

# **RED NACIONAL DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA EN ENERGÍAS**

**MEMORIA  
2012 - 2013**





## **MINISTERIO DE EDUCACIÓN**

### **Memoria 2012 - 2013**

*Red Nacional de Investigación Científica y Tecnológica en Energías Renovables*

#### **Ministro de Educación**

Roberto Aguilar Gómez

#### **Viceministro de Ciencia y Tecnología**

Pedro Crespo Alvizuri

#### **Director General**

Roberto Sánchez Saravia

#### **Jefe de Unidad**

Rodrigo Hoz de Vila Barbery

#### **Gestor de la RENICYT- Energías Renovables VCyT**

Bernardo Aspiazu Arce

#### **Coordinador Nacional RENICYT- Energías Renovables**

José Omar Arzabe Maure.

#### **Edición**

Cristina Pabón Escobar

#### **Diagramación, diseño e impresión**

Multigraph

#### **Depósito Legal**

La Paz - Bolivia  
Septiembre 2014



## ÍNDICE

---

PRESENTACIÓN	5
LA RED DE ENERGÍAS SE CONSOLIDA	6
EL AVANCE DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES	7
INTRODUCCIÓN	8
<b>RED DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES</b>	<b>10</b>
1. RED NACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES	11
1.1 OBJETIVOS DE LA RED DE ENERGÍAS RENOVABLES	11
1.2 PROGRAMAS Y LÍNEAS DE TRABAJO	12
1.3 INSTITUCIONES MIEMBRO DE LA RED DE ENERGÍAS RENOVABLES	13
<b>SIMPOSIO NACIONAL EN ENERGÍAS RENOVABLES 2012</b>	<b>15</b>
2. PRIMER SIMPOSIO NACIONAL EN ENERGÍAS RENOVABLES	16
2.1 ANTECEDENTES	16
2.2 OBJETIVOS DEL SIMPOSIO NACIONAL EN ENERGÍAS RENOVABLES	17
2.3 PONENCIAS PRESENTADAS EN EL PRIMER SIMPOSIO NACIONAL EN ENERGÍAS RENOVABLES	17
2.4. CONCLUSIONES Y RESULTADOS SIMPOSIO NACIONAL EN ENERGÍAS RENOVABLES	18
<b>PONENCIAS SIMPOSIO NACIONAL EN ENERGÍAS RENOVABLES - 2012</b>	<b>22</b>
1. DESARROLLO DE MATERIALES PARA BATERÍAS DE ION LITIO COMO SISTEMAS DE ACUMULACIÓN DE ENERGÍA EN EL CAMPO DE ENERGÍAS RENOVABLES	23
2. INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN PARA LA OBTENCIÓN EN LÍNEA DE MAPAS EÓLICOS DE BOLIVIA	41
3. PRODUCCIÓN DE FRÍO A PARTIR DE LA UTILIZACIÓN DE ENERGÍA NO CONVENCIONAL	52
4. ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD PARA PARQUES EÓLICOS EN BOLIVIA	63
5. SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS DE GENERADORES DE INDUCCIÓN ACCIONADOS POR MOTORES A COMBUSTIÓN CON EL OBJETIVO DE EVITAR LA DISMINUCIÓN DE EFICIENCIA	71
6. GENERADORES FOTOVOLTAICOS Y SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN BOLIVIA	84
7. REMOCIÓN DE ARSÉNICO POR OXIDACIÓN SOLAR (RAOS) EN UN FOTO-REACTOR TUBULAR DE SECCIÓN SEMI-CIRCULAR	90
8. FACTORES DE EFECTIVIDAD EN BIOPELÍCULAS ANAEROBIAS: UNA ECUACIÓN SEUDO-ANALÍTICA PARA REACCIONES CONSECUTIVAS Y PARALELAS	102
9. DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN DE AMBIENTES MEDIANTE COLECTORES SOLARES Y TUBOS AL VACÍO	113
10. DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE RADIACIÓN SOLAR BASADO EN UN ESPECTRÓMETRO DE AMPLIO ESPECTRO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS PRELIMINARES	119
11. DESARROLLO TECNOLÓGICO Y USOS PRODUCTIVOS EN PROYECTOS DE MICROCENTRALES HIDROELÉCTRICAS EN BOLIVIA	128
12. ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR EN EL ALTIPLANO CENTRAL DE BOLIVIA POR EL MODELO DE HARGREAVES – SAMANI	141
13. ESTUDIO DE CAMBIO CLIMÁTICO EN RECURSOS HIDRICOS Y DETERMINACIÓN DE SITIOS CON POTENCIAL HIDROENERGÉTICO, MEDIANTE EL EMPLEO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, DATOS DE SENSORAMIENTO REMOTO Y FUENTES DE ACCESO GLOBAL	150



14. BOMBEO DE AGUA CON SISTEMAS FOTOVOLTAICOS- NECESIDADES Y APLICACIONES EN BOLIVIA	162
15. CERTIFICACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DE ENERGÉTICA	170
16. SECADO SOLAR DE MADERA EXPERIENCIAS EN BOLIVIA Y PERÚ	178
17. MODELO DE SERVICIOS PARA MEJORAR LA SOSTENIBILIDAD DE PROYECTOS DE ELECTRIFICACIÓN FOTOVOLTAICA MASIVA	185
18. OPTIMIZACIÓN DE LA EFICIENCIA DE PANELES FOTOVOLTAICOS A TRAVÉS DEL CONTROL DE LA TEMPERATURA – RESULTADOS PRELIMINARES	196
19. ENERGÍAS RENOVABLES PARA EL ACCESO UNIVERSAL A LA ELECTRICIDAD DE LA POBLACION RURAL DISPERSA EN EL DEPARTAMENTO DE COCHABAMBA	201
20. EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA INDUSTRIA. CICLO ORGÁNICO RANKINE PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE CALOR RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DEL CEMENTO	214
21. COGENERACIÓN SOLAR HÍBRIDA EN BRASIL	225
22. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN LA GESTIÓN DEL AGUA	235
23. PIRÓLISIS RÁPIDA DE ACEITES VEGETALES: UNA ALTERNATIVA ENERGÉTICA	246
24. BIODIGESTOR FLEXIBLE ENERGÍAS DEL SOL S.A. - BIOGAS Y BIOFERTILIZANTE AL ALCANCE DE TU MANO	253
<b>MINIFORO IBEROEKA USO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN SISTEMAS PRODUCTIVOS 2012</b>	<b>256</b>
3. MINIFORO IBEROEKA USO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN SISTEMAS PRODUCTIVOS	257
3.1 ANTECEDENTES	257
3.2 OBJETIVO DEL MINIFORO	257
3.3 LA ENERGÍA SEGÚN CYTED	258
3.4 EMPRESAS PARTICIPANTES	258
3.5 CONCLUSIONES Y RESULTADOS MINIFORO IBEROEKA	266
<b>NANOANDES 2013</b>	<b>269</b>
4. NANOANDES 2013	270
4.1 ANTECEDENTES	270
4.2 OBJETIVOS	271
4.3 AGRADECIMIENTOS	271
4.4 PROGRAMA DEL EVENTO	272
<b>RESÚMENES PRESENTACIONES NANOANDES 2013 (16 Resúmenes)</b>	<b>273</b>
<b>POSTERS PRESENTADOS ESCUELA NANOANDES 2013 (12 Posters)</b>	<b>297</b>
<b>PRIMER CONGRESO BOLIVIANO DE ENERGÍAS RENOVABLES</b>	<b>316</b>
5. PRIMER CONGRESO BOLIVIANO DE ENERGÍAS RENOVABLES	317
5.1 ANTECEDENTES	317
5.2 OBJETIVO	317
<b>RESÚMENES PRESENTACIONES PRIMER CONGRESO BOLIVIANO DE ENERGÍAS RENOVABLES 2013 (37 Resúmenes)</b>	<b>318</b>





## PRESENTACIÓN

---

El Ministerio de Educación, a través del Viceministerio de Ciencia y Tecnología y en el marco del Sistema Boliviano de Innovación, apoya la conformación e implementación de Redes Temáticas que vinculen a investigadores y sectores socio-productivos para responder a las demandas del Estado Plurinacional de Bolivia y así obtener resultados de impacto económico y social de alcance nacional.

En junio del año 2011, en la ciudad de Cochabamba, se conformaron once redes nacionales de ciencia y tecnología a nivel nacional dentro las cuales se incluye la Red Nacional de Investigación en Energías Renovables (RENICYT - Energías), por su importancia coyuntural relacionada con el uso eficiente de fuentes renovables de energía, a partir del uso de tecnologías variadas.

Esta Red requiere generar información para orientar la toma de decisiones en el ámbito de la investigación atendiendo a las necesidades priorizadas por los sectores socio-productivos. El pilar fundamental de la RENICYT- Energías es el relacionamiento interinstitucional orientado a fortalecer los vínculos de cooperación y las capacidades científico-tecnológicas en el país.

El presente documento da a conocer el desarrollo del *Primer Simposio Nacional de Energías Renovables*, espacio que permitió el debate de la problemática nacional relacionada con la introducción de las Energías Renovables en la matriz energética y la legislación nacional como una posible salida a los problemas de abastecimiento de energía en nuestro país.

Por otra parte, refiere los resultados del *Mini Foro IBEROEKA "Usos de las Energías Renovables en Sistemas Productivos"*, cuyo objetivo fue crear un espacio de intercambio de experiencias y socialización de conocimientos en cuanto a la aplicación de las energías renovables en sistemas productivos.

Finalmente, Nanoandes 2013, que aglutinó dos importantes actividades *Nanomateriales para Energía y Minería* y el *Congreso Boliviano de Energías Renovables*, reuniendo a investigadores y científicos de Latinoamérica y el Caribe para la identificación del estado de la ciencia y la tecnología de los nanomateriales en energía y minería.

Los eventos fueron organizados por el Ministerio de Educación a través del Viceministerio de Ciencia y Tecnología, en coordinación con la Red Nacional de Investigación en Energías, el Viceministerio de Electricidad y Energías Renovables del Ministerio de Hidrocarburos y Energía, el Viceministerio de Desarrollo Productivo Minero Metalúrgico del Ministerio de Minería, la Universidad Mayor de San Andrés, la Universidad Mayor de San Simón, la Universidad Simón I. Patiño, la Red Internacional NanoAndes, la Cooperación Regional para los Países Andinos de la República de Francia y Energética, con el propósito de definir futuras acciones relativas al campo de las Energías Renovables.

Lic. Roberto Aguilar Gómez  
Ministro de Educación



## LA RED DE ENERGÍAS SE CONSOLIDA

---

Las energías renovables son un punto de atención de nuestros investigadores que concentrados en la RED NACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍAS, han compartido en varios eventos y adelantos, pero más que ello han proyectado sus experiencias hacia objetivos comunes.

Compartiendo sus Experiencias con sus similares de otros países, validando el nivel de sus contribuciones en este ámbito, tan apasionante como prospectivo, pensando siempre en nuestra Gente.

No solo es la obtención, la producción y el aprovechamiento. No solo es la acumulación y el transporte, son entre medio de estas líneas, la generación de nuevos materiales de nuevos dispositivos, de mezclar diferentes fuentes de energías.

La ligazón de la “empresa” con los centros de investigación, ha sido un común en los encuentros mirando cuidadosamente en el camino la innovación tecnológica. Ensamblando bien las demandas del sector y los planes de la lectura de los investigadores, una tarea difícil y lenta han logrado obtener los primeros logros de su empeño.

De estos encuentros, y como es natural han surgido nuevas líneas de investigación como la nanotecnología, requiriendo investigadores de otras áreas de la ciencia, fortaleciendo así su red, con la plataforma de energía y minería además de la plataforma de energía e hidrocarburos; estos nuevos cambios tienen objetivos más agresivos científicamente y la investigación tecnológica avanza con otra dinámica.

La Energía es uno de los pilares del plan nacional de ciencia y tecnología y reforzando la agenda 2025 con una visión de formación de talentos y del camino hacia la innovación.

MSc. Pedro Crespo Alvizuri  
Viceministro de Ciencia y Tecnología



## EL AVANCE DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

---

El Primer Simposio Nacional de Energías Renovables, el Mini Foro IBEROEKA *“Usos de las Energías Renovables en Sistemas Productivos”* y Nanoandes 2013 *“Nanomateriales para Energía y Minería y el Congreso Boliviano de Energías Renovables”*, fueron eventos que lograron reunir a los diferentes actores del complejo productivo de las Energías Renovables.

En estas actividades, organizadas por el Viceministerio de Ciencia y Tecnología con el apoyo de la Universidad Mayor de San Simón, la Universidad Simón I. Patiño y ENERGÉTICA, participaron importantes empresas locales dedicadas a la fabricación e implementación de sistemas energéticos basados en las energías renovables. Investigadores de las distintas universidades y autoridades gubernamentales, definieron futuras actividades relativas a este tipo de energías.

En el Simposio Nacional se presentaron trabajos de investigación de las universidades que pueden constituirse en innovaciones a ser transferidas a las empresas locales para dar pasos hacia el desarrollo sostenible de nuestro país. Las experiencias de los participantes en el Miniforo IBEROEKA mostraron los avances en el uso productivo de las Energías Renovables. Las mesas de trabajo permitieron iniciar contactos que pueden dar lugar a la interacción y al establecimiento de negocios entre los países vecinos y el nuestro.

Las visitas a las instituciones como ENERGÉTICA y PHOCOS, permitieron evidenciar que en nuestro país existen avances tecnológicos importantes en temas relacionados con las Energías Renovables. Se observaron sistemas fotovoltaicos interconectados a la Red, sistemas de control de calidad ISO 9001:2008 implementados por ambas instituciones, así como el desarrollo en luminarias para sistemas fotovoltaicos y los nuevos sistemas Pico PV's.

Nanoandes y el 1er Congreso Nacional de Energías Renovables en 2013, han marcado un claro crecimiento, donde se ha logrado articular y fortalecer la Red Nacional de Energías Renovables y crear la Red Nacional de Materiales, mediante las cuales se consolidan nuevas líneas de investigación en ciencia y tecnología en el ámbito nacional.

Para el año 2014 se espera poder mostrar mayores y mejores resultados, pues la interacción y la sinergia que busca la Red Boliviana de Investigación en Energías Renovables permitirán articular de mejor manera a todos los actores involucrados con esta área.

PhD. José Omar Arzabe Maure  
Coordinador Nacional  
Red de Investigación en Energías Renovables





## INTRODUCCIÓN

---

Según el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo - CYTED, la energía constituye un pilar del desarrollo socioeconómico y de la calidad de vida. Sin embargo, como los sistemas energéticos forman una compleja y entrelazada red de actores relacionados con los recursos, fuentes y tecnologías, procesos de extracción, minería, transporte, almacenamiento, conversión, distribución, comercialización, operación y mantenimiento, entre otros; y como la mayoría de los recursos energéticos no están distribuidos de forma equitativa, el acceso a estos servicios se convierte cada vez más en un problema.

La importancia de las energías renovables se puede resumir a través de los beneficios que proporcionan, dentro de los cuales se pueden mencionar los siguientes:

**Aspectos ambientales.** Las tecnologías de energías renovables son fuentes de energía limpia que tienen un impacto ambiental mucho menor que las convencionales; además de ser un tipo de energía inagotable.

**Aspectos económicos.** El desarrollo de las tecnologías de energías renovables en los últimos años ha logrado una madurez considerable, lo que provocó la disminución en los costos de los mismos. Por otra parte, se sabe que la inversión en nuevas tecnologías de energías renovables induce a la creación de un mercado nacional, así como a su nacionalización.

**Aspectos sociales.** Bolivia cuenta con diversas experiencias relacionadas con instalaciones de sistemas de generación aislados basados en energías renovables que proporcionan energía eléctrica a comunidades que no cuentan con este servicio. En este sentido, el uso de estos sistemas coadyuva con la universalización de este derecho.

**Seguridad energética.** La diversificación de la matriz energética, a través de la instalación de sistemas de energías renovables, provoca una mayor seguridad energética ante eventuales interrupciones de suministro de energía eléctrica provenientes de fuentes de energía tradicionales.

Las energías renovables pueden jugar un rol importante en la matriz energética de nuestro país. Estratégicamente, su aplicación pasa por el suministro de energía en el área rural y por su posible participación en el área urbana en nichos específicos. Adicionalmente, es previsible su participación en la generación de electricidad a gran escala a partir de diferentes fuentes.

La Constitución Política del Estado establece que:

*“Las diferentes formas de energía y sus fuentes constituyen un recurso estratégico, su acceso es un derecho fundamental y esencial para el desarrollo integral y social del país, y se regirá por los principios de eficiencia, continuidad, adaptabilidad y preservación del medio ambiente” (Art. 378) y además que “el Estado desarrollará y promoverá la investigación y el uso de nuevas*





*formas de producción de energías alternativas, compatibles con la conservación del ambiente” (Art. 379).*

Asimismo, el Plan Nacional de Desarrollo plantea políticas y estrategias energéticas vinculadas a las energías renovables:

- Desarrollar la infraestructura eléctrica de generación y transmisión para satisfacer la demanda interna y de exportación de electricidad.
- Incrementar la cobertura de electrificación urbana y rural para lograr la universalización del servicio de electricidad.
- Soberanía e independencia energética: Desarrollar fuentes de energías renovables que garanticen la independencia energética (hidroelectricidad, geotérmica, biomasa, fotovoltaicos, eólica, etc.)



## **RED DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES - RENICYT ENERGÍAS**

---



## **1. RED DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES - RENICYT ENERGÍAS**

La Red Boliviana de Investigación e Innovación de Energías Renovables nace en junio de 2011 a iniciativa del Viceministerio de Ciencia y Tecnología, y cuenta con la participación de las Universidades del Sistema Autónomo en su conjunto, las Universidades Privadas de Bolivia, varias Organizaciones No Gubernamentales y empresas relacionadas al área.

Como una de sus prioridades, la Red resolvió llevar a cabo la primera versión del *Simposio Nacional de Energías Renovables* en la Universidad Mayor de San Simón, los días 2 y 3 de octubre de 2012.

Asimismo, a través del Viceministerio de Ciencia y Tecnología y el programa CYTED, coadyuvó en el desarrollo del Miniforo IBEROEKA “*Uso de las Energías Renovables en Sistemas Productivos*” realizado los días 4 y 5 de octubre de 2012 en la Universidad Simón I. Patiño.

Finalmente, Nanoandes 2013 “*Nanomateriales para Energía y Minería y el Congreso Boliviano de Energías Renovables*”, realizado del 11 al 15 de noviembre de 2013, en el Hotel Calacoto de la ciudad de La Paz y en los laboratorios de Física de la Universidad Mayor de San Andrés.

### **1.1 OBJETIVOS DE LA RED DE ENERGÍAS RENOVABLES**

El objetivo general de la Red es promover el desarrollo e implementación de programas de investigación científica tecnológica e innovación en el campo de las Energías Renovables (ER), contribuyendo a la mejora de la calidad de vida de los distintos sectores sociales y a la transferencia tecnológica a los sectores productivos, a través de la articulación interinstitucional.

Esta articulación de los diferentes actores del Sistema Boliviano de Innovación pretende:

- El uso sustentable y eficiente de las Energías Renovables en sus diferentes componentes: generación, transporte, distribución y almacenamiento.
- El uso y aplicaciones de las distintas fuentes de energía renovables (solar, eólica, biomasa, etc.), basada en la investigación básica y aplicada, que apoyen el desarrollo local, regional y nacional.
- La incorporación de las Energías Renovables al Sistema Interconectado Nacional, proponiendo reglamentos y normativas adecuadas.
- El desarrollo de acumuladores de energía (almacenamiento), partiendo de la identificación de yacimientos mineros y de procesos tecnológicos para la transformación de minerales y para la obtención de productos químicos de alta pureza. Posteriormente, se pretende realizar el procesamiento de materiales avanzados (electrodos y



electrolitos), para así caracterizar y diseñar los principales componentes de estos sistemas (baterías, capacitores, otros). Finalmente, se busca desarrollar prototipos de aplicación en función de su aplicación en sistemas energéticos alternativos.

- La aplicación de sistemas híbridos, a través de la identificación de fuentes apropiadas para cada región y de las demandas energéticas para cumplir un rol social. En este sentido se debe desarrollar y optimizar las tecnologías disponibles; adaptarlas o mejorarlas para concretar un prototipo como mecanismo de promoción y difusión para cada fuente de energía (eólica, geotérmica, solar, biomasa).
- La formación de capital humano en Energías Renovables a través del desarrollo de programas enfocados a mejorar la formación académica de profesionales, insertando, por ejemplo, la temática de las energías renovables en la malla curricular. Asimismo, formar técnicos especialistas a nivel medio y superior (área rural), rescatando las experiencias desarrolladas en el área. Por otra parte, consolidar la creación de los programas de especialidad, maestría y doctorado en nuestro país y dotar de becas a los estudiantes interesados en esta temática.

## **1.2 PROGRAMAS Y LÍNEAS DE TRABAJO**

La Red estableció como programas y líneas de trabajo relevantes los siguientes ítems:

- Formación de Talento Humano en Energías Renovables
- Generación de energía en sistemas aislados o electrificación rural (solar, eólica, biomasa y biocombustibles, microcentrales hidroeléctricas) y sistemas híbridos.
- Generación distribuida para la integración a la red.
- Almacenamiento y acumuladores de energía.
- Eficiencia energética y cambio de la matriz energética.
- Sistemas híbridos.
- Usos y aplicaciones de las ER (e.g. en Sistemas Productivos, Smart Grids, Poligeneración, etc.).
- Eficiencia Energética.
- Nuevas tecnologías en ER (e.g., diseño de acumuladores, conversores de potencia, nuevos materiales, etc.)

En este marco se ha organizado el primer simposio para la definición de una línea base que permita periódicamente evaluar el avance de las actividades de la Red y el alcance de sus objetivos.





## 1.3 INSTITUCIONES MIEMBRO DE LA RED DE ENERGÍAS RENOVABLES

#	Ciudad	INSTITUCIÓN / CENTRO DE INVESTIGACIÓN		CONTACTO	e-mail
1	Santa Cruz	Universidad Autónoma Gabriel René Moreno		Jaime Alcides Alvarado Aguilar	<a href="mailto:jaimealvarado@uagrm.edu.bo">jaimealvarado@uagrm.edu.bo</a>
2	Tarija	Universidad Autónoma Juan Misael Saracho		Bernardo Echart	<a href="mailto:bechart1954@gmail.com">bechart1954@gmail.com</a>
3	La Paz	Universidad Católica de Bolivia - IISEC		Marcelo Segovia Cortez	<a href="mailto:dicyt@uajms.edu.bo">dicyt@uajms.edu.bo</a>
4	La Paz	Universidad Indígena Aymara Tupac Katari		Adriana Bueno Lanchez	<a href="mailto:abueno@ucb.edu.bo">abueno@ucb.edu.bo</a>
5	La Paz	Universidad Mayor de San Andrés	Teodora Arratia Escobar	Maggy Marianela Alacama Quispe	<a href="mailto:teodoraxx@hotmail.com">teodoraxx@hotmail.com</a>
			Oscar Mauricio Améstegui Moreno		<a href="mailto:maggy.marinela@gmail.com">maggy.marinela@gmail.com</a>
				Marcelo Omar Mena Rosas	<a href="mailto:mauricioamestegui@gmail.com">mauricioamestegui@gmail.com</a>
			Postgrado en Ecología y Conservación		<a href="mailto:momenarosas@hotmail.com">momenarosas@hotmail.com</a>
			IIDEPROQ	René Álvarez Apaza	<a href="mailto:alvarez.rene@hotmail.es">alvarez.rene@hotmail.es</a>
			Facultad Ingeniería	Basilio Eliseo Lima	<a href="mailto:eliseolima@gmail.com">eliseolima@gmail.com</a>
			Instituto de Investigaciones Físicas	Eduardo Palenque	<a href="mailto:edyrui@yahoo.es">edyrui@yahoo.es</a>
			Instituto de Investigaciones Químicas	Edgar Ricaldi Yarvi	<a href="mailto:edgarricaldi@gmail.com">edgarricaldi@gmail.com</a>
			Instituto del Gas Natural UMSA	Luz Zulema Quispe Quelca	<a href="mailto:luz4am@gmail.com">luz4am@gmail.com</a>
			Instituto de Hidráulica e Hidrología	Saúl Cabrera Medina	<a href="mailto:saulcabreram@hotmail.com">saulcabreram@hotmail.com</a>
6	Cochabamba	AGRUCO		Luis López	<a href="mailto:lgln@kth.se">lgln@kth.se</a>
7	Cochabamba	Universidad Mayor de San Simón	Emiliano Montaña Gonzales	Jorge Velazco Calcina	<a href="mailto:javc@kth.se">javc@kth.se</a>
					<a href="mailto:maqhdraulicas@hotmail.com">maqhdraulicas@hotmail.com</a>
			Doctorado en Energía KTH	Miguel Chirveches	<a href="mailto:miguelchirveches@agruco.org">miguelchirveches@agruco.org</a>
			Ingeniería Química	Joseph Adhemar Araoz Ramos	<a href="mailto:araoz@kt.se">araoz@kt.se</a>
				Jacklyn Vanessa Bustamante López	<a href="mailto:jacklynvanessa@gmail.com">jacklynvanessa@gmail.com</a>
				Javier Román Calvo Soliz	<a href="mailto:xavisolis@gmail.com">xavisolis@gmail.com</a>
			Centro de Tecnologías de Fabricación	Pascual Maldonado	<a href="mailto:pasmaldonado@hotmail.com">pasmaldonado@hotmail.com</a>
			Instituto de Investigación FCyT	Omar Perez	<a href="mailto:omarperez@umss.edu.bo">omarperez@umss.edu.bo</a>
8	La Paz	Universidad Tecnológica de Bolivia, UTB		Félix Rustan Roca Subirana	<a href="mailto:rustan_roca@hotmail.com">rustan_roca@hotmail.com</a>
9	Potosí	Universidad Nacional Siglo XX		Lucio Alejo Espinoza	<a href="mailto:laejo@fcyt.umss.edu.bo">laejo@fcyt.umss.edu.bo</a>
10				José Omar Arzabe Maure	<a href="mailto:o.arzabe@umss.edu.bo">o.arzabe@umss.edu.bo</a>
11	Cochabamba	Universidad Privada Boliviana			<a href="mailto:o.arzabe@umss.edu.bo">o.arzabe@umss.edu.bo</a>
12	Santa Cruz	Universidad Privada de Santa Cruz		Omar Alberto Ormachea Muñoz	<a href="mailto:oormachea@upb.edu">oormachea@upb.edu</a>
13	Cochabamba	Universidad Privada del Valle	Departamento de Arquitectura	René Gastón Mejía Brown	<a href="mailto:gastonmejia@upsa.edu.bo">gastonmejia@upsa.edu.bo</a>
			Departamento de Electromecánica	Antonio Eduardo Salinas Moreno	<a href="mailto:asalinasm@univalle.edu">asalinasm@univalle.edu</a>
14	Sucre	Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca		Mauricio Iñiguez Berbety	<a href="mailto:einiguez@univalle.edu">einiguez@univalle.edu</a>
15	Cochabamba	Universidad Simón I. Patiño		Humberto Gonzalo Murillo Avilés	<a href="mailto:tecnolog@usfx.edu.bo">tecnolog@usfx.edu.bo</a>
				Julio Cesar Ernesto Miranda Uribe	<a href="mailto:e.miranda@usip.edu.bo">e.miranda@usip.edu.bo</a>



#	Ciudad	INSTITUCIÓN / CENTRO DE INVESTIGACIÓN	CONTACTO	e-mail
16	Oruro	Universidad Técnica de Oruro	Felipe Rodolfo Coronado Pando	<a href="mailto:coronado@coteor.net.bo">coronado@coteor.net.bo</a>
			Miguel Ruiz Orellana	<a href="mailto:miguelruiz@utonet.edu.bo">miguelruiz@utonet.edu.bo</a>
			Alfredo Vargas	<a href="mailto:javomassiso@hotmail.com">javomassiso@hotmail.com</a>
			Edwin Víctor Lamas Sivila	<a href="mailto:edwinlamas@mecanica.edu.bo">edwinlamas@mecanica.edu.bo</a>
			Edgar Peñaranda Muñoz	<a href="mailto:epenarandam@utonet.edu.bo">epenarandam@utonet.edu.bo</a>
			Carlos Antonio Flores Castillo	<a href="mailto:cafcastillo@gmail.com">cafcastillo@gmail.com</a>
17	Cochabamba	Universidad Técnica Privada Cosmos	Anabel Caballero	<a href="mailto:anycaba@hotmail.com">anycaba@hotmail.com</a>
18	Cochabamba	ACT ENER Bolivia International	Elizabeth Espinoza Coli	<a href="mailto:eespinoza@abi.com.bo">eespinoza@abi.com.bo</a>
19	Cochabamba	Asociación Boliviana de Energías Renovables	Ivailo Peña Treneva	<a href="mailto:ivailo@sie-sa.com">ivailo@sie-sa.com</a>
20	Cochabamba	CEDESOL	David E. Whitfield	<a href="mailto:info@cedesol.org">info@cedesol.org</a>
21	La Paz	Sitap. S.L.	Cesar Guerra Chacon	<a href="mailto:ceguerra@yahoo.es">ceguerra@yahoo.es</a>
22	Oruro	Complejo Solar Oruro	Jhony Cuiza Churqui	<a href="mailto:complejosolar@gmail.com">complejosolar@gmail.com</a>
23	La Paz	Ecoenergía Falk S.R.L.	Reinhard Mayer Falk	<a href="mailto:falk_solar@hotmail.com">falk_solar@hotmail.com</a>
24	Santa Cruz	Fundación Amigos de la Naturaleza	Armando Rodriguez	<a href="mailto:armando.rodriguez.montellano@gmail.com">armando.rodriguez.montellano@gmail.com</a>
25	La Paz	ECOTEC - ONG	Álvaro Christian Montaña Saavedra	<a href="mailto:alvaroms@ecotecbolivia.org">alvaroms@ecotecbolivia.org</a>
26	Cochabamba	ENERGÉTICA	Miguel Fernández	<a href="mailto:miguel@energetica.org.bo">miguel@energetica.org.bo</a>
			Renán Jorge Orellana Lafuente	<a href="mailto:renan@energetica.org.bo">renan@energetica.org.bo</a>
27	La Paz	Escuela Militar de Ingeniería	Marco Antonio Barrero Argote	<a href="mailto:mbarreroa@adm.emi.edu.bo">mbarreroa@adm.emi.edu.bo</a>
28	Santa Cruz	Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA)	Jorge Ernesto Siles Sanzetenea	<a href="mailto:ernesto.siles@ibnorca.org">ernesto.siles@ibnorca.org</a>
29	La Paz	INFOCAL	Carlos Velásquez	<a href="mailto:cvgas.velasquez@hotmail.com">cvgas.velasquez@hotmail.com</a>
30	La Paz	SERCOIN LTDA	Yolanda Dips Salvatierra	<a href="mailto:sercoin@ceibo.entelnet.bo">sercoin@ceibo.entelnet.bo</a>
31	Cochabamba	SICO SOL S.R.L.	Grover Alfredo Choque Paredes	<a href="mailto:grover@sicosol.com">grover@sicosol.com</a>
32	La Paz	Ministerio de Minería Y Metalurgia	Gustavo Herbert Paiva Delgado	<a href="mailto:gustavo.paiva@mineria.gob.bo">gustavo.paiva@mineria.gob.bo</a>
33	La Paz	Ministerio de Energía e Hidrocarburos	Reina Eliana Quiroga	<a href="mailto:rquiroga@hidrocarburos.gob.bo">rquiroga@hidrocarburos.gob.bo</a>



## **SIMPOSIO NACIONAL EN ENERGÍAS RENOVABLES COCHABAMBA - 2012**

---



## **2. PRIMER SIMPOSIO NACIONAL EN ENERGÍAS RENOVABLES**

### **2.1 ANTECEDENTES**

La Red Boliviana de Investigación e Innovación de Energías Renovables, a iniciativa del Ministerio de Educación, a través del Viceministerio de Ciencia y Tecnología, realizó el Primer Simposio Nacional de Energías Renovables, en la ciudad de Cochabamba, los días 2 y 3 de octubre de 2012.

El Simposio Nacional pretendió articular a los diferentes actores del Sistema Boliviano de Innovación para alcanzar:

- El uso sustentable y eficiente de las Energías Renovables en sus diferentes componentes: generación, transporte, distribución y almacenamiento.
- El uso y aplicaciones de las distintas fuentes de energía renovables (solar, eólica, biomasa, etc.), basada en la investigación básica y aplicada, que apoyen el desarrollo local, regional y nacional.
- La incorporación de las Energías Renovables al Sistema Interconectado Nacional, proponiendo reglamentos y normativas adecuadas.
- La formación de recursos humanos en los distintos niveles, técnicos, pregrado y posgrado.

Líneas de trabajo:

- Generación de energía en sistemas aislados o electrificación rural (solar, eólica, biomasa y biocombustibles, microcentrales hidroeléctricas) y sistemas híbridos.
- Generación distribuida para la integración a la red.
- Almacenamiento y acumuladores de energía.
- Eficiencia energética y cambio de la matriz energética.
- Usos y aplicaciones de las ER (e.g. en Sistemas Productivos, Smart Grids, Poligeneración, etc.).
- Eficiencia Energética.
- Nuevas tecnologías en ER (e.g., diseño de acumuladores, convertidores de potencia, nuevos materiales, etc.).

El Simposio Nacional en Energías Renovables fue organizado por la Red Nacional de Energías Renovables con el apoyo y gestión del Ministerio de Educación, a través del Viceministerio de Ciencia y Tecnología.





## **2.2 OBJETIVOS DEL SIMPOSIO NACIONAL EN ENERGÍAS RENOVABLES**

Reunir a investigadores, científicos, industriales, autoridades ejecutivas de empresas relacionadas, ingenieros, técnicos, docentes universitarios, estudiantes universitarios, instituciones estatales y público en general, para compartir novedades científicas y tecnológicas relativas a las Energías Renovables.

Ofrecer un espacio de opinión y discusión para conocer el estado del arte de las Energías Renovables con la presencia de invitados internacionales, participantes del Miniforo IBEROEKA “Usos de las Energías Renovables en sistemas productivos” apoyados por el programa CYTED y el Viceministerio de Ciencia y Tecnología.

Generar un espacio de debate de la problemática nacional relativa a la introducción de las Energías Renovables en la matriz energética y a la legislación nacional como una posible salida a los problemas de abastecimiento de energía en nuestro país.

“El objetivo general de la Red es promover el desarrollo e implementación de programas de investigación científica tecnológica e innovación en el campo de las energías renovables”.

## **2.3 PONENCIAS PRESENTADAS EN EL PRIMER SIMPOSIO NACIONAL EN ENERGÍAS RENOVABLES**

1. Desarrollo de materiales para baterías de ion-litio como sistemas de acumulación de energía en el campo de energías renovables.
2. Infraestructura de medición para la obtención en línea de Mapas Eólicos de Bolivia.
3. Producción de frío a partir de la utilización de energía no convencional.
4. Análisis de sostenibilidad para parques eólicos en Bolivia.
5. Sistema de diagnóstico de fallas de generadores de inducción accionados por motores a combustión con el objetivo de evitar la disminución de eficiencia.
6. Generadores fotovoltaicos y sistemas de almacenamiento de energía en Bolivia.
7. Remoción de arsénico por oxidación solar (RAOS) en un foto-reactor tubular de sección semi-circular.
8. Factores de efectividad en biopelículas anaerobias: una ecuación pseudo-analítica para reacciones consecutivas y paralelas.
9. Desarrollo de un sistema de calefacción de ambientes mediante colectores solares y tubos al vacío.
10. Desarrollo de un sistema de monitoreo de radiación solar basado en un espectrómetro de amplio espectro y análisis de resultados preliminares.
11. Desarrollo tecnológico y usos productivos en proyectos de microcentrales hidroeléctricas en Bolivia.



12. Estimación de la radiación solar en el altiplano central de Bolivia por el modelo Deharsgreaves – Samani.
13. Estudio de cambio climático en recursos hídricos y determinación de sitios con potencial hidroenergético, mediante el empleo de sistemas de información geográfica, datos de sensoramiento remoto y fuentes de acceso global.
14. Bombeo de agua con sistemas fotovoltaicos. Necesidades y aplicaciones en Bolivia.
15. Certificación de la huella de carbono de Energética.
16. Secado solar de Madera. Experiencias en Bolivia y Perú.
17. Modelo de servicios para mejorar la sostenibilidad de proyectos de electrificación fotovoltaica masiva.
18. Optimización de la eficiencia de paneles fotovoltaicos a través del control de la temperatura. Resultados preliminares.
19. Energías renovables para el acceso universal a la electricidad de la población rural dispersa en el departamento de Cochabamba.
20. Eficiencia energética en la industria. Ciclo orgánico Rankine para el aprovechamiento energético de calor residual en la industria del cemento.
21. Cogeneración solar híbrida en Brasil.
22. Energía solar fotovoltaica en la gestión del agua. Energías Alternativas – Electricidad integral.
23. Pirolisis rápida de aceites vegetales: una alternativa energética.
24. Biodigestor flexible energías del sol S.A. Biogás y Biofertilizante al alcance de tu mano.

## **2.4 CONCLUSIONES Y RESULTADOS SIMPOSIO NACIONAL EN ENERGÍAS RENOVABLES**

En el marco de las actividades desarrolladas por la Red Boliviana de Investigación e Innovación de Energías Renovables, se desarrolló la primera versión del Simposio Nacional en Energías Renovables llevado a cabo en la ciudad de Cochabamba los días 2 y 3 de octubre del presente año. Este evento fue organizado por el Ministerio de Educación, a través del Viceministerio de Ciencia y Tecnología, la Universidad Mayor de San Simón, la Universidad Simón I. Patiño y ENERGÉTICA.

Más de 150 personas asistieron a este evento para conocer las diferentes investigaciones que se desarrollan en las instituciones académicas y en las empresas, así como establecer vínculos de colaboración.

En este simposio fueron presentadas una amplia variedad de temas relacionados a las Energías Renovables. Un total de 26 exposiciones se desarrollaron en el evento, donde estuvieron representadas 8 instituciones académicas, 4 bolivianas y 4 del extranjero, y 11 empresas, 4 bolivianas y 7 del extranjero, como se puede apreciar en el *Cuadro A*.

La revisión de los trabajos enviados, realizada por el comité científico, indica que los mismos tienen un nivel de investigación y desarrollo sobresaliente. Por lo tanto, se constituyen en



valiosas contribuciones al debate de la temática del evento. Entre los temas presentados en el Simposio, las fuentes de energía estudiadas fueron: Solar, Eólica e Hídrica, así mismo se presentaron temas relacionados a materiales de acumuladores, eficiencia energética y cambio climático.

Las líneas de investigación expuestas por los ponentes incluyeron:

- Microcentrales Hidroeléctricas
- Mapas Eólicos en Línea
- Análisis de Sostenibilidad para Parques Eólicos
- Desarrollo de Materiales para Baterías de Ion Litio
- Eficiencia de Paneles Fotovoltaicos
- Bombeo de Agua con Sistemas Fotovoltaicos
- Secado Solar de Madera
- Sistema de Calefacción Mediante Colectores Solares y Tubos al Vacío
- Estimación de la Radiación Solar
- Sistema de Diagnóstico de Fallas de Generadores de Inducción
- Cambio Climático en Recursos Hídricos
- Certificación de Huella de Carbono

EMPRESA	PAÍS	UNIVERSIDAD	PAÍS
Aqualimpia	Ecuador	Universidad Mayor de San Andrés	Bolivia
Consultor Energía y Medio Ambiente	Bolivia	Universidad Mayor de San Simón	Bolivia
Ecoenergía FALK	Bolivia	Universidad Privada Boliviana	Bolivia
Ecotecnologías Energéticas y Productivas	Bolivia	Universidad Técnica de Oruro	Bolivia
Energética	Bolivia	Universidade de Sao Paulo	Brasil
Energías Alternativas – Electricidad Integral	Argentina	Universidade Federal do ABC	Brasil
Hidroxsol	Guatemala	Michigan Technological University	USA
Power Quality Ingenieros Consultores Asociados S.A.C.	Perú	Queens University	USA
Sol de las pampas S.A.	Argentina		
Solinova Inovação Tecnológica e Empresarial Ltda.	Brasil		
Tecnalia	España		

*Cuadro A: Instituciones participantes*

El Simposio Nacional en Energías Renovables reunió a investigadores científicos, industriales, empresas relacionadas, ingenieros, técnicos, docentes universitarios, estudiantes universitarios, instituciones estatales para compartir las más recientes investigaciones científicas y tecnológicas, así como experiencias relativas al área.





Los debates ocurridos en el evento mostraron el interés de los asistentes por profundizar sus conocimientos en las áreas expuestas, pero también por colaborar y contribuir con el desarrollo de los trabajos expuestos.

Por otro lado, la participación de los invitados internacionales asistentes al Miniforo IBEROEKA “Usos de las Energías Renovables en sistemas productivos”, generó un espacio de opinión y discusión del estado del arte de las diferentes tecnologías relacionadas con las Energías Renovables.

Las ponencias presentadas en el Simposio permitieron realizar un amplio intercambio de experiencias a lo largo de las jornadas de trabajo. Los expertos reunidos en el evento coincidieron en señalar la importancia de las energías renovables para el país y la necesidad de integrarlas a las fuentes convencionales de energía. Para muchos, el futuro del suministro está en este tipo de energías; sin dejar de lado el ahorro de energía, lo cual implica eficiencia energética tanto en los procesos de transformación como en el uso final.

Se destacó la importancia de incentivar el uso de energías renovables en el país a fin de favorecer a comunidades alejadas que no cuentan con este servicio, y, al mismo tiempo, incentivar la utilización de energías limpias. En este sentido se realizaron las siguientes recomendaciones:

- Estudiar la viabilidad de financiación de programas de investigación y desarrollo de energías renovables a Universidades y Centros de Investigación.
- Tomar ventaja de nuestra condición de país rico en minerales, para incentivar el desarrollo de acumuladores de energía (dispositivos de almacenamiento), se propuso desarrollar prototipos de aplicación (baterías, capacitores, otros) en función de su aplicación en sistemas energéticos alternativos.
- Adoptar medidas de eficiencia energética en diferentes sectores de actividad económica, particularmente
- Procurar construir edificios e instalaciones eficientes que aprovechen las ventajas de ventilación, climatización, iluminación, etc.
- Proponer una legislación que permita e incentive el uso de energías renovables, tanto conectadas a la red como aisladas de ella.
- Realizar proyecciones de consumo de energía eléctrica, independientes de las instituciones gubernamentales, con el objetivo de obtener más de un escenario futuro que permita prever un adecuado incentivo a las fuentes de energía renovable.

Así mismo, fue destacado el hecho de que nuestro país cuenta con una diversidad de condiciones ambientales que pueden ser aprovechadas por las diferentes fuentes de energía renovable (hídrica, solar, eólica, biomasa).

Los trabajos expuestos en el evento mostraron el grado de investigación, desarrollo y producción de tecnologías para sistemas de Energías Renovables que actualmente las





Instituciones participantes están promoviendo. Estos avances, deberán coadyuvar a la obtención de una tecnología nacional que permita abaratar los costos de implementación, y, de esta forma, extender la cobertura energética en el país.

El Simposio Nacional en Energías Renovables generó un espacio de debate de la problemática nacional relativa a la introducción de las Energías Renovables en la matriz energética como una posible salida a los problemas de abastecimiento de energía en nuestro país.



**PONENCIAS**  
**SIMPOSIO NACIONAL EN ENERGÍAS**  
**RENOVABLES**  
**2012**



## DESARROLLO DE MATERIALES PARA BATERÍAS DE ION LITIO COMO SISTEMAS DE ACUMULACIÓN DE ENERGÍA EN EL CAMPO DE ENERGÍAS RENOVABLES

Saúl Cabrera<sup>a</sup>, Fabián Benavente<sup>a</sup>, Max Vargas<sup>a</sup>, José Luis Flores<sup>a</sup>, Manuel Ortega<sup>a</sup>,  
Jaime Villca<sup>a</sup>,  
Rafael Mamani<sup>a</sup>, Naviana Leiva<sup>a</sup>, Martín Luna<sup>a</sup>, Waldo Yapu<sup>a</sup>, Pedro Crespo<sup>a</sup>,  
Mario Blanco<sup>b</sup>, Eduardo R. Palenque<sup>c</sup>, Rodny Balanza<sup>d</sup>.

<sup>a</sup> Laboratorio de Energías Alternativas, Instituto de Investigaciones Químicas, UMSA.

<sup>b</sup> Laboratorio de Caracterización Estructural de Minerales, Instituto de Investigaciones Geológicas y del Medio Ambiente, UMSA

<sup>c</sup> Laboratorio de Materia Condensada, Instituto de Investigaciones Físicas, UMSA

<sup>d</sup> Instituto de Investigaciones en Metalurgia y Materiales, UMSA

Autor corresponsal: [saulcabreram@hotmail.com](mailto:saulcabreram@hotmail.com)

**Resumen.** Se analizan los procesos de obtención de electrodos catódicos ( $\text{Li}(\text{MnNi})_2\text{O}_4$ ) y del ( $\text{LiFePO}_4$ ), a partir de potenciales precursores existentes en Bolivia, concretándose en la síntesis y caracterización de ambos materiales catódicos, por procesos de reacción en estado sólido, y proceso hidrotermal respectivamente. Adicionalmente se evalúa la obtención de otro material catódico ( $\text{LiCoO}_2$ ), y de un material anódico ( $\text{LiTi}_4\text{O}_5$ ); finalmente se comenta su potencial para la aplicación en el campo de energías renovables.

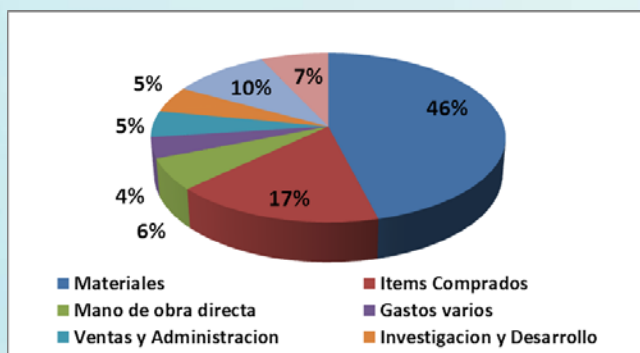
**Palabras clave:** síntesis, ánodo, cátodo, batería de ion litio, electrodos.

## INTRODUCCIÓN

La puesta al mercado de baterías de ion litio (LIB) a principios de 1990 por la empresa japonesa Sony (1) ha constituido el inicio de una revolución comercial en el campo de sistemas de almacenamiento de energía, provocando un crecimiento en el mercado de dispositivos electrónicos, tales como teléfonos móviles, computadoras portátiles, MP3 y otros.

De hecho, las baterías de ion litio son actualmente producidas en miles de millones de unidades al año (2), su demanda en los últimos años está en incremento, fundamentalmente por la utilización de baterías de litio de potencia para diferentes aplicaciones, y su introducción poco a poco al mercado de la industria de automóviles Híbridos (HEV), Eléctricos (EV), y Eléctricos Enchufables (PHEV) (3). Su aplicación en estos sistemas, más su potencial aplicación en sistemas de energías renovables (Eólicos y Solares), donde son una opción atractiva para obtener sistemas eficientes de almacenamiento, hace que las LIB se constituyan en un elemento clave para el campo energético amigable al medio ambiente, consolidándose poco a poco un mercado altamente atractivo para los próximos años (4). No obstante en ambos casos las baterías todavía son costosas, y para consolidarse en el mercado internacional deben volverse accesibles para la mayoría de los consumidores (5).

Hoy por hoy, si bien estos costos han bajado, los materiales para la construcción de baterías de ion litio tienen un 40 a 50% del costo total de baterías de potencia (6) (ver Figura 1)



**Figura 1.** Distribución de costos de producción de baterías de ion litio para HEV y PHEV (criterios de evaluación: planta de producción de 100,000 baterías por año, configuración de celda comercial tipo NCA – G, poder 50 - kW, capacidad 30-Ah, 8 módulos, 12 celdas por módulo, y 96 celdas por batería) (6).

Entre los materiales que constituyen las baterías de ion litio, los de mayor precio son los electrodos (materiales anódicos, catódicos, y electrolitos líquidos o sólidos). Los electrodos catódicos y anódicos comerciales para baterías de ion litio de potencia son un aglomerado de un compuesto de intercalación activo (material catódico o anódico), aglutinante, y aditivos conductores. En la actualidad los compuestos catódicos y anódicos más utilizados para la producción de baterías de ion litio comerciales, o que están en fase de introducción al mercado, permiten proponer siete configuraciones básicas (Tabla 1).

Electrodo	LC-G	LNCA - G	LFP - G	LFP - LTO	LM - G	LNM - G	LMS- LTO
<b>Cátodo (Positivo)</b>	LiCoO <sub>2</sub>	LiNi <sub>0.8</sub> Co <sub>0.15</sub> Al <sub>0.05</sub> O <sub>2</sub>	LiFePO <sub>4</sub>	LiFePO <sub>4</sub>	LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	LiNi <sub>0.5</sub> Mn <sub>1.5</sub> O <sub>4</sub>	LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
<b>Ánodo (Negativo)</b>	Grafito	Grafito	Grafito	Li <sub>4</sub> Ti <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	Grafito	Grafito	Li <sub>4</sub> Ti <sub>5</sub> O <sub>12</sub>

**Tabla 1.** Configuraciones básicas de baterías de ion litio en función de los compuestos catódicos y anódicos existentes en el mercado.

La mayoría de estos compuestos activos son sintetizados a través de reacciones en estado sólido [7,8], síntesis hidrotermal [9], y procesos sol-gel [10], disponibles en algunas empresas (Merck [11], Nippon Química Industria [12], Mitsui Ingeniería [13], Seimi Químicos [14], Südchemie [15], Phostech Litio Inc[16], y otros). Los precios de estos compuestos son muy altos, fundamentalmente por ser productos de alta calidad (con muy buena cristalinidad, tamaño de partícula pequeño, estructura estable a los proceso de intercalación de iones de litio), y, **una alta pureza** (mayor al 99,7%). Estos factores son muy importantes para que sus propiedades electroquímicas (alta capacidad de energía, y buena densidad de carga) sean aceptables y se mantengan en los ciclos de carga / descarga (17 - 20).

Bolivia, al disponer de grandes fuentes de recursos minerales (entre ellos el litio), impulsa un proceso de industrialización orientado al desarrollo de la producción de sistemas de acumulación de energía (baterías de ion litio). Al mismo tiempo, la estrategia nacional de universalización de la energía eléctrica hasta el 2025, pretende utilizar Sistema Fotovoltaico (SFV) como una de las líneas de electrificación en el área rural, para ello es necesario ver alternativas de sustitución de los actuales sistemas de almacenamiento de energía (baterías de plomo), poco eficientes y altamente contaminantes, por sistemas basados en baterías de ion litio. Esta iniciativa, promocionada a nivel mundial, podría orientar al tipo de baterías a ser desarrolladas en Bolivia.





## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Materias primas e insumos en la producción de electrodos catódicos

Una evaluación preliminar de la obtención de diferentes electrodos demandados y de interés comercial para baterías de ión litio (tabla N°1), permite identificar los posibles compuestos químicos necesarios para la obtención de los mismos (Tabla 2). En todos los casos es necesario tener reactivos de alta pureza (mayores al 99,5%), dado que eso permite obtener electrodos con buena pureza; favoreciendo sus propiedades electroquímicas, especialmente en el proceso de carga/descarga de baterías de ión litio. La oferta actual de las empresas en el mercado de proveedores, es de productos de alta calidad, con una muy buena pureza química, y con las características morfológicas y electroquímicas adecuadas.

En general, las empresas productoras de electrodos para baterías de litio producen en función de las demandas específicas del mercado, es decir a contratos específicos con empresas que producen sistemas de almacenamiento de energía ya establecidos en el mercado. Por otro lado, en el mercado abierto se identifican ofertas de diferentes empresas con producciones que van desde 120TM/año de  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  hasta de 3600 TM/año para  $\text{LiCoO}_2$ . Estos volúmenes actualmente bajos, podrán ser incrementados en los próximos años por la demanda de baterías de ión litio para HEV, o EV. Los electrodos son productos de química fina, por lo que el costo de los mismos es muy alto, así por ejemplo, el  $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y}\text{O}_2$  cuesta aproximadamente 90.000 \$/TM (20).

Si en Bolivia se pretende desarrollar acumuladores de energía de ion litio, es necesario primero desarrollar la obtención de electrodos, que depende del desarrollo de productos de química fina, los que a su vez dependen de un proceso previo de producción de productos de la química básica, a partir de insumos adecuados, en muchos casos minerales que ya han sido tratados previamente (beneficiado). El desarrollo de estas etapas de industrialización, es uno de los factores claves para que la producción de acumuladores sea rentable en nuestro país.

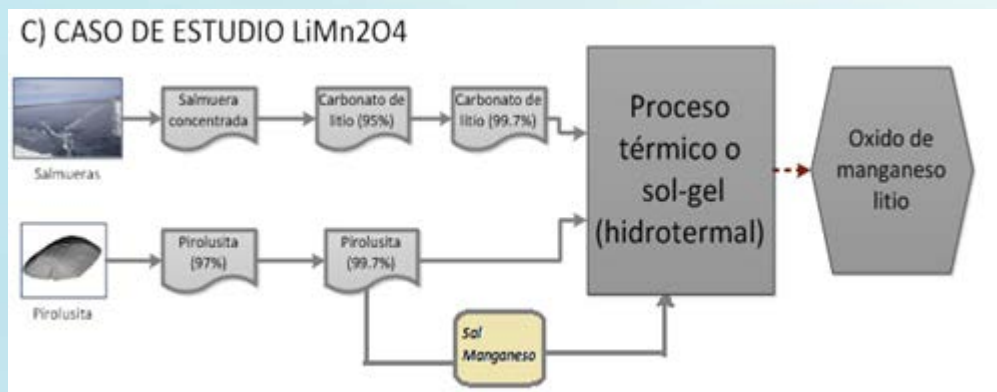
		ELECTRODOS				
		CÁTODOS			ÁNODO	ELECTROLITO
		$\text{LiCoO}_2$	$\text{LiFePO}_4$	$\text{LiMn}_2\text{O}_4$ / $\text{LiNiMnO}_4$	$\text{Li}_5\text{Ti}_2\text{O}_{12}$	$\text{LiTi}_2(\text{PO}_4)_3$ / $\text{Li}_x\text{Si}_{1-x}\text{B}_x\text{O}_2$
E L E M E N T O S	Li	$\text{Li}_2\text{CO}_3 \geq 98\%$	$\text{Li}_2\text{CO}_3 \geq 98\%$ $\text{LiCl} \geq 99\%$ $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O} \geq 98\%$	$\text{Li}_2\text{CO}_3 \geq 98\%$	$\text{Li}_2\text{CO}_3 \geq 98\%$ $\text{LiNO}_3 \geq 8\%$ $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O} \geq 99.9\%$	$\text{Li}_2\text{CO}_3 \geq 98\%$
	Co	$\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $\text{CoCO}_3 \geq 99\%$				
	Ni			$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $\text{NiCO}_3 \geq 98\%$		
	Mn			$\text{MnCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $\text{MnO}_2 \geq 99\%$		
	Fe		$\text{FeSO}_4 \geq 99.5\%$ $\text{FeCO}_3 \geq 99.5\%$			
	P		$\text{H}_3\text{PO}_4 \geq 88\%$ $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4 \geq 98\%$ $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 \geq 98\%$			$\text{H}_3\text{PO}_4$ (s)
	Ti				$\text{TiO}_2 \geq 99\%$ $\text{Ti}(\text{OR})_4 \geq 98\%$	$\text{TiO}_2 \geq 98\%$

**Tabla 2.** Compuestos químicos identificados en función para los procesos de obtención de diferentes electrodos comerciales para baterías de ion litio.



### Caracterización de precursores para la obtención de material catódico $\text{LiMn}_2\text{O}_4$

Para la obtención de  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  el método utilizado comercialmente es el proceso de reacción en estado sólido, no obstante actualmente hay muchos estudios por tratamientos hidrotermales o sol- gel, que pretenden mejorar las características electroquímicas de los materiales (Figura 2).



**Figura 2.** Etapas del proceso de obtención del electrodo  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$

En Bolivia, para el desarrollo de este electrodo, el yacimiento de la serranía del Mutún se constituye en un depósito atractivo de manganeso, el cual puede ser recuperado en el proceso de tratamiento de los minerales de hierro en la producción de acero propuesta actualmente. También se identifican otros yacimientos importantes fundamentalmente en el occidente del País (Tabla 3).

Yacimiento / Localización	Mn [%]	Mineral	Ref.
Cerro Mutún; Santa Cruz	44	Psilomelana y Pirolusita	(21)
Mina Mantos Negros; La Paz	50	Pirolusita	(22)
Mina Lourdes; Pucamayo, Chuquisaca	50	Psilomelana	(21)
Mina Negra; Pajancha, Potosí	35	Psilomelana y Pirolusita	(21)
Uquilla, y Jahuincha; San Pedro de Quemes, Potosí	27	Psilomelana	(23)
Virgen de Copacabana, Litoral y Exotica ; Kelluyo, Potosí	43	Psilomelana y criptomelana	(23)
Mina Okalchaloma; Okalchaloma, Potosí	25	Psilomelana	(23)
Mina Jorgito; Cerro Gordo, Potosí	30	-	(23)
Mina Apalupe; Potosí	34	-	(23)
Mina Charaque; Potosí	40	-	(23)
Mina Cotani; Potosí	20	-	(23)
Mina Yauricoya; Potosí	36	-	(23)

**Tabla 3.** Ocurrencias de Manganeso en Bolivia (Pirolusita= $\text{MnO}_2$ ; Psilomelana= $\text{BaMnMn}_8\text{O}_{16}(\text{OH})_{14}$ ; Criptomelana= $\text{K}(\text{Mn}^{4+}, \text{Mn}^{2+})_8\text{O}_{16}$ ; Rodocrosita= $\text{MnCO}_3$ )

Los yacimientos de manganeso en Potosí, alcanzan a 43 depósitos de los cuales 26 han sido evaluados y 5 han sido preseleccionados, siendo éstos las minas de Apalupe, Copacabana, Charaque, Cotani y Yauricaya, cuyas reservas alcanzan a 429213 TM a 150174 TMF entre reservas positivas, probables y prospectivas.

Si se considera una planta de 120000TM de mineral concentrado anual y la cantidad de reserva calculada, estas alcanzarán una vida útil de 36 años aproximadamente (21). Para la obtención de espinel  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ , el óxido de manganeso  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  de alta pureza es producido por un proceso de dos etapas mediante el cual se calcina carbonato de manganeso en una atmósfera baja en



contenido de oxígeno, seguido por calcinación en una atmósfera de alto contenido de oxígeno (22).

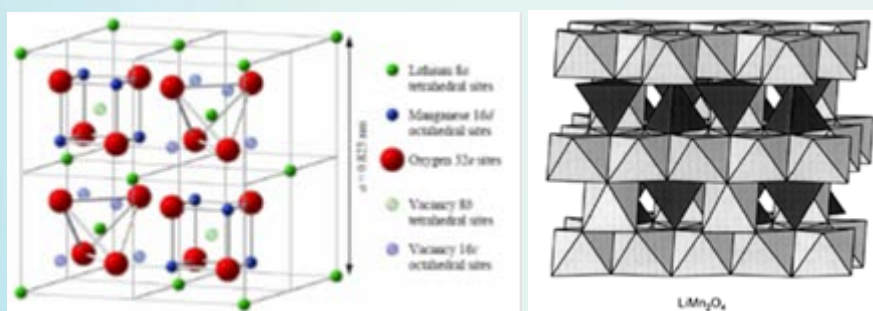
En este caso se observa como una mejor alternativa utilizar directamente el  $\text{MnCO}_3$  como precursor. Posteriormente, el óxido de manganeso (o  $\text{MnCO}_3$ ) y carbonato de  $(\text{Li}_2\text{CO}_3)$  se tratan por medio de varias etapas de tostación en un horno rotativo (24). Durante las diferentes etapas, la atmósfera cambia en el horno rotatorio de una condición inerte (adición de  $\text{N}_2$ ) a una oxidante (adición de  $\text{O}_2$ ). El polvo producido se suspende con agua, seguido de secado por aspersión (evaporación del agua).

La síntesis por medio sol gel o hidrotérmal, el manganeso debe estar en forma de sal, por lo que es necesario obtenerlo como carbonato, o sulfato de manganeso. En ambos casos se requiere de carbonato de litio grado batería (mínimo de 99.7%) como precursor de litio.

Para la posible obtención del material dopado con Níquel,  $(\text{Li}(\text{NiMn})_2\text{O}_4)$  en Bolivia se tiene el yacimiento en el cerro Pelón, dentro el complejo denominado el Rincón del Tigre, en el Pantanal boliviano, más propiamente entre los municipios Carmen Rivero Tórrez, de la provincia Germán Busch, y San Matías, de la provincia Ángel Sandoval. Este yacimiento es considerado uno de los más importantes, con un estimado de 5.5 millones de toneladas de mineral con 1% níquel.

### ***Síntesis y caracterización del óxido de Manganeso, Níquel y Litio (LM, LNM)***

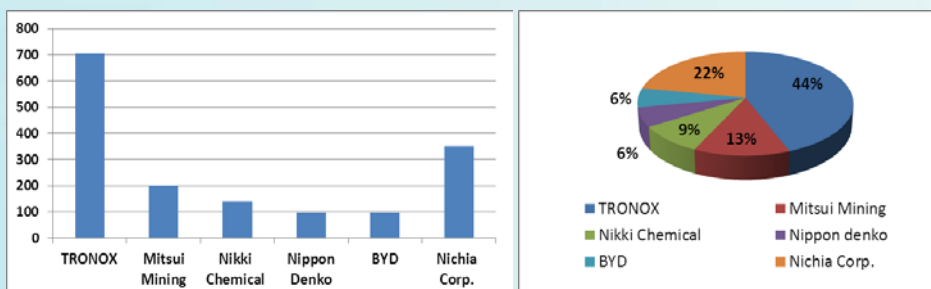
La fase  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  presenta una estructura tipo espinela (Figura 3) ampliamente utilizada en baterías de ion Li, y tal vez es el compuesto más estudiado para este tipo de aplicación (25 – 28). Posee la estructura de la espinela normal, donde los oxígenos ocupan las posiciones 32e del grupo espacial  $\text{Fd}3\text{m}$ . El manganeso ocupa la mitad de las posiciones octaédricas 16d, mientras que el litio se sitúa en posiciones tetraédricas 8a. Las posiciones tetraédricas 8a y las octaédricas 16c vacías proporcionan un espacio intersticial interconectado que permite la difusión rápida del litio en las tres coordenadas espaciales (29 – 33).



**Figura 3.** Estructura de la espinela  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ , donde se identifica los diferentes tipos de huecos ocupados, y la inserción/expulsión tridimensional de los iones litio. (37)

El óxido de manganeso litio  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  se ha constituido como un material alternativo al  $\text{LiCoO}_2$  en las baterías de ion litio, en especial por su buena respuesta electroquímica, bajo carácter contaminante y precio reducido (30 – 34) en comparación con las características altamente contaminante del Co, y su alto costo, siendo TRONOX la empresa líder en el mercado hasta el año 2010, productora de este material catódico con 700 TM/año (Figura 4) siendo su principal comprador la empresa E-one para la fabricación de baterías primarias y secundarias de ion litio (35).

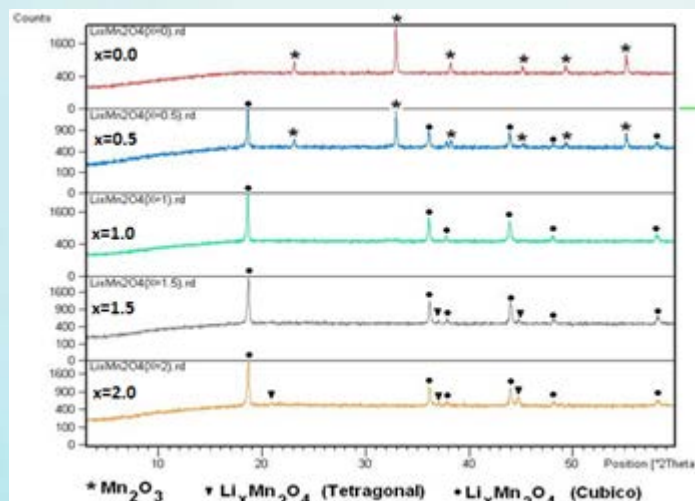




**Figura 4.** Empresas productoras y volúmenes de  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  en el 2010 (en TM/año) (50).

La síntesis convencional a nivel industrial del material tipo  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  es en reacciones en estado sólido. Estas reacciones se desarrollan por diferentes tipos de precursores que afectan las condiciones de síntesis, y las características morfológicas y electroquímicas del producto final (36 – 38).

En el presente trabajo se ha sintetizado  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ , a partir de dos precursores diferentes ( $\text{MnO}_2$  – Serie I), y ( $\text{MnCO}_3$  – Serie II). Los espectros de difracción de rayos X, para los productos sintetizados a partir de óxido de manganeso (Serie I), permite identificar que el óxido  $\text{Li}_1\text{Mn}_2\text{O}_4$  - espinela se va favoreciendo conforme se desarrolla la litación (ficha 00-0018-736). Sin embargo, en todas los productos, incluyendo la composición óptima de  $x = 1.0$ , se identifica la presencia de otras fases, en especial  $\text{Li}_1\text{Mn}_2\text{O}_4$  – tetragonal. En cambio, los espectros de difracción de rayos X de los productos obtenidos a partir de carbonato de manganeso (Serie II) (Figura 5), permiten identificar como fase única al  $\text{Li}_1\text{Mn}_2\text{O}_4$  - espinela para la composición con  $x = 1.0$ . La utilización de diferentes precursores define fuertemente la estructura y pureza final del material catódico, y por tanto sus propiedades electroquímicas (38, 39). De hecho, el utilizar como precursor el  $\text{MnCO}_3$ , favorece la obtención de un material catódico tipo  $\text{Li}_1\text{Mn}_2\text{O}_4$  - espinela óptimo a menores temperaturas, esto sugiere que en Bolivia se debe favorecer la obtención de este precursor.



**Figura 5.** Espectros de DRX de las muestras obtenidas por tratamiento de  $\text{MnCO}_3 + \text{Li}_2\text{CO}_3$  a  $800^\circ\text{C}$  por 20 h. con incrementos “x” de litio en  $\text{Li}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$ .

No obstante, si bien el uso de  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  inicialmente se extendió para remplazar al  $\text{LiCoO}_2$ , esto fue limitado por ser de menor capacidad en 10% comparado con el  $\text{LiCoO}_2$ , y presenta una muy baja estabilidad estructural durante el proceso de ciclización (40 – 42), donde el material pierde

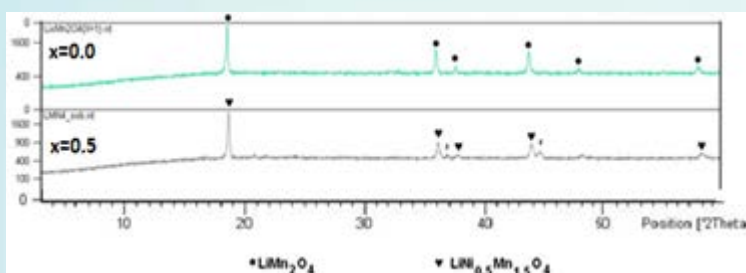




fácilmente su capacidad debido a su distorsión estructural por la presencia del ion  $Mn^{+2}$ , la disolución del manganeso en el electrolito, pérdida de cristalinidad en los proceso de ciclización, y la descomposición del electrolito a altos potenciales.

Se hicieron varios intentos para eliminar estos problemas, en especial el dopaje en la espinela por diferentes tipos de cationes como  $Al^{3+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Cr^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ , y  $Fe^{3+}$  o por modificación de la superficie del  $LiMn_2O_4$  con diferentes materiales como  $TiO_2$ ,  $MgO$ ,  $LiAlO_2$ , y  $Al_2O_3$  (43 – 45 ). En función de los resultados publicados, se demostró que una de las alternativas más adecuadas es la incorporación de Ni. El ion  $Ni^{+2}$  reemplaza al manganeso, para generar un producto óptimo, en una proporción de 0.5 molar con la estequiometría final  $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$  adecuado para su aplicación industrial (46 – 74), el producto mantiene su estructura tipo espinela. La síntesis es realizada por reacciones en estado sólido, que son relativamente simples y utilizables para la producción en masa.

La síntesis realizada a partir de  $Li_2CO_3$ ,  $NiO$  y  $MnCO_3$  (Serie III) como reactivos nos ha permitido obtener la fase tipo espinela,  $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$  con una estructura cúbica, sin embargo se identifican algunas señales de óxido de níquel, consistentes con la bibliografía, donde se sugiere que es difícil obtener una fase completamente pura: habitualmente se identifica la presencia de óxidos de níquel ( $Li_xNi_{1-x}O$ ) (Figura 6), característicos por la pérdida de oxígeno a altas temperaturas (46 – 49).



**Figura 6.** Espectros de DRX de las muestras obtenidas por tratamiento de  $MnCO_3 + Li_2CO_3 + NiCO_3$  a  $800^\circ C$  por 20 h. de la serie  $LiNi_xMn_{2-x}O_4$ , con  $x=0.0, 0.50$  (la impureza  $\downarrow$  corresponde a la fase de  $Li_xNi_{1-x}O_2$ ).

Las imágenes de SEM para el producto óptimo de  $LiMnO_4$  sintetizado con carbonato de Manganeso (Serie II,  $x=1.0$ ), muestra una distribución de diámetro de partículas homogéneo, en el orden de 4 – 10  $\mu m$ , este producto está en consistencia con los materiales comerciales (Tabla 4).

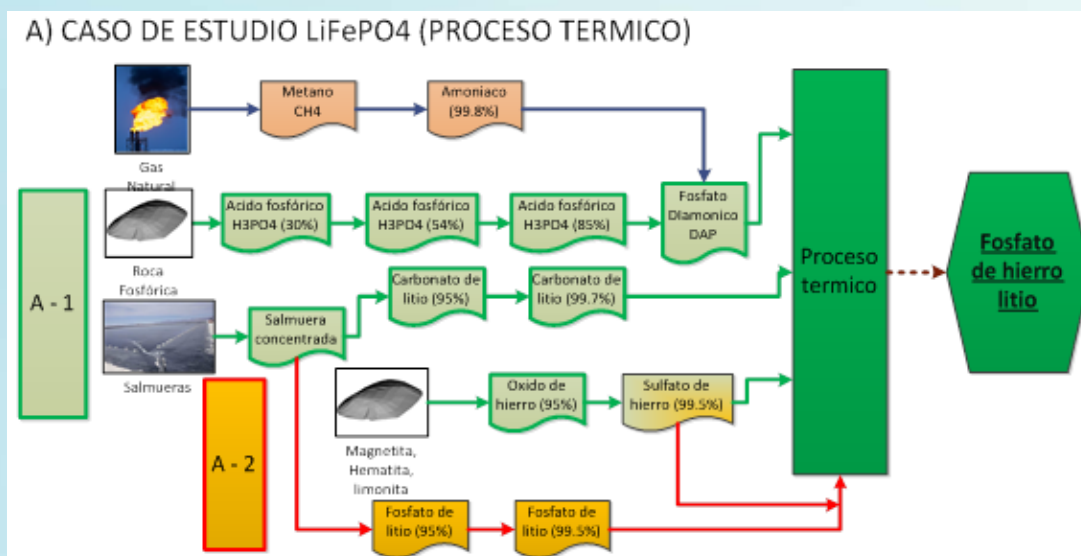
PROPIEDADES DEL LM	EMPRESA				
	TRONOX*	Zhengzhou Blue Ribbon (China)	Xian Huijie (China)	Linyi Gelon New Battery Baterials Co. Ltd. (China)	L&F (Korea)
Tamaño de partícula ( $\mu m$ )	6-15	12-18	12-20	13-17	5-15
Densidad (g/ml)	1.5-1.7	2.8-3.2	1.8	>2	1.45
BET SA ( $m^2/g$ )	0.5-1.3	0.4-0.8	1.0	0.4-1.0	0.58
Capacidad de descarga (mA-h/g)	96-110	121	>115	>102	101.3 a 4.3 V
Pérdida de capacidad	0.02%/ciclo	400 ciclos, 20%	-	100 ciclos, <10%	96.7% eficiencia

**Tabla 4.** Propiedades del  $LiMn_2O_4$  en productos comerciales



## Caracterización de precursores para la obtención de material Catódico $\text{LiFePO}_4$

Para la obtención de  $\text{LiFePO}_4$  se han identificado tres procesos característicos, la ruta en estado sólido (Figura 7), actualmente la más utilizada a nivel comercial, el proceso sol- gel y el tratamiento hidrotermal (Figura 8). Bajo estas propuestas se identifican los precursores correspondientes y los procesos tecnológicos a seguir.



**Figura 7.** Etapas en el procesamiento de materiales para la obtención del  $\text{LiFePO}_4$ , por reacción en estado sólido

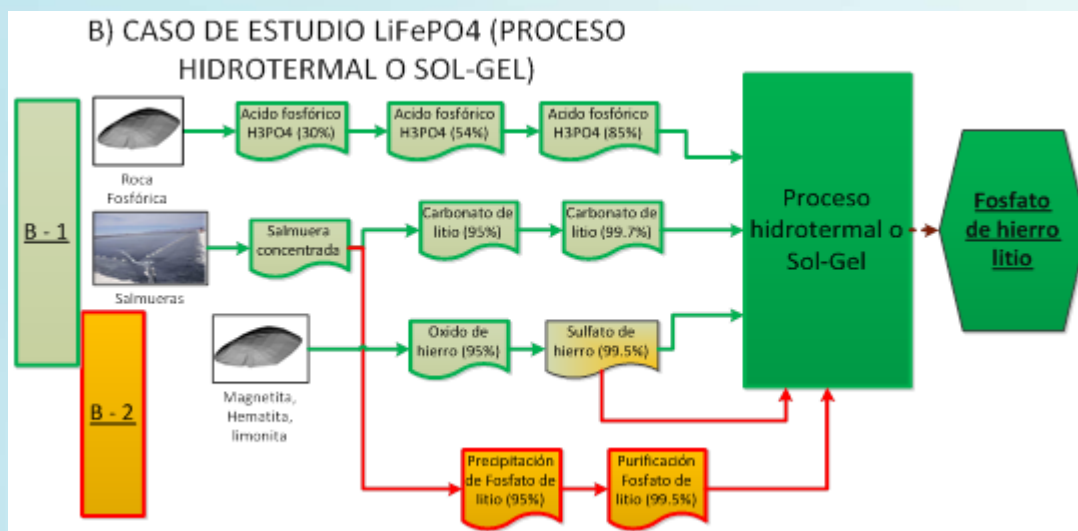
En Bolivia existen diversos yacimientos identificados de roca fosfórica (Tabla 5). Varios de ellos han sido evaluados y caracterizados mineralógicamente, pero no así cuantificados. Se han reportado, identificado y caracterizado los yacimientos de Roca Fosfórica de la Provincia de Capinota del departamento de Cochabamba, encontrando que este yacimiento tiene potencial para su explotación y posterior industrialización hacia ácido fosfórico, del cual se puede obtener  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  (MAP), o el  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  (DAP), compuestos fundamentales para la producción del electrodo  $\text{LiFePO}_4$  por la ruta de estado sólido.

Yacimiento	Localización	Cuantificación	Ley (%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	Observaciones
Paloma Pampa	Capinota Cochabamba (Lat. -17.7810 – Lon. - 66.2495)	2.8 M ton	25%	SERGEOTECMIN (GEOBOL-ENAF, 1979) (ordovícico - sedimentario)
Prospecto Illuri	Tiraque, Cochabamba	---	23%	SERGEOTECMIN
Camino nuevo Oruro – Cochabamba	Km 47 camino nuevo Oruro – Cochabamba	200.000 ton		SERGEOTECMIN (ordovícico - sedimentario)
Prospecto Caranavi	Caranavi – La Paz (lat - 15.8144, lon. -67.5828)			GEOBOL (ordovícico - sedimentario)
Prospecto Chacarilla	Chacarilla, Sicasica, La Paz (72 km Oeste NO de Oruro)	Capas de 10 a 30 cm	24%	Golzaes(1985), Notholt (1999) (ordovícico - sedimentario)
Cerro colorado	Puerto Suárez Santa Cruz		11.9%	(Appleton, 1991) (Precámbrico Igneo)
Prospecto Sepulturas	Sepulturas, Oruro (7 km Este de Oruro)	300.000 m3 (una capa de 0.5m)	9.3%	(Golzaes,1983)

**Tabla 5.** Yacimientos de roca fosfórica identificados en Bolivia, y algunas de sus características.



El proceso de producción de ácido fosfórico con una concentración de 30% en  $P_2O_5$  (Figura 20) utiliza la roca fosfórica con 30% en  $P_2O_5$  y ácido sulfúrico 98.7%, donde luego se pasa a una etapa de concentración y clarificación donde se puede llegar a 54% en  $P_2O_5$ . Este puede pasar por una segunda etapa de concentración mediante evaporación al vacío, proceso que permite obtener un ácido con 85% de pureza que puede ser utilizado para la producción de compuestos activos de cátodos para batería de ion litio por la vía hidrotermal (Figura 21).



**Figura 8.** Etapas en el procesamiento de materiales para obtener  $LiFePO_4$  por la ruta sol gel o hidrotermal.

Las mayores reservas de hierro en Bolivia se encuentran en la serranía del Mutún, que alberga el yacimiento mineral ferro-manganeso Mutún. Se encuentra en la provincia Germán Busch del departamento de Santa Cruz, aproximadamente a 700 kilómetros de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra y a 50 - 60 kilómetros de la ciudad fronteriza boliviana de Puerto Suárez. El yacimiento mineral está diseminado en un área de aproximadamente 65 kilómetros cuadrados, los minerales que la conforman son: magnetita, hematita, limonita y, en menor cantidad, siderita. También se identifica mineral de manganeso, azufre, y fósforo, con contenidos bajos y altos, por sectores. Las reservas brutas estimadas de mineral de hierro bordean los 40 mil millones de toneladas métricas con una ley promedio del 50% y, las de manganeso se estiman en 10 mil millones de toneladas métricas (50).

Si bien, en Bolivia la reserva del Mutún es la más grande en hierro y manganeso, se tienen otros yacimientos identificados como alternativas: los desmontes de las minas de Huanuni, Ubina, Colavi, Pulacayo, San José, ubicadas en los departamentos de Oruro o Potosí, donde se tiene grandes cantidades de Pirita ( $FeS_2$ ) (51), también se identifican yacimientos de goethita  $FeO(OH)$  hidróxido, o limonita ( $FeO(OH) \cdot nH_2O$ ) en el cerro Pozoconi de Huanuni, y en vetas estrechas en Challapata departamento de Oruro. La siderita  $FeCO_3$  se encuentra en variados yacimientos hidrotermales, en vetas y depósitos metasomáticos, entre ellos en las gangas de la mina Matilde, y de muchas minas de la cordillera de Muñecas - Oruro (51).

Los procesos para obtener sales de hierro de alta pureza son diversos, entre ellos el conocido es por reducción del hierro con hidrógeno a partir del óxido puro, proceso propuesto para el tratamiento de minerales del Mutún para la obtención de hierro esponja (50); el mismo se puede hacer reaccionar con ácido sulfúrico u otro ácido para producir la correspondiente sal de alta pureza.





El desarrollo para la producción de  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  en Bolivia, a partir de salmueras del salar de Uyuni - Potosí es un proceso que ya se ha iniciado, y pretende llegar a la producción de  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  de alta pureza (mayor al 99,7%), para la obtención de electrodos a mediano plazo. El proceso pasa por una primera etapa de concentración por evaporación solar (Figura 7, 8), y el posterior tratamiento del concentrado para llegar al carbonato.

Una alternativa atractiva en Bolivia, es la obtención de  $\text{LiPO}_4$ , a partir de salmuera concentrada, el cual posteriormente puede ser purificado y tratado con  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , o sales de hierro para la obtención del electrodo  $\text{LiFePO}_4$  por la ruta de reacción en estado sólido, o por proceso hidrotermal (Figura 7, 8). En todos los casos analizados la obtención de este material implica cinco etapas: exploración y extracción, beneficiado, química básica, química fina y síntesis de electrodos (ver tabla 6).

En Bolivia se han implementado algunas experiencias para la obtención de ácido fosfórico, pero no así para el desarrollo de la hidrometalurgia del hierro, no obstante la experiencia en minería tradicional podría permitir dar este paso. Queda un buen camino por recorrer en los procesos de química fina.

EXPLORACIÓN Y EXTRACCIÓN	BENEFICIADO	QUÍMICA BÁSICA	QUÍMICA FINA	SÍNTESIS DE ELECTRODOS
Apatita (Roca fosfórica – $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ )	Reducción de tamaño Flotación	Producción de ácido fosfórico (30% en $\text{P}_2\text{O}_5$ )	Concentración y clarificación de ácido fosfórico (54 – 70 % en $\text{P}_2\text{O}_5$ ) Producción de MAP, DAP (grado batería 99.5%)	FOSFATO DE HIERRO LITIO ( $\text{LiFePO}_4$ ) (Mayor a 99,6%)
Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) Limonita ( $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) Magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) Siderita ( $\text{FeCO}_3$ )	Reducción de tamaño Concentrado Peletizado	Metalurgia de reducción y disolución, o disolución reductora	Recuperación y purificación de $\text{FeSO}_4$	
Salmueras (Sales de Li, K, Mg, Ca, otros)	Concentración de salmueras	Producción de $\text{Li}_2\text{CO}_3$ (97%)	Purificación del $\text{Li}_2\text{CO}_3$ (99.7%)	

**Tabla 6.** Etapas propuestas de procesamiento desde minerales para llegar a obtener  $\text{LiFePO}_4$

### **Síntesis y caracterización de Fosfato de Hierro y Litio (LFP)**

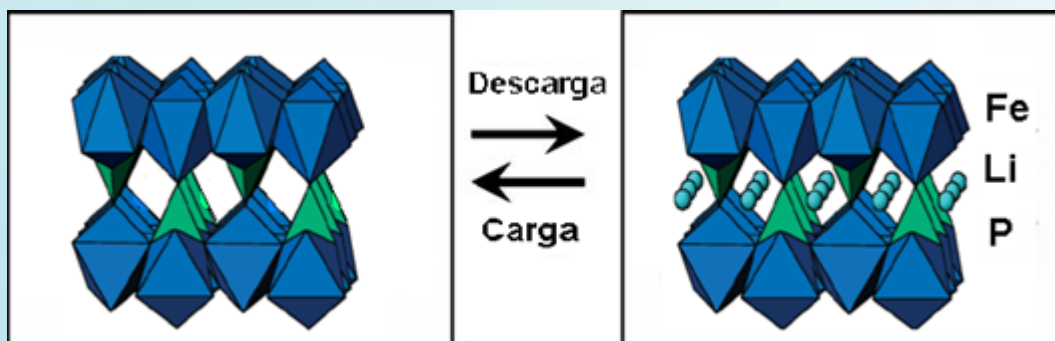
Entre las varias estructuras tipo Olivina, constituidas por una red de enlaces covalentes fuerte de aniones tetraédricos  $(\text{XO}_4)_n$  con ( $\text{X} = \text{P}, \text{S}, \text{As}, \text{Mo}$  y  $\text{W}$ ), y metales en posiciones octaédricas, identificados como potenciales electrodos catódicos por Godenough en 1997 (52), el  $\text{LiFePO}_4$ , se ha constituido en el producto de mayor interés comercial como material catódico de baterías de ion litio, fundamentalmente por sus características amigables al medio ambiente, bajo costo de sus precursores, larga vida en el proceso de ciclización, y una relativa buena capacidad específica de 170 mAh/g (53, 54).

No obstante, el principal problema de este material es el control del estado de oxidación en su síntesis, dado que es muy fácil que el  $\text{Fe}^{+2}$  se oxide a  $\text{Fe}^{+3}$  durante el tratamiento térmico de reacción, lo que ha hecho que en los sistemas de reacción en estado sólido se tenga un cuidado especial en el control de la atmosfera reductora del medio (55, 56). Existen diferentes métodos de síntesis del material tipo olivina  $\text{LiFePO}_4$  (reacción en estado sólido, hidrotermal, y sol gel) que permiten mejorar su desempeño electroquímico como material catódico en baterías recargables de ion litio (57 – 59). El  $\text{LiFePO}_4$ , a diferencia de otros materiales catódicos, permite la inserción y la extracción de todos los iones litios sin deterioro de la estructura de



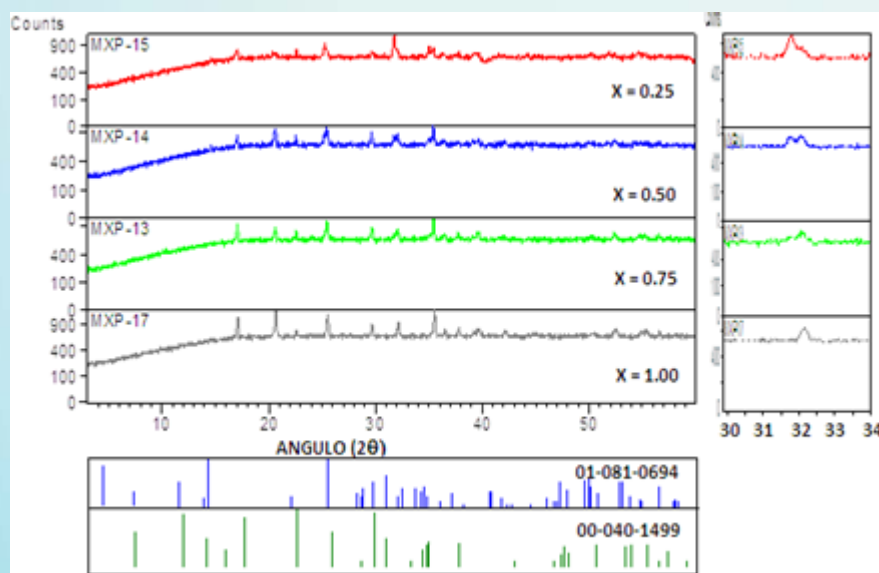


intercambio (59, 60). Esto por que presenta una fuerte estructura de enlaces covalentes P – O tridimensional formada por los polianiones  $(\text{PO}_4)^{3-}$ , existiendo dos fases en los extremos de la reacción en el proceso de carga o descarga (Figura 9) (60, 61).



**Figura 9.** Estructura del  $\text{FePO}_4$ , y del  $\text{LiFePO}_4$  antes y después del proceso de carga / descarga (la dirección del eje  $b$  de la celda unidad es correspondiente con el eje de transporte de iones litio) (61).

Los espectros de DRX de la serie de  $\text{Li}_x\text{FePO}_4$  con  $x = 0.25, 0.50, 0.75$  y  $1.00$  (Figura 10 ) sintetizados por la ruta hidrotermal permite identificar el proceso de cambio de fase presente en los fenómenos de descarga (60), así a bajos contenidos de Li se identifica señales de la fase  $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$  (ficha 01 – 081 – 0694) consistente con el bajo contenido de oxígeno en el proceso hidrotermal, al incrementarse el contenido de Li, las señales van desapareciendo y se identifican nuevas señales características de la fase tipo litiofilita ( $\text{LiFePO}_4$  – ficha 00 – 040 – 1499), hasta obtener como fase única a este material para la muestra con  $x = 1.00$ . A partir de las señales características del producto óptimo identificado ( $\text{LiFePO}_4$  a  $x = 1.0$ ) se calcula con la ecuación de Scherrer el tamaño medio de los micro dominios cristalinos ( $d \cong 0,16 \pm 0.03 \mu\text{m}$ ).



**Figura 10.** Espectros de DRX de la serie de  $\text{Li}_x\text{FePO}_4$  con  $x = 0.25, 0.50, 0.75$  y  $1.00$ , a la derecha se observa la desaparición de la señal característica de la fase  $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$  ( $2\theta = 31.6^\circ$ ), y el incremento de las señales de la fase  $\text{LiFePO}_4$  ( $2\theta = 32.3^\circ$ ), con el incremento de Li.

Las imágenes de SEM del producto con  $x = 1.00$ , correspondiente a la fase  $\text{LiFePO}_4$ , permiten identificar una alta homogeneidad en el tamaño (promedio de  $2.5 \pm 0.4 \mu\text{m}$ ) y forma de las partículas, las cuales están apiñadas formando cúmulos del orden de  $30$  a  $50 \mu\text{m}$ . Así mismo,



en la figura de la derecha se observan planos y ángulos característicos del hábito cristalino de las partículas de este compuesto.

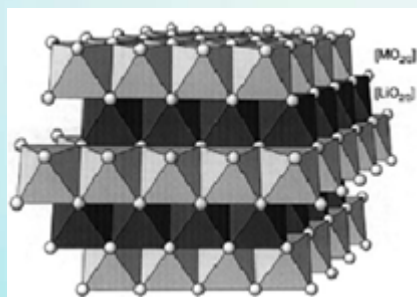
El diámetro medio de las partículas es consistente con los reportados para materiales comerciales (Tabla N°.7). Si bien se ha sintetizado el  $\text{LiFePO}_4$  por tratamiento hidrotérmico (56, 57), otros autores reportan la síntesis de este material por procesos sol- gel (62, 63), o en estado sólido (64), donde en el primer caso se puede partir de sales o alcóxidos, pero requiere necesariamente un tratamiento térmico adicional, y para el segundo caso se puede partir de  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{FeSO}_4$ , y  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ . En función de los reactivos de partida y del tratamiento térmico las propiedades electroquímicas de este material pueden variar, e incluso el método de síntesis ha demostrado que es adecuado incluir el material conductor eléctrico, dado que el LFP por sí sólo presenta una muy mala conductividad eléctrica, lo que generalmente se resuelve con la incorporación de carbono en el orden del 1 al 5% en peso (63, 65).

PROPIEDADES DEL MATERIAL CATÓDICO LFP	EMPRESAS			
	Linyi Gelon New Battery Materials Co.,Ltd.		Shanghai New Element Material Company Limited	HIKO IM&EX Co. LTD
%Li	3,5-4,5	4,3	4,1	
%Fe	33-36	33,5	35,2	
%P	18-20	19,5	19,4	
%C		1,5	2	
Ciclo	2000	500		
Superficie esp. ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	18	15	15	17
Tamaño ( $\mu\text{m}$ )	4-6	3-5	4-8	2-6
Densidad ( $\text{g/ml}$ )	0,8	1	1,1	0,53
Capacidad ( $\text{mAh/g}$ )	142	142	140	
Capacidad de suministro	25 Ton/ mes	35 Ton/mes	166 Ton/mes	10 Ton/ mes

*Tabla 7. Ficha técnica de productos comerciales de  $\text{LiFePO}_4$  grado batería.*

### Síntesis y caracterización de Óxido de Cobalto y Litio (LC )

El material laminar de  $\text{LiCoO}_2$  (Figura 11) es uno de los materiales catódicos más ampliamente utilizado a nivel industrial en baterías secundarias de ion litio, debido a su fácil preparación (habitualmente sintetizado en reacciones en estado sólido con prolongados tiempos de reacción y altas temperaturas), alta conductibilidad electrónica, y excelente comportamiento en la ciclización. Su capacidad teórica es de 273.8 Ah/Kg, lastimosamente el material sufre una degradación estructural cuando más del 50% del litio es extraído de su red laminar, perdiendo su capacidad para el procesos de carga/descarga, siendo su capacidad práctica solo de 140 Ah/Kg (66).

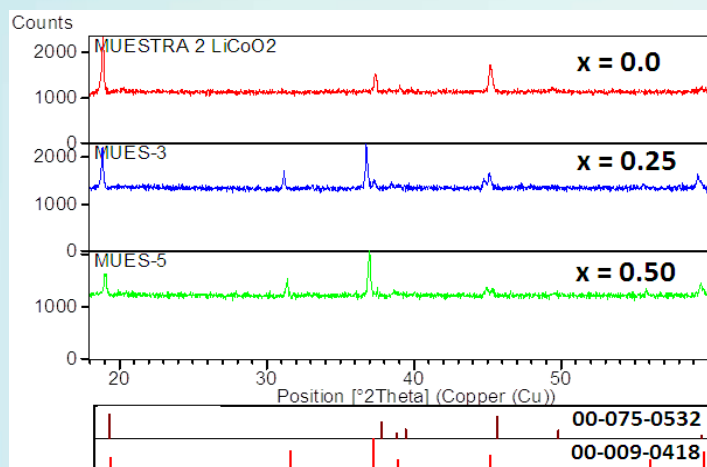


*Figura 11. Estructura bidimensional de  $\text{LiMO}_2$  ( $M = \text{Co}, \text{Ni}, \text{V}, \text{etc.}$ ) tipo  $\alpha\text{-NaFeO}_2$  (67)*

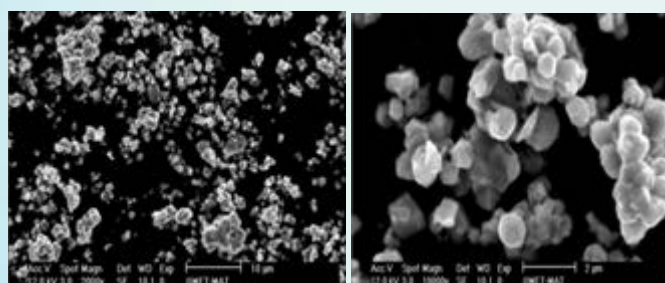


Se ha sintetizado materiales en la serie  $\text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2$  con  $x = 0.0$ ,  $0.25$ , y  $0.50$ , donde se evalúa el comportamiento estructural en el proceso de litación, de hecho los espectro de difracción de rayos X (Figura 12), muestran que el incremento de litio favorece el proceso de formación de la fase laminar de  $\text{LiCoO}_2$  pura (Ficha 00-075 – 0532), haciendo desaparecer la fase del óxido mixto de Cobalto  $\text{Co}_3\text{O}_4$  (Ficha 00 – 009 – 0418). En la fase pura  $x = 0.0$  se identifica claramente las señales del pico (003) a  $2\theta = 18.5^\circ$  demostrando la estructura laminar característica del  $\text{LiCoO}_2$ , y el pico (104) a  $2\theta = 45^\circ$  el cual indica la unidad básica Co – O – Co que forma el compuesto laminar. La alta relación en intensidades (001)/(104) sugiere una buena cristalinidad en el material (68).

Las microfotografías SEM de varias zonas de la muestra óptima  $\text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2$  ( $x = 0.0$ ), permiten identificar que el producto presenta una distribución de tamaño homogéneo, identificándose aglomerados de partículas, donde el tamaño medio de las partículas es del orden de  $1.0 \pm 0.2 \mu\text{m}$  (Figura 13). Este producto muestra un tamaño menor a los materiales comerciales reportados, con una forma angular, muy próximo a productos obtenidos por métodos sol gel (69).



**Figura 12.** Espectro de Difracción de rayos X de las muestras  $\text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2$  con  $x = 0.00$ ,  $x = 0.25$ , y  $x = 0.50$ .



(a)

(b)

**Figura 13** Imágenes de SEM de la muestra óptima de  $\text{LiCoO}_2$ . La barra corresponde (a)  $10 \mu\text{m}$ , y (b)  $2 \mu\text{m}$

### Síntesis y caracterización de materiales anódicos (LTO)

El material anódico de mayor uso comercial en baterías de ion litio es el grafito, porque tiene un buen ciclo de vida, abunda en el mercado, bajo costo, y no es tóxico (70 – 74). No obstante, este material presenta dos desventajas, una es la capacidad energética relativamente baja (375

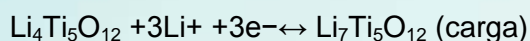




mAh/g) en comparación con otros materiales anódicos, y la segunda es la deposición de litio metálico en su estructura, como dendritas, en los procesos de carga y descarga; lo que, a largo plazo, si las condiciones de la batería no son adecuadas, produce un corto circuito en la misma (75).

Esto condujo a que se desarrollen nuevas alternativas en materiales anódicos, entre ellas la utilización de metales o aleaciones de alta pureza (76), o materiales basados en estaño, o silicio (77, 78). Estos materiales presentan una alta capacidad de energía, pero su desventaja es que en los procesos de carga/descarga de litio se producen grandes cambios en su volumen (hasta de 300%) (79), generando un problema de tensión física, y el deterioro de la estructura cristalina llegando en muchos casos a su pulverización, por tanto una baja capacidad de ciclación.

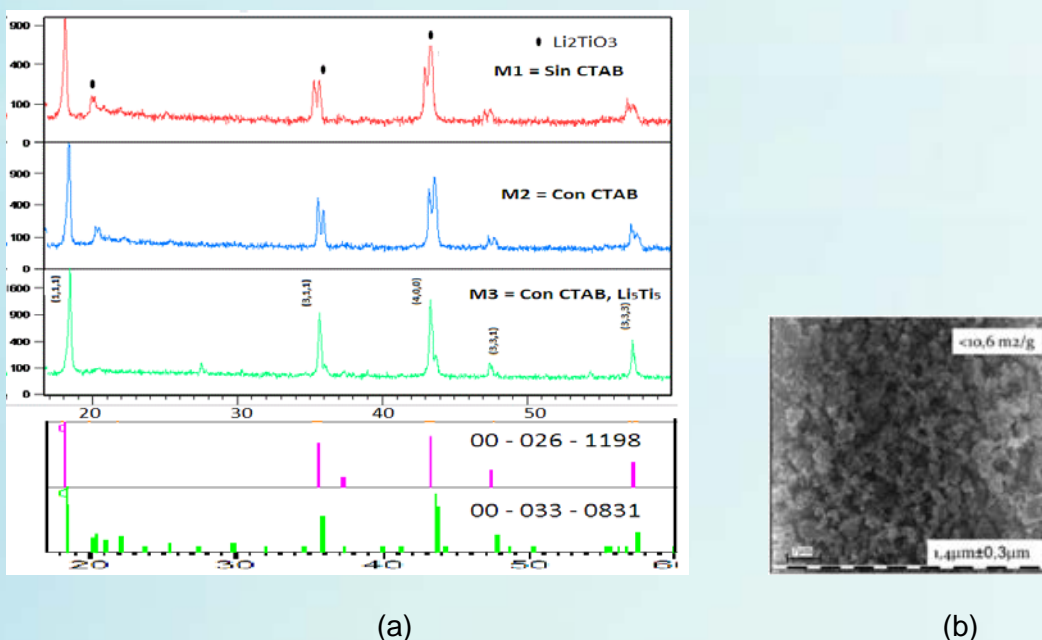
Actualmente, a nivel mundial se está explorando la utilización del material anódico  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  (LTO), tipo espinela -  $\text{Li}[\text{Li}_{1/3}\text{Ti}_{5/3}]\text{O}_4$ , el cual puede ser cargado hasta llegar a  $\text{Li}_7\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ , con una capacidad teórica de 175mAh/g:



El material muestra una excelente capacidad para mantener su capacidad incluso arriba de 100 ciclos (99%), fundamentalmente por no presentar cambios de volumen en este proceso, es no tóxico, y es térmicamente estable en los procesos de carga y descarga, estas excelentes propiedades hacen que este material sea un candidato excelente como material anódico en baterías de ion litio de potencia (80 – 82) reemplazando poco a poco al grafito. Su comercialización aún depende de sus procesos de síntesis, los cuales pueden ser en reacción en estado sólido, sol gel, combustión, y otros (83 – 86), aunque actualmente varias empresas ya lo están comercializando.

Se ha sintetizado  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  por la ruta de los atranos (ruta sol – gel) (85 - 87) (parte experimental). El proceso térmico ha sido desarrollado a diferentes temperaturas, optimizándose el producto a 850 °C. Los espectros de DRX de las muestras óptimas sintetizadas con una relación molar de  $\text{Li}:\text{Ti} = 4:5$ , y diferente contenido de agente direccional: Bromuro de Cetil Trimetil Amonio (CTAB) ( $M1 = 0.0$  CTAB,  $M2 = 1.8$ CTAB) presentan señales características de la fase tipo espinela  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  (Ficha 00 – 26 – 1198 ), y de la fase  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  (Ficha 00 – 033 – 0831) (Figura 14a) (86), no obstante, el análisis de SEM (Figura 14b) demuestra que para el producto sintetizado con material orgánico (M2) se obtiene una mejor distribución de diámetro de partículas. El espectro de DRX del producto sintetizado con mayor relación molar de  $\text{Li}:\text{Ti} = 5:5$  (M3), muestra señales características solo de la fase de  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  (A.S.T.M. 49-0207). El tamaño de partícula medio obtenido (1.4  $\mu\text{m}$ ), es consistente con productos comerciales.





**Figura 14.** a) Comparación de DRX de los productos a 850°C correspondientes a los productos óptimos: M1 (Li:Ti = 4:5, sin CTAB), M2 (Li:Ti = 4:5, con CTAB), y M3 (Li:Ti = 5:5, con CTAB) (Ficha 00 – 26 – 1198 del Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub>, y la Ficha 00 – 033 – 0831 a la fase Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub>). b) Imagen SEM de la muestra óptima M3.

## CONCLUSIONES

Se identificaron los procesos de obtención de dos materiales catódicos comerciales (LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> y LiFePO<sub>4</sub>), reconocimiento los potenciales precursores naturales existentes en Bolivia y sus procesos de transformación. Se identifica la síntesis y caracterización estructural de estos materiales, incluido el material catódico comercial LiCoO<sub>2</sub>, y el material anódico Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub>, mostrándose los resultados obtenidos de estos procesos en la UMSA, y resaltándose los procesos de obtención del material anódico por la ruta de los atranos.

Bolivia es un país demandante de sistemas de almacenamiento de energía de plomo, dado que actualmente se instalan SFV en diferentes zonas rurales del país; en este contexto, será importante evaluar la obtención de materiales catódicos y anódicos adecuados para la generación de baterías de ion litio, para esta aplicación, pensando en la demanda nacional, y en un potencial mercado internacional.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido desarrollado en el marco de los proyectos: “Materiales para baterías de litio de potencia”, y “Energía y Desarrollo Sostenible”, financiados por el programa de cooperación UMSA - ASDI /TB – BCR. Se agradece a los equipos de investigación del IGEMA, y del IMETMAT que colaboraron en la caracterización estructural de los materiales, o precursores en estudio, y el auspicio de la Dirección de Electroquímicos y Baterías de la Gerencia de Recursos Evaporíticos de la COMIBOL.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) K. Nakajima, Y. Nishi, in: T. Osaka, M. Datta (Eds.), *Advanced Li-ion Batteries*, Energy Storage Systems for Electronics, Gordon and Breach Science Publishers, 2000, pp. 109–129.
- (2) Bruno Scrosati, Jürgen Garche. *Journal of Power Sources* 195 (2010) 2419–2430
- (3) D. Howell, FY2006 Progress Report, Office of FreedomCar and Vehicle Technologies, U.S. Department of Energy, Washington, DC, 2006.
- (4) Arumugam Manthiram, *J. Phys. Chem. Lett.* 2011, 2, 176–184
- (5) Castaldo, Joe, "The Lithium Deficit," *Canadian Business*; 4/27/2009, Vol. 82 Issue 7, p17-18.
- (6) Paul A. Nelson, Danilo J. Santini<sup>1</sup> and James Barnes, Argonne National Laboratory, US Department of Energy, International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Stavanger, Norway, May, 2009
- (7) J.F. Martin, et al. , *Electrochem. Solid State Lett.*, 11 (2008) A12-A16.
- (8) D.Q. Liu, Z.Z. He, X.Q. Liu, *Journal of Alloys and Compounds*, 440 (2007) 69-73.
- (9) D.Y.W. Yu, et al., *Journal of the Electrochemical Society*, 155 (2008) A526-A530.
- (10) T.-F. Yi, C.-L.Hao, C.-B.Yue, R.-S. Zhu, J. Shu, *Synthetic Metals*, 159 (2009) 1255-1260.
- (11) J.S. Gnanaraj, V.G. Pol, A. Gedanken, D. Aurbach, *Electrochemistry Communications*, 5 (2003) 940-945.
- (12) H. Li, Z.X. Wang, L.Q. Chen, X.J. Huang, *Adv. Mater.*, 21 (2009) 4593-4607.
- (13) M. Yao, K. Okuno, T. Iwaki, T. Awazu, T. Sakai, *Journal of Power Sources*, 195 (2010) 2077-2081.
- (14) Y.H. Chen, C.W. Wang, X. Zhang, A.M. Sastry, *Journal of Power Sources*, 195 (2010) 2851-2862.
- (15) S.F. Lux, et al., Winter, *Journal of the Electrochemical Society*, 157 (2010) A320-A325.
- (16) A. Guerfi, M. Kaneko, M. Petitclerc, M. Mori, K. Zaghib, *Journal of Power Sources*, 163 (2007) 1047-1052.
- (17) V. Srinivasan, J. Newman, *Journal of the Electrochemical Society* 151 (10) (2004) A1530–A1538.
- (18) M. Doyle, J. Newman, *Journal of Applied Electrochemistry* 27 (1997) 846–856.
- (19) C.W. Wang, A.M. Sastry, *Journal of the Electrochemical Society* 154 (11) (2007), A.1035–1047.
- (20) Myounggu Parka, et al., *Journal of Power Sources* 195 (2010) 7904–7929.
- (21) Arzabe, Hugo; *Fluidización de minerales de manganeso*; UMSA; La Paz, 1979. 140 p.
- (22) CEPROMIN; *El bióxido de manganeso en Bolivia*; Serie Recursos Naturales, 1992, Camacho Antonio; *Proyecto Bióxido de Manganeso*, inventariación, evaluación y preselección de yacimientos de manganeso; GEOBOL
- (23) EU Measures for monitoring the average specific emissions of carbon dioxide from new passenger cars. [http://ec.europa.eu/environment/air/transport/co2/co2\\_monitoring.htm](http://ec.europa.eu/environment/air/transport/co2/co2_monitoring.htm) (Accessed June 14, 2010).
- (24) Heil, G.; Kormann, C.; Adel, J. Lithium Oxide Containing Lithium Intercalation Compounds. European Patent Application No. EP1204601, published on 2/19/2003
- (25) M. M. Thackeray, W. I. F. David, P. G. Bruce, and J. B. Goodenough, *Mater. Res. Bull.* (1983).18, 461
- (26) Martin Winter, Jürgen O. Besenhard,\* Michael E. Spahr, and Petr Novak, *Adv. Mater.* 1998, No. 10.10.
- (27) J. C. Hunter, *J. Solid State Chem.*(1981), 39, 142
- (28) D. Guyomard and J. M. Tarascon, *Solid State Ionics* (1994). 69, 222
- (29) J. Bates, D. Lubben, N. Dudney, and F. Hart, *J. Electrochem. Soc.* (1995) 142, L149.
- (30) G. Amatucci and J. M. Tarascon, *J. Electrochem. Soc.* (2002) 149, K31



- (31) R. Singhal, M. S. Tomar, and R. S. Katiyar, Research Signpost entitled "Advanced Materials and Methods for Lithium Ion Batteries," ISBN: 978-81-7895-279-6, edited by S. S. Zhang (2007), Chap. 4.
- (32) Christopher S. Johnson, Journal of Power Sources (2007) 165 559–565
- (33) Artur Brauna, Hongxin Wang, et al., Journal of Power Sources 195 (2010) 7644–7648
- (34) K. Y. Chung, H. S. Lee, W. S. Yoon, J. McBreen, and X. Q. Yang, J. Electrochem. Soc. (2006), 153, A774
- (35) Christophe, <http://c.pillot@avicenne.com>, 2010.
- (36) J.M. Tarascón, et al., J. Electrochem. Soc, 138(10), 2859 (1991).
- (37) J.M. Tarascón, et al., J. Electrochem. Soc, (1994) 141(6), 1421.
- (38) Hong Jun Yuea, XingKang Huang,a,b, DongPing Lva, Yong Yanga, Electrochimica Acta 54 (2009) 5363–5367
- (39) W. Bowdena, et al., Journal of Power Sources 165 (2007) 609–615
- (40) H. Yamaguchi, A. Yamada, and H. Uwe, Phys. Rev. B (1998) 58, 8.
- (41) K. Y. Chung, H. S. Lee, W. S. Yoon, J. McBreen, and X. Q. Yang, J. Electrochem. Soc. 153, A774 2006.
- (42) Y. Shin and A. Manthiram, J. Electrochem. Soc. 151, A204 2004.
- (43) Eftekhari A (2004) J Power Sources 130:260
- (44) Lee SW, Kim KS, Moon HS, Kim HJ, Cho BW, Cho WI, Ju JB, Park JW (2004) J Power Sources 126:150.
- (45) Shiao Fong Tay & Mohd Rafie Johan, Ionics, 2008, DOI 10.1007/s11581-010-0438-x.
- (46) Jun Liu, Ji-Guang Zhang, and M. Stanley Whittingham, Adv. Mater. 2012, 24, 2109–2116.
- (47) S. Patoux, et al., J Power Sources 189, 344, 2009
- (48) Xiaohua Ma, Byoungwoo Kang, and Gerbrand Ceder, J. of The Electroch. Society, 157 \_8\_ A925-A931 \_2010
- (49) Jie Xiao , et al., Adv. Mater. 2012, 24, 2109–2116
- (50) José Luís Urdininea, [www.hidrocarburosbolivia.com](http://www.hidrocarburosbolivia.com)
- (51) Salomón Rivas, Federico Ahlfeld, Minerales de Bolivia y sus parajes, Tomos I, II, La Paz, 2009.
- (52) Padhi AK, Nanjundaswamy KS, Goodenough JB (1997) J. Electrochem Soc 144:1188
- (53) J.M. Tarascon, M. Armand, Nature 414 (2001) 359.
- (54) J.B. Goodenough, Y. Kim, Chem. Mater. 22 (2010) 587.
- (55) D. Jugovic, D. Uskokovic, J. Power Sources 190 (2009) 538.
- (56) Ou XiuQin, et al., Sci China Ser E-Tech Sci, Jan. 2009, vol. 52, No. 1, 264-268.
- (57) Kiyoshi Kanamura, Shohei Koizumi, Kaoru Dokko J Mater Sci (2008) 43:2138–2142.
- (58) S. Y. Chung, J. T. Bloking, Y. M. Chiang, Nat. Mater. 2002, 1, 123.
- (59) Kiyoshi Kanamura, Shohei Koizumi, Kaoru Dokko, J Mater Sci (2008) 43:2138–2142.
- (60) C. Delmas, et al., Nature materials VOL 7 August 2008 [www.nature.com/naturematerials](http://www.nature.com/naturematerials)
- (61) Yonemura, M., et al., J. Electrochem. Soc. 151, A1352–A1356 (2004).
- (62) J. Yao. K. Konstantinov. G. X. Wang. H. K. Liu, J Solid State Electrochem (2007) 11: 177–185.
- (63) Xueliang Li, et al., J Solid State Electrochem (2009) 13:921–926.
- (64) Dan Li, Yudai Huang, Dianzeng Jia, Zaiping Guo, Shu-Juan Bao, J Solid State Electrochem (2010) 14:889–895.
- (65) Xueliang Li, et al , Electrochimica Acta 54 (2009) 5656–5659
- (66) Lunblad A, Bergman B (1997) Solid State Ionics 96:173–181
- (67) Martin Winter, Jürgen O. Besenhard,\* Michael E. Spahr, and Petr Novak, Adv. Mater. 1998, 10, No. 10.
- (68) Liao Gang, et al., Journal of Wuhan University of Technology - Mater. Sci. Ed., 2005, Vol 20, N° 4, 73 – 76.





- (69) X. L. Zeng, Y. Y. Huang, F. L. Luo, Y. B. He, D. G. Tong, *J Sol-Gel Sci Technol* (2010) 54:139–146
- (70) Gary McChesney, Dan Walden, Future Fuel, Chemical Co., Project ID: ARRAVT012, 2011, 372- 386
- (71) H. Lee, Y. Kim, M. Hong, S. Lee, *J. Power Sources* 141 (2005) 159.
- (72) Q. Si, K. Hanai, N. Imanishi, M. Kubo, A. Hirano, Y. Takeda, O. Yamamoto, *J. Power Sources* 189 (2009) 761.
- (73) Z. Luo, D. Fan, X. Liu, H. Mao, C. Yao, Z. Deng, *J. Power Sources* 189 (2009) 16.
- (74) C.M. Park, H.J. Sohn, *J. Electrochem. Soc.* 157 (2010) A46.
- (75) D. Larcher, S. Beattie, M. Morcrette, K. Edstrom, J.C. Jumas, J.M. Tarascon, *J. Mater. Chem.* 17 (2007) 3759.
- (76) M.M. Thackeray, J.T. Vaughey, L.M.L. Fransson, *J. Met.* 54 (2002) 20.
- (77) Ke Wang, et al., *Journal of New Materials for Electrochemical Systems* (2007) 10, 167-170
- (78) Xiuyan Wang, et al., *Journal of Power Sources*, Volume 184, Issue 2, 1 October 2008, Pages 508–512.
- (79) Bruno Scrosati\*, Jürgen Garche, *J. Journal of Power Sources* 195 (2010) 2419–2430
- (80) S. Panero, P. Reale, F. Ronci, B. Scrosati, P. Perfetti, V. Rossi Albertini, *Chem. Phys.* 3 (2001) 845–847.
- (81) H. Ge, N. Li, D. Li, C. Dai, D. Wang, *J. Phys. Chem. C* 113 (2009) 6324–6326.
- (82) Z.Y. Zhong, C.Y. Ouyang, S.Q. Shi, M.S. Lei, *ChemPhysChem* 9 (2008) 2104–2108.
- (83) P.P. Prosini, R. Mancini, L. Petrucci, V. Contini, P. Villano, *Solid State Ionics* 144(2001) 185–192.
- (84) K.-C. Chou, W.H. Qiu, K. Wu, G.H. Zhang, *Rare Metals* 25 (2006) 399–406.
- (85) Manuel Ortega, Mario Blanco, Eduardo Palenque, Saúl Cabrera, *Rev. Bol. Quím.* Vol. 28, No.2, 2011, 130 – 134
- (86) Kimio Hayashia, Takayuki Terai c, Katsuyoshi Tatenumab T. Yuan, K. Wang, R. Cai, R. Ran, Z. Shao, J.
- (87) Jianlin Li, Claus Daniela, David Wood, *Journal of Power Sources* 196 (2011) 2452–2460.



## INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN PARA LA OBTENCIÓN EN LÍNEA DE MAPAS EÓLICOS DE BOLIVIA

**Mauricio Améstegui Moreno** – [mauricioamestegui@gmail.com](mailto:mauricioamestegui@gmail.com)

Ingeniería Electrónica, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz – Bolivia

**Javier Alexis Andrade Romero** – [ing.aandrade@gmail.com](mailto:ing.aandrade@gmail.com)

Pós-graduação em Energia, Universidade Federal do ABC, Santo André – SP – Brasil

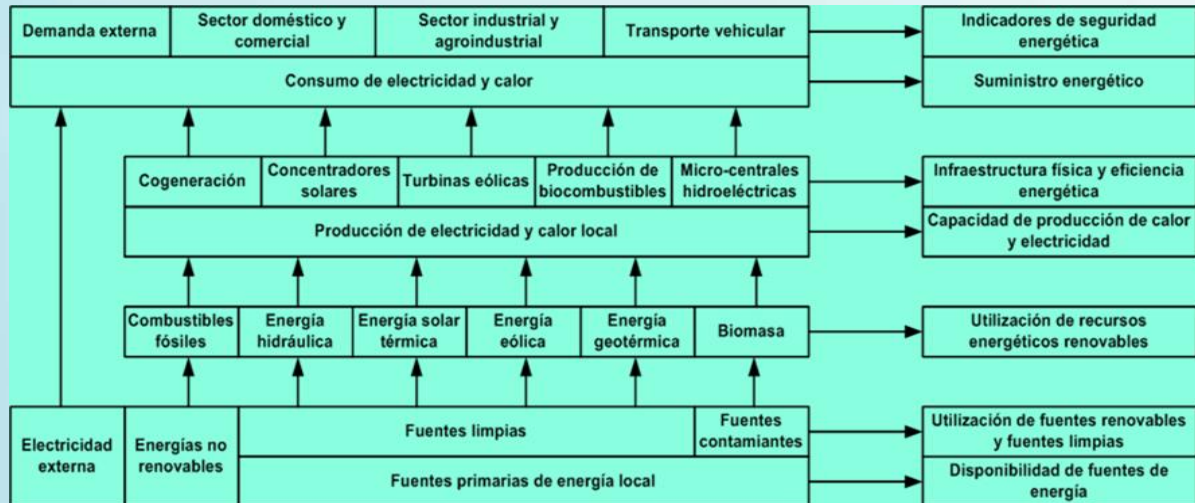
**Resumen.** Para lograr objetivos de seguridad energética se debe garantizar la continua disponibilidad de energía en variadas formas, en suficientes cantidades y a precio razonable. Una herramienta necesaria para el diseño y gestión de plantas de energía eólica, es un mapa de eólico. Este mapa muestra los niveles de intensidad velocidad del viento disponibles. Sin embargo, para propósitos de gestión, donde la tarea clave es el monitoreo del viento, este mapa no es suficiente debido a la intermitencia del recurso energético. Para ello, es necesario disponer de mediciones en línea, de la velocidad del viento y de la densidad del aire, con el propósito de tomar decisiones sobre la utilización del recurso en un determinado momento. En el presente trabajo, se propone un esquema de medición para la obtención en línea de mapas eólicos, basado en la utilización de Dispositivos Identificados aplicados en redes ad-hoc que operan bajo el paradigma del denominado Internet de Cosas (IoT, por su acrónimo en inglés). Inicialmente, se introduce el concepto del IoT, para, posteriormente, definir un modelo referencial de Dispositivo Identificado. A continuación, se construye un modelo de red ad-hoc de sensores, basados en tecnología RFID, para un escenario de aplicación. Finalmente, se detalla un modelo de aplicaciones, para el usuario, basado en el paradigma denominado IoT.

**Palabras clave:** energía eólica, mapa eólico, Internet de Cosas, dispositivo identificado, sensores RFID.

### 1. INTRODUCCIÓN

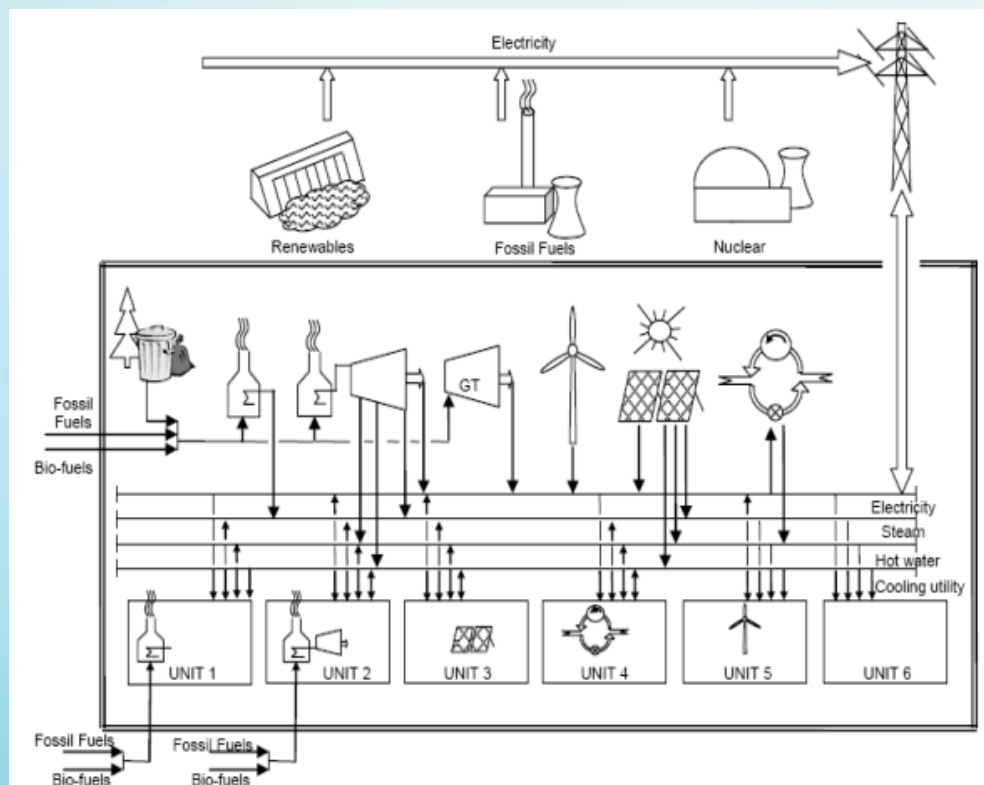
Para lograr objetivos de seguridad energética se debe garantizar la continua disponibilidad de energía en variadas formas, en suficientes cantidades y a precio razonable. Esto implica la implementación de políticas públicas de largo plazo en función de una visión futura de la utilización e integración de recursos energéticos a nivel local, nacional e internacional.

La Figura 1 muestra un modelo de gestión de un sistema de producción de energía a partir de fuentes renovables, el cual toma en cuentas aspectos como el monitoreo de la disponibilidad de fuentes energéticas, utilización de recursos renovables, capacidad de producción de electricidad y calor, infraestructura física, eficiencia energética en la producción, suministro eléctrico e indicadores de seguridad energética.



**Figura 1.** Modelo de gestión de energía con energías renovables, localizadas y distribuidas.

La producción de energía a nivel local o comunitario depende de la disponibilidad de fuentes energéticas. La Figura 2 muestra un modelo comunitario de producción de energía, donde están representadas diferentes fuentes de energía primaria que pueden estar disponibles en cada comunidad, como combustibles fósiles, energía hidráulica, solar térmica, solar fotovoltaica, eólica, geotérmica, biomasa y electricidad proveniente del sistema interconectado. Dichas fuentes primarias se pueden emplear en sistemas de cogeneración, concentradores solares, generación eólica, producción de biocombustibles o micro-centrales hidroeléctricas.



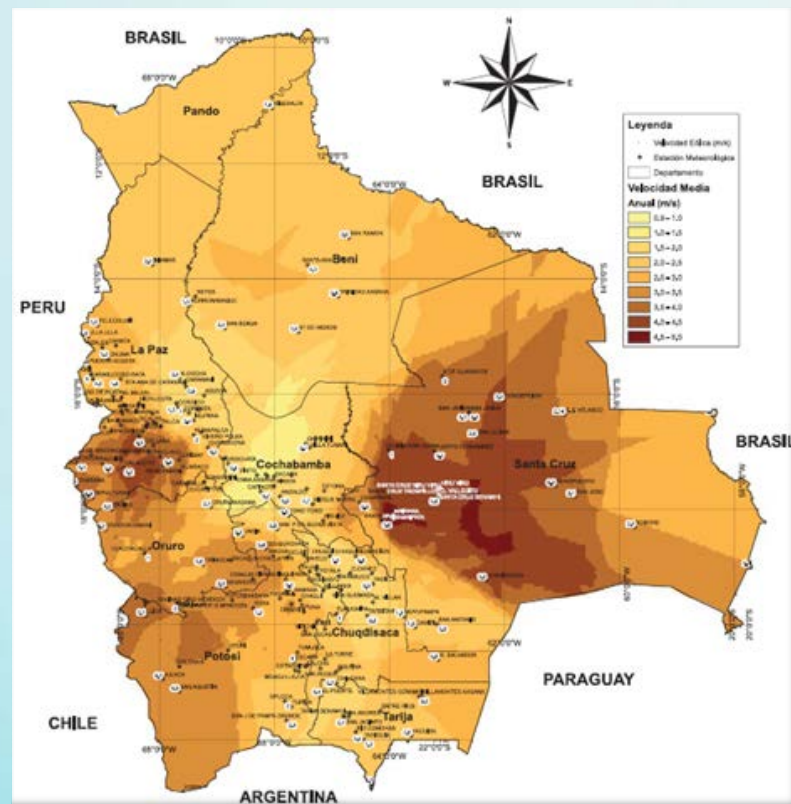
**Figura 2.** Modelo comunitario de producción de energía.  
Centre for Process Integration, The University of Manchester.



Entre las fuentes primarias de energía renovable consideradas limpias se tienen la energía solar y la energía eólica, las cuales comparten la característica de ser de naturaleza intermitente. Un adecuado aprovechamiento de este tipo de energías requiere de un sistema de gestión capaz de monitorear la utilización eficiente del recurso energético en los momentos adecuados. Para esto, es necesario disponer de información en línea, siempre que sea posible, de la medición de las propiedades locales del recurso energético. Esta información también es útil en la etapa de diseño del equipamiento a nivel local.

Una herramienta necesaria para el diseño y gestión de plantas de energía solar o eólica, es un mapa de irradiación o eólico respectivamente. Dichos mapas muestran los niveles de intensidad de irradiación solar o velocidad del viento disponibles en un territorio dado. La Figura 3 muestra el mapa eólico de Bolivia. Las zonas más oscuras del mapa representan las zonas donde se registra en promedio las mayores velocidades del viento.

Sin embargo, para propósitos de gestión, donde la tarea clave es el monitoreo del viento, este mapa suele no ser suficiente debido a la intermitencia del recurso energético. Para ello, es necesario disponer de mediciones en línea de la velocidad del viento y de la densidad del aire con el propósito de tomar decisiones sobre la utilización económica del recurso en un determinado momento. En el presente trabajo, se propone un esquema de medición para la obtención en línea de mapas eólicos, basado en la utilización de Dispositivos Identificados aplicados en redes ad-hoc que operan bajo el paradigma del denominado Internet de Cosas (IoT, por su acrónimo en inglés).



**Figura 3.** Mapa eólico de Bolivia [2]:





Primero se revisan aspectos fundamentales relacionados con la física del viento para propósitos de gestión y una discusión sobre la aerodinámica de turbinas eólicas para propósitos de diseño, con énfasis en turbinas de velocidad variable, las cuales obtienen un mayor aprovechamiento del recurso.

Posteriormente, se introduce el concepto del IoT, y, partiendo de un modelo referencial de Dispositivo Identificado, se construye un modelo de red ad-hoc de sensores para un escenario de aplicación. Asimismo, se propone un sistema de identificación de sensores, basado en tecnología RFID. Finalmente, se presenta un modelo de arquitectura de gestión basado en el paradigma denominado IoT.

### 3. FÍSICA DE LA ENERGÍA DEL VIENTO Y AERODINÁMICA DE TURBINAS EÓLICAS

El propósito principal de una turbina eólica es convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica. Para ello es útil empezar considerando la cantidad de energía y la potencia disponible en el viento.

Suponga que el aire tiene una densidad constante  $\rho$  y que el flujo del viento es incompresible, aunque en la realidad existen efectos de turbulencia y el aire no es uniforme. La densidad del aire depende de la altura y de la temperatura. Al nivel del mar, la densidad a 20°C es cercana a 1.2 Kg/m<sup>3</sup>; este valor disminuye a medida que se incrementa la altura sobre el nivel del mar. Bajo estas consideraciones, la potencia del viento está dada por [2]:

$$P = \frac{dKE}{dt} = \frac{1}{2} \rho A U_0^3 \quad (1)$$

Donde P es la potencia del viento, KE es la energía cinética del viento, A es el área del aspa de una turbina eólica y  $U_0$  es la velocidad del viento en la localización de la turbina. La Ec. (1) sugiere que la potencia de la turbina es proporcional a la densidad del aire y al cubo de la velocidad del viento.

La potencia del viento que la turbina convierte en potencia mecánica en el eje del generador (potencia de la turbina) es la potencia del viento multiplicada por el coeficiente de potencia de la turbina específica  $C_p$ . En general, dicho coeficiente es una función no lineal de dos parámetros de diseño de la turbina: la razón entre la velocidad de rotación de la turbina y la velocidad del viento  $\lambda$ , y el ángulo del viento  $\beta$ . La velocidad del viento está dada por  $\omega_r r$ , donde  $\omega_r$  es la velocidad angular del eje de la turbina y r es el radio del rotor.

En la literatura se reportan varias aproximaciones de esta función no lineal. Tres de las más comunes se proporcionan en las referencias [3-5]. La aproximación trigonométrica [3] y la aproximación exponencial [4] están dadas por las siguientes expresiones:

$$C_p(\lambda, \beta) = (c_1 - c_2 \beta) \sin\left(\frac{\pi(\lambda - c_3)}{(c_4 - c_5 \beta)}\right) - c_6 (\lambda - c_3) \beta \quad (2)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( \frac{6.5c_2}{\lambda} - c_3 \beta - c_4 \beta^2 - c_5 \right) \exp\left(\frac{6.5c_6}{\lambda}\right) \quad (3)$$





En dichos casos es difícil obtener estimaciones de los coeficientes  $c_i$  involucrados en dichas expresiones para obtener curvas características adecuadas de la potencia de la turbina. Una aproximación más simple es la aproximación polinomial [5], dada por:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1(\beta) + c_2(\beta)\lambda + c_3(\beta)\lambda^2 + \dots \quad (4)$$

En la práctica estas curvas, para cada ángulo del viento, pueden ser obtenidas a través del ajuste de los datos experimentales utilizando, por ejemplo, una herramienta como el *Curve Fitting Tool* de Matlab. De esta manera, sería posible obtener curvas características suficientemente precisas para el diseño de turbinas eólica.

#### 4. INTERNET DE COSAS Y TECNOLOGÍAS RFID

El fundamento del concepto de Internet de Cosas (IoT) hace referencia a la omnipresencia de una variedad de cosas u objetos – como los identificados por radiofrecuencia (RFID), sensores, actuadores, teléfonos móviles, etc. – que, a través de diferentes esquemas de direccionamiento, son capaces de interactuar entre si y cooperarse para alcanzar objetivos comunes [6]. Otra definición interesante es la expuesta en Networked Enterprise & RFID Micro & Nanosystems, 2008 [8], indica que el IoT es una red mundial de objetos interconectados con un único direccionamiento, en base a protocolos de comunicación estándar [8]. En este sentido, puede ser evidenciado que en la literatura no existe un consenso estricto en la definición del IoT, sin embargo, esto testimonia el reciente y fuerte interés que existe en el tema [7].

De acuerdo con Presser y Gluhak, 2009 [9], la RFID se mantiene a la vanguardia de las tecnologías que impulsan el paradigma del IoT. Debido, básicamente, a la madurez, bajo costo, y soporte de la comunidad empresarial a esta tecnología.

La RFID está basada en el uso de una red inalámbrica que utiliza campos de radiofrecuencia electromagnética para transmitir datos de una etiqueta adherida a un objeto [10]. El objetivo principal de la RFID es de identificación y rastreamiento de objetos. Algunas etiquetas RFID no requieren baterías y son alimentadas por los mismos campos electromagnéticos utilizados para leerlos. Sin embargo, otros utilizan una fuente de alimentación local y emiten ondas de radio (radiación electromagnética a frecuencias de radio). La etiqueta RFID contiene información, de identificación y otras, almacenada electrónicamente y puede ser leída a varios metros de distancia a través de un lector RFID. Una ventaja importante de esta etiqueta RFID es que no tiene que estar dentro de la línea de visión del lector, por tanto, puede ser leída siempre que el objeto esté dentro del alcance del lector.

A continuación, en la Tabla 1, se muestran los rangos de frecuencia de mayor alcance utilizados en la tecnología RFID.

Rango	Rango de Frecuencia	Longitud de onda	Frecuencia	Standard
Baja Frecuencia	30kHz a 300kHz	10km a 1km	30-50kHz 125/134kHz 131/450kHz	USID 18000-2 IEEE P1902.1/ RuBee
Media Frecuencia	300kHz a 3MHz	1km a 100m		
Alta Frecuencia	3MHz a 30MHz	100m a 10m	6.78MHz 7.4-8.8MHz 13.56MHz 27MHz	18000-3 ISO/IEC 15693 ISO/IEC 14443/NFC ISO/IEC 10536

**Tabla 1:** Rango y alcance de transmisión de radio frecuencia [11]



## 5. MODELO DEL DISPOSITIVO IDENTIFICADO BAJO EL PARADIGMA DEL IOT

A continuación, se definirá un modelo conceptual de Dispositivo Identificado, basado en el concepto expuesto en Serbanati, et al., 2011 [12]. Este Dispositivo, instalado en el punto de medición, será capaz de comunicarse, bajo el paradigma del IoT, con el usuario, quien, por una parte, tendrá acceso en línea a las variables locales medidas y, por otra parte, podrá establecer instrucciones de comando.

En este sentido, serán introducidos los componentes básicos del modelo conceptual del Dispositivo Identificado, así como su interrelación. Inicialmente, partimos sobre el supuesto de que el usuario tiene una meta de interacción con una parte del medio físico, llamada “entidad física”.

En el caso particular de este estudio, la meta del usuario será la de medir dos variables del medio físico, velocidad del viento y densidad del aire. Para este efecto, el usuario deberá interactuar con una denominada “Entidad Digital” a fin de satisfacer la meta asignada a la Entidad Física. Por otra parte, la Entidad Física deberá poder ser identificada en el mundo digital, lo cual se puede realizar a través de otro elemento, llamado “Proxy Digital”.

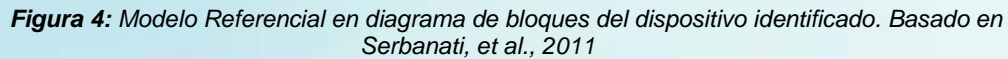
En el contexto del IoT, el Proxy Digital forma parte de la Entidad Digital y está bi-unívocamente asociada con la entidad física que representa. Lo que significa que, cada Proxy Digital debe tener una y sólo una identificación que representa a la Entidad Física. La asociación entre el Proxy Digital y la Entidad Física deberá ser establecida automáticamente.

En seguida, se define al “Dispositivo Identificado” como una extensión de la Entidad Física, la cual, al mismo tiempo, está asociada al Proxy Digital. Este Dispositivo Identificado media la interacción entre la Entidad Física (la cual no tiene ninguna proyección sobre el mundo digital) y el Proxy Digital (el cual no tiene ninguna proyección sobre la Entidad Física).

Desde el punto de vista funcional, el Dispositivo Identificado **tiene los siguientes tres bloques funcionales:**

- **Los sensores proporcionan información de la entidad física** que monitorea. En el caso estudiado, el sistema contará con dos sensores, de velocidad del viento y de densidad de aire. Por otra parte, el sensor lee la información del Tag, a través de radio frecuencia. La lectura del tag, puede estar intrínsecamente ligada a la entidad física, como en el caso de dispositivos integrados, o puede ser derivada de la observación de tags externas (provenientes de otros Dispositivos).
- Tags, son las etiquetas usadas para la identificación de la Entidad Física. Son leídos a través de sensores especiales, llamados lectores RFID.
- Los actuadores pueden modificar el estado físico de la entidad física. Los actuadores pueden mover (trasladar, rotar, etc.) simples entidades físicas o activar/desactivar funcionalidades. En el caso estudiado, el actuador podrá ser utilizado para la etapa de gestión de la generación de energía eléctrica, es decir, una vez el generador eólico sea instalado.

En este sentido, en la Figura 4 se grafica el modelo conceptual del Dispositivo Identificado y los módulos básicos que lo componen.



Los usuarios que necesitan interactuar con estos Dispositivos Identificados deben hacerlo a través del uso de “Aplicaciones”. Estas Aplicaciones son componentes digitales e identificables, que implementan diferentes capacidades. Más de una aplicación puede estar asociada a una Entidad Digital y por lo tanto a un Dispositivo Identificado. Ver Figura 5.



- Recuperación de las propiedades físicas de la Entidad Física asociada, capturada a través de sensores;
- Modificación de las propiedades físicas de la Entidad Física asociada, a través del uso de actuadores.
- Recuperación y modificación de las propiedades digitales del Proxy Digital asociado.



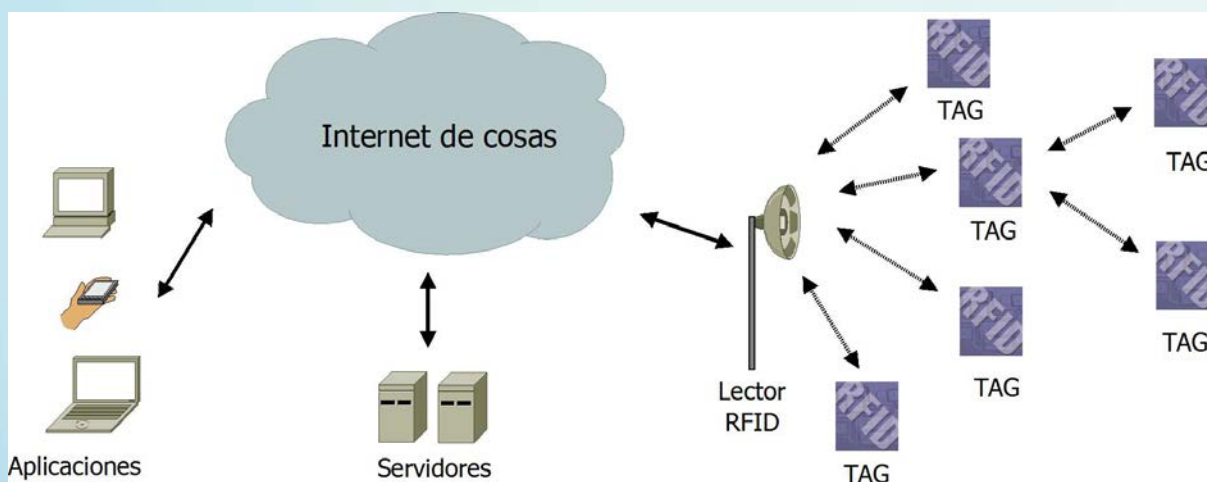


## 6. ARQUITECTURA DE LA RED Y APLICACIONES

La Figura 6 ilustra un modelo básico de una arquitectura de gestión, basado en redes ad-hoc de sensores, el Internet de Cosas y diversas aplicaciones de gestión de la información. Los primeros componentes de la arquitectura fueron descritos en las secciones anteriores. A continuación se describe el componente de aplicaciones.

Puesto que el modelo de gestión de producción de energía, basado en recursos renovables, está caracterizado por la distribución geográfica de sistemas localizados, posiblemente en comunidades dentro de una extensión territorial, es natural asumir que la información de los puntos geográficos puede ser manejada utilizando un sistema de información geográfica (GIS por su acrónimo en inglés) que procesa diversas aplicaciones.

El término GIS (ver por ejemplo [13,14]) actualmente está siendo aplicado a sistemas computarizados de captura, almacenamiento y procesamiento de datos disponibles en dispositivos empotrados con hardware y software especialmente diseñados para una entidad física particular (en el presente artículo sensores y actuadores en una unidad de generación eólica o en una estación meteorológica), por lo que constituyen un complemento importante para realizaciones basadas en el paradigma de el IoT.



**Figura 6:** Modelo de arquitectura de gestión, basado en red ad-hoc de sensores.

En un GIS, los datos espaciales están comúnmente organizados en forma de capas. En el caso de la gestión de sistemas distribuidos de energía, dichas capas de información pueden describir la topografía de puntos específicos, elementos medioambientales, recursos energéticos, sistemas de generación, potencia disponible o déficit de potencia, carga acoplada, interconexiones, costos de producción, etc. El traslape de dichas capas puede dar lugar a diversas aplicaciones que tienen que ver con la gestión de los sistemas distribuidos y la producción de indicadores de seguridad energética. La implementación de estas aplicaciones usualmente está basada en el uso de tecnologías de minería de datos [15].

En el presente artículo la aplicación está orientada a la obtención en línea de mapas eólicos. Para esto es razonable construir una capa de información geográfica, contenida en una base de datos que contenga información de la localización, elevación, densidad del aire y velocidad del

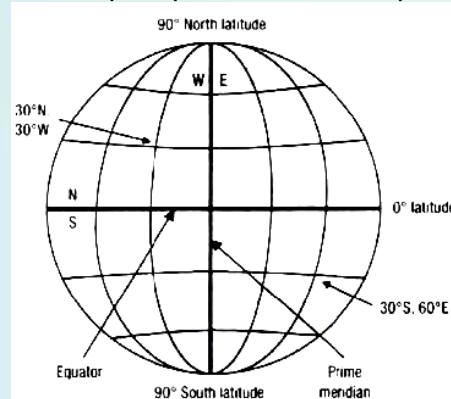




viento de las entidades físicas distribuidas en las redes ad-hoc adjuntas al IoT, de forma que pueda ser procesada por un sistema de información geográfica.

Dicho sistema debe ser capaz de manipular y desplegar los datos espaciales almacenados en una tabla de la base de datos, proporcionando resultados gráficos y tabulares con suficiente rapidez. La terminología para referirse a la base de datos de un GIS varía dependiendo del software utilizado. Para el tipo de aplicación descrita en el presente artículo, puede ser de mucha utilidad un GIS que muestre tanto mapas con la topografía del territorio (mapas de relieve), como mapas planos donde se visualice el gradiente de intensidad de los datos medidos, provisto además de los suficientes recursos gráficos y/o computacionales para proyectar y traslapar la información de la capa topográfica y la información de la capa de densidad del aire o velocidad del viento. Más aún, podría incluir capacidades para proyectar a mapas, la distribución de potencia aprovechable del viento para diferentes tipos de turbinas. Por tanto, el núcleo de un sistema de información geográfica es la base de datos, donde los conceptos clave son las proyecciones a mapas y la estructura de datos.

Para una adecuada proyección de los datos es necesario elegir un sistema de coordenadas. El sistema de coordenadas más común es el sistema de latitud y longitud, algunas veces llamado sistema de coordenadas geográfico. Ver (ver Figura 7). El sistema de coordenadas geográfico puede ser utilizado para localizar cualquier punto sobre la superficie de la tierra.



**Figura 7:** Sistema de coordenadas geográfico [15]

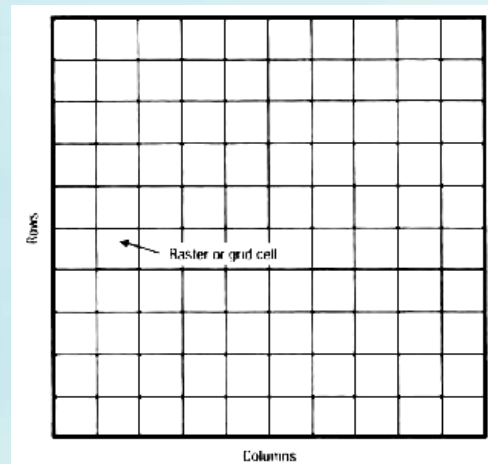
Las proyecciones de áreas iguales o equivalentes son apropiadas para mantener el tamaño relativo y las características de la forma de la tierra cuando es de interés la comparación de tamaños. Estas proyecciones preservan el tamaño y la forma de la tierra, pero sacrifican relaciones de distancia. Sin embargo, parece ser la mejor opción para la representación de mapas eólicos.

Por su parte la elección de una estructura de datos está muy vinculada al software utilizado por el sistema de información geográfico. Para representar datos espaciales comúnmente se utilizan dos tipos de formatos de estructura de datos: raster y vectorial. Ambas tienen fortalezas y debilidades, aunque la más común es la vectorial. Sin embargo, es importante notar que a mayoría de los GIS utilizan una combinación de ambas.

Una estructura de datos raster se construye mediante lo que se considera celda o pixels en una imagen digital. Está organizada y referenciada por su posición en la fila y la columna de un archivo de datos. Las estructuras de datos raster dividen a la superficie de la tierra mediante

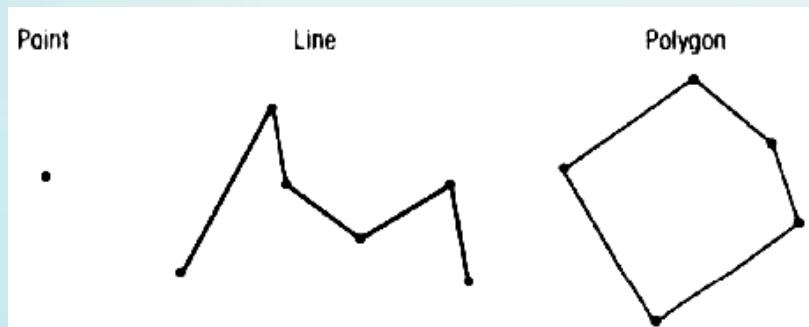


formas regulares, usualmente cuadrados (ver Figura 8) para describir todas las áreas representadas por cada celda.



**Figura 8.** Estructura de datos raster [15]

Los datos vectoriales, comparados con los datos raster, generalmente se construyen de manera irregular. Los datos vectoriales generalmente se agrupan en tres categorías: puntos, líneas o polígonos (ver Figura 9). Esta categorización algunas veces es referida como modelo de características, ya que casi cualquier característica sobre la superficie de la tierra puede ser descrita utilizando una de estas tres formas o una combinación de ellas. Los puntos son los más básicos de las formas pero definen la esencia de todas las tres formas. Una línea es un conjunto de puntos conectados. Un polígono es una colección de líneas que forman un lazo cerrado.



**Figura 9.** Formas vectoriales de la estructura de datos [15].

La elección de una estructura de datos dependerá fundamentalmente de la complejidad del software del sistema de información geográfica y de las prestaciones que éste tenga para desplegar la información requerida. Aparentemente, en el caso de construcción de mapas eólicos, se puede lograr excelentes aproximaciones en los resultados con cualquiera de ellas.

## 7. CONCLUSIONES

El presente artículo expone la factibilidad de lograr la convergencia de varias tecnologías bajo el paradigma del Internet de Cosas. La arquitectura construida, en base al Dispositivo Identificado, permite mostrar mapas eólicos en línea (desplegando velocidad del viento y densidad del aire), que por su carácter intermitente requiere de supervisión y monitoreo continuo a lo largo del tiempo.



El Dispositivo Identificado representa, además, al componente base de un sistema de gestión de producción de energía eléctrica de sistemas distribuidos (localizados en comunidades dentro de municipios). Se obtuvo como resultado una información espacial de relativa alta resolución y útil para toma de decisiones. El presente planteamiento, puede ser extendido a mapas de irradiación solar o de condiciones medioambientales localizadas en puntos de interés para el aprovechamiento de energía renovable y limpia.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Fuente: Transportadora de Electricidad, Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas, 2008
- (2) D. Wood, Small wind turbines. Analysis, design and application Springer-Verlag London Limited 2011.
- (3) M. Haro, A.F.Ameal, D.E. Corbellini, Variable speed control of wind turbines using tuning functions design. Faculty of Nautical Sciences, University of Cadiz.Polígono Río San Pedro 2001
- (4) H. Overseth, Doubly fed induction generator in a wind turbine. Technical Report at Norwegian University of Science and Technology, 2002
- (5) M. Godoy, B.K. Bose, R.J. Spiegel, Fuzzy Logic Based Intelligent Control of a Variable Speed Cage Machine Wind Generation System. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 12 No. 1, January 1997.
- (6) D. Giusto, A. Iera, G. Morabito, L. Atzori (Eds.), The Internet of Things, Springer, 2010. ISBN: 978-1-4419-1673-0.
- (7) Atzori, L. and Iera, A. and Morabito, G.,The internet of things: A survey, Journal of Computer Networks, Elsevier, vol. 54, N 15, 2010
- (8) Networked Enterprise & RFID Micro &Nanosystems, in: Co-operation with the Working Group RFID of the ETP EPOSS, Internet of Things in 2020, Roadmap for the Future,2008.
- (9) M. Presser, A. Gluhak, The Internet of Things: Connecting the RealWorld with the Digital World, EURESCOM mess@ge – The Magazine for Telecom Insiders, vol. 2, 2009, <<http://www.eurescom.eu/1680> message>.
- (10) Weis, S.A., 'RFID and Security', Handbook of information security, Wiley, vol. 3, 2006
- (11) O. Vermesan, SINTEF, Contribution to Strategic Research Agenda Internet of Things and Smart Systems Integration, Project: RFID Resource Network, RFID Technology Roadmap, 2009.
- (12) Serbanati, C. Medaglia y U. Ceipidor, Building Blocks of the Internet of Things: State of the Art and Beyond, en: Deploying RFID – Challenges, Solutions, and Open Issues, INTECH OPEN, pp. 351-366, 2011.
- (13) M-G. Wing, P. Bettinger, Geographic Information Systems, Applications in Natural Resource Management.Oxford University Press Canada 2008
- (14) L-E.Johnson, Geographic Information Systems in Water Resources Engineering, CRC Press Taylor & Francis Group, 2009.
- (15) V. Bogorny, C.A. Heuser, L.O. Alvares, A conceptual data model for trajectory data mining. GIScience 2010 LNCS 6292, pp. 1-15, 2010 Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.





## PRODUCCIÓN DE FRÍO A PARTIR DE LA UTILIZACIÓN DE ENERGÍA NO CONVENCIONAL

**PhD Edwin Víctor Lamas Sivila** – [edwinlamas@mecanica.edu.bo](mailto:edwinlamas@mecanica.edu.bo)

Universidad Técnica de Oruro, Facultad Nacional de Ingeniería, Ingeniería Mecánica

**Msc. Ing. Miguel Ruiz Orellana** – [miguelruiz@mecanica.edu.bo](mailto:miguelruiz@mecanica.edu.bo)

Universidad Técnica de Oruro, Facultad Nacional de Ingeniería, Ingeniería Mecánica

**Resumen.** *El presente estudio tiene como objetivo general, proponer un método para evaluar el potencial de frío solar a partir de un modelo simplificado. En la primera parte se ha asumido un acople directo entre los captadores solares y la máquina de absorción simple efecto, modelo que no contempla ningún tipo de almacenamiento intermedio en el sistema solar. La ecuación obtenida muestra la dependencia de la temperatura del generador con la temperatura de equilibrio de los colectores solares y un básico diseño del sistema (máquina de absorción – colectores solares). En la segunda parte del artículo se muestra el potencial de ahorro en el comportamiento térmico de un edificio que es acoplado al sistema de refrigeración solar. El servicio de aire acondicionado se ofrece en dos temperaturas medias: 5°C y 14°C. La primera de ellas por el uso de fan-coils, mientras que el segundo por el empleo en suelos o techos fríos como elementos terminales. El diseño óptimo entre ambos sistemas se estudia con el fin de abastecer la mayor carga de refrigeración. Los efectos de la tecnología empleada en la máquina son también abordados en el presente escrito.*

**Palabras clave:** *energía solar, eficiencia energética, enfriamiento por absorción, bajo carbono, eficiencia energética en edificios.*

### 1. INTRODUCCIÓN

La eficiencia energética o la reducción del consumo de energía hoy en día se ha convertido en una consigna inmersa en todos los ámbitos. Con ello surge la preocupación del uso racional de la energía o la búsqueda de energías alternativas como el caso de las energías no convencionales (solar, eólica, geotermia) que resuenan como mecanismos para reducir y/o anular el impacto del hombre sobre el cambio del clima del planeta.

Este artículo se centra en ver el potencial del uso de la energía solar térmica para el acondicionamiento de viviendas (unifamiliares y en bloque). El centro del estudio es la producción de lo que se conoce abreviadamente como frío solar, que es la refrigeración producida con calor proveniente de captadores solares térmicos y el uso de un sistema para la conversión del calor (en este caso una máquina de frío por absorción de simple efecto).

Para la generación de frío solar se usan captadores solares fototérmicos que van conectados directamente a una máquina de absorción LiBr-H<sub>2</sub>O, con un modelo del acople sencillo y estático. El modelo de los captadores es la conocida ecuación lineal algebraica, la máquina de absorción sigue la formulación presentada por Ziegler (1999), Coronas (2010), conocida como ecuación característica. Se han usado modelos sencillos para ilustrar el método, no obstante análogamente se podrían usar modelos más complejos de ambos elementos. La idea es mostrar los efectos fundamentales del acople. A consecuencia de lo anunciado se obtiene la  $t_g^{eq}$  (temperatura de equilibrio) en el generador de la máquina de absorción y los captadores. Con





ello se consigue desarrollar potencia de frío disponible, para diferentes parámetros de diseño de ambos sistemas.

La condición que permite que trabajen directamente acoplados es que la potencia del campo de captadores sea igual en cada instante a la potencia para accionar la máquina. Esto da como resultado una temperatura  $t_g^{eq}$  que coincide con la temperatura media de captación y con la de generación que cumple la condición anterior.

A partir de aquí es posible calcular la potencia de frío disponible hora a hora durante un año típico, para diferentes parámetros de diseño de ambos componentes del sistema y para diferentes zonas climáticas. Adicionalmente se obtiene la capacidad total de producción de frío en un año. Esto es importante para saber hasta qué punto es posible cubrir la demanda de frío del edificio con la producción solar de frío.

## 2. ACOPLE DIRECTO PANELES FOTOTÉRMICOS CON EL SISTEMA DE ABSORCIÓN SIMPLE EFECTO

La potencia térmica de un campo de captadores solares depende básicamente de la intensidad de la radiación ( $I$ ), de la temperatura ambiente ( $t_{amb}$ ) y de la temperatura media del agua caliente producida. En el estudio la temperatura se hará coincidir con la temperatura media del generador ( $t_g$ ) de la máquina de absorción que se pretende accionar con energía solar.

Para una máquina de absorción si  $t_c$  (temperatura de condensación) y  $t_e$  (temperatura de evaporación, producción de agua fría) se mantienen fijas y se varía  $t_g$  resulta que, a mayor  $t_g$  mayor es la capacidad de producción de frío y por lo tanto mayor la potencia requerida en el generador. Así ambas tendencias son contrapuestas; a mayor  $t_g$  mayor necesidad de potencia para accionar la máquina pero menor la potencia captada del sol.

Por lo tanto, dada un área de captadores de un cierto tipo y un tamaño de máquina, debe existir una temperatura de equilibrio que haga que la potencia recogida en los captadores a esa  $t_g^{eq}$  sea igual a la potencia necesaria en el generador de la máquina en ese momento. Además, hay que señalar que las máquinas necesitan una temperatura mínima del generador  $t_g$  para arrancar.

De lo anterior se deduce que es posible que si la relación ( $\Psi$ = área de campo solar / tamaño de la máquina= $A_{col}/s$  - $s$ =conductancia total- $m^2K/W$ ) no fuera lo suficientemente elevada, la  $t_g^{eq}$  estuviera por debajo de esa temperatura mínima y ocasionaría que el acoplamiento directo fuera imposible.

### 2.1 CAPTADORES SOLARES

La potencia de los captadores solares obedecen la ecuación lineal y se puede expresar como:

$$Q_{Col} = A_{Col} \cdot I \cdot \eta \cdot (t_{amb}, t_g, I) \quad (1)$$

Dónde el rendimiento es expresada como:

$$\eta(t_{amb}, t_g, I) = FR_{\tau\alpha} - FRU_L \cdot \left( \frac{t_g - t_{amb}}{I} \right) \quad (2)$$



Donde:

- $I$  radiación solar total ( $W/m^2$ ).
  - $Q_{col}$  potencia térmica captada ( $W$ ).
  - $A_{col}$  área de los captadores ( $m^2$ ).
  - $FR_{\tau a}$  factor óptico (en este trabajo se adopta un valor de 0.825).
  - $FRU_L$  pérdida por metro cuadrado (se adopta valor de  $1.1 W/m^2 K$ ).
  - $t_g$  temperatura media del agua en los captadores ( $^{\circ}C$ ).
  - $t_{amb}$  temperatura seca del ambiente exterior ( $^{\circ}C$ ).
- (nota: los valores corresponden a un captador de vacío).

## 2.2 MÁQUINAS DE ABSORCIÓN SIMPLE EFECTO Li Br-H<sub>2</sub>O

La máquina de absorción se formula a partir de la ecuación característica planteadas por Ziegler y se resume:

$$s = \frac{1}{\frac{G}{UA_g z_g} + \frac{A}{UA_a z_a} + \left( \frac{C}{UA_c z_c} + \frac{1}{UA_e z_e} \right)} \quad (3)$$

Dónde:

- $s$  es proporcional a la conductancia total ( $UA W/K$ ) instalada en la máquina (evaporador, condensador, absorbedor, generador), que representa el tamaño térmico de todos los elementos.
- $G, A, C$  son coeficientes de entalpía (generador, condensador, evaporador y absorbedor) y son números aproximadamente constantes y que dependen de las propiedades de la mezcla LiBr-H<sub>2</sub>O. El único valor importante en la práctica es  $G$  valor de referencia que se toma es de 1.04 (A. Coronas 2010).
- $UA$  capacidad global de intercambio de calor de un elemento de la máquina ( $W/K$ ).

Subíndices:

- $g, a, c, e$  representan al generador, absorbedor, condensador y evaporador de la máquina de absorción respectivamente.

$$\alpha = \left( \frac{1}{UA_g z_g} + \frac{1}{UA_a z_a} \right) \cdot s \quad (4)$$

- $\alpha$  distribución de la capacidad de intercambio dentro de la máquina de absorción (representa un parámetro tecnológico).
- $z$  corrección del salto de temperaturas en el intercambio (en la práctica, los valores toma cercano a la unidad).

La potencia de frío de la máquina se escribe:

$$Q_e = s \cdot (\Delta\Delta t - \Delta\Delta t_{\min}) \quad (5)$$

Dónde:

$$\Delta\Delta t = t_g - t_c - B(t_a - t_e) \quad (6)$$

con  $B$  aproximadamente constante, para LiBr-H<sub>2</sub>O vale alrededor de 1.15.

A  $\Delta\Delta t$  se la conoce como el doble salto de temperaturas y su sentido físico es la intensidad de la fuerza termodinámica para producir frío. (Las pérdidas internas se indican con  $s \Delta\Delta t_{\min}$ ).



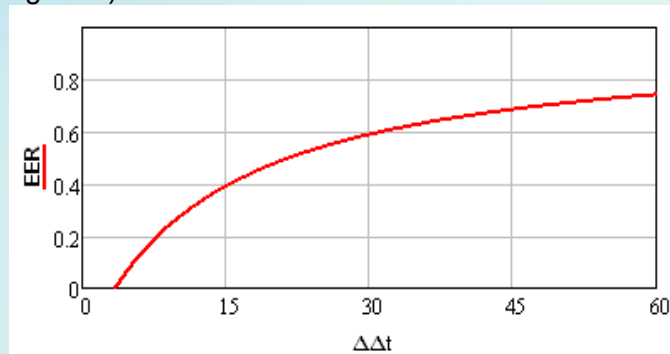
De manera que cuanto mayor sea la intensidad de la fuerza, mayor será la capacidad de generación de frío. Por ejemplo si  $s=0.9 \text{ kW/k}$ ,  $\Delta\Delta t_{\min}=1.53 \text{ K}$  y la potencia del evaporador será igual a:

$$\dot{Q}_e = 0.9 \cdot \Delta\Delta t - 1.53 \quad (8)$$

El rendimiento de una máquina de absorción de simple efecto se puede expresar aproximadamente, según Ziegler, como:

$$EER = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g} = \frac{\Delta\Delta t - \Delta\Delta t_{\min}}{G \cdot \Delta\Delta t + \left(\frac{1}{\alpha} - G\right) \cdot \Delta\Delta t_{\min}} \quad (9)$$

El rendimiento también está relacionado en forma directa al  $\Delta\Delta t$  de la máquina. A mayor  $\Delta\Delta t$  mejor rendimiento (ver Figura 1)



**Figura 1.** Rendimiento máquina de absorción en función de  $\Delta\Delta t$  ( $\Delta\Delta t_{\min} = 3.5 \text{ K}$ ,  $G = 1.04$ ,  $\alpha = 0.2$ )

A nivel práctico son importantes las expresiones de  $Q_e$  y de  $EER$ :

$$EER = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g} = \frac{\Delta\Delta t - \Delta\Delta t_{\min}}{G \cdot \Delta\Delta t + \left(\frac{1}{\alpha} - G\right) \cdot \Delta\Delta t_{\min}} \quad (10)$$

$$= EER(\Delta\Delta t, \Delta\Delta t_{\min}, \alpha)$$

$$\dot{Q}_e = s \cdot (\Delta\Delta t - \Delta\Delta t_{\min}) = \dot{Q}_e(\Delta\Delta t, \Delta\Delta t_{\min}, s) \quad (11)$$

Para una máquina se pudiera calcular  $\{\Delta\Delta t_{\min}, s, \alpha\}$  se tendría caracterizada la máquina de absorción por completo. Esto se puede conseguir a partir de datos de catálogo. Basta con dos puntos de funcionamiento, esto es, valores de  $Q_e$  y  $EER$  para dos valores de  $\Delta\Delta t$  (que llamamos  $\Delta\Delta t_1$  y  $\Delta\Delta t_2$ ). Los valores de  $\Delta\Delta t_1$  y  $\Delta\Delta t_2$  dependen de las condiciones de funcionamiento. Las temperaturas deben ser las temperaturas medias de las corrientes que pasan por cada elemento de la máquina. La media entre la temperatura de entrada y la salida de cada elemento. Esto da un sistema de cuatro ecuaciones y cuatro incógnitas:

$$\dot{Q}_e 1 = \dot{Q}_e(\Delta\Delta t_1, \Delta\Delta t_{\min}, s); \quad \dot{Q}_e 2 = \dot{Q}_e(\Delta\Delta t_2, \Delta\Delta t_{\min}, s)$$

$$EER1 = \frac{\dot{Q}_e 1}{\dot{Q}_g 1} = EER(\Delta\Delta t_1, \Delta\Delta t_{\min}, \alpha); \quad EER2 = \frac{\dot{Q}_e 2}{\dot{Q}_g 2} = EER(\Delta\Delta t_2, \Delta\Delta t_{\min}, \alpha)$$



Dónde;  $\{Q_{e1}, Q_{e2}\}$  son las potencias de frío y  $\{EER1, EER2\}$  son los rendimientos en las condiciones de operación 1 y 2 respectivamente. Las incógnitas son  $\{s, \alpha, \Delta\Delta t_{min1}, \Delta\Delta t_{min2}\}$ . En realidad las pérdidas dependen del punto de operación de la máquina por eso se calculan 2 valores de  $\Delta\Delta t_{min}$ . Por simplificar, en este artículo se ha usado un valor medio de  $\Delta\Delta t_{min}$ . Para un mismo fabricante, con una serie de máquinas, se puede comprobar que el parámetro  $\alpha$  no cambia con el tamaño de la máquina. De algún modo es un parámetro relacionado con la tecnología del fabricante. El parámetro  $s$  se escala con el tamaño térmico de la máquina y es el valor que cambia dentro de una serie del fabricante. Está inmerso dentro de la capacidad tecnológica del fabricante el conseguir valores grandes de  $s$  con tamaños físicos pequeños. Veamos un ejemplo. Del catálogo de un fabricante se extrajo la siguiente información de una máquina de simple efecto:

#### General

$\Delta t_g$	salto de temperatura de la corriente de agua en el generador:	
10°C		
$\Delta t_c$	salto de temperatura de la corriente de agua en el condensador:	3.5°C
$\Delta t_a$	salto de temperatura de la corriente de agua en el absorbedor:	3.5°C
$\Delta t_e$	salto de temperatura de la corriente de agua en el evaporador:	5.0°C

#### Punto 1

$t_a$	temperatura de entrada al absorbedor:	30°C
$t_g$	temperatura de entrada al generador:	98°C
$t_e$	temperatura de salida del agua fría (evaporador):	7°C

El  $\Delta\Delta t$  calculado usando las temperaturas medias de las corrientes en cada elemento es:

$$\Delta\Delta t_1 = 31.64 \text{ } ^\circ\text{C}$$

En estas condiciones el rendimiento y la potencia de frío es:

$$EER1 = 0.75 \quad , \quad Q_e = 151 \text{ kW}$$

#### Punto 2

$t_a$	temperatura de entrada al absorbedor:	32°C
$t_g$	temperatura de entrada al generador:	90°C
$t_e$	temperatura de salida del agua fría (evaporador):	7°C

El  $\Delta\Delta t$  calculado usando las temperaturas medias de las corrientes en cada elemento es:

$$\Delta\Delta t_1 = 25.10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

En estas condiciones el rendimiento y la potencia de frío es:

$$EER1 = 0.739 \quad , \quad Q_e = 135.9 \text{ kW}$$

Lo cual da como resultado:

$$\Delta\Delta t_{min1} = 0.03 \text{ } ^\circ\text{C} \quad , \quad \Delta\Delta t_{min2} = 0.02 \text{ } ^\circ\text{C} \quad , \quad \alpha = 0.002 \quad , \quad s = 4.778 \text{ kW/K.}$$





De estos resultados se puede inferir que este fabricante dimensiona generosamente el intercambiador de solución intermedia (por eso los términos de pérdidas son pequeños) y asigna una capacidad de intercambio muy grande a generador y absorbedor ( $\alpha$  es pequeño) en comparación con la capacidad total de intercambio instalada. Cualquier otra máquina de la serie de este fabricante comparte estos valores salvo  $s$  que crece con la potencia nominal de la máquina.

### 3. TEMPERATURA DE EQUILIBRIO Y PRODUCCIÓN DE “FRÍO SOLAR”

La condición para que puedan ser acoplados directamente el campo de captadores y la máquina, es la igualdad de potencia entre la potencia de captación solar y la necesaria en el generador de la máquina Lamas et. al. (2011). La ecuación siguiente se ha escrito de modo que quede explícita la dependencia de ambas potencias con la  $t_g$ :

$$A_{Col} \cdot I \cdot \eta(t_{amb}, t_g, I) = Q_{Col} = Q_g = \frac{Q_e(\Delta\Delta t(t_g), \Delta\Delta t_{min}, s)}{EER(\Delta\Delta t(t_g), \Delta\Delta t_{min}, \alpha)} \quad (12)$$

Si de la ecuación anterior se despeja la  $t_g$  y se la llama  $t_g^{eq}$  se obtiene la siguiente ecuación:

$$t_g^{eq} = \frac{FRU_L \cdot \psi}{FRU_L \cdot \psi + 1000 \cdot G} \cdot \left[ t_{amb} + \frac{1000}{FRU_L} \left( I \cdot FR_{\tau\alpha} + \frac{G}{\psi} t_a + \frac{G \cdot B}{\psi} (t_c + t_e) - \left( \frac{1}{\alpha} - G \right) \frac{\Delta\Delta t_{min}}{\psi} \right) \right] \quad (13)$$

Esta es la temperatura que permite que ambas potencias se equilibren, que como se puede comprobar incluye la dependencia de; la tecnología de los captadores, la máquina de absorción, las condiciones ambientales (radiación solar y temperatura), la temperatura de servicio (temperatura de producción de frío) y la de condensación. Es importante recordar que la  $\Psi$  ( $m^2K/W$ ) que aparece es la relación anteriores es la relación, entre el área de captadores (área de un determinado tipo de captador solar) dividido por el tamaño térmico de la máquina de absorción  $s$ :

$$\Psi = \frac{A_{col}}{s} \quad (14)$$

Al modelo matemático representado por la ecuación anterior, se aplica las siguientes restricciones:

- La temperatura de equilibrio no será mayor a 110°C. Valor límite.
- La temperatura de equilibrio no debe ser menor a 75°C (a valores menores de esta temperatura el acople no es posible).

Además, para conseguir la aplicación de los modelos, se realiza la siguiente consideración:

#### • Localidad:

- Datos de las condiciones meteorológicas medias de cada una de las zonas (un año tipo juliano). Se corresponden con los valores obtenidos del Ministerio de Industria y Comercio de España.
- Descripción geográfica de la zona (latitud, a.s.n.m).



- **Captadores:**

- Los captadores se ubican con una inclinación de  $-15^\circ$  latitud sud del lugar, asumiendo un diseño óptimo de verano.
- El azimut, de todos los captadores es hacia el sur.
- Superficie de captadores ( $A_{Col}$ ), para realizar cada uno de los estudios se hará variar desde  $5 \text{ m}^2$  hasta  $70 \text{ m}^2$ .
- El valor de  $\Psi$  se hará variar entre 50 y  $700 \text{ m}^2 \text{ K/kW}$ . Se ha constatado que se puede tomar  $\Psi=50 \text{ m}^2 \text{ K/kW}$  como un valor mínimo para que el acople directo sea posible.

- **Máquina de absorción:**

- La temperatura de condensación ( $t_c$ ) será igual a la temperatura húmeda de la localidad.
- $\Delta\Delta t_{min}=3.5^\circ\text{C}$  y dos valores del parámetro tecnológico de la máquina  $\alpha=0.2$  ,  $\alpha=0.5$  uno malo y otro bueno respectivamente.
- La temperatura de evaporación ( $t_e$ ) corresponderá a unidades terminales del tipo fan-coils  $5^\circ\text{C}$  ó suelos/techos fríos asumiendo un valor de agua fría de  $14^\circ\text{C}$ .
- La temperatura de generación ( $t_g$ ) será igual a la temperatura de equilibrio  $t_g^{eq}$ , determinada en la ecuación anterior.
- La temperatura de absorbedor ( $t_a$ ) es igual a la temperatura de húmeda de la localidad menos  $2.5^\circ\text{C}$ .

### 3.1 DISCUSIÓN DEL ACOPLE

En base a los parámetros antes definidos, en esta sección se muestra una discusión sobre el efecto del acople captadores solares-máquina. La discusión se basa en las figuras 2 a la 7.

Las gráficas en 3D muestran la distribución anual según los tres ejes siguientes: hora del día (1-24h), día del año (1-365 días), valor de la variable (potencia de frío, temperatura de equilibrio). Los días de verano se encuentran situados hacia la mitad del eje (para la latitud norte, Europa), lugar dónde se centra la producción de frío.

En la Fig. 2 se muestra la temperatura de equilibrio  $t_g^{eq}$  ( $^\circ\text{C}$ ) y la potencia de frío generada para  $t_e=5^\circ\text{C}$  y en la Fig.3 para  $t_e=14^\circ\text{C}$ . Obsérvese que si la  $t_g^{eq}$  es menor que  $75^\circ\text{C}$  no hay producción de frío.

Si se comparan las gráficas a la izquierda (potencia de frío) en las Figuras 2 y 3 se observan los valores integrados (sumados) de la producción total de frío. Se pueden extraer algunas conclusiones que inicialmente pueden ser sorprendentes. Por ejemplo, si se produce el agua fría a  $5^\circ\text{C}$  se puede producir mayor cantidad de frío anualmente (MJ de frío), que si la temperatura se fija a un valor más elevado (a  $14^\circ\text{C}$ ). Sin embargo, parece que la potencia pico (kW) que se puede obtener es más alta en este segundo caso. Esto no es obvio a primera vista y la causa es la siguiente. Suponga que el sistema captadores-máquina está trabajando de forma acoplada y estable y suba la temperatura de consigna de producción del agua fría de  $5^\circ\text{C}$  a  $14^\circ\text{C}$ . ¿Qué sucede?

A  $14^\circ\text{C}$  la  $\Delta\Delta t$  de la máquina es mayor y puede producir más frío. Así mismo, para ello la máquina pedirá mayor potencia a la  $t_g^{eq}$  actual. Por otro lado, el campo de captadores ya estaba dando su máxima potencia de captación a esa  $t_g^{eq}$ . De manera que para reequilibrar el sistema no queda más opción que bajar la  $t_g^{eq}$  para poder aumentar la potencia de captación pero al



hacerlo el  $\Delta\Delta t$  descende. Al final el resultado neto es una reducción en la producción anual de frío, aunque eventualmente sea posible obtener  $\Delta\Delta t$  grandes y por tanto picos de potencia de frío superiores.

Esta tendencia desaparece cuando  $\Psi$  es muy grande (ver Fig.4). Si el campo de captadores es muy grande el efecto resultante neto es un desacoplamiento entre los captadores y la máquina. En este caso la tendencia se invierte y al elevar  $t_e$  de  $5^\circ\text{C}$  a  $14^\circ\text{C}$  se obtiene una mayor producción anual de frío como ocurriría en una máquina de absorción cuya temperatura de generación no se viera influida por los captadores. La inversión de la tendencia se puede ver para  $\Psi=200 \text{ m}^2 \text{ K/kW}$  en la Fig. 5. La curva de puntos amarilla ( $t_e=5^\circ\text{C}$ ) se pone por encima de la azul ( $t_e=14^\circ\text{C}$ ) a partir de ese valor.

Finalmente, el rendimiento del sistema captadores-máquina se podría medir dividiendo el frío producido en un año por la cantidad de radiación que incidió sobre los captadores solares. El resultado para diferentes  $\Psi$  se muestra en Fig. 6. El pico en el rendimiento de la conversión oscila y depende del clima, de la temperatura  $t_e$  y de la tecnología de la máquina y se encuentra entre  $\Psi=180$  y  $250 \text{ m}^2 \text{ K/kW}$ . Su valor máximo está alrededor de un 30% - 35%. La conclusión inmediata sería diseñar las instalaciones entorno a este pico, sin embargo, en la práctica esto no es posible por la causa que muestra la Fig. 7. Para una producción de frío anual dada ( $\text{MJ}$  totales) la distribución anual de esa producción de frío se distribuye de forma diferente en función del valor de  $\Psi$ . Para valores pequeños la producción se concentra en el centro del año (verano), justo cuando existe una demanda por parte del edificio. Por otro lado a medida que  $\Psi$  aumenta la distribución anual de la producción de frío se vuelve más plana. El rendimiento alcanza su máximo (30%) en el vértice de la curva (queda patente, pues es el punto que requiere un menor tamaño de la máquina y de superficie de captadores). No obstante esta distribución anual queda lejos de la distribución anual de la demanda de frío del edificio. Finalmente, el diseño práctico debe abarcar una zona de  $\Psi$  dónde el rendimiento máximo del sistema de frío solar estará entre un 10 y un 20%.



**Figura 2.** (izq.) Potencia horaria de frío (kW) a lo largo de un año. (dech.)  $t_{\text{geq.}}$  ( $t_e=5^\circ\text{C}$ )

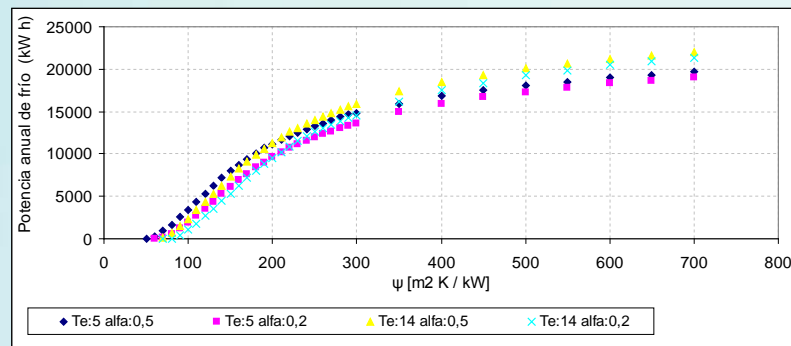


**Figura 3.** (izq.) Potencial horaria de frío (kW) a lo largo de un año. (dech.)  $t_{\text{geq.}}$  ( $t_e=14^\circ\text{C}$ )

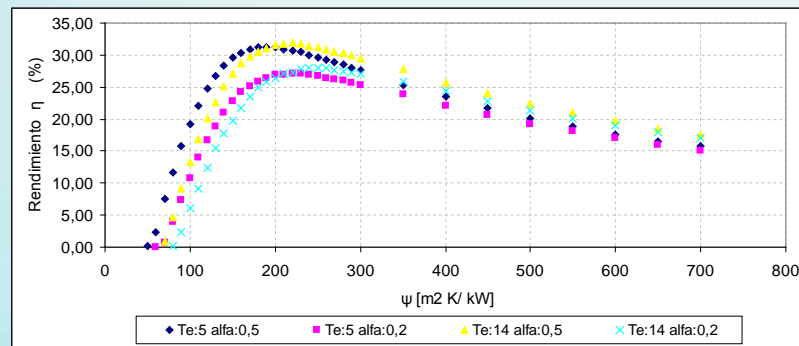




**Figura 4.** (Izq.) Potencia horaria de frío (kW) a lo largo de un año. (dech.)  $t_{geq}$ . ( $t_e=5^{\circ}\text{C}$ , con una relación muy alta  $\Psi=200$ ).

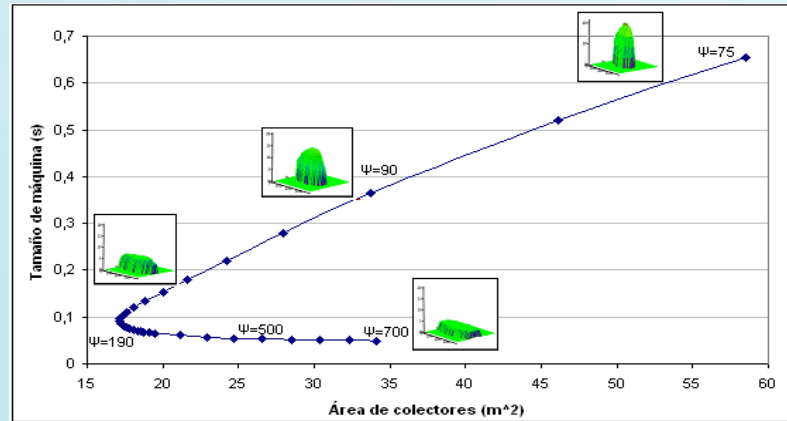


**Figura 5.** Capacidad total (sumada) de producción de frío a lo largo de un año. (Diferentes  $t_e$  y diferente tecnología de absorción).



**Figura 6.** Rendimiento del sistema solar (captadores-máquina de absorción) en Valencia.





**Figura 7.** Efecto de la relación  $\Psi$  (área captadores/tamaño máquina de absorción) sobre la distribución anual de una cierta cantidad total de producción de anual frío dada.

#### 4. CONCLUSIONES

Las ideas más importantes del estudio se resumen en los siguientes puntos:

- El uso de modelos simples para los captadores y la máquina de absorción permite obtener una relación analítica entre sus parámetros de diseño y su funcionamiento, una vez que son acoplados. Además permite ver la repercusión de un diseño pobre de la máquina de absorción y/o de los captadores sobre el tamaño necesario de los mismos.
- No siempre es posible el trabajo con un acople directo, un campo de captadores y una máquina de absorción de simple efecto. El sistema debe diseñarse con esa intención. La relación mínima de área de captadores a tamaño de máquina es de  $\Psi=50 \text{ m}^2 \text{ K/kW}$ .
- El máximo rendimiento del sistema solar (captadores-máquina de absorción) se produce en un rango de  $\Psi$  entre 190 y 250  $\text{m}^2 \text{ K/kW}$ . Este rendimiento está por encima de 30%. En este caso el sistema solar sería el más económico; de menor tamaño de máquina y de menor área de captadores.
- En general, aumentar la temperatura de producción del agua fría lleva consigo una reducción de la producción anual de frío o, si se fuerza a mantener ésta constante, a un mayor tamaño del campo de captadores. Por el contrario, el pico puntual de potencia de frío es mayor con temperaturas de evaporación superiores.
- Debido a la necesidad de acoplar la demanda de refrigeración y la producción de frío a lo largo del año, el máximo rendimiento solar no coincide con la máxima producción de frío solar.
- Los diseños prácticos rondarán los  $\Psi$  entre 75 y 105  $\text{m}^2 \text{ K/kW}$  y el rendimiento solar máximo estará entre el 10 y el 20% en la producción de frío.
- El diseño que optimiza la cobertura de la demanda de frío por parte del sistema solar, conduce a tamaños que pueden ser instalados en la superficie disponible en los edificios.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) C++ Builder Profesional Versión 5, Copyright 1983-2000 Inprise Corporation
- (2) Código Técnico de la Edificación. programa LIDER. Julio, 2009.
- (3) E. V. Lamas, V. M. Soto E.J. Sarabia, Air conditioning production by a single effect absorption cooling machine directly coupled to a solar collector field. application to Spanish climates. Solar Energy 85 (2108-2121), 2011.
- (4) Edwin Víctor Lamas Sivila. Análisis y Propuesta de un Nuevo Método de Simulación Abreviado para la Certificación Energética en Edificios Residenciales, PhD. Thesis, Universitat Politècnica de València., Mayo 2011.
- (5) Hellmann H.M. Schweigler C. Ziegler, F. An approximative method for modeling the operating characteristics of advanced absorption chillers. In 20th International Congress of Refrigeration. IIR/IIF, Sydney (Australia), 1999.
- (6) J. López-Villada J. C. Bruno A. Coronas, M. Puig-Arnavat. Analysis and parameter identification for characteristic equations of single - and double-effect absorption chillers by means of multivariable regression. International Journal of refrigeration, 22:7078, 2010.
- (7) Kühn A. Ziegler, F. Operational results of a 10 kw absorption chiller and adaptation of the characteristic equation. In Proc. First Int. Conference Solar Air Conditioning, Bad-Sta\_elstein., 2005.
- (8) Ministerio de Industria Turismo y Comercio. Documentos reconocidos. URL
- (9) Ministerio de Industria Turismo y Comercio. programa Calener VYP, Certificación Energética de la Edificación. Julio, 2009.
- (10) Pinazo Ojer J,M, Manual de Climatización, Tomo II: SPUPV, Valencia 1996.
- (11) Schweigler C. Ziegler F. Hellmam, H.M. The characteristic equations of absorption chillers. In: Proc. of the Int. Sorption Heat Pump conf., pages 169\_172. Munich, 1999.
- (12) [www.mityc.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/CertificacionEnergetica/DocumentosReconocidos/Paginas/documentosreconocidos.aspx](http://www.mityc.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/CertificacionEnergetica/DocumentosReconocidos/Paginas/documentosreconocidos.aspx).



## ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD PARA PARQUES EÓLICOS EN BOLIVIA

Rubén Marca Carpio – [rmarca5@hotmail.com](mailto:rmarca5@hotmail.com)  
Consultor Energía y Medio Ambiente

**Resumen.** *Bolivia tiene potencial para la implementación de sistemas eólicos, sin embargo haciendo un ejercicio de aplicación para el caso de un parque de 2.55 MW, se tiene que bajo los actuales costos de remuneración de energía, cualquier proyecto eólico se hace inviable. Asimismo tampoco se cuenta con una normativa del sector que describa la forma de explotación para este tipo de energía y en general para las energías renovables. Entonces, se debe identificar claramente los puntos críticos que deben ser atendidos para que al solucionarlo se logre la sostenibilidad de este tipo de energías. Es así que bajo los conceptos de sostenibilidad ecológica y económica financiera, se plantea la creación de un Fondo de Energías Renovables, para apoyar e incentivar la ejecución de parques eólicos.*

**Palabras clave:** *energía eólica, sostenibilidad, cambio climático, energías renovables, costo de energía.*

### 1. INTRODUCCIÓN

La energía eólica se constituye en una energía limpia y renovable y su explotación a nivel mundial está muy desarrollada y avanzada tecnológicamente. En el país, más allá de anuncios, todavía no se tiene implementado un parque eólico de potencia, sin embargo los últimos años se han realizando esfuerzos muy valiosos en la concepción de proyectos eólicos, pero que evaluados en su dimensión de sostenibilidad todavía son poco reales en el contexto del sector de energía eléctrica del país.

Es así que el presente artículo aporta elementos de análisis que deben ser atendidos, si en el futuro inmediato se quiere arrancar con el primer parque eólico de manera sostenible. El planteamiento del análisis permitirá a las instituciones del sector, la gestión del financiamiento y la implementación del primer parque eólico del país.

De acuerdo al mapa eólico de Bolivia, el país tiene zonas con buen potencial eólico, sin embargo hasta el presente año (2012) no se tiene todavía ningún parque eólico en explotación comercial. Ante la necesidad de llegar a la implementación de parques eólicos, se debe realizar un análisis desde la perspectiva de sostenibilidad cuyos resultados permitan orientar de forma estructurada la incorporación sostenible de la energía eólica.

Para un análisis objetivo se toma el caso de un parque eólico de 2.55 MW de potencia y estructurado bajo una forma administrativa de empresa del tipo de Sociedad Anónima Mixta (Marca, 2011).

Se analiza la viabilidad y se da el enfoque de sostenibilidad económico financiero para este tipo de proyectos de Energías Renovables.



## 2. PARQUE EÓLICO

La implementación de los parques eólicos se caracteriza por una gran inversión inicial que será restablecida a lo largo de la vida útil del activo a través de la venta de la energía generada. La cantidad de energía a producir dependerá principalmente de la potencia nominal de los aerogeneradores y de las singularidades del viento en el lugar donde esté situado el parque.

La implementación del primer parque eólico puede ser enfocada como un avance estratégico, puesto que permitirá al país ganar experiencia real de gestión, ejecución y operación de parques eólicos. Su éxito, permitirá replicar otros parques en el resto del país.

### 2.1 Análisis Estratégico

Entre las fortalezas se destaca: profesionales competentes, ser la primera empresa eólica, instalaciones de trabajo adecuados.

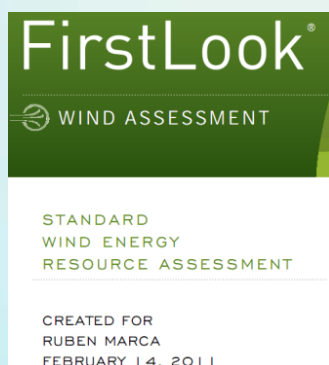
Entre sus debilidades: falta de posicionamiento nacional, falta de sistema de predicción en tiempo real para la programación de energía, en el primer año de operación dependencia de técnicos extranjeros.

Entre sus oportunidades: necesidad de expansión del sistema eléctrico, energía limpia y renovable, coherente con las políticas de control del cambio climático, diversificar la matriz energética del país.

Entre sus amenazas: inseguridad legal, carencia de marco regulatorio eólico, falta de procedimientos operativos para parques eólicos, dependencia de subvenciones, catástrofes naturales como sismos y otros, energía cara bajo el concepto de economía clásica.

### 2.2 Análisis meteorológico para la selección del sitio de proyecto

La selección del sitio de emplazamiento se realizó con la herramienta del “Atlas Eólico de Bolivia”, la ayuda de la herramienta “Firstlook” y complementariamente el programa Google Earth.



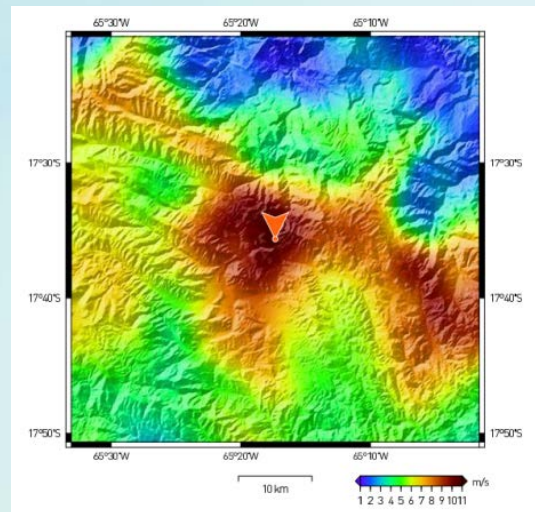
**Figura 1.** Carátula del estudio meteorológico satelital





Se procedió a discriminar los sitios con los siguientes criterios:

- Discriminación por velocidades de viento mayores a 5 m/s (valor relacionado a las velocidades de arranque de los aerogeneradores)
- Discriminación por dirección preponderante del viento, disponibilidad de acceso y distancia al sitio
- Discriminación por condiciones geográficas y uso de suelo
- Ubicación en el departamento de Cochabamba
- Proximidad a una red eléctrica, en cola de red



**Figura 2.** Imagen satelital de potencial eólico del sitio elegido

### Características de la central eólica

Aerogenerador:	V52 <sup>1</sup>
Capacidad Nominal:	850 kW
Factor de capacidad:	59 % (promedio)

### Características del potencial eólico

Velocidad media anual:	11.1 m/s
Velocidad media máxima:	14.3 m/s
Velocidad media mínima:	7.8 m/s
Error estándar:	0.9 m/s
Altura de buje:	50 m.
Factor de forma "K":	2.09
Factor de escala "A":	12.55
Dirección viento predominante:	Norte – Sur

<sup>1</sup> De forma preliminar se ha considerado un aerogenerador GE General Electric. En el desarrollo del proyecto se analizará y evaluarán otras opciones y modelos de aerogeneradores.



### 3. FORMULACIÓN ESTRATÉGICA

A partir del análisis estratégico se plantean objetivos desde cinco perspectivas: social, financiera, cliente, procesos internos, aprendizaje y crecimiento. A continuación se plantean los resultados a través de planes estratégicos.

#### a. Plan de Acción Comercial

El parque eólico estará conformado por tres unidades de 850 kW (potencia nominal unitaria) haciendo un total de 2.55 MW, esta potencia equivale a 0.53% de la capacidad instalada del sistema Hidroeléctrico y un 0.32% de la termoeléctrica. En cuanto a la generación de energía prevista, la eólica representa un 0.15% del consumo de energía del SIN (CNDC, 2011).

El tiempo previsto de implementación del proyecto eólico es de tres años.

El precio de venta de energía es el correspondiente al costo monómico de 37.1 USD/MWh. La previsión de ventas anual de la energía es de 9.81 GWh, correspondiendo a 364 mil USD/año.

Las ventas serán realizadas a través del mercado eléctrico mayorista del SIN y utilizando la red de media tensión “Paracaya – Epizana” de ELFEC.

La estrategia de crecimiento está fundamentada en el éxito del primer proyecto eólico y en el sexto año de operación, incrementar la capacidad del parque eólico a 7 MW nominales.

#### b. Plan de Producción

Las etapas definidas son: inputs, transformación, conversión, outputs y retroalimentación.

Inputs: energía cinética del viento con una velocidad promedio de 11.1 m/s y un factor de capacidad de 61%. La transformación de la energía será realizada con un aerogenerador marca VESTAS de 850 kW; por efectos de altitud sobre el nivel del mar se estima que la potencia efectiva será de 612 kW por unidad.

Un aspecto importante, identificado en el análisis estratégico, es la capacitación técnica del personal, es así que la empresa eólica, deberá elaborar y aplicar contratos independientes y específicos de Asistencia Técnica y Know How.

#### c. Plan de Organización y Recursos Humanos

Para la empresa eólica se recomienda la siguiente estructura, en tres áreas: Ejecutiva, administrativa y técnica.

La ejecutiva en dirigir la empresa, buscar el incremento del negocio y darle sostenibilidad económica; la administrativa, realizar las gestiones contables y soporte administrativo a la empresa; la técnica, realizar la operación y mantenimiento del sistema eólico.

La empresa será estructurada de tal manera que a futuro con la expansión de los proyectos eólicos, tenga la capacidad de transferir recursos humanos que lleven adelante los nuevos proyectos.



#### **d. Plan de Marketing**

Entre las ventajas se tiene:

- Procede indirectamente del sol (energía solar), por lo que proviene de una fuente inagotable de energía, no contamina de forma directa y al ser una energía autóctona ayuda a reducir dependencia energética.

Entre las dificultades se tiene:

- La dependencia de los regímenes de viento hace que la energía sea muy variable, por lo que no siempre se produce a más energía en los picos de consumo. Es por eso que el aprovechamiento de la energía eólica debe considerarse como una energía complementaria. La predicción de la producción de una instalación eólica es muy difícil, lo que genera problemas e incertidumbres en la planificación energética.

En cuanto a la descripción del producto y la empresa, se tiene:

- Producto (servicios – intangible): electricidad a partir de la energía eólica.
- Empresa: Empresa del tipo S.A.M.
  - Plaza: Montepunko, a 100 Km de la ciudad de Cochabamba, camino antiguo a Santa Cruz. Existencia de una red de distribución en media tensión.
  - Precio: Inversión total de 4.3 millones de USD.
  - Producto: Energía eólica (electricidad).
  - Promoción: Difusión y presentación a Instituciones especializadas (SIB, Secretaría de Energía Gobernación) y ONG's relacionadas al Medio Ambiente.

#### **e. Plan de Inversiones y Localización**

La empresa eólica, deberá contar con dos tipos de infraestructuras claramente diferenciados, una infraestructura administrativa y otra técnica – operativa.

La infraestructura administrativa, serán oficinas en contrato de anticresis en la ciudad de Cochabamba. De acuerdo a organigrama de la empresa, las gerencias que funcionaran son Gerencia General, Asesoría Legal, Gerencias Administrativa y Financiera.

La otra infraestructura y la principal será la del Parque Eólico, ubicada en la zona de Montepunko. En la misma estará emplazada el parque eólico, oficinas, talleres y almacenes. Esta infraestructura estará en calidad de propiedad propia. En esta funcionará la Gerencia de Operaciones e Ingeniería. El tamaño previsto será de 2 Hectáreas.

#### **f. Plan Económico Financiero**

En lo económico es altamente sensible a la tarifa eléctrica para la venta al sistema, a tal grado que considerando y evaluando a las tarifas actuales de los otros sistemas convencionales de generación (hidro y termo), se tiene que el parque eólico solo será rentable y financieramente sostenible, insertando subvenciones económicas.



Los resultados económico financieros para el estudio de caso (parque de 2.55 MW) son: VAN PROYECTO 107.3 mil USD. TIR PROYECTO 7.96%. VAN ACCIONISTA 11.1 mil USD. TIR ACCIONISTA 10.6%. Del análisis económico financiero, se recomienda la ejecución del proyecto, a través de la conformación de empresa societaria mixta (S.A.M.) donde el estado subvencione 3.9 millones de USD y la empresa propiamente invertirá 430 mil USD.

El parque eólico está conformado por tres unidades de 850 kW nominales. La potencia efectiva de la planta es de 1.8 MW, inyectando una energía anual de 9.81 GWh.

#### **4. RIESGOS**

Los principales riesgos identificados son:

- Falta de posicionamiento nacional, actualmente no hay ninguna empresa generadora de electricidad de este tipo.
- Si no se capacita adecuadamente a técnicos nacionales, se prevé una dependencia extrema de técnicos extranjeros.
- Sin mecanismos de incentivo a la tarifa eléctrica para este tipo de energías limpias, o sin contar con subvenciones, el proyecto puede fracasar.
- Vacío normativo, falta de normas regulatorias para este tipo de energías.
- Falta de procedimientos operativos para la gestión eficaz para este tipo de generación.
- No se tienen herramientas de predicción en tiempo real del comportamiento del viento.
- Elevado costo de inversión.

#### **5. VENTAJAS**

Las principales ventajas identificadas son:

- Bolivia cuenta con un Atlas Eólico, completo con información satelital, de acceso directo por un portal internet.
- El país tiene buen potencial eólico en determinadas zonas del país.
- Producción de energía ambientalmente limpia y coherente a los objetivos mundiales de control al calentamiento global.
- Satisfacer las expectativas y compromisos del Estado para explotación de este tipo de recurso renovable.
- Con la implementación de la primera empresa eólica, se favorecerá el conocimiento de este tipo de tecnología limpia.
- Diversificación de la matriz energética del país.
- No hay riesgo de suministro de combustible.
- Bajo costo de operación

#### **6. SOSTENIBILIDAD ECOLÓGICA**

En lo que se refiere a la explotación de los recursos no renovables -petróleo y gas natural-, el criterio de sostenibilidad ecológica del desarrollo destaca, que la tasa de utilización del recurso no renovable sea equivalente a la tasa de sustitución del recurso en el proceso productivo, por el período de tiempo previsto para su agotamiento.





Esto implica el fomento a la obtención de nuevos sustitutos del recurso a largo plazo, por lo que se deberían realizar inversiones asignadas de estas actividades para la búsqueda de sustitutos, durante el período de explotación, por ejemplo invertir en la creación o adquisición de tecnologías aplicables a las energías renovables, inserción de tecnología eficiente en el uso de la energía, inversión en educación dirigido a este objetivo (centros de investigación tecnológicos, etc.). Es decir, si no se obtiene un beneficio de los ingresos energéticos actuales, difícilmente se podría dar otra oportunidad para desarrollar otras formas alternativas de energía. Por otra parte, se debe tomar en cuenta que actualmente existen compromisos internacionales de cooperación en temas ambientales, de energías renovables, tecnologías limpias, eficiencia energética, etc., que sumados a las regalías, pueden convertirse en una fuente económica que impulse programas estratégicos de energía eólica.

## **7. SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA FINANCIERA**

Se considera que la omisión o el no abordaje oportuno a la evaluación económica financiera, puede derivar en el colapso económico de dicho proyecto y por tanto, antes de siquiera operar, puede derivar en percepciones de que los proyectos son irrealizables.

Actualmente diferentes países del mundo desarrollan proyectos eólicos a través de algunos mecanismos de incentivos o apoyos institucionales, porque son fuentes de energía limpia y están alineados a las políticas globales de esfuerzos para controlar los efectos del calentamiento global.

En las actuales condiciones de marco normativo del sector eléctrico de Bolivia y con las tarifas de remuneración por generación de energía, se hace insostenible cualquier proyecto eólico. Por tanto, si no se modifica o incentiva el pago de la tarifa de energía para este tipo de energía renovable, va a ser muy difícil implementar el primer parque eólico.

A partir de los dos enfoques de sostenibilidad (ecológico y económico financiero) se plantea la creación de un Fondo de Incentivo a las Energías Renovables. Dichos recursos permitirán facilitar el costo de inversión de un parque eólico. Siendo así, se puede demostrar que las etapas de operación y mantenimiento son auto sostenibles.

## **8. CONCLUSIONES**

Cuando se habla sostenibilidad del proyecto eólico, necesariamente se refiere a los ingresos provenientes de la venta de dicha energía, esta situación hace imperiosa la necesidad de que el Estado defina y norme los mecanismos de incentivo al desarrollo de emprendimientos eólicos y defina las tarifas para las energías renovables en general y para la energía eólica en particular.

Como referencias de precios internacionales de energía eólica, se tienen por ejemplo: en los Estados Unidos de Norteamérica 90 USD/MWh, en Alemania 98 USD/MWh, en China varían entre 137 a 164 USD/MWh, en Brasil y Uruguay las últimas subastas de proyectos eólicos fueron del orden de 80 USD/MWh.

Los resultados reales difícilmente serán exactamente los esperados, pueden producirse cambios en la tasa de interés, en el valor residual del proyecto, o incluso en el potencial eólico del parque como consecuencia de variaciones en las condiciones meteorológicas. Entonces realizando un análisis de sensibilidad del modelo respecto a las variables: la tarifa de



electricidad precio medio del MWh; como variables de salida los indicadores de rentabilidad TIR y VAN; tanto del proyecto como del accionista.

Por tanto, un primer escenario de análisis de sensibilidad económico financiero se realizó para una tarifa variable de energía eólica desde un mínimo de 20 a 100 USD/MWh).

Como resultados se tuvieron que para una tarifa de 37 USD/MWh, el proyecto en lo económico financiero, por sí solo, no es sostenible, es decir para esta tarifa, un proyecto requiere una subvención directa en la inversión del 90%.

Pero considerando una tarifa de 80 USD/MWh, se tienen VAN PROYECTO 1.25 millones USD. TIR PROYECTO 8.56%. VAN ACCIONISTA 269 mil USD. TIR ACCIONISTA 11.76%, por lo que el proyecto se hace sostenible por sí mismo, es decir, para esta condición de tarifa no se requerirá subvención alguna.

Finalmente, la forma de darle sostenibilidad es a través del Fondo de Energías Renovables, se subvencione los costos de inversión, de esta forma con los costos de energía actuales podría ser sostenible solo desde la etapa de operación y mantenimiento.

Por tanto, a través del presente análisis se busca llegar a la sostenibilidad económica financiera, dotándole recursos económicos provenientes de la explotación de los recursos no renovables como los combustibles fósiles.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CNDC, Memoria anual 2011.
- (2) MARCA, Rubén. 2011. Proyecto de grado – Escuela Europea de Negocios. 2011. Modelo de Gestión Estratégica Empresarial para el Área Eólico Productivo.
- (3) GUIMARAES, Roberto. 1994. EL DESARROLLO SUSTENTABLE: Propuesta alternativa o retórica neoliberal. Santiago: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- (4) SACHS, Jeffrey. 2007. El fin de la Pobreza. Buenos Aires: Debate.
- (5) GESEL, Universidad Federal de Rio de Janeiro. 2010. Seminario Perspectivas para la Energía Eólica en Brasil: Cochabamba.
- (6) GARAY, Gonzalo. 2009. Finanzas de Empresas. Cochabamba: Editorial Kipus.
- (7) GARCÍA, Olmos. Análisis económico de un parque eólico. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- (8) ENDESA. 2007. Curso de energía eólica para no expertos. Endesa cogeneración y renovables.
- (9) CATASUS, Beatriz. 2008. Análisis de rentabilidad de Proyectos Eólicos bajo distintos marcos regulatorios y proyecciones de retribución. Universidad Pontificia Comillas. Madrid.
- (10) ESTEBAN, María Dolores. 2009. Propuesta de una metodología para la implantación de parques eólicos offshore. Universidad Politécnica de Madrid. Tesis Doctoral.
- (11) Atlas Eólico de Bolivia:
- (12) [www.aeeolica.es](http://www.aeeolica.es). Asociación Empresarial Eólica
- (13) [www.udape.gob.bo](http://www.udape.gob.bo). Unidad de Análisis de Políticas Sociales y Económicas.

## SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS DE GENERADORES DE INDUCCIÓN ACCIONADOS POR MOTORES A COMBUSTIÓN CON EL OBJETIVO DE EVITAR LA DISMINUCIÓN DE EFICIENCIA

Victoria Herrera – [victoria.herrera@ufabc.edu.br](mailto:victoria.herrera@ufabc.edu.br)

J. Franklin A. Romero – [jesus.romero@ufabc.edu.br](mailto:jesus.romero@ufabc.edu.br)

J. Alexis Andrade-Romero – [javier.romero@ufabc.edu.br](mailto:javier.romero@ufabc.edu.br)

Universidad Federal del ABC -UFABC Santo André/SP - Brasil

**Resumen.** Este trabajo presenta un sistema de diagnóstico de fallas para generadores aislados de baja potencia, basados en máquinas de inducción accionadas por motores a combustión. El objetivo del sistema de diagnóstico de fallas es evitar la disminución de eficiencia del generador a causa de fallas internas en el rotor y estator. Para comprobar la necesidad del sistema de diagnóstico se realizó un análisis de impactos económicos y ambientales de la disminución de eficiencia del generador, causada por las mencionadas fallas.

**Palabras clave:** generador de inducción, eficiencia, combustible, impactos económico y ambiental.

### 1. INTRODUCCIÓN

El creciente interés en la generación de energía descentralizada impulsa el desarrollo de sistemas de energía aislados, pequeños generadores de energía para uso interno y generadores portátiles (Bhaskara et al, 2005). En todas estas aplicaciones, se advierte el uso más intensivo de los "generadores de inducción auto-excitados" (SEIG – Self Excited Induction Generator).

Dado que los sistemas de generación están sujetos a diversas perturbaciones eléctricas, mecánicas y térmicas, hay una pérdida de eficiencia, así como una reducción en la vida útil en los distintos dispositivos en el sistema (Pillay y Hofmann, 2001).

Pillay (2006), muestra la relación entre las fallas internas de una máquina de inducción y la eficiencia del proceso de conversión, presentando como resultado la reducción proporcional de la calidad de la energía y la vida de la máquina. En este caso, son causadas paradas inesperadas y por lo tanto existirán pérdidas en los costos de generación. En este contexto, se presenta un estudio relacionado con el funcionamiento del SEIG con fallas internas, y ese comportamiento comparado con la disminución de la eficiencia, proponiendo como solución un sistema de diagnóstico de fallas basado en la Transformada Wavelet Continúa (CWT-Continuous Wavelet Transform) .

El principal objetivo de este trabajo es presentar un sistema de diagnóstico de fallas que además de evitar posibles paradas inesperadas en el proceso de generación, evitará la disminución de la eficiencia causada por las fallas internas del generador. Con este objetivo en la sección 1 se analizan los impactos económicos y ambientales causados por la disminución de la eficiencia de la máquina. Todos los aspectos evaluados muestran la necesidad del sistema de detección de fallas a fin de lograr un proceso de conversión de energía eficiente, y sobre todo, sostenible.

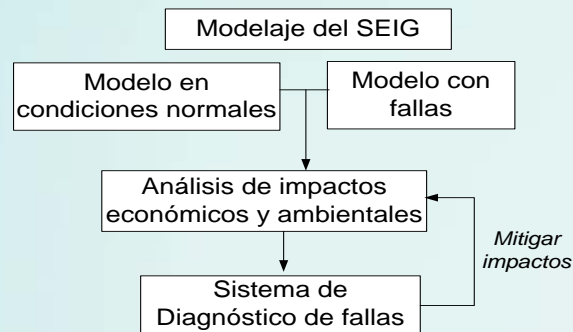




Tanto el sistema de diagnóstico, como la evaluación de los impactos de la disminución de la eficiencia, se han propuesto sobre la base de las simulaciones computacionales realizadas en el ambiente Matlab / Simulink ® para máquinas de baja potencia en sistemas de generación aislada.

La metodología aplicada en este estudio muestra el modelado del SEIG como herramienta principal (ver Figura 1). A partir de esta herramienta y de la interpolación de datos con otras investigaciones se evalúan los impactos económicos y ambientales.

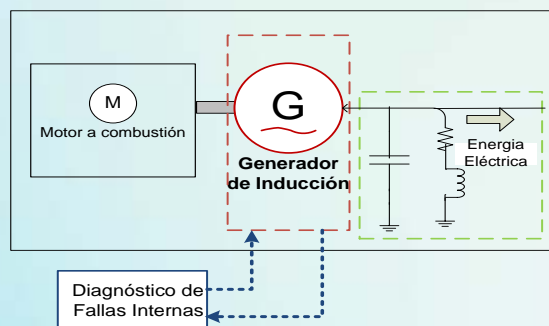
En la sección 2 se presenta el sistema generador basado en SEIG. La sección 3 presenta las tensiones generadas por el SEIG bajo diferentes condiciones de operación, las cuales fueron obtenidos a partir de simulaciones de los modelos del SEIG en condiciones de falla y en condiciones normales. La sección 4 presenta la evaluación de la eficiencia y el porcentaje de voltajes no balanceados para diferentes condiciones de operación estudiadas. La sección 5 presenta el análisis de los impactos económicos y ambientales. La sección 6 presenta el sistema de diagnóstico propuesto. La sección 7 presenta el análisis de los resultados. Finalmente las principales conclusiones se presentan en la Sección 8.



**Figura 1.** Metodología de trabajo

## 2. INSTRUCCIONES PARA LA DIGITACIÓN

El sistema de generación de energía estudiado se presenta en la Figura 2, donde se puede observar que los módulos son parte del sistema, es decir, la fuente de energía mecánica, el generador, el banco de capacitores y el sistema de carga de diagnóstico



**Figura 2.** Sistema de Generación de Energía

Cabe señalar que, aunque el generador de inducción es más aplicado para generar mayor energía hidroeléctrica y eólica, también se usa de manera eficiente en sistemas aislados, cuando es accionado por motores a diesel, biogás, gas natural, gasolina (Bhaskara et al, 2005).





### 3. CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL GENERADOR

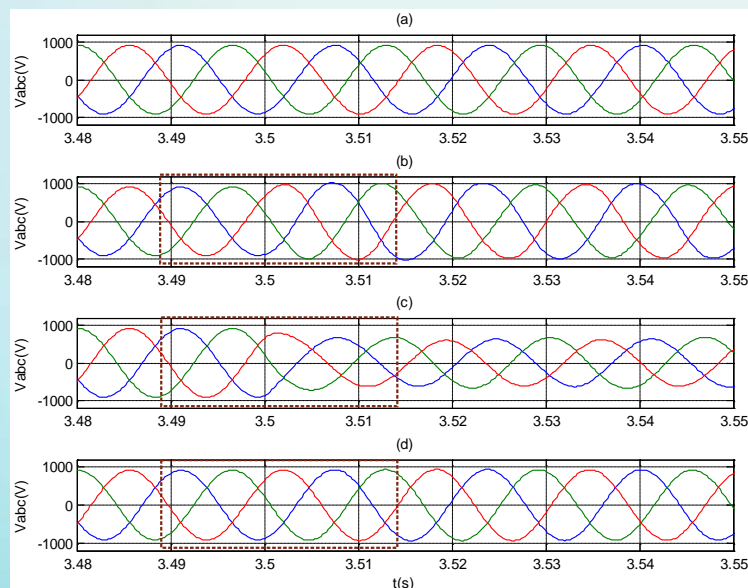
En sección muestra el comportamiento del SEIG bajo condiciones de operación normales y en condiciones de falla. Los resultados se basan en simulaciones computacionales para una máquina generando 21kWatts, accionada por un motor de combustión o una microturbina. Los modelos dinámicos utilizados para este propósito se llevaron a cabo en coordenadas dq y se describen en Herrera (et al, 2010a). El modelo en condiciones normales se basa en el trabajo propuesto por Romero (2002). Los modelos bajo condiciones de falla se obtuvieron realizando modificaciones en el modelo en condiciones normales, que se basaban en la propuestas de Stocks (2006a) para los fallas en el rotor y Stocks (2006b) para las fallas en el estator.

Las fallas que se estudiarán son:

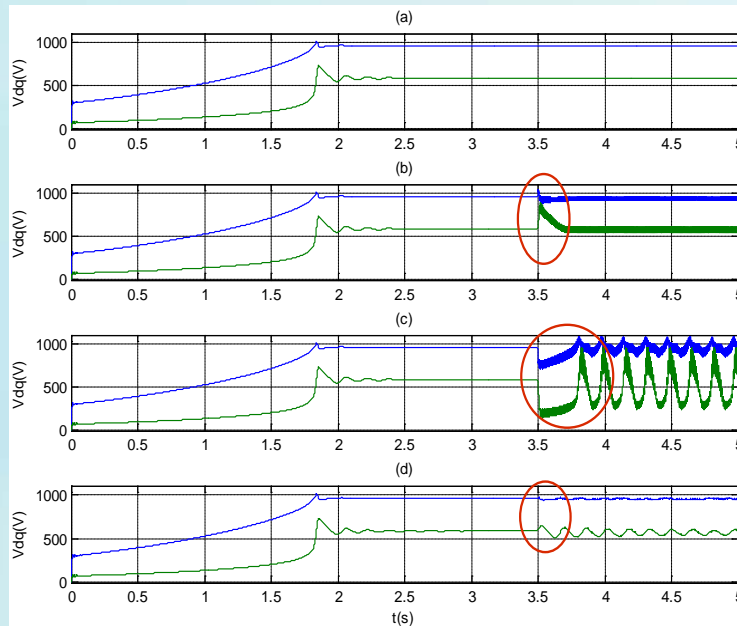
- Mala conexión de los bobinados del estator. Que puede ser causada por vibraciones o desgaste excesivo del aislamiento térmico en el estator.
- Cortocircuito en el bobinado del estator. Representa un cortocircuito en una pequeña porción de un devanado de fase del estator.
- Quiebre de aros o de barras del rotor. Falla que puede ser causada por transitorios largos, desequilibrio del flujo magnético, sobrecalentamiento, y la falta de lubricación.

Para fines de estudio, los modelos del SEIG en condiciones de falla fueron simulados a partir del instante  $t = 3,5$  s, asumiendo que se produce la falla durante el funcionamiento del generador.

La Figura 3 muestra los voltajes trifásicos (en coordenadas abc) para todas las condiciones de operación estudiadas. Se observa que debido a la robustez del SEIG, la máquina continúa funcionando cuando se presentan las fallas y las señales tienen un patrón aparente regular. Sin embargo, existe un mayor grado de desequilibrio, como se puede ver en las Figuras 3b, 3c y 3d. Este desequilibrio se calcula posteriormente y se presentan en la sección 4.2.



**Figura 3.** Voltajes trifásicos (abc). Condiciones de operación: a) Normales, b) Mala conexión de los bobinados del estator, c) Cortocircuito en el bobinado del estator, d) Quiebre de aros o de barras del rotor.



**Figura 4.** Voltajes en coordenadas dq. Condiciones de operación: a) Normales, b) Mala conexión de los bobinados del estator, c) Cortocircuito en el bobinado del estator, d) Quiebre de aros o de barras del rotor.

Las diferencias en el comportamiento de las variables del SEIG, en presencia de fallas, son particularmente notables en las coordenadas dq, como se muestra en la Figura 4. El desequilibrio de las señales cuando la falla ocurre es muy evidente, pero de diferente amplitud y frecuencia para cada caso. La diferencia más obvia para la máquina estudiada fue la presencia de un cortocircuito en el devanado del estator, la Figura 4c.

#### 4. LEVANTAMIENTO DE INDICADORES PARA EVALUAR LOS IMPACTOS CAUSADOS POR LAS FALLAS.

En esta sección se presentan dos indicadores que evalúan el comportamiento del SEIG en las diferentes condiciones de operación abordadas. Estos son: la eficiencia SIEG y el porcentaje de voltajes desequilibrados (VUP), ambas calculadas sobre la base de los resultados de simulación se presentan en la sección 3. Por otro lado se presentan dos indicadores ambientales: factor de emisiones de carbono y la densidad de energía por unidad de masa.

##### 4.1 Eficiencia del SEIG

Según (Boldea y Nasar, 2000) la eficiencia de la máquina de inducción en el modo de generador puede ser calculada mediante la ecuación (1), donde  $P_{out}$  es la potencia de salida y  $P_{in}$  es la potencia de entrada

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (1)$$

Debido a las dificultades en la medición de la potencia de entrada, potencia de salida y pérdidas, existen diferentes criterios para medir la eficiencia de la máquina de inducción. Sin embargo, en la ecuación se ve claramente que la potencia eléctrica ( $P_{out}$ ) es directamente proporcional a la eficiencia y a la energía generada, concluyendo así que si la energía generada



se reduce, para la misma potencia de entrada ( $P_{in}$ ), la eficiencia del SEIG también disminuye. La Tabla 1 muestra los valores de la energía generada por el SEIG en condiciones normales y en condiciones de falla.

ESTADO DEL SEIG	ENERGÍA GENERADA [Watts/h]	PÉRDIDAS [Watts/h]	$\eta$	PÉRDIDAS [%]
a) Normal	21571	-	0.8987	-
b) Mala conexión de los bobinados del estator	20735	836	0.8639	3.87
c) Cortocircuito en el bobinado del estator	20636	935	0.8598	4.33
d) Quiebre de aros o de barras del rotor	20951	620	0.8729	2.87

**Tabla 1:** Pérdida de potencia generada y de la eficiencia del SEIG

Las pérdidas se calculan a partir de los valores de eficiencia en condiciones nominales de la máquina, por lo que en las condiciones nominales las pérdidas son consideradas como nulas. Se puede verificar que la reducción de la energía del SEIG, bajo condiciones de falla, es claramente observable. Para calcular la eficiencia de la máquina se considera una potencia de entrada de 32HP (24kWatts), como observado en el caso de la reducción de la energía generada, la eficiencia disminuirá entre 2,87 y 4,33%, dependiendo de la falla.

#### 4.2 Porcentaje de Tensiones no Balanceadas (VUP)

En los sistemas polifásicos las tensiones no balanceadas se producen cuando los valores eficaces de las tensiones de fase no son iguales. En las máquinas eléctricas las tensiones reales rara vez son perfectamente balanceadas o equilibradas entre las fases, pero cuando este desequilibrio es excesivo, puede crear problemas en la operación.

Las fallas del SEIG estudiadas en este trabajo se caracterizan por variaciones de los parámetros internos que provocan desequilibrios en las señales eléctricas generadas, característica observada en diferentes magnitudes para fallos en el rotor y el estator. Para medir ese desbalance se utiliza el indicador Porcentaje de Tensión no Balanceada (VUP - *Voltage Unbalanced Percentage*) definida por la ecuación (2), donde  $V_n$  y  $V_p$  son las tensiones en secuencia negativa y positiva, respectivamente.

$$VUP = \frac{V_n}{V_p} \times 100 \quad (2)$$

Según Feshiki (et al, 2007) las tensiones no balanceadas son responsables del aumento de temperatura en la máquina de inducción. Cuando el SEIG está en funcionamiento es normal un aumento en la temperatura, pero cuando el VUP pasa los valores definidos por el fabricante, la temperatura se aumenta tan rápidamente que la protección contra el daño no funciona (Pillay y Hofmann, 2001).

En este trabajo el VUP se calculó para la máquina en condiciones nominales y con fallas, los cálculos se basaron en los resultados de la simulación de los modelos del SEIG presentados en la sección 3. Los resultados del porcentaje de tensión no balanceada obtenidos se han relacionado con los valores de incremento de temperatura en la máquina como se muestra en (PG & E, 2009) esto, debido a que el aumento de la temperatura del SEIG, además de disminuir la eficiencia, es la causa principal de la disminución de la vida útil de la máquina.





En la Tabla 2 se puede observar que los valores de VUP son más grandes cuando la máquina falla, como se esperaba, pero en el caso de fallas en el estator, el desbalance es mayor que en el caso de fallos en el rotor.

ESTADO DO SEIG	VUP	AUMENTO DE TEMPERATURA
a) Normal	0.8	0-2 %
b) Mala conexión de los bobinados del estator	2.9	8-18 %
c) Cortocircuito en el bobinado del estator	4.5	32-50 %
d) Quiebre de aros o de barras del rotor	0.9	0-2 %

**Tabla 2.** VUP y Porcentaje de aumento de temperatura del SEIG

#### 4.3 Emisiones de carbono y densidad de energía por masa.

En este trabajo se asume que el generador es accionado por un motor a combustión que puede ser usado con diferentes tipos de combustible. El principal impacto ambiental de la quema de combustible es la emisión de gases de efecto invernadero. En este sentido Sales (2008b), Dos Santos (2004) y NEAA (2002) presentaron resultados de la cuantificación de las emisiones de carbono generadas en el proceso de conversión de energía a partir de fuentes diferentes. Esos trabajos incluyen el Factor de Emisiones de Carbono como indicador que cuantifica las toneladas de carbono emitido por unidad de energía de cada combustible. Las emisiones de carbono pueden estar presentes en CO, CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>. La Tabla 3 presenta el factor de emisiones de carbono para cuatro diferentes combustibles según datos presentados por los autores mencionados y la densidad de energía por unidad de masa de combustible.

FONTE	FACTOR DE EMISIONES DE CARBONO [tC/kWh]	DENSIDAD DE ENERGÍA POR MASA [kWh/ kg]
Gas natural	0.00005508	4.46
Diesel	0.00007272	3.64
Biodiesel	0.00003636	3.43

**Tabla 3.** Indicadores ambientales

### 5. EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS.

En esta sección se presentará la evaluación de los impactos económico y ambiental de la disminución de la eficiencia del SEIG causada por fallas internas.

#### 5.1 Impacto Ambiental

Se presentan los impactos ambientales de los sistemas de generación, basados en SEIG, considerando la cantidad de combustible necesario para el proceso de generación, para diferentes fuentes de energía.

Dados los resultados presentados en la Tabla 3 es posible calcular la cantidad de combustible necesario para generar electricidad durante 8000 horas cuando el SEIG es accionado por un motor a gas, diesel, gasolina y biodiesel.

La Tabla 4 muestra la cantidad de combustible, en unidades de peso, necesaria para generar la misma cantidad de energía cuando el SEIG está en funcionamiento normal y en condiciones de falla.





ESTADO DEL SEIG	GÁS NATURAL [kg]	DIESEL [kg]	BIODIESEL [kg]
a) Normal	38634.6	47397.9	50262.5
b) Mala conexión de los bobinados del estator	40131.9	49234.9	52210.5
c) Cortocircuito en el bobinado del estator	40309.3	49452.4	52441.2
d) Quiebre de aros o de barras del rotor	39745.1	48760.3	51707.2

**Tabla 4.** Cantidad de combustible usado en el proceso de generación de energía en unidades de masa

Se observa claramente que en presencia de fallas se requiere más combustible, y que además de aumentar costos en el proceso de generación de energía eléctrica, causa un incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero debido a un mayor consumo de combustible.

Con base en el Factor de Emisiones de Carbono, y del aumento de combustible utilizado para el proceso de generación, a continuación, se calcula la cantidad de toneladas de carbono emitidas en el proceso de generación durante un año de uso continuo (8000h) del SEIG en estado normal y con fallas, para tres diferentes fuentes de energía. Los resultados se muestran en la Tabla 5, donde se observa el aumento de toneladas de carbono [tC] generadas cuando el SEIG funciona en condiciones de falla.

ESTADO DEL SEIG	GAS NATURAL [tC]	DIESEL [tC]	BIODIESEL [tC]
a) Normal	9505.0	12549.1	6274.6
b) Mala conexión de los bobinados del estator	9873.4	13035.5	6517.7
c) Cortocircuito en el bobinado del estator	9917.0	13093.1	6546.5
d) Quiebre de aros o de barras del rotor	9778.2	12909.8	6454.9

**Tabla 5.** Toneladas de Carbono emitidas durante o proceso de generación de energía

Vale la pena mencionar que en el caso de los sistemas eólicos o PCH (pequeñas centrales hidroeléctricas) las emisiones de CO<sub>2</sub> son nulas, pero hay que considerar la pequeña cantidad de gas metano que contaminan las aguas.

Por otra parte se debe resaltar que si bien la cantidad de biodiesel (en unidades de masa) usada para el proceso de generación es mayor que la cantidad de gas natural y diesel, el biodiesel emite menos toneladas de carbono en el proceso combustión.

## 5.2 Impacto Económico

El impacto económico de la disminución de la eficiencia del SEIG considera los siguientes puntos: La disminución del tiempo de vida útil de la máquina, lo que resulta en la renovación del equipo en menos tiempo del planificado, y el aumento en los costos del proceso de generación de energía.

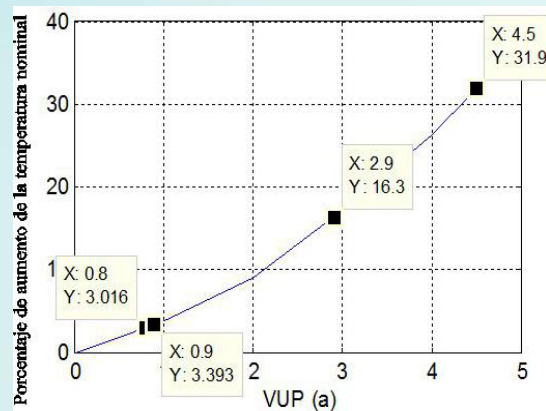
### i. Disminución del tiempo de vida útil del SEIG

El tiempo de vida útil del SEIG está sujeto a las proyecciones del fabricante, a la dimensión de la máquina y a la aplicación. Cuando las condiciones son ideales la vida útil de la máquina de inducción puede alcanzar los 30 años, pero de hecho, las máquinas están siempre expuestas al desgaste de materiales y a trastornos.

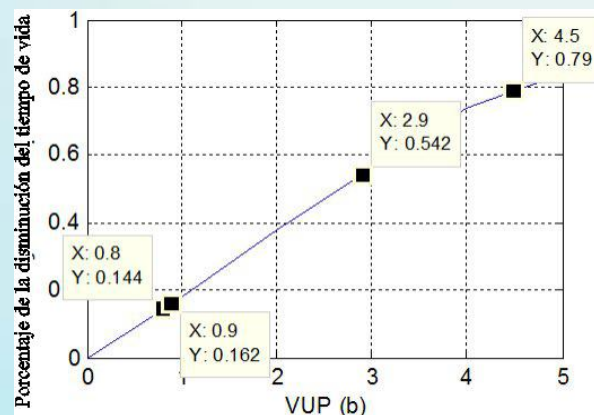


Diversos trabajos han estudiado la reducción de la vida útil de la máquina de inducción debido al incremento de temperatura, a las tensiones no balanceadas y a la presencia de armónicos. Por lo tanto, el trabajo realizado por Abreu y Eigeles (2000) muestra una relación directa entre el tiempo de vida que la máquina pierde a causa de tensiones desequilibradas (para el caso de bajo porcentaje de VUP) para máquinas de distintas potencias. Pillay y Hofmann (2001) presentan un estudio amplio relacionado al efecto que la temperatura causa al tiempo de vida de la máquina. Pillay (2006) presenta un estudio que relaciona el aumento de la temperatura y el VUP, con la disminución del tiempo de vida de la máquina en caso de una máquina con aislamiento Clase A y 20.000 horas de trabajo continuo.

De acuerdo con los valores experimentales obtenidos en Pillay (2006), es posible determinar la relación entre el aumento de la temperatura y la disminución de la vida útil de la máquina de acuerdo con los resultados de las simulaciones. En la Figura 5 y la Tabla 6, esta relación se presenta con base en los valores de VUP calculados para las fallas estudiadas.



**Figura 5.** Valores VUP en relación a:  
a) % de aumento de temperatura en relación, b) % de disminución del tiempo de vida útil.



La Tabla 6, presenta un resumen de los valores presentados en la Figura 5, donde se puede observar que la disminución del tiempo de vida útil del SEIG ocurre incluso en el funcionamiento normal. Sin embargo, cuando el SEIG opera bajo condiciones de falla la disminución del tiempo de vida presenta valores relevantes.



ESTADO DEL SEIG	VUP	AUMENTO DE TEMPERATURA	TIEMPO DE VIDA PERDIDO
a) Normal	0.8	3.02 %	14.4 %
b) Mala conexión de los bobinados del estator	2.9	16.30 %	54.2 %
c) Cortocircuito en el bobinado del estator	4.5	31.96 %	79.0 %
d) Quiebre de aros o de barras del rotor	0.9	3.39%	16.2 %

**Tabla 6.** Tiempo de vida útil perdido por causa de la elevación de la temperatura.

## ii. Pérdidas económicas en el proceso de generación de energía

La disminución de la eficiencia causada por los diferentes tipos de fallas en el SEIG, como se muestra en la Tabla 1 provoca pérdidas económicas en los costos de generación. Según Boldea y Nasar (2000), la disminución de la eficiencia, incluso siendo en un 2%, produce notables pérdidas económicas.

A continuación se presenta un análisis de las pérdidas económicas en el proceso de generación causada por la disminución de la eficiencia del SEIG en condiciones de falla. Para este propósito, se asume un sistema de generación continua, es decir, funcionando 8000 horas/año, los costos de generación son presentados según Sales (2008a). En el análisis se consideran tres tipos de combustible: biomasa, gas natural y diesel, así los costos de generación dependen directamente de la fuente utilizada. La Tabla 7 muestra los costos de generación para las cuatro condiciones de operación estudiadas.

ESTADO DEL SEIG	% <sup>17</sup> Pérdida	BIOMASA 0.46 Bs/kWh	GAS NATURAL 0.68 Bs \$/kWh	DIESEL 2.28 Bs \$/kWh
a) Normal	-	79346766,4	118036512,0	393455040,0
b) Mala conexión de los bobinados del estator	3.87	82417485,6	122604522,4	408681746,4
c) Cortocircuito en el bobinado del estator	4.33	82782479,4	123147489,2	410491640,8
d) Quiebre de aros o de barras del rotor	2.87	81624015,2	121424158,8	404747196,0

**Tabla 7.** Costos de generación para diferentes fuentes

Es importante tener en cuenta la existencia de incentivos fiscales, existentes en ciertos países, para la generación de energía a través de fuentes renovables, lo que reduce los costos de generación en sistemas basados en la quema de biomasa.

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A través del análisis de impactos se constató que:

- Las fallas en el generador, estudiadas en el presente trabajo, provocan la disminución de la energía generada que se traduce en disminución de la eficiencia y el aumento del VUP (dimensión tecnológica).
- El VUP y el aumento de la temperatura de la máquina, provocado por la disminución de la eficiencia, se relaciona con la disminución en el tiempo de vida del SEIG (Tabla 6). Esto indica que la planificación del sistema de generación se debe considerar que la vida útil de los equipos dependerá de las condiciones de funcionamiento.
- La disminución de la eficiencia causada por las fallas genera un gran aumento en los costes generación debido a la necesidad de mayores cantidades de combustible para generar la energía requerida, como se muestra en la Tabla 4. Este indicador es muy importante, ya que además de evaluar el proyecto desde el punto de vista tecnológico,





también permite evaluar la dimensión económica y medioambiental, a través del aumento de los costos de generación y de las emisiones de carbono.

- La robustez del SEIG permite que continúe funcionando a pesar de las fallas, sin embargo, si opera en este estado durante un largo tiempo, además de aumentar los costos de generación, pueden ocurrir averías graves causando paradas inesperadas lo que resulta en altos costos de reparación y operación.
- Considerando el medio ambiente, debido a la disminución de la eficiencia, se requiere mayor cantidad de combustible para generar la energía requerida, resultando en una mayor cantidad de emisiones de carbono (como se muestra en la Tabla 5).
- Por otra parte se debe resaltar que el biodiesel emite menos toneladas de carbono en el proceso combustión que el gas natural o el diesel y que la biomasa ofrece menores costos de generación.

## 7. SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS

Una vez evaluados los impactos económicos y ambientales, se mostró la necesidad de un sistema de diagnóstico de fallas internas con el fin de evitar la disminución de la eficiencia del SEIG. El sistema de diagnóstico que se propone en este trabajo está basado en técnicas de procesamiento digital de señales, específicamente en el uso de la transformada wavelet continua (CWT- *Continuous Wavelet Transform*).

En las siguientes sub secciones se explica brevemente la técnica de diagnóstico de fallas aplicada en el presente trabajo.

### 7.1 Análisis en el dominio tiempo-frecuencia.

El análisis en el dominio tiempo-frecuencia se aplicó en el módulo de las tensiones de estator ( $|V_{abc}|$ ), definido por la ecuación (3).

$$|V_{abc}| = \sqrt{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2} \quad (3)$$

Inicialmente, se calculó la transformada de Fourier, a través de los resultados se constataron las dificultades para identificar un patrón de comportamiento para cada una de las condiciones de operación estudiadas los resultados se presentaron en Herrera et al., 2010). Este hecho, se debe a la posibilidad de que el sistema presente condiciones no estacionarias debido a las constantes perturbaciones mecánicas y eléctricas, sumadas al comportamiento no lineal del SEIG.

Posteriormente, fue aplicada la CWT mediante la cual fue posible identificar patrones de comportamiento para cada condición de operación, como se muestra en Herrera (Ob.cit, 2010). El análisis del espectro de frecuencia de  $|V_{abc}|$  se considera una opción interesante y prometedora con el fin de identificar las fallas, debido a que trabaja con señales que pueden ser directamente medidas, sin necesidad de sensores especiales o estimadores.

Los resultados de la Potencia Espectral de Wavelet (WPS- *Wavelet Power Spectrum*) deben ser resumidos a través de un algoritmo de reducción que pueda cuantificarlos. Esta cuantificación se realiza mediante la herramienta de wavelet conocida como Espectro Global de Wavelet (GWS-*Global Wavelet Spectrum*), la cual captura la información proporcionada por la WPS en un intervalo de tiempo dado  $[n1, n2]$ , y se describe mediante la siguiente ecuación:





$$GWS = \frac{1}{n_a} \sum_{n=n_1}^{n_2} |W_n(s)|^2 \quad (4)$$

Donde  $W_n(s)$  son los coeficientes de CWT, el nuevo índice  $n$  se le asigna arbitrariamente al punto medio entre  $n_1$  y  $n_2$ , y  $n_a = n_2 - n_1 + 1$  es la media del número de puntos. Repitiendo la ecuación (4), a cada paso de tiempo, se construye una gráfica de wavelet en los ejes (Frecuencia vs Potencia Espectral). La ecuación (4) describe el GWS como la suma del cuadrado de los coeficientes de CWT en cada escala. Por lo tanto, el GWS es un vector donde cada valor corresponde a la potencia global en una escala determinada.

## 7.2 Resultados del cálculo del GWS

Con el fin de estudiar generadores de baja potencia bajo condiciones de carga diferentes, el modelo del SEIG fue simulado en diferentes condiciones de operación. En las simulaciones han sido utilizados los parámetros internos de tres máquinas de inducción diferentes, que para fines de identificación son llamadas como SEIG1, SEIG2 y SEIG3, generando 21kW/h, 18 kW/h y 16 kW/h respectivamente.

Para resumir el vector de datos suministrado por el GWS se calculó el área bajo la curva del mismo, denotado por  $A_{GWS}$ . Por lo tanto, se obtuvo un valor numérico en lugar de un vector de datos, lo que facilita la interpretación de los resultados. La Tabla 8 presenta los resultados para tres diferentes máquinas en cuatro diferentes condiciones de carga.

MÁQUINA	CARGA INDUTIVA/ CARGA RESISTIVA	(a)	(b)	(c)	(d)
SEIG1	Alta $L_L$ /Alta $R_L$	$2,02 \times 10^{-2}$	$3,98 \times 10^{-3}$	$1,38 \times 10^{-5}$	$1,17 \times 10^{-3}$
SEIG1	Alta $L_L$ /Baixa $R_L$	$1,91 \times 10^{-5}$	$8,62 \times 10^{-3}$	$5,00 \times 10^{-4}$	$4,35 \times 10^{-2}$
SEIG2	Alta $L_L$ /Alta $R_L$	$4,03 \times 10^{-18}$	$2,83 \times 10^{-3}$	$9,44 \times 10^{-4}$	$7,09 \times 10^{-2}$
SEIG2	Alta $L_L$ /Baixa $R_L$	$1,79 \times 10^{-20}$	$1,04 \times 10^{-4}$	$5,38 \times 10^{-4}$	$4,50 \times 10^{-2}$
SEIG3	Alta $L_L$ /Alta $R_L$	$2,80 \times 10^{-3}$	$9,36 \times 10^{-3}$	$7,57 \times 10^{-4}$	$7,67 \times 10^{-2}$
SEIG3	Alta $L_L$ /Baixa $R_L$	$2,14 \times 10^0$	$1,92 \times 10^{-4}$	$6,74 \times 10^{-4}$	$5,09 \times 10^{-2}$
SEIG1	Baixa $L_L$ /Alta $R_L$	$7,05 \times 10^{-2}$	$3,28 \times 10^{-3}$	$1,34 \times 10^{-5}$	$1,53 \times 10^{-3}$
SEIG1	Baixa $L_L$ /Baixa $R_L$	$4,04 \times 10^{-5}$	$8,01 \times 10^{-3}$	$4,70 \times 10^{-4}$	$4,01 \times 10^{-2}$
SEIG2	Baixa $L_L$ /Alta $R_L$	$6,68 \times 10^{-16}$	$2,45 \times 10^{-3}$	$8,65 \times 10^{-4}$	$6,64 \times 10^{-2}$
SEIG2	Baixa $L_L$ /Baixa $R_L$	$4,46 \times 10^{-23}$	$9,63 \times 10^{-3}$	$5,03 \times 10^{-4}$	$4,14 \times 10^{-2}$
SEIG3	Baixa $L_L$ /Alta $R_L$	$2,81 \times 10^{-2}$	$8,72 \times 10^{-3}$	$6,67 \times 10^{-4}$	$7,10 \times 10^{-2}$
SEIG3	Baixa $L_L$ /Baixa $R_L$	$1,91 \times 10^{-5}$	$1,73 \times 10^{-4}$	$6,20 \times 10^{-4}$	$4,61 \times 10^{-2}$

**Tabla 8.** Valores del  $A_{GWS}$  para diferentes condiciones de operación: a) Normal, b) Mala conexión de los bobinados del estator, c) Cortocircuito en el bobinado del estator, d) Quiebre de aros o de barras del rotor

Se observa claramente que los valores del GWS, para el SEIG en condiciones normales, son cercanos a cero. En el caso del SEIG en condiciones de falla los valores del GWS presentan un crecimiento característico para cada condición, lo que permite separar los valores obtenidos en distintos fajas y por lo tanto realizar el procedimiento de detección y clasificación de cada falla.

## 7.3 Sistema de diagnóstico

El sistema de diagnóstico de fallas interna se puede resumir en tres unidades funcionales que representan la metodología de diagnóstico propuesta:



- 1ra. Analizador Tiempo-frecuencia. Aplicado para reconocer los patrones de comportamiento de las señales analizadas, este paso consiste básicamente en el cálculo de la WPS.
- 2da. Algoritmo de Reducción. El objetivo de este paso es extraer un conjunto de características que representan el comportamiento de la señal analizada en el dominio tiempo-frecuencia. En este trabajo, la reducción de dimensión se llevó a cabo por medio del GWS, específicamente del  $A_{GWS}$ .
- 3ra. Identificador de patrones. Se compone de un sistema entrenado para caracterizar el conjunto de variables de entrada. Como el  $A_{GWS}$  tiene un rango específico de valores para cada condición de falla, no es necesario entrenar un sistema sofisticado, basta con especificar el rango de valores del  $A_{GWS}$  al cual pertenece cada falla, presentado en la Tabla 9.

ESTADO DEL SEIG	$A_{GWS}$
a) Normal	$3 \times 10^{-23} < GWS < 1 \times 10^0$
b) Mala conexión de los bobinados del estator	$3 \times 10^4 < GWS < 2 \times 10^5$
c) Cortocircuito en el bobinado del estator	$2 \times 10^3 < GWS < 3 \times 10^4$
d) Quiebre de aros o de barras del rotor	$1 \times 10^2 < GWS < 2 \times 10^3$

**Tabla 9.** Rango de valores de  $A_{GWS}$  para las diferentes condiciones de operación

En relación al sistema de diagnóstico propuesto, se puede considerar que:

- Observando las señales generadas por el SEIG bajo diferentes condiciones de operación, se constata que las fallas causan un mayor desequilibrio en las señales generadas, como puede ser observado tanto en la Figura 4, como en la Tabla 2.
- Se encontró que la transformada de Fourier no tiene características diferenciales cuando se aplica al módulo de los voltajes del estator del SEIG en todas las condiciones de operación estudiadas. Sin embargo, la PWS presenta características diferentes para cada condición de operación del SEIG. Esta peculiaridad permite el diagnóstico de fallas mediante la aplicación de un proceso de reconocimiento de patrones, determinando rangos del  $A_{GWS}$  para cada condición de operación, los cuales se resumen en la Tabla 8.

## 8. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un breve estudio de los impactos económicos y ambientales de la disminución de la eficiencia causada por las fallas internas del SEIG, basado en resultados de simulación computacional. Esta evaluación muestra la necesidad de un sistema de diagnóstico de fallas con el fin de evitar la disminución de la eficiencia causada por las fallas internas del SEIG.

El sistema de diagnóstico propuesto tiene como contribución principal la capacidad para clasificar cada condición de funcionamiento del SEIG sin la necesidad de aplicar un sistema clasificador sofisticado, utilizando directamente los valores del área bajo la curva GWS.

A pesar de ser aplicado un proceso de combustión para la generación de energía, el sistema de diagnóstico propuesto se encarga de disminuir los impactos económicos y ambientales causados por la disminución de eficiencia. El análisis de impactos mostró también que los biocombustibles pueden presentar menores costos de generación y emitir menor cantidad de carbono en el proceso de combustión.



Por último, se hace hincapié en que las soluciones a los problemas energéticos actuales deben considerar además del ámbito de la tecnología, los problemas en la dimensión económica, ambiental y social, con el fin de lograr procesos energéticos eficientes y sobre todo sostenibles.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) BHASKARA, P.; GODOY, M. S. E FARRET, F. A. Dynamic Simulation and Analysis of Parallel Self-Excited Induction Generators for Islanded Wind Farm Systems. Em: IEEE Transactions On Industry Applications, VOL. 41, No. 4, July/August 2005.
- (2) BOLDEA, I. e NASAR S. *The Induction Machine HandBook*, CRC Press Boca Raton London New York Washington, D.C. 2000
- (3) DE ABREU, J. e EIGELES, A. Induction Motors Loss of Life due to Voltage Imbalance and Harmonics: A Preliminary Study. Em: Proceedings. Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2000.
- (4) DOS SANTOS, M., PINGUELLI, L., SIKAR, B., SIKAR, E., SANTOS, E. O. Gross greenhouse gas fluxes from hydro-power reservoir compared to thermo-power plants. Dezembro, 2004.
- (5) FESHKI FARAHANI, H., HAFEZI, H. R., HABIBINIA, D., JALILIAN, A. R., A. SHOULAEI. Investigation of Unbalance Supplying Voltage on the Thermal Behavior of Squirrel Cage Induction Motor Using Monitoring System. Universities Power Engineering Conference, UPEC 2007 pag 210 – 216
- (6) HERRERA, V., ANDRADE-ROMERO, J.A. e ROMERO, J. F. A., “Metodologia de detecção de falhas em geradores de indução utilizando a potência espectral de wavelet.” In 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Application. São Paulo, Brasil. 2010a.
- (7) HERRERA, V., ANDRADE-ROMERO, J. A., ROMERO, J. F. Sistema de diagnóstico de falhas do gerador de indução visando evitar a diminuição da eficiência, Anales del VI Congreso Brasileiro de Eficiencia Energética, Juiz de Fora – Brazil, 2011.
- (8) NEAA - Netherlands Environmental Assessment Agency (NEAA) - Greenhouse Gas Emissions in the Netherlands 1990-2003:, National Inventory Report, 2005.
- (9) PG&E - Pacific Gas and electric Company, Voltage Unbalance and Motors, Outubro 2009.
- (10) PILLAY, P. e HOFMANN, P. Derating of Induction Motors Operating with a Combination of Unbalanced Voltages and Over- or Under voltages. Em: Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE 2001.
- (11) PILLAY, P. Loss of Life in Induction Machines Operating With Unbalanced Supplies. Em: *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 21, No. 4, Dezembro, 2006.
- (12) ROMERO, J.F.A. e HEMERLY, E. . Desempenho de Estimadores de Fluxo em Máquinas de Indução. Em: IV Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, 1997, Belo Horizonte. COBEP'97. Belo Horizonte : Pedro Francisco Donoso Garcia - UFMG, 1997. p. 474-479.
- (13) SALES, C. J. Fontes Renováveis de Energia: viabilidade da criação de um fundo especial de fomento às energias eólica e solar. Comissão Especial – Fontes Renováveis de Energia. 2008a.
- (14) SALES, C. J.. Expanding the Role for Thermal Power Generation in Brazil –Ensuring Energy Security. Em 2nd Coaltrans Brazil. 2008b.
- (15) STOCKS, M., RODYUKOV F. e MEDVEDEV A. Idealized two-axis model of induction machines under rotor faults, Em: 1st IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications ICIEA, Singapore, 2006b.
- (16) STOCKS, M., RODYUKOV F. e MEDVEDEV A. Idealized two-axis models of faulty induction machines under stator faults. Em: 1st IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications ICIEA, Singapore 2006a.



## GENERADORES FOTOVOLTAICOS Y SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN BOLIVIA

**Fabián Benavente** – [fabianbenaventea@gmail.com](mailto:fabianbenaventea@gmail.com)

Instituto de Investigaciones Químicas - UMSA

**Saúl Cabrera** – [saulcabreram@hotmail.com](mailto:saulcabreram@hotmail.com)

Instituto de Investigaciones Químicas - UMSA

**Eduardo Palenque** – [edyruy@yahoo.es](mailto:edyruy@yahoo.es)

Instituto de Investigaciones Físicas - UMSA

**Resumen.** *En Bolivia las energías alternativas como la solar (SFV) no sustituirán a las tradicionales, pero tienen un alto impacto en beneficiarios aislados del Sistema Interconectado Nacional (SIN), es decir, fundamentalmente en el área rural. Para poder garantizar la eficiencia de SFV (su funcionamiento óptimo, tiempo de vida prolongada, costo factible, y otros) se plantea el uso de sistemas de almacenamiento basados en baterías ION-Li cuyo desarrollo en nuestro país tiene gran potencial.*

**Palabras clave:** *baterías, litio, energías renovables, sistemas fotovoltaicos, Bolivia*

### 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente existen dos grandes problemas relacionados a la generación de energía eléctrica a nivel mundial, por un lado están los elevados costos relacionados a la producción de energía eléctrica y por otro el daño al medio ambiente debido a la generación de Gases de Efecto de Invernadero (GEI) (Moraes et. al, 2010). Bolivia no es la excepción debido su fuerte dependencia del gas y del diesel para producir aproximadamente el 59% de su energía eléctrica (termoeléctricas). Sin embargo, existe el Plan de Expansión del Sistema Interconectado Nacional (SIN) que cambiará la matriz energética del sector eléctrico en forma significativa, posibilitando un desarrollo sostenible. El cambio en la matriz energética busca reducir la dependencia de las termoeléctricas, de un 59 % actual a un 40% para el 2022, potenciando la generación de electricidad a través de centrales hidroeléctrica (Ministerio de Hidrocarburos y Energía, 2012).

Los proyectos de generación de electricidad a partir de energías alternativas, como la solar y la eólica, no son factibles económicamente en el esquema de remuneración actual por lo que dependen fuertemente de la ayuda que el gobierno brinda para su instalación y mantenimiento. Sin embargo, una de las razones por las que se ha estado utilizando este tipo de tecnologías es que tienen un gran impacto en los beneficiarios del área rural, que están aislados del SIN y no cuentan con energía eléctrica, siendo esta alternativa una ventana al mejoramiento de su calidad de vida y disminución de su vulnerabilidad y su nivel de pobreza.

### 2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN BOLIVIA

Bolivia cuenta con una amplia experiencia en la implementación de Sistemas Fotovoltaicos (SFV) para electrificación rural. Existe un plan iniciado en 1979 para que la energía eléctrica llegue a todos sus habitantes, existiendo instalaciones de SFV mediante proyectos privados y estatales, como CRE (5600 SFV), FIS (847 SFV) y PNUD (600 SFV), hasta el 2003.





A partir de ese año se han promocionado nuevos programas de instalación de SFV, fortaleciéndose los mismos desde el 2006 con el Programa Electricidad para Vivir con Dignidad (PEVD), que pretende lograr el Acceso Universal hasta el 2025. Del 2003 a la fecha se instalaron aproximadamente 30.000 SFV, quedando aun 420.000 hogares rurales por electrificar, dado que el 97% del territorio nacional tiene una alta factibilidad para la utilización de SFV. Según las proyecciones, con el propósito de alcanzar la universalización de la energía en Bolivia, se instalarán aprox. 90.000 nuevos SFV (Canedo, 2005).

Actualmente, debido a falta de mantenimiento, aproximadamente entre el 35 al 45 % de estos sistemas instalados están en desuso (Canedo, 2005). Uno de los principales motivos parece ser que la mayoría de estos SFV, al utilizar sistema de almacenamiento de baterías tipo PbA, requieren un alto cuidado (reposición de la solución electrolítica, uso del controlador de descarga y carga, la disposición final de la misma<sup>2</sup>, elevado peso y tamaño, tiempo de vida corto y baja capacidad comparada con otro tipo de baterías); adicionalmente un factor relevante es el tiempo de vida relativamente corto (2.5 a 5.5 años), comparado al panel solar (12 a 15 años). Esto implica la necesaria sustitución de la misma, por varias veces, durante la utilización de un SFV, pero esto en muchos casos no es posible, por las condiciones precarias de los beneficiarios del área rural, que son los beneficiarios principales en nuestro país, generando la inhabilitación del SFV.

### **Sistemas de almacenamiento de energía para SFV**

Entre las características más importantes con las que debe contar un sistema de almacenamiento para su uso efectivo en SFV se puede mencionar:

- Vida útil prolongada (muchos ciclos de carga/descarga)
- Alta capacidad específica y volumétrica (más liviana y más pequeña)
- Alta retención de la capacidad a tasas bajas de descarga
- Alta confiabilidad bajo condiciones de descarga
- Alto rendimiento a temperaturas altas
- Requerimientos bajos de sincronización
- Requerimientos bajos de mantenimiento
- Precios accesibles y factibles para su utilización
- Costos de instalación bajos

En este contexto, no solo en Bolivia, sino en muchos países en desarrollo, donde las energías limpias son altamente promocionadas, bajo un criterio de conservación del medio ambiente, se evalúa la sustitución de las baterías de plomo (tipo PbA) por las de litio – ion dentro el sistema de almacenamiento por sus ventajas en tiempo de vida, densidad de energía (Tabla 1), y eficiencia (Figura 1), a un costo mayor pero rentable en el tiempo, considerando que las baterías de plomo, sin los cuidados correspondientes causan un daño ambiental muy alto.

**Tabla 1.** Parámetros característicos de diferentes tipos de baterías

Batería	Ciclos	Tiempo de vida (años)	Densidad energética Wh/kg	Costo (US\$/kWh)
Li-ION	5000 – 7000	14 – 16	200 – 370	1200
PbA	500 – 1000	2.5 – 5.5	30 – 50	300 – 600
NiCd	2000 – 2500	13 – 16	50 – 75	1000
NaS	2500	14 – 16	150 – 240	350

<sup>2</sup> Estas baterías deben ser manejadas responsablemente por contener compuestos nocivos al medio ambiente

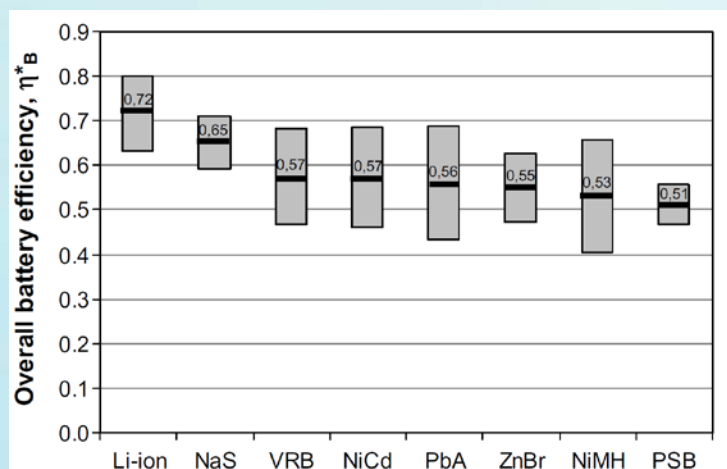


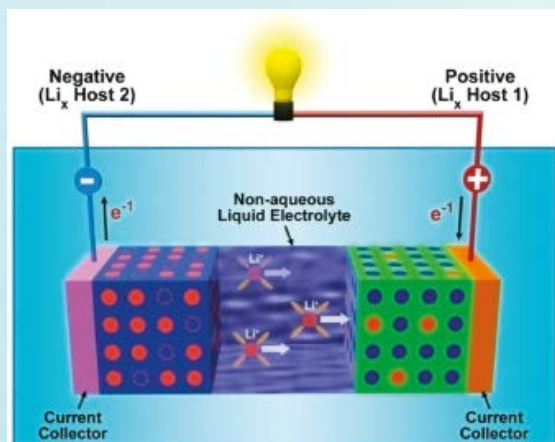
Figura 1. Eficiencia global de distintos tipos de baterías. (Johan et. al, 2005)

Es así que a pesar de los altos costos que representa la implementación de sistemas de almacenamiento basados en ION-Li se puede justificar su uso en el tiempo, y el aprovechamiento neto de la energía generada por SFV, fundamentalmente para las zonas rurales de Bolivia.

Otro de los factores que hace atractiva la propuesta, es que Bolivia cuenta con una Política Nacional que pretende desarrollar baterías de litio – ion, en base a los recursos evaporíticos existentes en la región. Este proyecto, actualmente en ejecución por la Corporación Minera de Bolivia (COMIBOL), pretende consolidar la producción de baterías de ION-Li hasta el 2015, lo cual ofrece una ventaja en costos de fabricación y transporte de las mismas, y una oportunidad de articular dicho proceso de producción con la demanda nacional en el campo energético, bajo el Programa Nacional de Electrificación Rural que pretende universalizar la energía eléctrica al 2025.

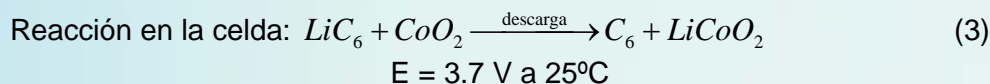
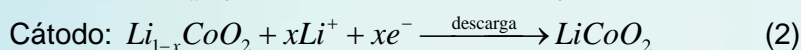
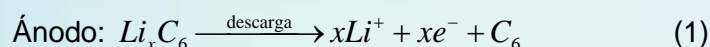
### **Baterías de ion-litio**

Las baterías ION-Li almacenan energía eléctrica en electrodos cuyos componentes pueden intercalar iones litio en su estructura. Durante los procesos de carga o descarga, iones  $\text{Li}^+$  se mueven a través de un electrolito situado entre los electrodos con un concomitante proceso de oxidación y reducción en los materiales activos que los componen. El electrolito puede ser líquido, gel o sólido; la mayoría de las baterías ION-Li utiliza electrolitos líquidos que contienen una sal de litio, como el  $\text{LiPF}_6$  generalmente, que se disuelve en un solvente orgánico (Soroush et. al, 2012). Se muestra En la Figura N 2 se muestra la operación de descarga de una batería ION-Li.



**Figura 2.** Esquema del funcionamiento de una celda tradicional de ION-Li.  
Fuente: Zhenguo (et al., 2011)

Una batería de ION-Li se compone principalmente de: cátodo, ánodo, electrolito, separador, colectores y carcasa, para un arreglo del tipo  $\text{LiCoO}_2/\text{grafito}$  se presentan las siguientes reacciones químicas tanto en el ánodo como en el cátodo:



El desempeño favorable de estos sistemas se refleja en su capacidad y en sus densidades de potencia y energética. Los avances tecnológico – científicos que se están llevando a cabo, principalmente para el desarrollo de baterías para automóviles eléctricos e híbridos han convertido a esta tecnología en una alternativa atractiva para su uso en sistemas de almacenamiento y gestión energética en el campo de las energías alternativas alrededor del mundo. Estas propiedades son altamente dependientes del tipo de arreglo cátodo/ánodo que se utilice. Podemos mencionar tipos de arreglos comerciales que actualmente se utilizan: el convencional  $\text{LiCoO}_2/\text{grafito}$ ,  $\text{LiMn}_2\text{O}_4/\text{grafito}$ ,  $\text{LiFePO}_4\text{-C}/\text{grafito}$ . Como se puede apreciar todas tienen en común al grafito en el ánodo debido a su bajo costo y alta densidad energética, lo cual dirige principalmente la atención al cátodo.

Actualmente se utiliza el arreglo  $\text{LiCoO}_2/\text{grafito}$  para fabricar baterías recargables que se usan en dispositivos electrónicos (celulares, Smartphone, tablets, laptops), sin embargo este arreglo no es viable para su uso en baterías para automóviles EV, HEV debido a aspectos de seguridad, costo y contaminación, por lo que se están desarrollando los arreglos  $\text{LiMn}_2\text{O}_4/\text{grafito}$  y  $\text{LiFePO}_4\text{-C}/\text{grafito}$  (o alternativamente con ánodos en base a titanio  $\text{LiFePO}_4 - \text{LTO}/\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ) debido a su bajo costo, seguridad y bajo impacto ambiental, pero adicionalmente con propiedades electroquímicas de potencia y carga/descarga casi similares (Tabla 2). En Bolivia existe un gran potencial para la fabricación de estos materiales y consecuentemente baterías basadas en estos arreglos (Cabrera et al., 2012), visualizándose una oportunidad para la producción de baterías de ion litio para SFV.





	LiCoO <sub>2</sub>	LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	LiFePO <sub>4</sub>
Capacidad específica	145	148	170
Densidad	2.6 – 3.0	1.8 – 2.4	0.8 – 1.4
Voltaje de descarga	3.6	3.7	3.3
Numero de Ciclos	500 – 800	1000 – 1500	> 3000
Temperatura de trabajo	-20 – 55	-20 – 50	-20 – 60

Tabla 2. Comparación de materiales catódicos típicos. (Haisheng et. al, 2011)

En lo que respecta al uso de baterías de Ion-Li para sistemas de almacenamiento en SFV se debe tomar en cuenta dos parámetros fundamentales que determinan la tecnología a usar: el costo y el tiempo de vida. Con esto se puede pensar en el arreglo LiFePO<sub>4</sub>/Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (Figura 3) como alternativa atractiva para su uso en el país, ya existen avances en el desarrollo de estos compuestos tanto local como internacionalmente (Cabrera et. al, 2012).

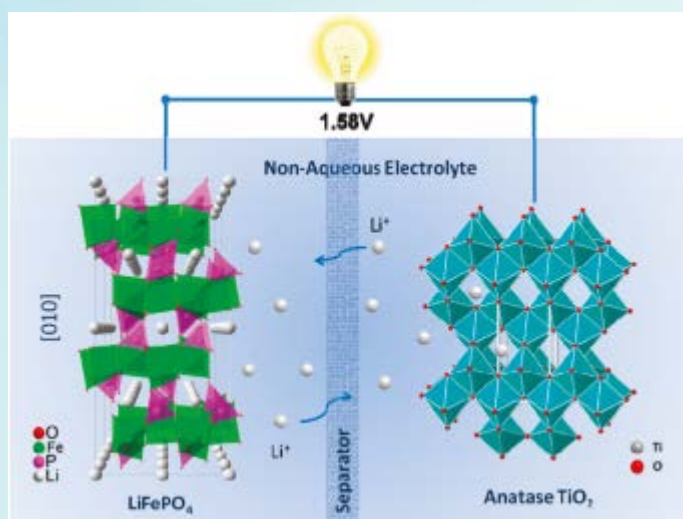


Figura 3. Esquema de una celda con un arreglo del tipo LiFePO<sub>4</sub>/Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub>  
Fuente: Zhenguo et al, 2011

Entre las ventajas de este sistema están el bajo costo de sus componentes y la alta estabilidad que presentan en el proceso de carga/descarga. La estabilidad, además de ofrecer seguridad ante incrementos en la temperatura, también aumenta el tiempo de vida o número de ciclos debido a la estructura tipo olivina y los fuertes enlaces covalentes entre el hierro y el oxígeno que evitan que la estructura se deforme y destruya prematuramente.

Recientemente se han desarrollado baterías de ION-Li para sistemas estacionarios de almacenamiento de energía (Beaudin et. al, 2010), y se están probando en aplicaciones residenciales y comunitarias (área urbana y rural). Finalmente, es necesario mencionar que estos sistemas deben siempre incluir un sistema de control electrónico para evitar daños en la batería por descargas completas o sobrecargas.



### 3. CONCLUSIONES

Bolivia ha implementado una gran cantidad de SFV, en áreas rurales, y pretende incrementar los mismos con el propósito de contribuir a la electrificación universal al 2015, donde debido al carácter intermitente de la energía generada por SFV, es necesario contar con sistemas de almacenamiento de energía para su aprovechamiento óptimo y sostenible. Los sistemas tradicionales de almacenamiento de energía basados en baterías de plomo tienen tiempos de vida reducidos, por lo que se desarrolla la sustitución de los mismos por baterías ION-Li. Bolivia, en función a sus políticas nacionales de electrificación y de industrialización de recursos evaporíticos tiene una oportunidad para el desarrollo de estos sistemas de almacenamiento con potencial no solo para el uso nacional, sino a nivel mundial.

### AGRADECIMIENTOS

Al programa de cooperación ASDI -UMSA, proyecto “Energía y Desarrollo Sostenible” y a los equipos de investigación del IIQ, del IIF que han colaborado en el estudio de evaluación.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Beaudin M., Hamidreza Z., Anthony S., William R., 2010, Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review, *Energy for Sustainable Development*, n. 14, p. 302 – 304.
- (2) Cabrera S., Benavente F., Vargas M., Flores J., Ortega M., Villca J., Mamani R., Leiva N., Luna M., Yapu W., Blanco M., Palenque E., Balanza R., 2012, Procesamiento de Materiales Como Electrodos Para Baterías de Ion Litio en Bolivia, *Revista Boliviana de Química*, v. 20, n. 10.
- (3) Haisheng T., Zhizhong F., Hao L., Xianwen K. and P. Chen, 2011, Reality and Future of Rechargeable Lithium Batteries, *The Open Materials Science Journal*, n. 5, p. 204 – 214.
- (4) Johan C., Sandén B., 2005, Energy analysis of batteries in photovoltaic systems. Part II: Energy return factors and overall battery efficiencies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n 46, p. 1980 – 2000.
- (5) Johan C., Sandén B., 2005, Energy analysis of batteries in photovoltaic systems. Part II: Performance and energy requirements, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n 46, p. 1957 – 1979.
- (6) Ministerio de Hidrocarburos y Energía, 2012, Plan Optimo de Expiación del Sistema Interconectado Nacional 2012 – 2022.
- (7) Moraes O., Delly Oliveira Filho, Antônia Sônia Alves Cardoso Diniz, 2010, Distributed photovoltaic generation and energy storage systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n. 14, p. 506 – 511.
- (8) Soroush, M., Chmielewski, D. J., 2010, Process Systems Opportunities In Power Generation, Storage And Distribution, *Computers and Chemical Engineering*, p. 0 – 15.
- (9) Walter Canedo Espinoza, 2005, Diagnóstico del Sector Energético en el Área Rural de Bolivia, OLADE-ACDI-Universidad de Calgary.
- (10) Zhenguo Y., Jianlu Z., Michael C., Kintner-Meyer, Xiaochuan L., Daiwon C., John L., and Jun L., 2011, Electrochemical Energy Storage for Green Grid, *Chemical Reviews*, n. 111, p. 3577 – 3613.



## REMOCIÓN DE ARSÉNICO POR OXIDACIÓN SOLAR (RAOS) EN UN FOTO-REACTOR TUBULAR DE SECCIÓN SEMI-CIRCULAR

**Ramiro Escalera Vásquez** - [rescalera@upb.edu](mailto:rescalera@upb.edu)

(Universidad Privada Boliviana, Centro de Investigaciones en Procesos Industriales – CIPI)

**Omar Ormachea Muñoz** - [oormachea@upb.edu](mailto:oormachea@upb.edu)

(Universidad Privada Boliviana, Centro de Investigaciones Ópticas – CIO)

**Resumen.** Se ha construido y caracterizado un foto-reactor tubular de sección circular que ha sido aplicado al tratamiento de aguas subterráneas contaminadas con As(V), utilizando la técnica de la Remoción de Arsénico por Oxidación Solar (RAOS). El concentrador solar fue construido reciclando materiales desechados: tubos de vidrio proveniente de lámparas fluorescentes y tubos de desagüe sanitario de 6" (PVC), recubierto por láminas de aluminio y con capacidad de radiación equivalente a 2,8 soles. Pruebas simultáneas, sin agitación, realizadas aplicando la radiación UV solar a aguas sintéticas en el foto-reactor, un tubo de vidrio sólo y una botella PET de 2 litros, demostraron que la remoción de As(V) en el foto-reactor es más rápida, logrando remociones mayores al 98% en todos los casos. Los tiempos de aparición de los flóculos de complejo Fe-citrato fueron de 40, 50 y 90 min respectivamente, para intensidades de radiación UVA integral (290-390 nm) entre 50 y 70  $\text{Wm}^{-2}$ . Pruebas de irradiación seguidas de agitación controlada a 30-33  $\text{s}^{-1}$  de gradiente de velocidad demostraron que la concentración de la radiación solar y la agitación aceleran el proceso global de formación de flóculos fácilmente sedimentables. Los tiempos de irradiación para el foto-reactor, el tubo y la botella de 15, 25 y 60 min respectivamente. Pruebas en régimen de flujo continuo en un foto-reactor de aproximadamente 0,9  $\text{m}^2$  de área, con un tiempo de residencia hidráulica (igual al tiempo de irradiación) de 15 min, mostraron que inmediatamente se producen flóculos fácilmente sedimentables cuando se agitan a 33  $\text{s}^{-1}$  durante algunos minutos, lográndose una remoción del 98,36% y una concentración remanente de 16,5  $\text{mgL}^{-1}$  de As(V) en aguas decantadas. Esto significa que se pueden tratar aproximadamente 130  $\text{Lm}^{-2}$  en una jornada de 5 horas de radiación UVA de 50-70  $\text{Wm}^{-2}$  de intensidad.

**Palabras clave:** foto-reactor tubular, remoción de arsénico en aguas subterráneas, radiación ultravioleta, floculación

### 1. INTRODUCCIÓN

Un problema de importancia sanitaria a nivel mundial es la contaminación natural de las aguas subterráneas con arsénico. Entre los países más afectados con este tipo de contaminación se encuentran Bangladesh, India, Chile y Argentina (Hug et al., 2001a; Cornejo et al., 2004). Recientemente (Ormachea, 2008), en nuestro país se han detectado regiones en el altiplano, concretamente la cuenca del Lago Poopó, en las que aguas de pozos poco profundos (hasta 30 m), poseen concentraciones de arsénico que sobrepasan hasta en 25 veces la norma boliviana de agua potable y la recomendación de la OMS (10  $\mu\text{g/l}$ ).

El consumo de estas aguas en lugares secos donde no existen otras fuentes, por las elevadas concentraciones de arsénico en la ingesta diaria de las poblaciones afectadas han ocasionado graves enfermedades, tales como el cáncer de la piel, de pulmones, la hiperqueratosis y daños al sistema nervioso central (Hall, 2002; Hanjani et al. 2007).





Por estas razones, las investigaciones de varios grupos de científicos se han enfocado a la remoción de arsénico mediante la aplicación de radiación solar ultravioleta y se han desarrollado sistemas caseros de tratamiento de aplicación inmediata, utilizando botellas PET.

Se puede citar los trabajos de Hug et al. (2001b) que desarrolló la técnica de RAOS, un método aplicado con éxito relativo en Bangladesh, donde las concentraciones varían entre 100 y 150 µg/l, removiendo el As(III) con una eficacia del 50-70% . La metodología RAOS usa el Fe(III) presente naturalmente en las aguas naturales de ese país, con adiciones de citrato en presencia de la luz solar para remover arsénico por adsorción con los óxidos de hierro. El mismo método, modificado por la adición de una sal de Fe(II), ha sido utilizado por Lara et al (2006) para lograr remociones mayores al 95% en aguas de alta concentración de As(V) contenido en las aguas del río Camarones (1250 µg/l).

Últimamente, se presentaron excelentes resultados de remoción de As(III) y As(V) en aguas naturales de río (Cornejo et al., 2008), por medio de la adición de unas gotas de limón como fuente de citratos y unos cuantos gramos de virutas de hierro como fuente de Fe(0), obteniéndose remociones mayores del 99,5% y logrando bajar la concentración hasta cumplir la recomendación de la OMS (OMS, 1993).

Sin embargo, estos procesos son largos (duran entre 3 y 6 horas), no siempre se pueden controlar y en general se hace difícil garantizar una buena calidad del agua de consumo en forma permanente. A la fecha no se han reportado estudios sobre características de funcionamiento de foto-reactores tubulares que utilicen la técnica RAOS para el tratamiento de aguas contaminadas con arsénico.

El objetivo de este estudio es sentar las bases para el desarrollo de un sistema de tratamiento de flujo continuo de mayor capacidad destinado a prestar servicios de purificación en comunidades pequeñas de áreas rurales. En estas zonas, además de requerir agua para beber, se necesitan grandes volúmenes de agua para riego.

El estudio se ha centrado en el desarrollo y aplicación de un foto-reactor tubular solar que concentra la radiación varias veces la intensidad de radiación solar, lo que permite acelerar la velocidad de tratamiento de estas aguas. El reactor ha sido construido reciclando materiales desechables y baratos como los tubos de neón, tubería y accesorios plásticos de desagüe de alcantarilla y papel de aluminio.

En la presente investigación se caracterizan los atributos ópticos del foto-reactor y se determinan las características de funcionamiento en la remoción de arsénico en modo batch y en flujo continuo. Se han comparado las condiciones de operación (tiempos de irradiación, intensidad de radiación) necesarios para obtener remociones de As(V) mayores al 95%, utilizando la técnica modificada de RAOS en tres reactores: el foto-reactor descrito, un tubo de vidrio y una botella PET de 2 L de capacidad.

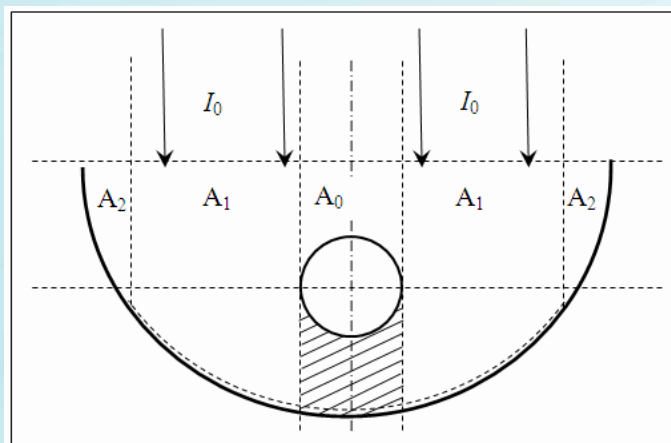
## **2. CARACTERIZACIÓN ÓPTICA DE CONCENTRADORES CIRCULARES**

Se realizó la caracterización óptica del foto-reactor, que es básicamente un concentrador semicircular.

Como material para la construcción de los colectores ópticos se emplearon tubos de PVC de 0.16 m de diámetro interno y 1 m de largo. Estos tubos fueron cortados en dos partes de



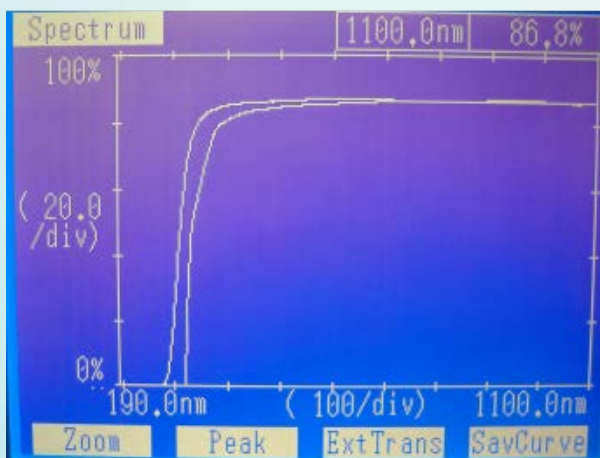
manera transversal para obtener dos semicircunferencias. En la Figura 1 se muestra el corte transversal de la configuración elegida.



**Figura 1.** Esquema de diseño del reactor tubular

Como tubos transparentes para el diapasón electromagnético 290 – 390 nm (UVA) se propuso el uso de tubos de Ne usados, reciclando el material indicado. Estos tubos fueron propuestos por su transmitancia más efectiva en comparación a las botellas PET.

En la Figura 2 se muestran los espectros de transmisión referentes a los dos materiales: se observa claramente que en el rango 280 – 320 nm el tubo de vidrio reciclado tiene mayor transmitancia, en comparación a la botella PET. Aún cuando el plástico utilizado tiene menor espesor que el tubo de vidrio y aparentemente es altamente transparente, tiene mayor absorbancia en esta parte del espectro.



**Figura 2.** Espectro de transmitancia del tubo de vidrio y botella PET

En el foco de estas semicircunferencias, se dispusieron estos tubos de vidrio reciclados de 3,6 cm de diámetro como parte fundamental del reactor tubular.

Los tubos de PVC fueron recubiertos de papel aluminio para convertirlos en elementos colectores de radiación ultra-violeta. El aluminio tiene un alto índice de reflectancia para el rango UVA del espectro solar electromagnético, (Blanco et al., 2001).



## 2.1 Potencia real recibida dentro de los tubos

Como aproximación, se tomará en cuenta la influencia de la reflexión de la radiación UVA, del área sombreada bajo el tubo (ver Figura 1). La potencia UVA real recibida dentro del tubo es:

$$P_{tubo}^{colector} = I_0 (A_0 \cdot T_{tubo} + 2A_1 \cdot R_{Al} \cdot T_{tubo} + A_0 \cdot T^{As} T_{tubo} R_{Al} T_{tubo}) \quad (1)$$

Donde,  $I_0$ : intensidad solar incidente ( $Wm^{-2}$ ),  $A_0$ ,  $A_1$ : área perpendicular a la radiación incidente ( $m^2$ ),  $R_{Al}$ : reflectancia del aluminio (-),  $T_{tubo}$ : transmitancia del tubo (-),  $P_{tubo}^{colector}$ : potencia recibida por el tubo en el concentrador solar, (W) y  $T^{As}$ : transmitancia de la solución acuosa que contiene As, Fe(II) y citrato de sodio (-). El término  $(A_0 \cdot T^{As} T_{tubo} R_{Al} T_{tubo})$  resulta de la transmitancia de dos capas de tubo, la transmitancia de la solución de As, Fe (II) y citrato de sodio, y posteriormente reflexión en la capa de Al y nuevamente pérdidas en la transmitancia del tubo.

La intensidad recibida dentro del tubo será:

$$I = P_{tubo}^{colector} / A_{tubo} \quad (2)$$

Estos parámetros fueron medidos experimentalmente en circunstancias reales al medio día y en días claros sin nubes. Los resultados se presentan en la Tabla 1.

Parámetro	Magnitud
Transmitancia del tubo, $T_{tubo}$	0,851
Reflectancia del aluminio, $R_{Al}$	0,80
$2A_1$	0,0913 $m^2$
$A_0$	0,04 $m^2$
$T_{As}$	0,70

**Tabla 1.** Datos experimentales para la determinación de la potencia real recibida en el interior de los tubos

Con la ayuda de láseres, se definió experimentalmente que el perímetro efectivo en la configuración elegida con radiación solar incidente perpendicular es aproximadamente:

$$l_{efectivo} = \left( \frac{1}{2,5} \right) \cdot 2\pi r \quad (3)$$

Donde, r: radio del tubo de PVC (m).

El área  $A_2$  (Figura 1) no da ningún aporte al sistema cuando la radiación es perpendicular al colector. Sin embargo, esta área puede dar su aporte cuando la radiación tiene cierto ángulo de incidencia con la normal.

La configuración geométrica semicircular del colector el perímetro efectivo es constante desde las 11 a.m. a 2 p.m. y por consiguiente la radiación reflejada que llega al tubo de vidrio permanece constante en este periodo de tiempo, sin tener que ajustar la posición del colector. Antes de las 11 a.m. y después de las 2 p.m., la pared del colector puede generar sombras que reducen la cantidad de radiación efectiva. Sin embargo, el periodo de tiempo útil del colector





puede extenderse desde las 9 a.m. hasta las 3 p.m. con laguna perdida durante las horas iniciales y finales.

Utilizando los datos experimentales de la Tabla 1, en el rango de 290 – 390 nm, la ec. (1) puede evaluarse para obtener la intensidad UVA recibida dentro del tubo de vidrio:

$$P_{tubo}^{colector} [W] = I_0 [W / m^2] (0.062 [m^2] + 0.034 [m^2] + 0.016 [m^2]) = I_0 (0.112) \quad (4)$$

La relación entre el tubo con el colector y el tubo libre será:

$$\frac{P_{tubo}^{colector}}{P_{tubo}} = \frac{I_0 (0.112)}{I_0 (0.04)} \quad (5)$$

Donde,  $P_{tubo} = I_0 (0.04 m^2)$  es la potencia recibida por el tubo sin colector.

Por consiguiente:

$$P_{tubo}^{colector} = 2.8 P_{tubo} \quad (6) \text{ y,}$$

$$I_{tubo}^{colector} = 2.8 I_0 \quad (7)$$

La Ec. (7) implica que la intensidad de la radiación recibida por la solución contenida dentro del tubo de vidrio es 2,8 veces la intensidad solar incidente. En Cochabamba, donde se realizaron las mediciones, en el mes de noviembre el máximo de radiación solar UVA es  $70 \text{ Wm}^{-2}$ , obteniéndose una intensidad efectiva para el UVA de  $I_{tubo}^{colector} = 196 \text{ W} / m^2$ .

Las mayores intensidades de la radiación UVA dentro del concentrador solar permitirán incrementar la velocidad de las reacciones foto-químicas. En este estudio se confirma experimentalmente esta hipótesis, estudiando las velocidades de remoción de As(V) mediante la aplicación de la técnica RAOS.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS EXPERIMENTALES

#### 3.1 Reactivos

Todos los reactivos utilizados fueron de grado analítico Merck y Sigma-Aldrich, excepto el citrato de sodio ( $C_6H_5Na_3O_7 \cdot 2H_2O$ ) que fue de grado comercial de 98,68% de pureza. Las soluciones para la determinación de As(V) se prepararon con agua destilada y desionizada. Los patrones de As(V) se prepararon a partir de arsenato dibásico de sodio ( $Na_2HAsO_4 \cdot 7H_2O$ ). Para la foto-oxidación se utilizó sulfato ferroso ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) como fuente de Fe(II).

#### 3.2 Determinación de As(V)

Se utilizó el método espectrofotométrico modificado de Johnson (1973) a una longitud de onda de 905 nm. El reactivo mezcla para el desarrollo de color se optimizó añadiendo el doble de masa de L-ascórbico que lo indicado por Strickland (1968). Se preparó una curva de calibración para el intervalo de 0 – 1000  $\mu\text{g/L}$ , observándose una relación lineal en todo el intervalo de interés.



Las muestras tomadas con jeringas de plástico se filtraron inmediatamente con filtros de 0,45  $\mu\text{m}$  antes de la marcha analítica. Las absorbancias se midieron a las dos horas de desarrollo de color en celdas de cuarzo de 1 cm de paso de luz. Se utilizó un espectrofotómetro Shimadzu 1601.

Para las pruebas con aguas subterráneas, en las cuales la presencia de fósforo pentavalente interfiere la determinación del As(V), se utilizó el método de espectrofotometría de absorción atómica con generación de hidruros, el cual determina la concentración de arsénico total. Muestras filtradas y decantadas se enviaron al Laboratorio de Investigaciones Medioambientales de Zonas Áridas, LIMZA, de la Universidad de Tarapacá.

### 3.3 Procedimientos de remoción de arsénico

#### *Pruebas batch sin agitación usando aguas contaminadas sintéticas*

Las pruebas se realizaron en un foto reactor, un tubo de vidrio y una botella PET de 2L, colocadas en un soporte de aluminio que permite variar la inclinación de 0 a 45° y la posición longitudinal en 360°. La Figura 3 muestra el dispositivo con los tres reactores.

El procedimiento típico utilizado para las pruebas de remoción de arsénico consistió en la exposición solar de 1 o 2 L de soluciones de As(V) de 1000  $\mu\text{g/L}$  en agua destilada, dentro del fotoreactor tubular, el tubo de vidrio o la botella PET. Antes de la exposición, se adicionaron sulfato ferroso, citrato de sodio, en una relación molar de As: Citrato:Fe(II): 1:5:19, recomendada por Lara et al [7] y se airearon las soluciones durante 10 min (en ausencia de radiación UVA) para garantizar la presencia de suficiente oxígeno disuelto. Los fotoreactores permanecieron sin agitarse durante los tiempos de exposición. Se tomaron muestras cada 2,5 min durante los primeros 15 min a 25 min de exposición. Por otra parte, también se observaron los tiempos de aparición de flóculos en cada tipo de reactor.

La radiación UVA integral se midió cada 10 min con un radiómetro PCE-UV34 que mide la radiación en el intervalo de 290-390 nm.



**Figura 3.** Dispositivo soportando tres reactores en pleno proceso de foto-reacción

#### *Pruebas batch con agitación controlada con aguas contaminadas sintéticamente*

Se siguió el mismo procedimiento anterior con la siguiente variante: Se irradiaron 2 L de las soluciones de As(V) de 1000  $\mu\text{g/L}$  en agua destilada durante 5, 10 y 15 min para el reactor tubular; 15, 20 y 25 min para el tubo de vidrio y 30, 40, 50 y 60 min para la botella PET de 2 L.



Luego, dentro del recinto de laboratorio ( $RUVA = 0,1 \text{ Wm}^{-2}$ ), se procedió a agitar las soluciones a 50-52 rpm en un vaso de precipitado de 2 L y con un agitador provisto de un aspa de 3" de largo por 1" de ancho colocada a 2,25" desde el fondo del vaso.

Estas dimensiones poseen curvas calibradas que relacionan las revoluciones por minutos con el gradiente de velocidad a temperaturas entre 10 y 40°C. Se determinaron los tiempos de formación de flóculos y luego se prolongaron los tiempos de agitación por un tiempo de 30 min. Se observaron los tamaños de flóculos y se calificaron mediante el Índice de Willcomb (Arboleda, 2000) (Ver Tabla 2)

NÚMERO DE ÍNDICE	DESCRIPCIÓN
0	Floc coloidal. Ningún signo de coagulación
2	Visible. Floc muy pequeño, casi imperceptible para un observador no entrenado
4	Disperso. Floc bien formado uniformemente distribuido. (Sedimenta muy lentamente o no sedimenta)
6	Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud
8	Bueno. Floc que se deposita fácil pero no completamente
10	Excelente. Floc que se deposita todo dejando el agua clara

**Tabla 2.** Índice de Willcomb

### ***Pruebas de operación continua con agitación controlada en agua subterránea contaminada sintéticamente***

Se siguió el mismo procedimiento anterior con la siguiente variante: Se prepararon 50 L de solución (1000  $\mu\text{g-As(V)/L}$  de agua de pozo de laboratorio) en un tanque de plástico de 130 L de capacidad. La solución consistió en Se irradió el flujo continuo de 440 mL/min (que equivale a 15 min de tiempo de residencia hidráulico promedio; es decir, 15 min de irradiación): La solución saliente se recolectó en otro tanque de plástico y los últimos volúmenes (luego de haberse establecido un régimen permanente) se recolectaron en vasos de precipitado de 2 L para su agitación a  $33 \text{ s}^{-1}$  de gradiente de velocidad en ausencia de radiación UVA. Se determinaron los tiempos de formación de flóculos y luego se prolongaron los tiempos de agitación por un tiempo de 30 min. Se observaron los tamaños de flóculos y se calificaron mediante el Índice de Willcomb. La Figura 4 muestra el foto-reactor tubular de 6,6 L de capacidad efectiva.



**Figura 4.** Concentrador solar para pruebas de flujo continuo

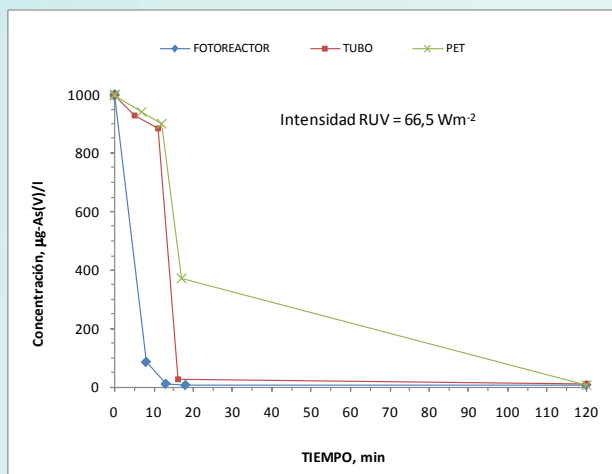




## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Pruebas batch sin agitación

La Figura 5 muestra el perfil temporal de las concentraciones de As(V) obtenido en los tres fotoreactores. Se puede observar con claridad que el concentrador solar remueve el As (V) con mayor rapidez, logrando disminuciones mayores al 90% en los primeros 10 minutos. En ese mismo periodo el tubo de vidrio y la botella PET solo removieron el 10%. A partir de los 15-16 minutos las concentraciones en estos reactores disminuyen drásticamente aunque más lentamente en el caso de la botella PET. Este comportamiento se debe a que los flóculos coloidales que ya adsorben el As(V) tienen diferentes velocidades de crecimiento dependiendo de la intensidad de radiación UVA efectiva que penetra en las soluciones. En el concentrador solar el tamaño de los flóculos ya sobrepasó el tamaño de los poros del filtro de  $0,45\ \mu\text{m}$  en menos de 5 min, en cambio en el tubo y la botella los tiempos fueron de 15-16 min.



**Figura 5.** Comparación de los perfiles de concentración de As(V) vs. tiempo en el concentrador solar, tubo de vidrio y botella PET de 2 L, en aguas contaminadas sintéticamente

Este mismo comportamiento se refleja en los tiempos de aparición de flóculos visibles, tal como se muestra en la Tabla 3. Nuevamente, en el concentrador solar los flóculos aparecen a los 44 min en comparación con el tubo con 54 min y la botella PET con 105 min. Luego de estos periodos los flóculos se aglomeran entre sí logrando tamaños mayores a 2 mm e índices de Willcomb excelentes (sedimentan rápidamente dejando el agua clara)

REACTOR	RUVA INCIDENTE, Wm-2	RUVA EFECTIVA, Wm-2	TIEMPO DE APARICIÓN DE FLÓCULOS VISIBLES, min	ÍNDICE DE WILLCOMB DESPUÉS DE 4 h DE IRRADIACIÓN	TAMAÑO DE FLÓCULO, mm
Botella PET 2 L	62,6	-	95	10	> 2
	63,0	-	115	10	> 2
Tubo de vidrio	62,6	-	50	10	> 2
	63,0	-	59	10	> 2
Concentrador solar	62,6	175,3	45	10	> 2
	63,0	176,4	43	10	> 2

**Tabla 3.** Comparación del funcionamiento del concentrador solar, tubo de vidrio y botella pet (2 l), en la remoción de as(v) en aguas contaminadas sintéticamente con 6 horas de irradiación.



A partir de estas observaciones, se puede afirmar que la velocidad de crecimiento de los flóculos depende de la intensidad de la radiación UVA efectiva que penetra en las soluciones. La mayor cantidad de fotones producidos por la mayor intensidad de radiación, permite la aceleración de la cadena de reacciones propuestas por Hug et al (2001b): la fotólisis del complejo citrato-Fe(III), la formación de los radicales libres hidroxilo ( $\text{OH}^*$ ) y superóxido  $\text{O}_2^*$  y el  $\text{H}_2\text{O}_2$  y finalmente la formación del precipitado de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

### Pruebas con agitación en aguas sintéticas

La Tabla 3 muestra los resultados de la comparación del desempeño del concentrador solar el tubo de vidrio y la botella PET de 2 L en formación y calidad de los flóculos cuando se aplicó la técnica RAOS a agua destilada contaminada artificialmente con As(V). En primer lugar se puede observar que, en todos los casos, los tiempos de aparición de flóculos disminuyeron con la agitación controlada en comparación con las pruebas sin agitación. Por otra parte, también para cada caso, también se evidencia que cuanto más largo sea el tiempo de irradiación, mejor calidad tendrá el floculo. Sin embargo, existe un tiempo de irradiación óptimo en el que se forman floculos de calidad suficiente para una buena sedimentación. Estos tiempos son: 60 min para la botella PET, 25 min para el tubo y 15 min para el concentrador solar.

Finalmente, se puede apreciar que, manteniendo los mismos tiempos de irradiación, cuando la intensidad crece, se reducen los tiempos de aparición de flóculos y mejora la calidad y tamaño de los mismos (Ver los casos de la botella PET a 30 min y el concentrador solar a 10 min). Los flóculos con un índice de Willcomb de 6-8 (tamaño de 0,75 – 1,0 mm se aprecian en la Figura 6 dentro de un vaso precipitado de 2 L.

REACTOR	RUVA INCIDENTE, $\text{Wm}^{-2}$	RUVA EFECTIVA, $\text{Wm}^{-2}$	TIEMPO DE IRRADIACIÓN, min	TIEMPO DE APARICIÓN DE FLÓCULOS EN AGITACIÓN, Min	INDICE DE WILLCOMB	TAMAÑO DE FLÓCULO, mm
Botella PET 2 L	34,9	-	31	no flocula (*)	0	0
	57,5	-	30	21	0-2	< 0,1
	60,6	-	40	12	2-3	0,1-0,3
	61,4	-	50	1	4-6	0,5-0,75
	63,9	-	60	0,5	8	0,75-1,5
Tubo de vidrio	52,3	-	15	no flocula (*)	0	0
	62,1	-	20	2	6-8	0,75-1,0
	64,3	-	25	1	8	1-1,5
	61,8	-	26	1	6-8	0,75-1,0
Concentrador solar	67,3	188,4	5	no flocula (*)	0	0
	63,3	177,2	10	2	4-6	0,5-0,75
	53,7	150,4	10	26	2	< 0,3
	50,5	141,4	10	60	0-1	< 0,1
	44,4	124,3	15	1	8-10	0,75-1,0
	64,9	181,7	15	1	8-10	0,75-1,5

**Tabla 4.** Comparación del funcionamiento del concentrador solar, tubo de vidrio y botella PET (2 l), en la remoción de As(V) en aguas contaminadas sintéticamente.

(\*) Floculó y sedimentó después de 20 horas sin recibir radiación solar directa ( $\text{UVA} = 0,1 \text{Wm}^{-2}$ )

Estos resultados permiten afirmar que mayores intensidades de radiación UVA aceleran no solo la cinética de la formación de los precipitados de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , sino también incrementan las velocidades de crecimiento de los flóculos. Es decir, los incrementos de las intensidades de radiación permiten acelerar el proceso global de remoción de As (V).



**Figura 6.** Flóculos formados (Índice de Willcomb de 6-8) con agitación controlada a  $33 \text{ s}^{-1}$  de gradiente de velocidad con agua de pozo contaminada artificialmente con As(V).

### **Pruebas de operación continua con agitación controlada en agua subterránea contaminada sintéticamente**

Conociendo el tiempo de irradiación óptimo para el concentrador solar, se procedió a aplicar este tiempo estableciendo un flujo continuo de agua de pozo contaminada artificialmente con As (V). Para un volumen efectivo de  $6,6 \text{ Lm}^{-2}$  de tubos en el concentrador este flujo se calcula como  $440 \text{ mLmin}^{-1}$ . Los resultados de dos corridas se muestran en la Tabla 5. Se puede apreciar que los tiempos de aparición de flóculos son casi inmediatos y su calidad es buena y suficiente para una sedimentación apropiada y rápida, habiéndose logrado una concentración de  $16,45 \mu\text{gL}^{-1}$  y una remoción del 98,36% de As(V) en muestras decantadas. Para un tiempo diario de operación de 5 h (9 a.m a 15), se puede tratar aproximadamente 130 L de agua contaminada por  $\text{m}^2$  de reactor, permitiendo dotar de agua segura para una familia de 4 personas a un consumo de 30-35 L/hab-d, el cual es típico de zonas rurales del altiplano.

Nº DE CORRIDA	RUVA INCIDENTE, $\text{Wm}^{-2}$	RUVA EFECTIVA, $\text{Wm}^{-2}$	FLUJO, $\text{Lmin}^{-1}$	TIEMPO DE RESIDENCIA HIDRÁULICO, Min	TIEMPO DE APARICIÓN DE FLOC, s	INDICE DE WILLCOMB	TAMAÑO DE FLÓCULO, mm
1	58.2	163,0	402,8	16,6	10	6-8	0,75-1,0
2	67,0	187,6	450	14,7	60	6-8	0,75-1,0

**Tabla 5.** Funcionamiento del concentrador solar en la remoción de As(V) en aguas de pozo contaminadas sintéticamente.

## **5. CONCLUSIONES**

Se construyó y caracterizó un foto-reactor tubular de sección circular que fue aplicado al tratamiento de aguas subterráneas contaminadas con As(V), utilizando la técnica de la Remoción de Arsénico por Oxidación Solar (RAOS). El concentrador solar fue construido reciclando materiales desechados: tubos de vidrio proveniente de lámparas de Ne y tubos de desagüe sanitario de 6" (PVC), recubierto por láminas de aluminio y posee una capacidad de radiación equivalente a 2,8 soles.

Pruebas simultáneas sin agitación realizadas aplicando la radiación UV solar a aguas sintéticas en el foto-reactor, un tubo de vidrio sólo y una botella PET de 2 litros, demostraron que la remoción de As(V) en el foto-reactor es más rápida, logrando remociones mayores al 98% en todos los casos. Los tiempos de aparición de los flóculos de complejo Fe-citrato fueron de 40, 50 y 90 min respectivamente, para intensidades de radiación UVA integral (290-390 nm) entre 50 y  $70 \text{ Wm}^{-2}$ .





Pruebas de irradiación seguidas de agitación controlada a  $30\text{--}33\text{ s}^{-1}$  de gradiente de velocidad demostraron que el foto-reactor acelera el proceso de formación de flóculos fácilmente sedimentables. Los tiempos de irradiación para el foto-reactor, el tubo y la botella de 15, 25 y 60 min respectivamente. Los tiempos de crecimiento del flóculo fueron de 20 min para todos los casos.

Pruebas en régimen de flujo continuo en un fotoreactor de aproximadamente  $1\text{ m}^2$  de área, con un tiempo de residencia hidráulica (igual al tiempo de irradiación) de 15 min, mostraron que inmediatamente se producen flóculos fácilmente sedimentables cuando se agitan a  $33\text{ s}^{-1}$  durante 30 min, lográndose una remoción del 98,36% una concentración remanente de  $16,5\text{ mgL}^{-1}$  de As(V) en aguas decantadas. Esto significa que se pueden tratar aproximadamente  $130\text{ Lm}^{-2}$  en una jornada de 6 horas de radiación UVA de  $50\text{--}70\text{ Wm}^{-2}$  de intensidad. En conclusión, el fotoreactor tubular puede ser utilizado para la remoción de As(V) contenido en aguas subterráneas en zonas del Altiplano boliviano y en Bangladesh, donde la intensidad de radiación UVA alcanza el intervalo de valores descrito.

### Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración recibida de parte de Jorge Quintanilla y Mauricio Ormachea del Instituto de Investigaciones Químicas de la UMSA consistente en la dotación de algunos materiales y reactivos de laboratorio. Por otra parte, se agradece la colaboración del Laboratorio de Investigaciones Medioambientales de Zonas Áridas, LIMZA, de la Universidad de Tarapacá en el análisis de arsénico por espectrofotometría de absorción atómica. Asimismo agradecen la valiosa ayuda de Eliana Garrón y Christopher Guzmán, estudiantes de la Carrera de Ingeniería de la Producción de la UPB, quienes trabajaron en la construcción de los fotoreactores y en la realización de las corridas experimentales.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Arboleda V. J. 2000. Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. Mc Graw Hill, 3ª. Ed.
2. Cornejo, L., Mansilla, H.D., Arenas, J., Flores, M., Flores, V., Figueroa, L., Yáñez, J., 2004. Remoción de Arsénico en aguas del río Camarones, Arica, Chile, utilizando la Tecnología RAOS modificada, en: Avances en tecnologías económicas solares para la desinfección, descontaminación y remoción de arsénico en aguas de comunidades rurales de América Latina (métodos FH y RAOS), Proyecto OEA AE141/2001, 85–92.
3. Cornejo L., Lienqueo H., Arenas M., Acarapi J., Contreras D., Yáñez J. Mansilla H., 2008. In field arsenic removal from natural water by zero-valent iron assisted by solar radiation. Environmental Pollution v. 156, p. 827–831
4. Hall, A.H., 2002. Chronic arsenic poisoning. Toxicology Letters v. 128, p. 69–72.
5. Hanjani, N.M., Fender, A.B., Mercurio, M.G., 2007. Chronic arsenicism from Chinese herbal medicine. Cutis 80, p. 305–308.
6. Hug, S.T., Wegelin, M., Gechter, D., Canonica, L., 2000a. Arsenic contamination of ground water: disastrous consequences in Bangladesh. EAWG News 49, p. 18–20.
7. Hug, S.T., Wegelin, M., Gechter, D., Canonica, L., von Gunten, U., “Solar oxidation and removal of arsenic at circumneutral pH in iron containing waters. Environmental Science & Technology v.10, p. 2114–2121.
8. Johnson D. L., 1971. Simultaneous Determination of Arsenate and Phosphate in Natural Waters. Environmental Science & Technology v. 5, p. 411– 414.



9. Lara, F., Cornejo, L., Yañez, J., Freer, J., Mansilla, H.D., 2006. Solar-light assisted removal of Arsenic from natural water: effect of iron and citrate concentrations. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* v. 81, p. 1282–1287.
10. Ormachea M., 2008. Evaluation of shallow groundwater quality and arsenic presence in the basin of lake Poopó - Bolivia. *Memoria 2008, 3er Congreso Internacional de agua subterránea para el desarrollo sustentable*, La Paz, p. 139-146
11. Strickland J. D., Parsons T. R., 1968. *Fisheries Research Board of Canada Bulletin* n. 167, Queens Printer, Ottawa.
12. World Health Organization (WHO), 1993, *Guidelines for Drinking Water Quality*, vol. 1, Recommendations.



## FACTORES DE EFECTIVIDAD EN BIOPELÍCULAS ANAEROBIAS: UNA ECUACIÓN SEUDO-ANALÍTICA PARA REACCIONES CONSECUTIVAS Y PARALELAS<sup>3</sup>

Ramiro Escalera Vásquez – [rescalera@upb.edu](mailto:rescalera@upb.edu)

Universidad Privada Boliviana, Centro de Investigaciones en Procesos Industriales – CIPI

**Resumen.** Se estudiaron teóricamente los factores de efectividad para una película anaerobia en la que ocurren reacciones paralelas y consecutivas. Se desarrolló una ecuación pseudo-analítica para calcular los factores de efectividad ( $E_f$ ) como función de un parámetro adimensional  $M_{oj}$ , denominado valor característico global de biopelícula y las concentraciones adimensionales en la superficie de la biopelícula ( $B_j$ ). El parámetro adimensional  $M_{oj}$  es una combinación de los valores característicos individuales  $M_j$ . La aplicabilidad de estas ecuaciones se demostró experimentalmente para la degradación de mezclas de ácidos grasos volátiles (ácido butírico, ácido propiónico y ácido acético) en las que el ácido acético es predominante. Debido a que la descomposición anaerobia de estos ácidos se considera la etapa limitante en procesos anaerobios de película fija, esta ecuación se puede utilizar para el diseño, evaluación del funcionamiento y simulación de bio-reactores anaerobios de alta tasa.

**Palabras clave:** simulación de reactores anaerobios de película fija, resistencia difusional a la transferencia de masa.

### 1. INTRODUCCIÓN

La descomposición de la fracción orgánica soluble de las aguas residuales industriales y domésticas se ha logrado mediante la aplicación de sistemas de tratamiento de biopelículas anaerobias, tales como los lechos empacados, filtros anaerobios y lechos expandidos y fluidizados. En estos sistemas, la inmovilización de las bacterias depuradoras sobre la superficie de los soportes sólidos permite cargas orgánicas que son varias veces más altas que aquellas posibles en sistemas convencionales de cultivo suspendido (Heijnen et al, 1989), y se observan mejores registros de estabilidad en reactores de biopelícula cuando se someten a cargas de shock.

Para predecir o evaluar el rendimiento de tales procesos, se han propuesto varios modelos matemáticos de biopelícula. Básicamente consideran la descomposición de sustratos, la difusión intra-biopelícula, la resistencia de la película laminar a la difusión del sustrato y las velocidades específicas de crecimiento y decaimiento. Varios modelos [Atkinson y Davis, 1974; Rittmann y McCarty, 1980; Suidan y Wang, 1985] suponen un sustrato limitante bajo regímenes estables y se han desarrollado ecuaciones pseudo-analíticas globales en función de las concentraciones adimensionales sobre la superficie de la biopelícula y parámetros que usualmente fueron de forma similar a un módulo de Thiele modificado.

Posteriormente el modelamiento de las biopelículas anaerobias se mejoró considerando la existencia de poblaciones bacterianas mixtas y dos sustratos limitantes que se degradan

<sup>3</sup> Este artículo fue publicado en 1993 en la revista: "Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing", Reino Unido.





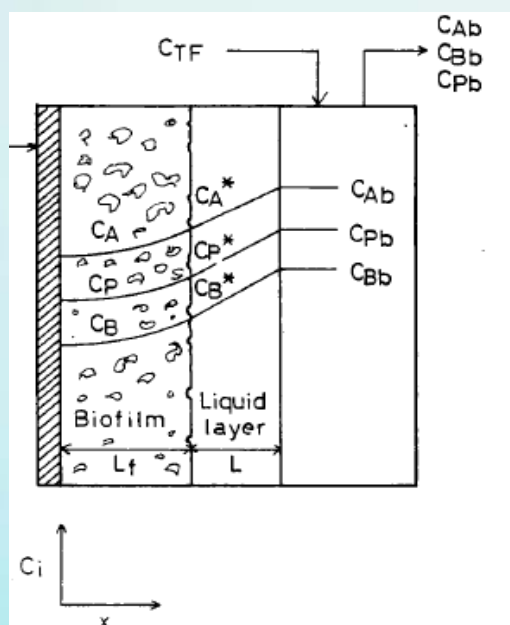
consecutivamente dentro de la biopelícula (Canovas y Howell, 1988; Sakakibara et al., 1985). Kuroda et al. (1989) propusieron ecuaciones simplificadas para los factores de efectividad considerando dos reacciones consecutivas en reactores de biopelícula operados bajo un régimen de mezcla completa y su aplicabilidad se demostró para degradaciones de butiratos y propionatos.

Ellos usaron el modelo de Sakakibara (1986) que considera despreciable la resistencia de la capa laminar para números de Reynolds grandes. Sin embargo, existen diferencias mayores al 20% entre los valores calculados con tales factores de efectividad y las soluciones numéricas basadas en las ecuaciones diferenciales básicas, especialmente en los casos de valores de concentraciones grandes en la fase líquida y valores grandes de concentraciones dentro de la biopelícula. Además, sistemas de dos reacciones consecutivas, tales como las degradaciones de butiratos y propionatos, son solo parte del sistema más complejo de reacciones paralelas y consecutivas de una descomposición anaerobia de aguas residuales de orgánicas, e.g. aquellas que contienen carbohidratos.

Este artículo incluye un estudio teórico sobre los factores de efectividad para una biopelícula en la que una población bacteriana mixta degrada una mezcla de sustratos limitantes, en una combinación de reacciones consecutivas y paralelas. La resistencia difusional de la capa laminar también se considera. Se presentan soluciones analíticas de los factores de efectividad para aproximaciones de reacciones de primer orden y se desarrolla una ecuación pseudo-analítica general. Esta ecuación representa aproximadamente a los factores de efectividad para una reacción de una sola etapa y el sistema de reacciones consecutivas y paralelas para un amplio intervalo de concentraciones en la superficie de la biopelícula.

## 2. MODELO DE REACTOR

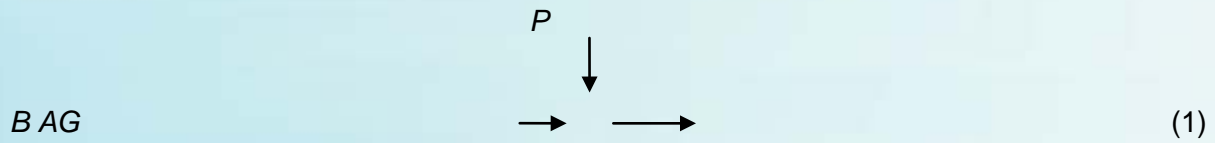
El modelo de reactor (Figura 1) propuesto por Sakakibara (1987) fue la base conceptual usada en este estudio.



**Figura 1.** Modelo de reactor (Sakakibara, 1987)



El modelo considera un reactor de mezcla completa con una biopelícula plana de densidad uniforme,  $\rho$  y espesor uniforme,  $L_F$ , donde una mezcla de sustratos primarios se degrada por la actividad de los microorganismos adheridos, de acuerdo con la siguiente ecuación:



Dónde P y B son los sustratos primarios; A es el producto intermedio y G el producto final.

Se supone que tanto los sustratos y el producto intermedio son transportados por difusión molecular dentro de la biopelícula y en la capa laminar y que las velocidades de reacción se pueden representar mediante las relaciones de Monod. Por otra parte, considerando que las velocidades específicas de crecimiento y las de decaimiento son muy pequeñas comparadas con los cambios de concentración, los balances de masa en un estado cuasi-estacionario, para los sustratos y el producto intermedio resultan en las siguientes ecuaciones:

Para los sustratos B y P:

$$D_s \frac{d^2 C_s}{dx^2} - \frac{v_s \alpha_s \rho C_s}{K_s + C_s} = 0 \quad (S = B, P) \quad (2)$$

Para el producto intermedio A:

$$D_A \frac{d^2 C_A}{dx^2} - \frac{v_A \alpha_A \rho C_A}{K_A + C_A} - Y_{A/B} \frac{v_B \alpha_B \rho C_B}{K_B + C_B} - Y_{A/P} \frac{v_P \alpha_P \rho C_P}{K_P + C_P} = 0 \quad (3)$$

Las condiciones de frontera para el sistema de ecuaciones (2) y (3) son:

$$\frac{dC_j}{dx} \Big|_{x=0} = 0 \quad (4)$$

$$D_j \frac{dC_j}{dx} \Big|_{x=L_F} = k_{Lj} (C_{jb} - C_j^*) \quad (j = A, B, P) \quad (5)$$

Los balances de masa para los sustratos y el producto intermedio en el líquido generan las siguientes ecuaciones:

$$(C_{jF} - C_{jb}) / \alpha \theta = k_{Lj} (C_{jb} - C_j^*) \quad (j = A, B, P) \quad (6)$$

Los flujos de transferencia de masa para los sustratos y el producto intermedio son:

$$J_S = \int_0^{L_F} \frac{v_S \alpha_S \rho C_S}{K_S + C_S} dx = D_S \frac{dC_S}{dx} \Big|_{x=L_F} \quad (S = B, P) \quad (7)$$

$$J_A = \int_0^{L_F} \frac{v_A \alpha_A \rho C_A}{K_A + C_A} dx = D_A \frac{dC_A}{dx} \Big|_{x=L_F} + Y_{A/B} D_{B/A} \frac{dC_B}{dx} \Big|_{x=L_F} + Y_{A/P} D_{P/A} \frac{dC_P}{dx} \Big|_{x=L_F} \quad (8)$$



En ausencia de cualquier resistencia difusional dentro de la biopelícula, o cuando las velocidades de difusión son mucho mayores que las velocidades de descomposición, las concentraciones de los sustratos y el producto intermedio a través de la película son iguales a las concentraciones de superficie. Por consiguiente, los flujos específicos de transferencia de masa correspondientes son:

$$J_j^* = \frac{v_j \alpha_{j\rho} C_j^*}{K_j + C_j} L_F \quad (j = A, B, P) \quad (9)$$

Los factores de efectividad se definen, entonces como:

$$Ef_j = J_j / J_j^* \quad (10)$$

Las Ecs. (2) – (5) pueden representarse en términos de parámetros adimensionales como sigue:

$$\frac{d^2 S}{dX^2} - \frac{M_S^2 S}{1 + B_{TF} K_{A/S} S} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{d^2 A}{dX^2} - \frac{M_A^2 A}{1 + B_{TF} A} + Y_{A/B} D_{B/A} \frac{M_B^2 B}{1 + B_{TF} K_{A/B} B} + Y_{A/P} D_{P/A} \frac{M_P^2 P}{1 + B_{TF} K_{A/P} P} = 0 \quad (12)$$

$$\left. \frac{dj}{dX} \right|_{X=0} = 0 \quad (13)$$

$$\left. \frac{dj}{dX} \right|_{X=1} = Bi_j (j_b - j^*) \quad (14)$$

A partir de la Ec. (6), en variables adimensionales:

$$j_b = \frac{Bi_j j^* + Pe_j j_F}{Bi_j + Pe_j} \quad (j = A, B, P) \quad (15)$$

$$Ef_S = \frac{1 + B_S}{M_S^2 S^*} \frac{dS}{dX} \Big|_{X=1} \quad (16)$$

$$Ef_A = \frac{1 + B_A}{M_A^2 A^*} \left( \frac{dA}{dX} \Big|_{X=1} + Y_{A/B} D_{B/A} \frac{dB}{dX} \Big|_{X=1} + Y_{A/P} D_{P/A} \frac{dP}{dX} \Big|_{X=1} \right) \quad (17)$$

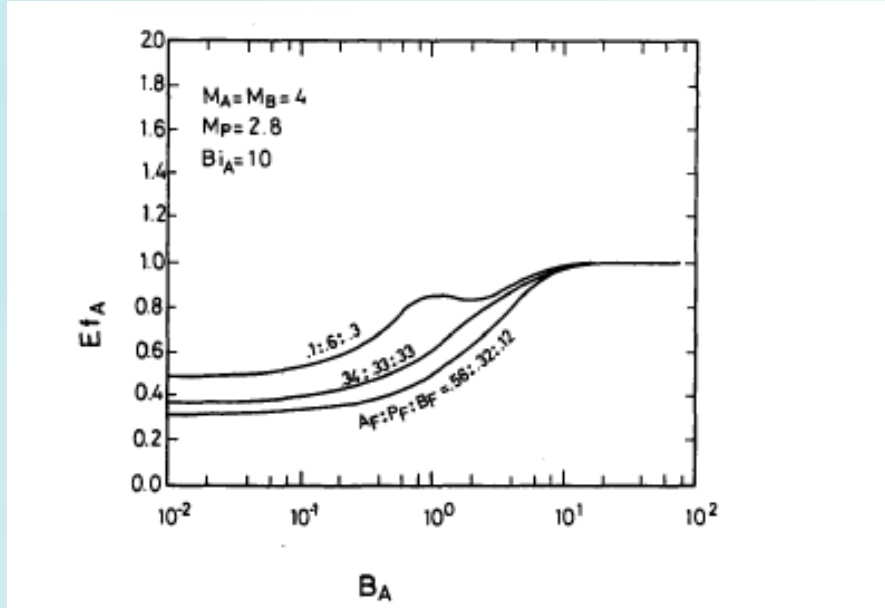
En las ecuaciones precedentes, los valores  $M_j$  representan los valores característicos de biopelícula para los sustratos (B y P) y el producto intermedio A, y representan los respectivos cocientes entre las velocidades de utilización y las velocidades de difusión en la biopelícula. Los parámetros  $Pe_j$  son parámetros operacionales para los sustratos B y P y el producto intermedio A, y representan los cocientes respectivos entre las velocidades de carga orgánica por unidad de área y las velocidades de difusión. Los parámetros  $Bi_j$  son los números de Biot correspondientes, los cuales representan los cocientes entre las velocidades de difusión en la capa laminar y las que ocurren al interior de la biopelícula.





### 3. APROXIMACIÓN DE PRIMER ORDEN

Cuando las concentraciones son mucho más grandes que los coeficientes de velocidad media ( $Bj > 1$ ), las velocidades de reacción en las Ecs. (2) y (3) se pueden aproximar a un modelo de reacción de orden cero y los factores de efectividad son aproximadamente 1 (Figura 2).



**Figura 2.** Relación entre el factor de efectividad  $Ef_A$  y la concentración adimensional en la superficie de la biopelícula ( $B_A$ ) para la descomposición del producto intermedio

Cuando las concentraciones son mucho menores que los coeficientes de velocidad media ( $Cj < Kj$ , i.e.  $Bj < 1$ ), los términos de velocidad en las Ecs. (2) y (3) se pueden aproximar a velocidades de primer orden. De este modo, se pueden obtener las siguientes soluciones analíticas para los factores de efectividad:

$$Ef_S = \tanh M_S / M_S \quad (S = B, P) \quad (18)$$

$$Ef_A = \frac{Op_A A_F}{M_A^2 A^*} + \frac{Y_{A/B} D_{B/A} Op_B B_F}{M_A^2 A^*} \left( \frac{M_B \tanh M_B}{M_B \tanh M_B + Op_B} \right) + \frac{Y_{A/P} D_{P/A} Op_P P_F}{M_A^2 A^*} \left( \frac{M_P \tanh M_P}{M_P \tanh M_P + Op_P} \right) + \frac{Op_A}{M_A^2} \quad (19)$$

Dónde el parámetro  $Op_j$  se define como:

$$Op_j = \frac{1}{1/Pe_j + 1/Bi_j} \quad (j=A, B, P) \quad (20)$$

Cuando  $Pe_j$  es mucho menor que 1 (cargas orgánicas bajas), los valores del parámetros  $Op_j$  se aproximan a los de  $Pe_j$ . Para estos casos y para valores de  $M_j$  mayores a 3, la solución analítica de los factores de efectividad para los sustratos y el producto intermedio se aproximan a las siguientes ecuaciones:

$$Ef_S = 1/M_S = 1/M_{oS} \quad (S = B, P) \quad (21)$$



$$Ef_A = \frac{A_F}{M_A A_F} + \frac{Y_{A/B} B_F + Y_{A/P} P_F}{\frac{Y_{A/B} B_F}{1/M_{O_{B-A}}} + \frac{Y_{A/P} P_F}{1/M_{O_{P-A}}}} = \frac{1}{M_{O_A}} \quad (22)$$

Dónde:

$$1/M_{O_{S-A}} = 1/M_S + 1/M_A (S = B, P) \quad (23)$$

Siguiendo el mismo procedimiento, se puede demostrar que las expresiones  $(1/M_A + 1/M_B)$  y  $(1/M_A + 1/M_P)$  son los factores de efectividad para la aproximación de primer orden que corresponden a las reacción consecutivas  $B-A-G$  y  $P-A-G$ , respectivamente.

Los parámetros  $M_{O_{B-A}}$  y  $M_{O_{P-A}}$  se definen como los valores característicos de biopelícula globales y corresponden a las reacciones consecutivas en dos etapas definidas en la Ec. (1). El valor característico global  $M_{O_A}$  es una combinación de los valores característicos correspondientes a las trayectorias de reacción consecutivas individuales, ordenadas de la misma manera que una configuración de resistencias en serie y paralelo. Esta configuración sugiere que un valor característico global  $M_{O_j}$  puede definirse para cualquier sistema de reacciones consecutivas y paralelas, como una combinación de los valores globales de trayectoria individual.

#### 4. DESARROLLO DE LAS ECUACIONES SEUDO-ANALÍTICAS

Las Ecs. (18) a (23) pueden utilizarse para calcular los factores de efectividad cuando las concentraciones en la superficie de la biopelícula son muy pequeñas. Sin embargo, cuando estas concentraciones crecen (por ejemplo,  $B_j > 1$ ) las relaciones de Monod en las ecuaciones (2) y (3) no pueden simplificarse a ecuaciones de primer orden. Entonces se hacen necesarias las soluciones numéricas del sistema de ecuaciones diferenciales. Para evitar el trabajo numérico, se desarrolló una ecuación general de aproximación como sigue:

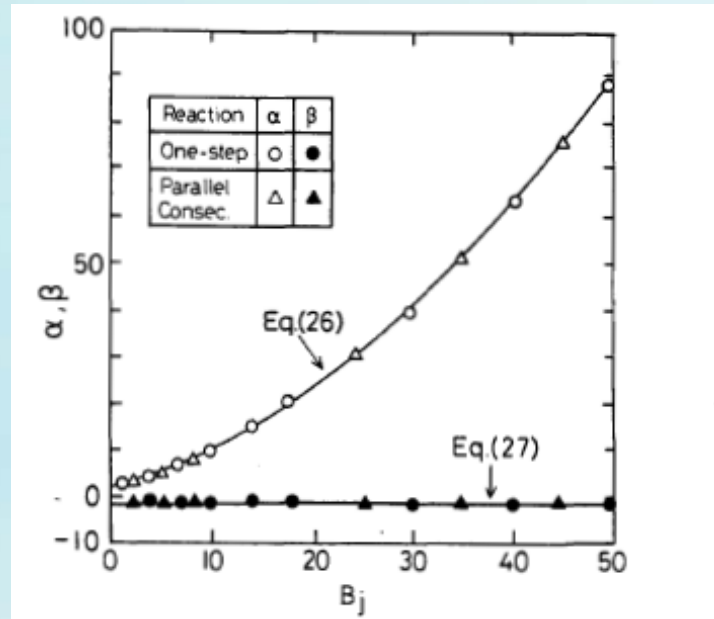
El factor de efectividad para los sustratos primarios B y P (primeras etapas de las reacciones consecutivas correspondientes) y para el producto intermedio A pueden representarse aproximadamente mediante la función empírica:

$$Ef_j = \tanh(\alpha M_{O_j}^\beta) \quad (j = A, B, P) \quad (24)$$

la cual puede reordenarse de la siguiente manera:

$$\ln \left[ \ln \frac{1+Ef_j}{1-Ef_j} \right] = \ln 2\alpha + \beta \ln M_{O_j} \quad (25)$$

Graficando la Ec. (25) usando los datos de las soluciones numéricas para valores diferentes de la concentración de superficie  $B_j$ , se pueden obtener las relaciones para  $\alpha$  y  $\beta$ . La Figura 3 muestra la relación para el sustrato primario.



**Figura 3.** Relación entre los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ . y las concentraciones adimensionales sobre la superficie de la biopelícula  $B_S$  y  $B_A$  para la descomposición de los sustratos primarios y el producto intermedio.

Estos parámetros pueden aproximarse a las siguientes ecuaciones como funciones de las concentraciones  $B_j$ :

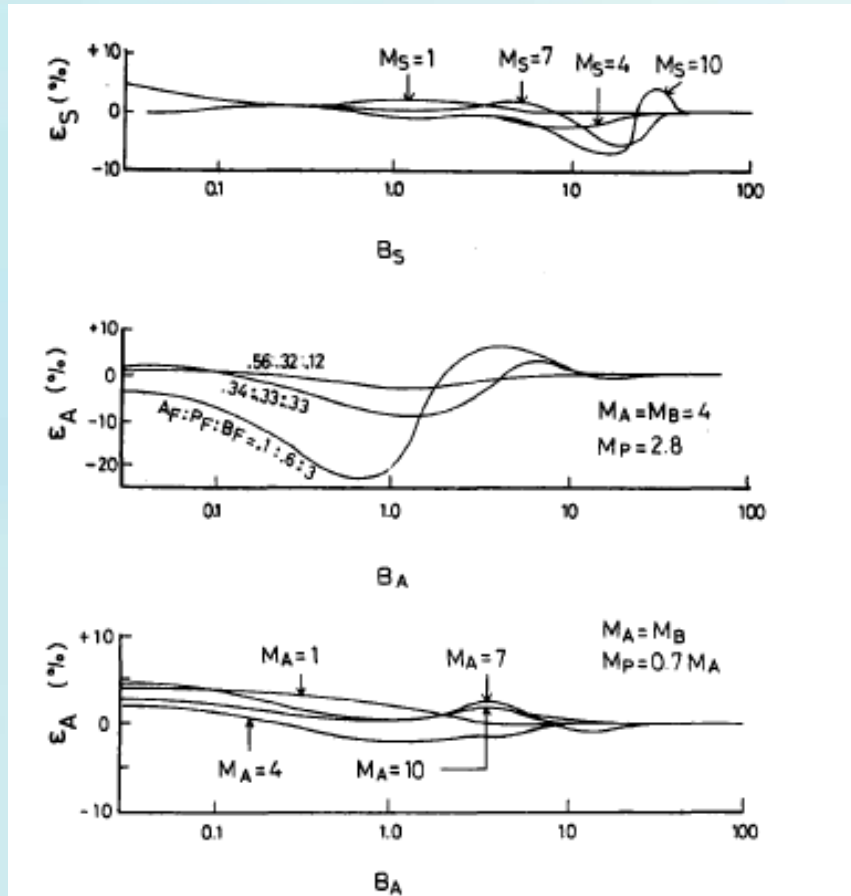
$$\alpha = 1,059 + (M_j / Mo_j)(0,6573B_j + 0,022B_j^2) \quad (26)$$

$$\beta = -1,0 - 0,044B_j + 0,00082B_j^2 \quad (27)$$

para el intervalo de  $0,01 < B_j < 100$

Los errores resultantes del uso de estas ecuaciones comparados con las soluciones numéricas se presentan en la Figura 4. Los errores  $\varepsilon_s$  para las primeras etapas son consistentemente menores que el 10% para todos los valores de  $M_s$  y  $B_s$  considerados. Los errores  $\varepsilon_A$  para el sistema paralelo y consecutivo son consistentemente menores que el 10% para todos los valores considerados de  $M_A$  y  $M_B$ , cuando la proporción de A en la alimentación es mayor a un tercio del total. También se observan errores menores al 5% para mayores proporciones de A.





**Figura 4.** Errores obtenidos al utilizar las Ecs. (26) y (27) en los cálculos de los factores de efectividad con respecto a las soluciones numéricas.

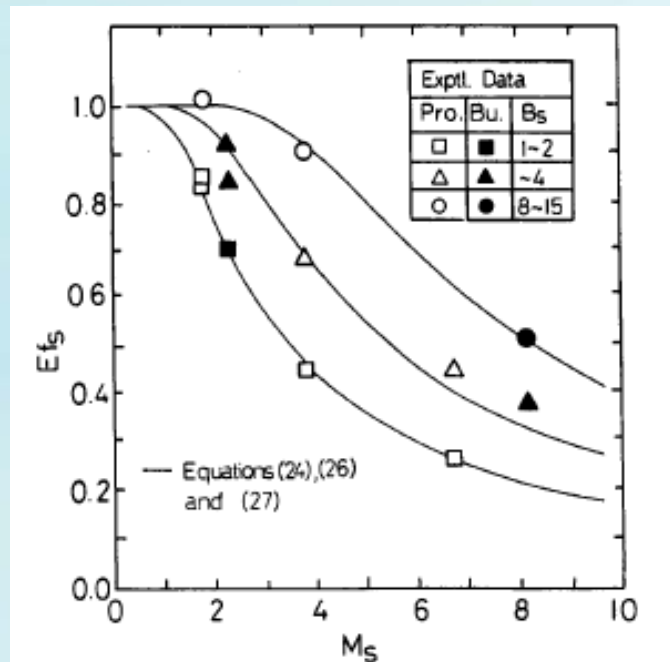
Se han reportado datos experimentales (Mosey, 1983); Denac y Dunn, 1988) para reactores anaerobios que tratan aguas residuales agroindustriales cuando no están sujetos cargas orgánicas estresantes, e.g. melazas, azúcar de remolacha y licores residuales de procesamiento de frutas. Se ha observado que entre los ácidos producidos en la etapa de formación de ácidos, el ácido acético intermedio se produce en grandes proporciones comparados con los ácidos propiónico y butírico. Considerando estos datos, las Ecs. (25) a (27) se pueden utilizar para la evaluación y el diseño de bioreactores de película fija que tratan tales residuos y otros en los cuales la descomposición de la mezcla de ácidos representa la etapa limitante del proceso.

## 5. APLICABILIDAD DE LAS ECUACIONES PROPUESTAS

Como ejemplo de aplicabilidad de las ecuaciones de aproximación, la Figura 5 muestra una comparación de los factores de efectividad obtenidos experimentalmente y los valores calculados mediante la ecuación pseudo-analítica, para las primeras etapas de las degradaciones de butiratos y propionatos. Los procedimientos experimentales y datos experimentales provienen de Sakakibara et al. (1987). Ellos usaron reactores anaerobios de lecho empacado operados en condiciones de flujo reciclado de agua residual alto. Por consiguiente la resistencia de la capa laminar a la transferencia de masa fue minimizada y representa menos del 20% de la resistencia difusional dentro de la biopelícula. Como se



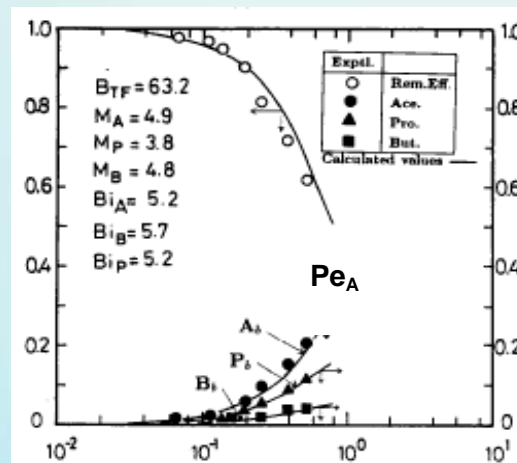
muestra en la Figura 5, existe muy buena concordancia entre los resultados experimentales y calculados para un amplio intervalo de concentraciones en la superficie de la biopelícula.



**Figura 5.** Comparación entre los resultados experimentales y calculados para los factores de efectividad para las descomposiciones de propionato y butirato en un reactor de lecho empacado

Las Figura 6 muestra una comparación entre datos experimentales y valores calculados (obtenidos usando las ecuaciones pseudo-analíticas) de la eficacia de remoción y las concentraciones de efluente para la descomposición de una mezcla de ácidos acético, propiónico y butírico en un reactor de lecho empacado a escala de laboratorio, según reporta Sakakibara (et al.,1987). Nuevamente, se ha logrado una muy buena aproximación entre los resultados experimentales y calculados.

Eficacia de remoción,



Concentraciones normalizadas, j

**Figura 6.** Comparación de resultados experimentales y calculados de las eficacias de remoción y concentraciones en el líquido circulante para la descomposición de una mezcla de ácidos acético, propiónico y butírico en un reactor de lecho empacado



## 6. CONCLUSIONES

Se estudiaron los factores de efectividad para la descomposición de una mezcla de sustratos primarios y el producto intermedio que ocurre en una biopelícula anaerobia. La base teórica fue un modelo de biopelícula que considera un sistema de reacciones anaerobias paralelas y consecutivas y las velocidades de difusión dentro de la biopelícula y en la capa laminar. Se obtuvieron los siguientes resultados:

- El factor de efectividad del producto intermedio depende de la composición de los sustratos y el producto intermedio en la alimentación.
- Los factores de efectividad para los sustratos primarios y el producto intermedio ( $E_f$ ) pueden representarse aproximadamente mediante una ecuación pseudo-analítica expresada en términos de los valores característicos globales ( $Mo_j$ ), definidos en las Ecs. (21) y (22) y sus concentraciones correspondientes en la superficie de la biopelícula ( $B_j$ )
- Estas ecuaciones de aproximación pueden aplicarse al diseño y/o la evaluación del rendimiento de reactores anaerobios de película fija, en los cuales las degradaciones de una mezcla de ácidos orgánicos volátiles (i.e. ácidos acético, propiónico y butírico) son las etapas limitantes del proceso global

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Atkinson, B. and Davies, I.J., 1974. The overall rate of substrate uptake reaction by microbial films. Trans. Instn. Chem. Engrs., v. 52, p. 248-260.
- (2) Canovas-Dim M. and Howell, J.A., 1988. Stratified mixed-culture biofilm model for anaerobic digestion. Biotech. Bioeng., v. 32, p. 348-361.
- (3) Denac, M. and Dunn, I.J. 1988., Modeling dynamics experiments on the anaerobic degradation of molasses wastewater. Biotech. Bioeng., v. 31, p. 1-10.
- (4) Heijnen, J.J., Mulder, A., Enger, W.A. and Hoeks, F. 1989. Review on the application of anaerobic fluidized bed reactors in waste-water treatment. Chem. Eng. J., v. 41, p. B37.
- (5) Kuroda, M., Sakakibara, Y. and Escalera, C.R., 1989. Simplified equations for effectiveness factors in anaerobic biofilms. J. Envir. Engng., ASCE, v. 6, n. 115, p.1123-1138.
- (6) Mosey, F. E., 1983. Mathematical modeling of the anaerobic digestion process: Regulatory mechanisms for the formation of short-chain volatile fatty acids from glucose. Wat. Sci. Technol., v. 15, p. 209-223.
- (7) Rittmann, B.E. and McCarty, P.L., 1980. Model of steady-state biofilm kinetics. Biotech. Bioeng., v. 22, n. 4, p. 2343-2368.
- (8) Sakakibara, Y., Yuzawa, M. and Kuroda, M., 1985. Theoretical consideration on the performance of a biofilm reactor in which a consecutive reaction take place. Proc. Envir. and San. Engng. Res., v. 21, p. 133-141.
- (9) Sakakibara, Y., Yuzawa, M. and Kuroda, M., 1987. Theoretical consideration on the performance treatment characteristics of volatile fatty acids in completely mixed anaerobic biofilm reactors. Proc. JSCE, v. 387, p. 291-299.
- (10) Sakakibara, Y., Yuzawa, M. and Kuroda, M., 1986. Analysis of acetate removal rates in methanogen attached biofilm reactors. Proc. JSCE, v. 375, p. 311-320
- (11) Suidan, M.T. and Wang, Y. , 1985. Unified analysis of biofilm kinetics. J. Envir. Engng., ASCE, v. 111, n. 5, p. 634-646.





## Nomenclatura

- $a$  = Área superficial específica de la biopelícula, ( $L^{-1}$ )  
 $C_j$  = Concentración de componente  $j$  en la biopelícula, ( $ML^{-3}$ )  
 $C_{jb}$  = Concentración de componente  $j$  en el líquido recirculante, ( $ML^{-3}$ )  
 $C_j^*$  = Concentración de componente  $j$  en la superficie de la biopelícula, ( $ML^{-3}$ )  
 $C_{SF}$  = Concentración de entrada de sustrato, ( $ML^{-3}$ )  
 $C_{TF}$  = Concentración global de entrada de sustrato, ( $ML^{-3}$ )  
 $D_j$  = Difusividad efectiva del componente  $j$  en la biopelícula, ( $M^2T^{-1}$ )  
 $J_j$  = Velocidad de remoción del componente  $j$ , ( $ML^{-2}T^{-1}$ )  
 $J^*$  = Velocidad de remoción del componente  $j$ , sin resistencia difusional dentro de la biopelícula, ( $ML^{-2}T^{-1}$ )  
 $K_j$  = Coeficiente de velocidad media para el componente  $j$ , ( $ML^{-3}$ )  
 $k_{Lj}$  = Coeficiente de transferencia de masa para el componente  $j$ , ( $LT^{-1}$ )  
 $L_F$  = Espesor de la biopelícula, ( $L$ )  
 $x$  = Distancia a partir de la superficie de soporte sólido, ( $L$ )

## Parámetros adimensionales

- $j$  = Concentración adimensional del componente  $j$  en la biopelícula,  $C_j/C_{TF}$   
 $j^*$  = Concentración adimensional del componente  $j$  en la superficie de la biopelícula,  $C^*/C_{TF}$   
 $j_b$  = Concentración adimensional del componente  $j$  en el líquido circulante,  $C_{jb}/C_{TF}$   
 $j_F$  = Concentración adimensional del componente  $j$  en la alimentación,  $C_{jF}/C_{TF}$   
 $B_j$  = Concentración adimensional del componente  $j$  en la superficie de la biopelícula,  $B_{TF}K_{A/j}j^*$   
 $Bi_j$  = Número de Biot para transferencia de masa para el componente  $j$ ,  $L_F k_{Lj}/D_j$   
 $B_{TF}$  = Concentración adimensional del sustrato en la alimentación,  $C_{TF}/K_A$   
 $D_{j/A}$  = Razón entre difusividades efectivas,  $D_j/D_A$   
 $Ef_j$  = Factor de efectividad para el componente  $j$ ,  $J_j/J_j^*$   
 $K_{j/i}$  = Cociente entre coeficientes de velocidad media,  $K_j/K_i$   
 $M_j$  = Valor adimensional característico de la biopelícula para el componente  $j$ ,  $L_F(v_j\alpha_j\rho/K_jD_j)^{1/2}$   
 $Mo_j$  = Valor adimensional característico global de la biopelícula para el componente  $j$   
 $Op_j$  = Parámetro operacional para el componente  $j$ , definido en la Ec. (20),  
 $Pe_j$  = Parámetro operacional para el componente  $j$ ,  $L_F/\alpha\theta D_j$   
 $X$  = Distancia adimensional desde la superficie del soporte sólido,  $x/L_F$   
 $Y_{A/S}$  = Coeficiente de producción del componente intermedio  $A$  a partir del sustrato  $S$ .  
 $Y_{G/A}$  = Coeficiente de producción para la formación del producto final.

## Caracteres griegos

- $\alpha$  = Parámetro de la ecuación pseudo-analítica, definido en la Ec. (26)  
 $\alpha_j$  = Fracción de masa del componente  $j$  en la biopelícula  
 $\beta$  = Parámetro de la ecuación pseudo-analítica, definido en la Ec. (27)  
 $\varepsilon_j$  = Error cometido en los cálculos del factor de efectividad del componente  $j$ , %  
 $\rho$  = Densidad de la biopelícula, ( $ML^{-3}$ )  
 $\theta$  = Tiempo de residencia hidráulico, ( $T$ )  
 $v_j$  = Velocidad de descomposición específica máxima del componente  $j$ , ( $T^{-1}$ )

## Subíndices

- $A$  = Producto intermedio  
 $B$  = Sustrato B  
 $P$  = Sustrato P

## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN DE AMBIENTES MEDIANTE COLECTORES SOLARES Y TUBOS AL VACÍO

Omar Ormachea – [oormachea@upb.edu](mailto:oormachea@upb.edu)

(Universidad Privada Boliviana, Centro de Investigaciones Ópticas - CIO)

Dante Loza – [dantor\\_2@hotmail.com](mailto:dantor_2@hotmail.com)

(Universidad Privada Boliviana, Centro de Investigaciones Ópticas - CIO)

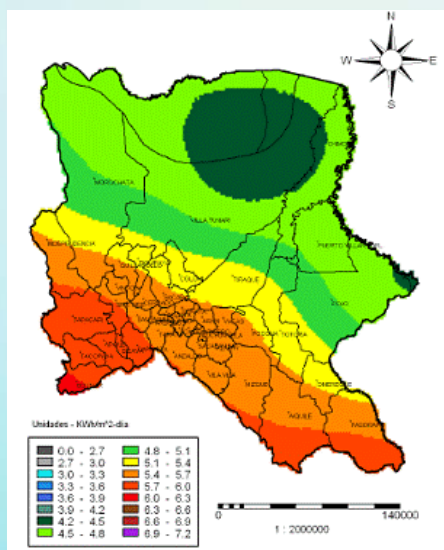
**Resumen.** El presente trabajo de investigación consiste en el diseño y construcción de un sistema de concentración de energía solar térmica, mediante colectores de geometría circular de bajo costo, para el calentamiento de agua. El líquido calentado es utilizado como elemento termo-regulador para la calefacción de ambientes en nuestra institución académica. El uso de los colectores solares permite la reducción de la cantidad de tubos al vacío para el calentamiento de volúmenes de agua predeterminados. La eficiencia del sistema construido es comparable a un sistema comercial de 15 tubos al vacío que calientan 100 litros de agua a una temperatura promedio de 70°C, el sistema desarrollado utiliza solo 3 tubos al vacío con la misma eficiencia, lo cual implica la reducción de costos en la recolección solar.

**Palabras clave:** energía solar térmica, concentración solar.

### 1. INTRODUCCIÓN

El acceso a la energía es de vital importancia para el desarrollo de un país, más aún si está en vías de desarrollo. Bolivia es uno de los países con el consumo de energía e ingreso per cápita más bajos en Latinoamérica y con un uso de energía muy desproporcional entre el área urbana y rural. La universalización del acceso a la energía eléctrica, en particular, es un objetivo generalizado en el mundo. Se estima que 1.600 millones de personas no cuentan con los servicios básicos de electricidad para satisfacer sus necesidades, como iluminación, calefacción, refrigeración y menos aún para emprender procesos productivos o actividades relacionadas con la salud, educación, trabajo, entre otras.

**Figura 1.** Distribución anual de la radiación solar global (Lucano et al. 2010), para el departamento de Cochabamba.





La participación de energías alternativas en la matriz energética del sector eléctrico en Bolivia es todavía muy reducida, debido al predominio en la generación de electricidad que utiliza fuentes fósiles e hídricas a gran escala mayores a 2 MW, ambas consideradas como convencionales. Por otro lado, Bolivia cuenta con un gran potencial energético para la generación de energía eléctrica mediante fuentes alternativas como la energía solar, debido a la posición geográfica privilegiada de sectores importantes del país. En relación con Europa, por su ubicación Bolivia recibe más del doble de radiación solar promedio a nivel mundial.

En la Figura 1 se muestra la distribución promedio de radiación solar global para el Departamento de Cochabamba. Considerando un día solar de 8 horas, el promedio anual es de  $680 \text{ W/m}^2$ , teniendo niveles de radiación máximo de  $787.5 \text{ W/m}^2$  y mínimo de  $556,25 \text{ W/m}^2$ .

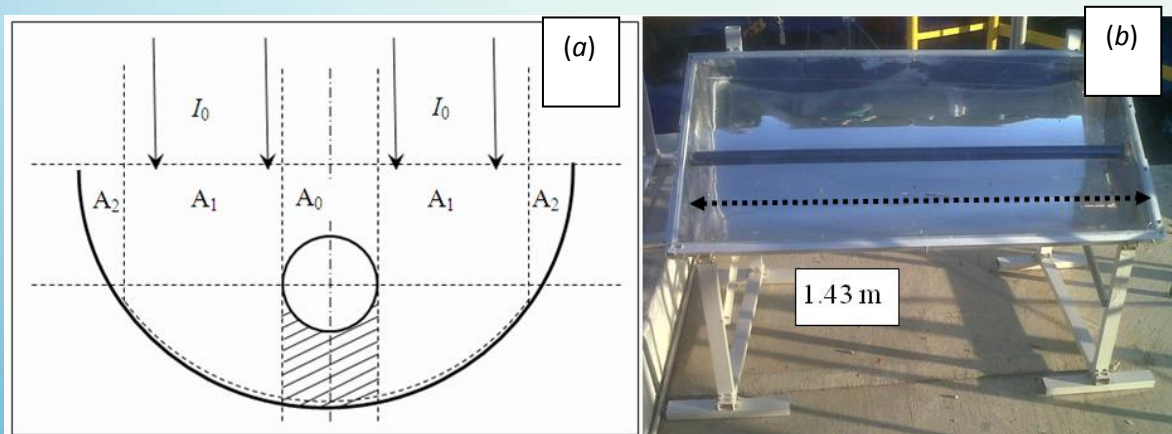
La mayor parte del total de energía consumida en una vivienda se realiza para el calentamiento de agua y la climatización de ambientes (Duffy y Beckman, 1991). El uso de sistemas de calefacción no es común en Bolivia, sin embargo, un tercio del territorio nacional se encuentra cerca a los 4 mil m.s.n.m en la denominada zona Andina con temperaturas muy bajas principalmente en invierno. Una aplicación de calefacción domiciliaria tendría como consecuencia elevar significativamente el consumo de energía en una vivienda convencional.

Los dispositivos solares más comunes y disponibles en nuestro medio para aprovechar la energía solar térmica, son los colectores solares planos y los paneles de tubos al vacío. Ambos equipos tienen un costo elevado respecto al poder adquisitivo de la población boliviana. Debido a esta situación se vio la necesidad se diseñar un mecanismo solar más efectivo, basado en concentración solar, con un impacto en el valor económico del componente colector gracias a la utilización de materiales baratos disponibles en el medio local para su construcción.

## 2. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se experimentó con distintos dispositivos solares hasta llegar a un prototipo final que consiste en la aplicación de colectores solares semicirculares y tubos al vacío. La importancia de la utilización de los colectores solares planteados en el proyecto, es que al emplearlos se reduce la cantidad necesaria de tubos al vacío para el calentamiento de un determinado volumen de agua. El agua caliente obtenida puede ser utilizada para uso sanitario o para el calentamiento de un ambiente.

**Figura 2.** Esquema de diseño del colector semicircular(a),  $I_0$  - intensidad de radiación incidente. Fotografía del colector solar de geometría circular construido y soporte de aluminio (b).







## 2.1 Caracterización óptica de los concentradores circulares

Se realizó la caracterización óptica del foto-reactor, que es básicamente un concentrador semicircular (Escalera et al. 2011). En la Figura 2 se representa el esquema transversal. Como material para la construcción de los colectores solares se utilizó calamina plana No30 de 1 m<sup>2</sup>, se le dio forma circular con perfiles de aluminio de 2x5 mm, los cuales están sujetos a perfiles del mismo material de 25x25 mm. La calamina fue recubierta con papel adhesivo reflectante también de A<sub>1</sub> de 1 m<sup>2</sup>; la reflectancia de este material en el rango 400 – 1000 nm es en promedio de un 90%.

La potencia real recibida por los tubos al vacío dependen de la geometría del colector y de los parámetros de reflexión del Al y la pared externa del tubo al vacío.

$$P_{tubo}^{colector} = I_0 (A_0 \cdot T_{tubo} + 2A_1 \cdot R_{Al} \cdot T_{tubo}) \quad (1)$$

Donde: I<sub>0</sub> – Intensidad solar incidente,

A<sub>0</sub>, A<sub>1</sub> - Área perpendicular a la radiación incidente,

R<sub>Al</sub> – Reflectancia del Al,

T<sub>tubo</sub> – Transmitancia de la pared externa del tubo, causada por reflexión,

$P_{tubo}^{colector}$  - Potencia recibida por el tubo bajo concentración.

La intensidad recibida dentro del tubo será:

$$I = P_{tubo}^{colector} / A_{tubo} \quad (2)$$

Estos parámetros fueron medidos experimentalmente en circunstancias reales al medio día y en días claros sin nubes. Los resultados se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Datos experimentales para la determinación de la potencia real recibida

Parámetro	Magnitud
Transmitancia del tubo, T <sub>tubo</sub>	0.92
Reflectancia del aluminio, R <sub>Al</sub>	0.9
A <sub>1</sub>	0.33605 m <sup>2</sup>
2A <sub>1</sub>	0.6721 m <sup>2</sup>
A <sub>0</sub>	0.06435 m <sup>2</sup>
L, Longitud del colector	1.43 m

Con la ayuda de un láser, se definió experimentalmente que el perímetro efectivo en la configuración elegida con radiación solar incidente perpendicular es aproximadamente:

$$l_{efectivo} = \left( \frac{1}{2,5} \right) \cdot 2\pi r \quad (3)$$

Utilizando la Ec. (1) y los datos experimentales de la Tabla 1., se obtiene la siguiente relación para la intensidad solar recibida dentro del tubo:

$$P_{tubo}^{colector} [W] = I_0 [W / m^2] (0.0592 [m^2] + 0.5565 [m^2]) = I_0 (0.6157) \quad (4)$$



La relación entre el tubo con el colector y el tubo libre será:

$$\frac{P_{tubo}^{colector}}{P_{tubo}} = \frac{I_0(0.6157)}{I_0(0.0592)} \quad (5)$$

Dónde:  $P_{tubo} = I_0(0.0592 \text{ m}^2)$  = potencia recibida por el tubo sin colector.

De la Ec. (5) se tiene:

$$P_{tubo}^{colector} = 10.4 P_{tubo} \quad (6)$$

Utilizando (2) se obtiene:

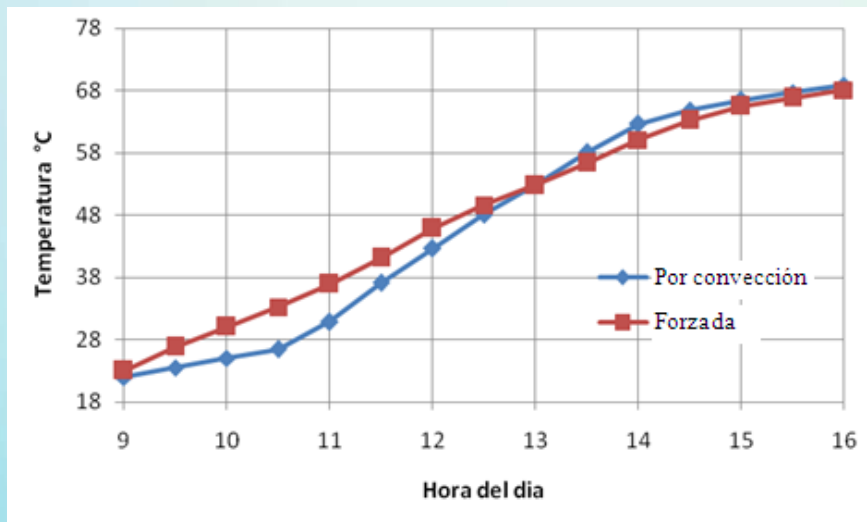
$$I_{tubo}^{colector} = 10.4 I_0 \quad (7)$$

que se puede interpretar como la irradiación de 10.4 soles debido a la influencia del colector. En Cochabamba, donde se realizaron las mediciones, el promedio anual de radiación solar es  $680 \text{ W/m}^2$ , obteniéndose una intensidad solar efectiva promedio de  $I_{tubo}^{colector} = 7.07 \text{ kW/m}^2$  debido al colector implementado.

## 2.2 Implementación del sistema de calefacción solar

Se diseñó y construyó un sistema de calefacción para un ambiente de oficinas del campus de Cochabamba de la Universidad Privada Boliviana (latitud  $17^\circ 22'50.8''\text{S}$  y longitud  $66^\circ 09'37.3''$  a 2558 m.s.n.m.). El sistema consiste en una red cerrada de agua que circula por los colectores para luego ser almacenada en un termotanque de 100 litros. Para el calentamiento de este volumen de agua se requieren 3 colectores solares, alcanzando una temperatura aproximada de  $70^\circ\text{C}$ .

**Figura 3.** Incremento de temperatura de un colector, en función del tiempo.





Los colectores solares están orientados hacia el norte ya que la localización está ubicada en el hemisferio sur y tienen una inclinación de  $30^\circ$ . El ángulo adoptado por el proyecto está optimizado para la época de invierno entre los meses junio a agosto; el área total de recolección efectiva de los 3 módulos es de  $2.21 \text{ m}^2$ .

**Figura 4.** Fotografía del sistema de recolección solar térmico instalado.



Los tres colectores y el termotanque se encuentran ubicados en la azotea a una altura aproximada de 15 m. El agua circula a través de los colectores y es almacenada en el termotanque mediante una circulación por convección. El agua caliente almacenada en el tanque, es transportada mediante una bomba de agua de  $\frac{1}{2}$  HP de potencia, hacia un radiador ubicado en el ambiente elegido para la calefacción. Se tomaron medidas de aislamiento en las tuberías empleando cobertores de plastofomo, igualmente se tomaron previsiones de aislamiento en el ambiente poniendo doble vidrio a las ventanas para evitar las pérdidas térmicas a través de las ventanas.

### 3. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se caracterizaron concentradores solares ópticos de geometría circular; se construyó y diseñó un sistema de calefacción de ambientes en nuestra institución académica. Los módulos de recolección construidos permiten incrementar la intensidad solar y efectivizar el proceso de intercambio de calor con los tubos al vacío. La aplicación de los colectores solares permiten reducir de manera sustancial la cantidad de tubos al vacío en un





factor de 5 para 100 litros de agua, reduciendo los costos de construcción del sistema de recolección solar.

### **Agradecimientos**

Los autores agradecen a SWISSCONTACT proyecto eco-vecindarios, por el apoyo económico para el desarrollo de este trabajo de investigación.

### **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- (1) Lucano M. J. y Fuentes I. E. (2010). Evaluación del potencial de radiación solar global en el departamento de Cochabamba utilizando modelos de sistemas de información geográfica e imágenes satelitales. *Revista Boliviana de Física* 16, 13-21.
- (2) Duffie J.A. and Beckman W.A. (1991) *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2nd edn. pp. 54-59. Wiley Interscience, New York.
- (3) Escalera R., Ormachea O., Casanovas N., Ormachea M., Huallpara L. (2011). Remoción de arsénico asistida por oxidación UV solar (RAOS) en foto-reactores tubulares de sección semicircular – cinética del crecimiento de flóculos de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . *Investigación & Desarrollo* 11, 37-45.



## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE RADIACIÓN SOLAR BASADO EN UN ESPECTRÓMETRO DE AMPLIO ESPECTRO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS PRELIMINARES

Omar Ormachea – [oormachea@upb.edu](mailto:oormachea@upb.edu),

Faviola Romero, Oscar Urquidi, Augusta Abrahamse

(Universidad Privada Boliviana, Centro de Investigaciones Ópticas - CIO)

Joshua Pearce

(Michigan Technological University, Materials Science and Engineering,)

Rob Andrews, Matthew de Vuono

(Engineering, Queens University, Mechanical and Materials)

**Resumen.** Se diseñó y construyó un prototipo funcional de un sistema de medición de radiación solar (global y difusa) basado en un espectrómetro de amplio espectro (UVA, VIS y parte del IR cercano) para el monitoreo solar en Cochabamba, Bolivia, conjuntamente con un sistema similar instalado en Ontario, Canadá. Los datos obtenidos en dos regiones con características geográficas muy distintas ayudaran en el estudio y optimización de materiales fotovoltaicos, para su implementación en diferentes partes del mundo, con características particulares de radiación incidente.

Para medir la intensidad del espectro solar recibido se realizó la calibración del sistema cuyo elemento principal es un espectrómetro Ocean Optics USB4000, utilizando una lámpara halógena de 300W, conjuntamente con un piranómetro, bajando notablemente el costo de la calibración.

La característica fundamental del sistema propuesto es que la medición de los parámetros de intensidad incidente están en función de la longitud de onda. Se realizaron pruebas preliminares en dos ciudades de Bolivia y se demostró que la cantidad de radiación UVA y NIR es mayor en el El Alto (4062 msnm), en comparación con Cochabamba (2570 msnm), con una relación porcentual de incremento de 28% y 18% respectivamente, para las regiones espectrales indicadas.

Se prevee el desarrollo de una red nacional de monitoreo de radiación solar basado en el sistema propuesto, que mejorará los mapas solares existentes, actualmente basados en fotografías satelitales obtenidas en el rango VIS del espectro electromagnético.

**Palabras-clave:** monitoreo de energía solar, radiación solar global y difusa.

### 1. INTRODUCCIÓN

El sol irradia energía en todas las direcciones, con un espectro cercano al de un cuerpo negro a 6000 K (Jonda, 2003) y debido a la inclinación de la tierra y su trayectoria variable en las diferentes épocas del año, la radiación en un lugar específico puede variar en un alto porcentaje. Muchos factores, como la misma atmósfera, que absorbe un 16% (Rösemann, 2004) de la radiación total que llega a la tierra antes de pasar por ésta, las nubes y aerosoles, entre otros factores climáticos propios de cada región, causan variaciones en la radiación recibida en la superficie de la tierra.

El conocimiento preciso de la radiación solar incidente sobre la superficie terrestre es de gran importancia para una variedad de aplicaciones científicas, desde la agricultura hasta el estudio



del calentamiento global (Duffie et al., 2006; Dunlop, 2010; Messenger et al., 2004; Escalera et al., 2009).

En particular, para aplicaciones de obtención de energía eléctrica solar, la información sobre el "recurso solar" es muy importante. Las centrales eléctricas solares (térmicas) necesitan predecir la energía eléctrica producida con un margen de error menor al 5%, las centrales fotovoltaicas y los sistemas de micro-generación conectados a la red, requieren de datos precisos de la variabilidad del recurso solar (Renné et al., 2008).

La intensidad de la radiación solar, su variabilidad y además el espectro solar influyen en la potencia de generación eléctrica por sistemas solares (Betts et al., 2005)

El espectro estándar AM1.5, usado en la optimización de módulos fotovoltaicos de silicio cristalino (actualmente el material más común para paneles fotovoltaicos) refleja principalmente las características del espectro solar en latitudes medias y alturas cerca el nivel de mar; estas características espectrales, corresponden a muchas regiones de Europa y los Estados Unidos (Michael et al., 2011). Nuevos materiales fotovoltaicos (películas delgadas, células de multiunion, etc.) tienen distintas eficiencias cuánticas y como estos materiales se están volviendo comercialmente viables, es importante estudiar el espectro solar en diferentes partes del mundo (Muller et al., 2010).

El espectro solar en Bolivia (país caracterizado por su latitud ecuatorial y su elevación sobre el nivel del mar en varios lugares del país), tiene influencia en la eficiencia de los sistemas solares, por lo tanto es importante caracterizar el espectro solar en esta región con radiación incidente muy variable.

Actualmente en Bolivia se tiene déficit en la información sobre el recurso solar, en cuanto a datos sobre la distribución espectral de la radiación en el país, la información es aun más incipiente. La única fuente de datos sobre la radiación solar y accesible al público, son datos satelitales de la NASA Surface Meteorology and Solar Energy. Aunque estos datos pueden ser útiles para estudios de pre-factibilidad, son muy variables (Cebecauer et al., 2011).

Estos datos son procesados para una red de 40x40 Km, resolución no suficientemente fina para tomar en cuenta variaciones micro-climáticas, además que la resolución temporal de estos datos son promedios de periodos de 3 horas, una resolución que no permite estudios de la variabilidad de la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos (Derewonko, 2008).

Actualmente Bolivia cuenta con un mapa solar (Lucano et al., 2010) que promedia extensas regiones de 1° de latitud por 1° de longitud en base a imágenes satelitales de la NASA y un método de interpolación para estimar la radiación recibida en función de los meses del año. La exactitud de este mapa no ha sido verificada por un período a largo plazo. En general, la exactitud de datos de satélites es muy variable y en muchos casos mayor al 10% (Gueymard 2011).

Por lo tanto, la existencia de una red de medición de radiación solar es imprescindible para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos, térmicos y sistemas activados por radiación UV. Como se mencionó anteriormente, la radiación incidente en la superficie terrestre es función de la altura: Bolivia cuenta con territorios que se encuentran prácticamente al nivel del mar y a alturas que superan los 6000 msnm, teniendo una porción territorial habitada muy importante sobre los 4000 msnm, el altiplano boliviano. Sin embargo, los sistemas para el monitoreo y





medición de radiación solar son caros (sistemas de alta precisión tienen costos por encima de los 30 000 \$US), y no incorporan elementos para medir el espectro solar.

En este trabajo de investigación, se construyó y diseñó un sistema de medición de radiación solar en base a un espectrómetro de amplio espectro. El monitoreo de radiación solar con este instrumento permitirá estudiar los efectos solares en Cochabamba para la mejor predicción de la eficiencia de sistemas solares, su optimización y el ajuste del mapa solar ya existente, que por estar basado en fotografías satelitales solo puede ser usado como una estimación de radiación solar.

Se propone la instalación de un prototipo funcional de monitoreo radiación solar global directa, como también la difusa, parámetros muy importantes para el diseño de celdas fotovoltaicas y sistemas térmicos fundamentalmente.

## **2. CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR**

Los paneles fotovoltaicos generalmente están instalados inclinados hacia el norte con un ángulo fijo, es importante medir el espectro en diferentes ángulos de incidencia, además el albedo de la superficie de la tierra en adición a la radiación solar influye en el espectro incidente y varía en proporción al factor de visión *view factor*. Para tomar en cuenta estos efectos, el espectrómetro toma medidas regularmente en varios ángulos con respecto a la horizontal.

El sistema de medición de radiación solar construido, consta de un espectrómetro comercial *Ocean Optics* USB4000, ajustado a una fibra de cuarzo de diámetro 1000  $\mu\text{m}$ , cuyo extremo contiene un corrector o receptor de coseno *Stellarnet* CR2 y su acople para medir radiaciones intensas, como la del sol, un *Stellarnet* CR2 AP con 10% de apertura. El extremo de la fibra óptica está sujeto a una barra a una distancia determinada, la cual será movida por el primer motor paso a paso, en incrementos de 9 grados en un espacio de 90 a 0 grados, para tomar una medida en cada lugar.

Adicionalmente, el sistema fue diseñado para permitir la medición del espectro de la radiación difusa. Un segundo motor está sujeto a una banda de sombra de radio y ancho determinados para dar sombra al sensor, según el día y época del año. Un total de 20 medidas serán tomadas cada hora, diez de radiación directa en distintos ángulos y otras diez de radiación difusa, también a distintos ángulos.

El control y sincronización del sistema está gobernado por un microcontrolador *Arduino UNO*, el cual se encarga de mover ambos motores con ayuda de la placa controladora *Adafruit Motor Shield*, se necesita además realizar el cálculo respectivo de la posición del sol para poder dar sombra al sensor y sincronizar y ordenar la captura de datos al espectrómetro.

Para llevar un control de la hora y fecha actuales, datos necesarios para el cálculo de la posición del sol, se conectó un RTC (real time clock) al *Arduino*, el cual al poseer una batería independiente, lleva cuenta de la hora y fecha exactas, aun si el sistema no está energizado. Se utilizó la versión más actualizada del reloj, llamada *Chronodot v2.1*. El espectrómetro está directa y permanentemente conectado a un computador en el cual los datos son almacenados por fecha para su posterior análisis.

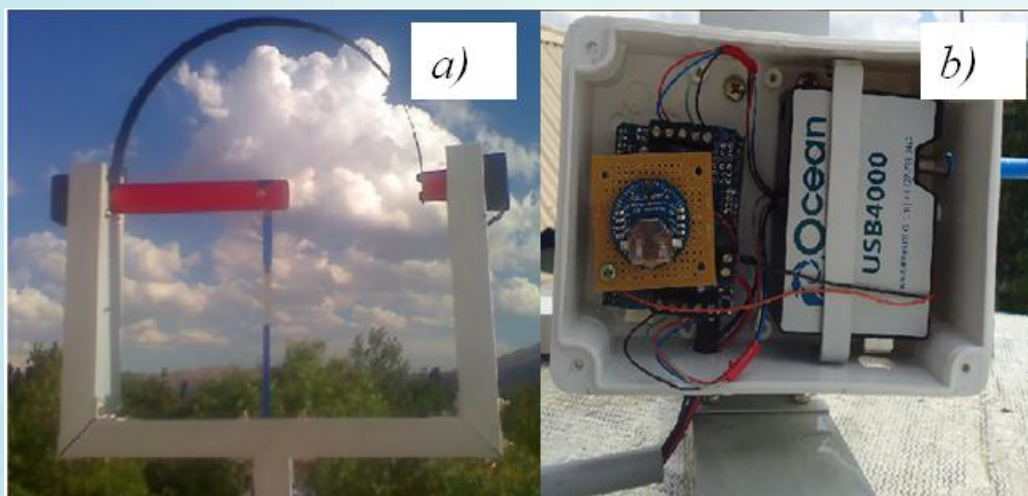


## 2.1 Estructura mecánica

La estructura mecánica del sistema se constituyó de piezas de perfil de aluminio de 30x60mm unidas por pernos de distintos diámetros y profundidades para dar lugar a un soporte del sistema compuesto de dos motores, el soporte de la fibra de cuarzo (ver Figura 1a) y una caja hermética para contener el espectrómetro y el microcontrolador (Ver Figura 1b). El aluminio es un material de costo relativamente bajo y disponible en la Ciudad de Cochabamba.

La altura de la estructura mecánica es de 2m. Los elementos básicos de la estructura son ambos soportes de los motores, uno de ellos fijado a una barra de teflón que sostiene la fibra de cuarzo que se conecta con el espectrómetro y el otro que sostiene a la banda de sombra (semicírculo para producir sombra en la fibra y permitir la medición de la radiación difusa).

Para calcular el diámetro y el ancho de la banda de sombra se utilizó una equivalencia entre el diámetro y el radio de un piranómetro certificado. El resultado fue de un radio de 13.5 cm y un ancho de 2.5 cm. En función de estos parámetros se diseñó la estructura metálica, el soporte del sistema y la caja que contiene al espectrómetro y al microcontrolador dependen del espacio disponible y de la estructura del cableado.



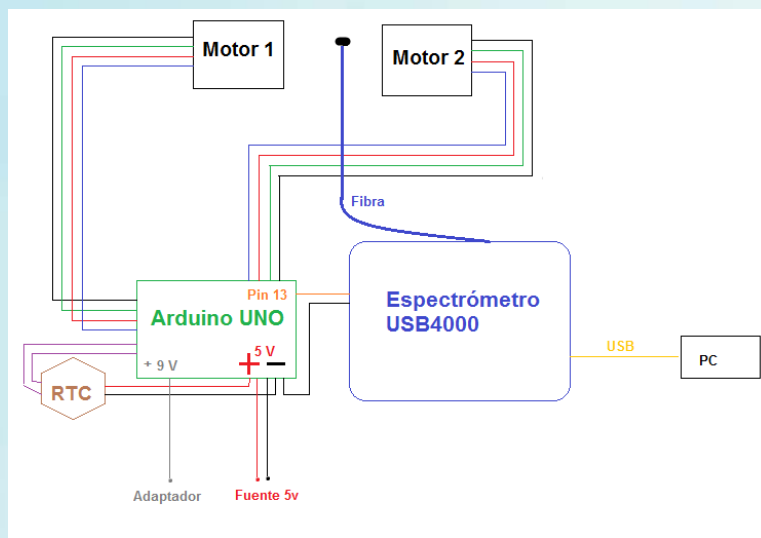
**Figura 1.** Estructura mecánica de motores y fibra (a), caja hermética con la electrónica del sistemaN (b).

Se consideraron detalles en el diseño para que la estructura resista los cambios climáticos, por lo que se cubrió los motores con placas de aluminio y se las selló con silicona; también los orificios de entrada y salida de cables en la caja hermética fueron sellados con silicona para evitar filtraciones de agua. Adicionalmente se agregaron cables tensores en las cuatro esquinas del soporte para evitar el movimiento en caso de vientos fuertes. Finalmente la estructura fue empernada al piso en el techo de uno de los ambientes de la Universidad Privada Boliviana, para asegurar fijación en su orientación, con el sensor y la banda de sombra apuntando al norte magnético, con una inclinación de 8 grados al oeste, siendo la latitud 17.4° Sur y la longitud 66,2° Oeste, cálculo para la Ciudad de Cochabamba.



## 2.2 Electrónica y control

Debido a que el sistema está gobernado por el microcontrolador Arduino, el programa principal se escribió en lenguaje C. El Arduino UNO es un microcontrolador que consta de 6 entradas/salidas analógicas y de 13 entradas/salidas digitales, las cuales pueden ser programadas para el propósito requerido. La comunicación con el ordenador para quemar los programas se realiza mediante la conexión de un puerto USB, previamente instalados los drivers. Sobre la energía necesaria, el Arduino UNO puede funcionar con la energía del computador, o bien la conexión de una fuente externa de 9VDC.



**Figura 2.** Diagrama electromecánico de conexiones del sistema.

Se tomaron en cuenta tres aspectos cruciales para la elaboración del programa: el movimiento de ambos motores, el cálculo de la posición del sol en el medio día solar de cada día, y el reloj RTC para llevar una cuenta exacta del tiempo.

## 2.3 Estructura electromecánica

La estructura electromecánica del sistema está dentro de la estructura de aluminio y en la caja hermética en su totalidad, excepto por los cables de alimentación de motores y conexión con el computador.

Ambos motores son bipolares, paso a paso, de cuatro hilos. Para ponerlos en funcionamiento, se tuvo que extender las cuatro entradas hasta la caja hermética y conectar con la placa controladora de motores acoplada al Arduino UNO, que tiene una alimentación de 9V para el microcontrolador y una de + 5V y GND para los motores.

Se debe tomar en cuenta la curva de respuesta de los motores para obtener el torque suficiente para que estos sean capaces de mover tanto la fibra como la banda de sombra. En la Figura 2 se observa un esquema del cableado del sistema. Se comprobó experimentalmente que la corriente necesaria para lograr el suficiente torque es de al menos 1.5 A. Además, el pin digital #13 del Arduino está conectado al espectrómetro en su pin#7, el cual envía el pulso para obtener la captura de datos, y también una conexión a GND, en el pin#6 del espectrómetro. Los puertos analógicos #4 y #5 del Arduino están conectados al RTC en sus puertos SDA y SDC,





encargados de datos y hora, respectivamente. Además el RTC está también alimentado por +5V y con una conexión a GND, para evitar que la batería independiente se gaste muy rápidamente.

## 2.4 Calibración del Sistema

El espectrómetro *Ocean Optics* USB4000 fue certificado de fábrica, en lo que se refiere a la calibración en función de la longitud de onda en un rango de 200 – 900 nm; en cuanto a unidades de intensidad este instrumento muestra unidades arbitrarias *counts*..

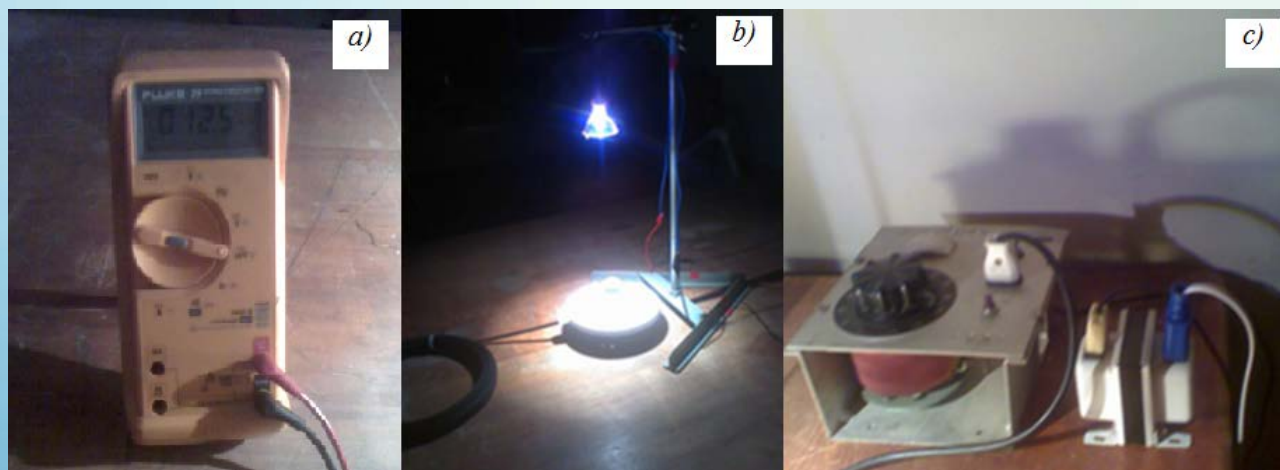
Para obtener datos en intensidades (valores absolutos) se necesita calibrar al sistema, esto está previsto para este tipo de instrumentos, donde se debe utilizar el software *SpectraSuite*, conectado al espectrómetro, en el modo de Irradiancia Absoluta, cuyas unidades son  $[\mu\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})]$  en el eje vertical y la longitud de onda en [nm] el eje horizontal.

Para la calibración del sistema se utilizó una lámpara de halógeno de alta potencia (300 W–120 VAC), cuya curva espectral fue tomada en Queens University (Canadá) por el espectrómetro Avantes de 200 – 2500 nm, el cual se encontraba certificado y calibrado de fábrica (intensidad en función de longitud de onda). La lámpara halógena se posicionó a una distancia de 251 mm y se registró la curva obtenida; esta lámpara fue enviada a Bolivia a nuestras instalaciones, para el proceso de calibración del espectrómetro *Ocean Optics* USB4000.

A través de la curva obtenida, se realizaron dos tareas:

1. Crear un archivo de referencia, con la extensión “.Imp”
2. Integrar la curva, para obtener el dato de la intensidad integral total.

El archivo de referencia .Imp se utiliza para comparar la curva obtenida con el espectrómetro en “ua” por nm y la de la radiación real, en  $[\mu\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})]$  por [nm], a través de esta operación se crean datos en formato Excel, importándolos a un archivo de texto de dos columnas, la primera es la longitud de onda en [nm] y la segunda la irradiancia en  $[\mu\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})]$ .



**Figura 3.** Sistema de calibración. Multímetro Fluke (a), lámpara halógena y piranómetro Kipp&Zonen CMP-6 (b), variac y transformador (c).



En esta experiencia se utilizó el piranómetro Kipp&Zonen CMP-6 de primera clase como sensor de radiación electromagnética, este instrumento entrega un voltaje que es función de la intensidad recibida, donde el valor equivalente es hallado a través de la siguiente relación:

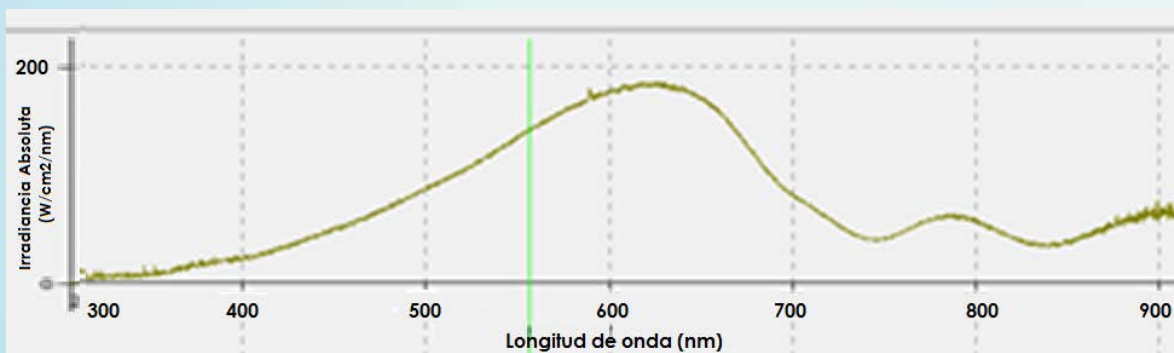
$$\text{Radiación solar } \left[ \text{W/m}^2 \right] = \frac{\text{Salida del piranómetro } [\mu\text{V}]}{\text{Cte. de sensibilidad del piranómetro } [\mu\text{V}/(\text{W/m}^2)]} \quad (1)$$

En nuestras instalaciones se posicionó la lámpara halógena a 251 mm de distancia del sensor (tal como se hizo en Canadá) obteniendo un valor de 12553.17  $\mu\text{V}$ , correspondientes al espectro obtenido integrando numéricamente: 791,20  $\text{W/m}^2$ , para la lámpara halógena mencionada.

Se utilizó además un circuito estabilizador compuesto por un transformador y un variac, para estabilizar a la lámpara halógena (ver Figura 3); se incrementó la intensidad hasta que el piranómetro entregue el valor equivalente en  $\mu\text{V}$  a 791.20  $\text{W/m}^2$ .

En la ecuación (1) la constante de sensibilidad, propia del piranómetro utilizada es de 15.87  $[\mu\text{V}/(\text{W/m}^2)]$ , se utilizó un multímetro Fluke con resolución del orden de  $[\text{mV}]$ , para la obtención del valor en voltaje. El tiempo de respuesta del piranómetro es de 18 segundos, el valor del voltaje alterno que alimenta la lámpara es de 81.2 V y se recomienda esperar 20 minutos hasta que la fuente de luz se estabilice.

**Figura 4.** Imagen de la medición de radiación  $[\mu\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})]$  en función de la longitud de onda  $[\text{nm}]$ .



Una vez obtenidos los parámetros necesarios de emisión de la fuente patrón, se procedió a cambiar el piranómetro por el sistema construido, basado en un espectrómetro de amplio espectro, donde, el extremo de la fibra, ajustado al corrector de cosenos lleva la radiación incidente al sensor mencionado. Posteriormente con el espectrómetro conectado a un computador, dentro del software SpectraSuite, en File>New>New Absolute irradiance Measurement, se eligió la fuente de toma de datos y se procedió a cargar los espectros de referencia con y sin luz; se cargó el archivo .lpm de referencia, debido al corrector de cosenos, tenemos una apertura de  $\frac{1}{4}$  de pulgada, es decir 6350  $\mu\text{m}$  de diámetro con  $180^\circ$  de campo de vista. En la Figura 4 se observa la curva de respuesta en el modo de Irradiancia Absoluta, del espectrómetro ya calibrado, en el cual se puede observar los valores en intensidad.

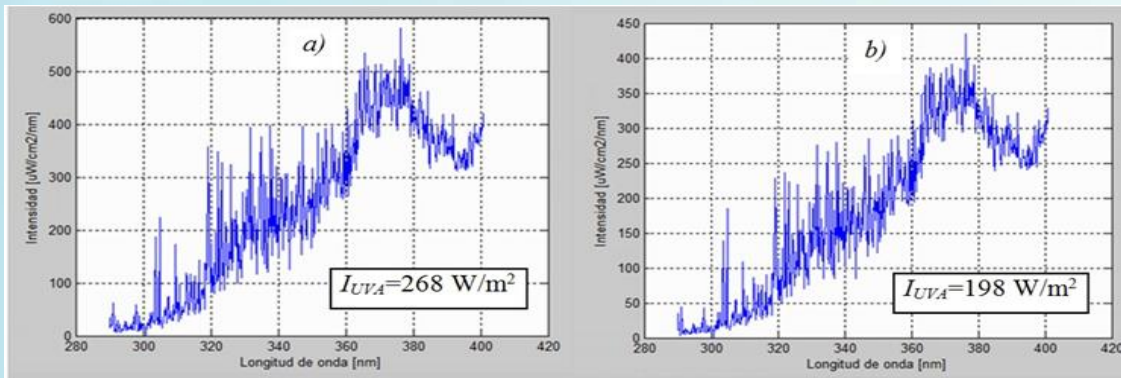
### 3. RESULTADOS PRELIMINARES

Con el sistema ya calibrado se procedió a la instalación del sistema y a la de toma de datos



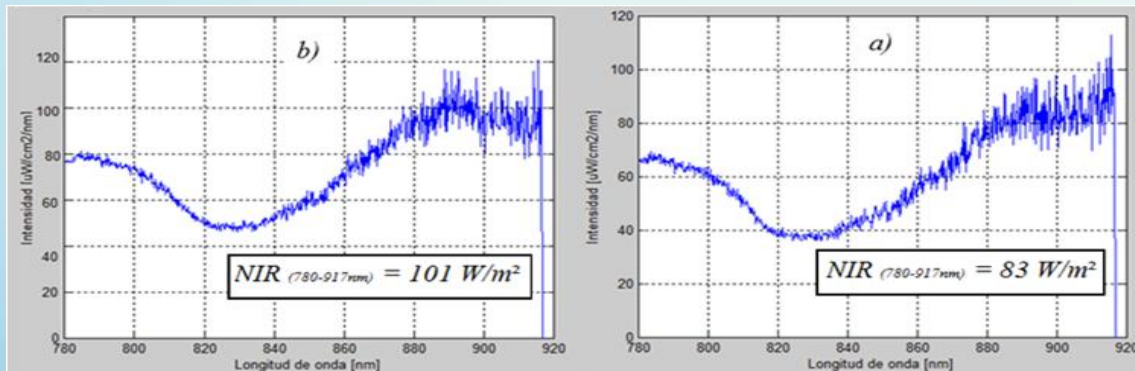
automatizado en Cochabamba, a 2570 msnm.

**Figura 5.** Imagen de la medición de radiación solar UVA para una altitud de 4062 msnm (a) y 2570 msnm (b).



La parte del espectro electromagnético UVA, es de fundamental importancia pues con la altura la cantidad de radiación en esta región seleccionada se incrementa, en la Figura 5 se muestra dos tomas de intensidad en la región mencionada, para Cochabamba y la Ciudad de El Alto que se encuentra a 4062 msnm, ambas mediciones fueron tomadas bajo condiciones similares en días claros sin nubes y a un ángulo aproximado de  $90^\circ$  con respecto a la normal. En la Ciudad de Cochabamba se tomaron estos datos el día 24 de noviembre, mientras que en El Alto al día siguiente (25 de noviembre), a las 12:12 horas en ambos casos. Estos datos muestran un incremento del 25,8 % de radiación global integral (directa + difusa) en función de la altura correspondiente a una diferencia de 1492 m entre ambas ciudades.

**Figura 6.** Imagen de la medición de radiación solar NIR para una altitud de 4062 msnm (a) y 2570 msnm (b).



Además se comparó, en ambos lugares, en la parte del NIR detectada por el espectrómetro usado, para comprobar que efectivamente la radiación está en función a la altura del lugar. En la Figura 6 se observa la comparación.

En este caso existe un 18% de aumento de la radiación solar IR en el rango de 780 a 917 msnm, y por consiguiente se asume que existe un aumento de esa proporción en el resto del IR cercano, debido a la naturaleza similar de las ondas de este rango de longitud.





#### 4. CONCLUSIONES

Se desarrolló y construyó un sistema de monitoreo de radiación solar, basado en un espectrómetro de amplio espectro, el sistema fue calibrado usando una lámpara halógena (como fuente patrón), de la cual previamente se obtuvo su espectro en el “Mechanical and Materials Engineering”, de la Queens University.

El sistema fue instalado en la ciudad de Cochabamba donde actualmente se obtienen datos de la radiación directa y difusa en función de la longitud de onda, de manera automatizada. Se realizaron además pruebas de medición en la región espectral UVA, en dos ciudades de Bolivia que se encuentran a diferentes alturas comprobando experimentalmente que por lo menos en esta parte del espectro se tiene un incremento sustancial aproximadamente del 25 % de la radiación incidente que es función de la altura. Asimismo se asume un aumento de un 18% de la radiación NIR recibida, también en función a la altura. De esta manera se demuestra que este sistema es de mucha importancia y que potencialmente una red de medición de radiación solar en Bolivia, basada en estos sistemas, podría dar datos más precisos para el diseño de sistemas fotovoltaicos, térmicos y aplicaciones en la región UVA, se muestra además que con estos datos se puede ajustar el mapa de radiación solar boliviano existente.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) J. Tonda, El oro solar y otras fuentes de energía, México, Fondo de cultura económica, 2003.
- (2) R. Rösemann, Solar Radiation Measurement, 2004.
- (3) J.A. Duffie, W.A. Beckman, Solar engineering of thermal processes, Jhon Wiley & Sons Inc., 2006.
- (4) J.P. Dunlop, Photovoltaic Systems, American Technical Publishers Inc, 2010.
- (5) R.A. Messenger, J. Ventre, Photovoltaic Systems, Florida: CRC Press, 2004.
- (6) R. Escalera, O. Ormachea, Remoción de arsénico (V) asitida por oxidación UV solar en un fotoreactor de sección circular, Investigacion & Desarrollo, pp.58-79, 2009.
- (7) D. Renné, et al., Technical Report NREL/TP-581-42301, 2008.
- (8) G.R. Betts, et al., The effect of spectral variations on the performance parameters of single and double junction amorphous silicon solar cells, Solar Energy Materials & Solar Cells, 85, pp.415-428, 2005.
- (9) S. Michael E.L. Meyer, The effects of spectral evaluation of c-Si modules, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol.19, 1, pp.1-10, 2011
- (10) M. Muller, et al., An Investigation into Spectral Parameters as they Impact CPV Module Performance, 6th International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems, Freiburg, Germany, 2010.
- (11) T. Cebecauer, M. Suri, and C. Gueymard, Uncertainty sources in satellite-derived direct normal irradiance: how can prediction accuracy be improved globally, Proc. SolarPACES Conj, Granada, Spain, pp.20-23, 2011.
- (12) P. Derewonko, J.M. Pearce, Optimizing design of household scale hybrid solar photovoltaic combined heat and power systems for Ontario, 2009 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference PVSC, pp.1274-1279, 2009.
- (13) M. Lucano, I. Fuentes, Evaluación del potencial de radiación solar global en el departamento de Cochabamba utilizando modelos de sistemas de información geográfica e imágenes satelitales, Revista Boliviana de Física, 16, pp.13-21, 2010.
- (14) C.A. Gueymard, Uncertainties in modeled direct irradiance around the sabara as affected by aerosols: Are current datasets of bankable quality, Journal of Solar Energy Engineering, vol. 133, pp.031024, 2011.



## DESARROLLO TECNOLÓGICO Y USOS PRODUCTIVOS EN PROYECTOS DE MICROCENTRALES HIDROELÉCTRICAS EN BOLIVIA

**Emiliano Montaña Gonzáles** – [maghidraulicas@hotmail.com](mailto:maghidraulicas@hotmail.com)

Instituto de Hidráulica e Hidrología Ihh-UMSA

**José Luis Monroy Cuellar** – [jlmc261@hotmail.com](mailto:jlmc261@hotmail.com)

Instituto de Hidráulica e Hidrología Ihh-UMSA

**Álvaro Christian Montaña Saavedra** – [alvaroms@ecotecbolivia.org](mailto:alvaroms@ecotecbolivia.org)

ECOTEC, Ecotecnologías Energéticas y Productivas

**Resumen.** A principios de los años 90 del siglo pasado, en el Instituto de Hidráulica e Hidrología dependiente de la Universidad Mayor de San Andrés se creó el Programa Hidroenergético, cuyo objetivo principal era el de contribuir al desarrollo de la hidrogenación en pequeña escala en el país. En el marco de este Programa, se han desarrollado turbinas hidráulicas tipo Pelton y Banki, adecuadas para la zona Andina del país y reguladores electrónicos de velocidad del grupo turbina - generador con el cual se han implementado equipos de generación completos. Por otra parte se ha desarrollado un enfoque adecuado para la concepción, diseño y construcción de pequeños proyectos de hidrogenación y un curso de capacitación para operadores de microcentrales hidroeléctricas. A partir de estos desarrollos, el Programa ha intervenido en más de 60 proyectos en todo el país, de los cuales se han construido 30 microcentrales en diferentes regiones principalmente en el Departamento de La Paz. Los proyectos se han construido en la modalidad de “autoconstrucción” y usos productivos de la energía. La mayor parte de estos proyectos son auto sostenibles a partir del cobro de tarifas por el consumo eléctrico; responden a una administración auto gestionada y han contribuido al desarrollo de las comunidades donde han sido implementados, permitiendo el ahorro familiar y reducción de la pobreza por sustitución de los energéticos tradicionales (velas, querosén, GLP) por energía eléctrica producida localmente a menor costo y por procesamiento y semi industrialización de los recursos naturales con que cuentan las diferentes zonas.

### 1. INTRODUCCIÓN

A mediados de los años 80, en el Instituto de Hidráulica e Hidrología dependiente de la Universidad de San Andrés se realizaron las primeras experiencias en el campo de la generación hidroeléctrica en pequeña escala con la fabricación de una turbina hidráulica tipo Michell Banki y con la construcción de una microcentral hidroeléctrica en la comunidad de San Pedro de Condo en el Departamento de Oruro.

A partir de esta experiencia, a principios de los años 90, en el Instituto se creó el Programa Hidroenergético para coadyuvar en el desarrollo de la hidrogenación en pequeña escala en el país, considerando que la cobertura de electrificación rural en esos años se encontraba cercana al 20% y que principalmente en la zona Andina existían potenciales hidroenergéticos sin aprovechar. Muchas comunidades no contaban con energía eléctrica y su posibilidad de conectarse a las redes eléctricas existentes era escasa, debido a su aislamiento, a los altos costos y a la reducida demanda que estas comunidades representan.

En el Programa se planteó el desarrollo de pequeños equipos de generación hidroeléctrico con el fin de reducir la dependencia externa, creando una tecnología propia para la fabricación de estas máquinas a nivel local con las ventajas que esto significa: menores costos, disponibilidad



inmediata, disponibilidad de asistencia técnica permanente y ahorro de divisas de importación. Por otra parte, se planteó el desarrollo de un enfoque adecuado en la concepción, diseño y construcción de pequeños proyectos de hidrogenación, acordes a su tamaño?, con el fin de reducir los costos de pre inversión y construcción, además de contar con modelos de obras hidráulicas sencillos y seguros que puedan ser construidos incluso por los propios beneficiarios con dirección técnica de los ingenieros del Programa. También se contempló el desarrollo de cursos de capacitación para operadores locales de las plantas para entrenar a personal local en aspectos de administración, operación y mantenimiento, con el fin de lograr la auto gestión de estos emprendimientos.

Otro aspecto desarrollado y que se convirtió en un punto fundamental fue el uso productivo que las comunidades le daban a la energía eléctrica generada. El Programa tuvo que incorporar propuestas y formular proyectos acordes a las necesidades de cada región.

## **2. OBJETIVOS**

Cuando se creó el Programa se plantearon los siguientes objetivos:

### ***Objetivo principal***

Coadyuvar en el desarrollo de la hidroenergía en pequeña escala en el país y aplicaciones productivas de la misma.

### ***Objetivos específicos***

Para lograr el objetivo principal se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollo de turbinas hidráulicas tipo Pelton.
- Desarrollo de turbinas hidráulicas tipo Michell Banki.
- Desarrollo de reguladores de velocidad electrónicos.
- Montaje de equipos hidroeléctricos completos.
- Desarrollo de un enfoque adecuado para la concepción, diseño, construcción, operación y mantenimiento de pequeños proyectos hidroenergéticos.
- Desarrollo de un enfoque adecuado para la creación, funcionamiento y administración de microempresas rurales, mediante el uso de la energía renovable para procesamiento de recursos naturales.

En gran medida, los objetivos planteados inicialmente se han cumplido, y actualmente el Programa Hidroenergético se encuentra vigente por las siguientes razones:

- La cobertura de electrificación rural en la actualidad no se ha modificado sustancialmente, se encuentra alrededor del 35%.
- En el país existen varias poblaciones pequeñas y comunidades sin servicio eléctrico que cuentan con potenciales hidroeléctricos que pueden ser aprovechados y cuya posibilidad de interconectarse con la red eléctrica nacional son escasas debido a su aislamiento.
- Es necesario prestar asistencia técnica permanente a los proyectos ejecutados que se encuentran en operación.
- La tecnología desarrollada en cuanto a turbinas hidráulicas y reguladores de velocidad requiere mejora y perfeccionamiento permanente que se logra con un proceso de





retroalimentación a partir de información de los equipos que se encuentran en funcionamiento.

### **3. METODOLOGÍA**

Para el desarrollo de las turbinas hidráulicas tipo Pelton y Michell Banki y los controladores electrónicos de carga, se han fabricado modelos y prototipos probados en banco de pruebas del laboratorio de hidráulica en un proceso de experimentación y mejora hasta lograr desenvolvimientos aceptables. Este proceso continúa con prototipos instalados en proyectos reales de campo, con evaluaciones permanentes e incorporación de mejoras en un proceso de retroalimentación.

El desarrollo de obras civiles adecuadas para pequeñas y micro centrales hidroeléctricas, ha partido de la adecuación de los enfoques de diseño de obras para grandes centrales a pequeños aprovechamientos, simplificando muchos elementos de éstas de acuerdo a su dimensión, lo que permite reducir los costos de preinversión y ejecución.

Se ha desarrollado también una metodología de construcción de estos proyectos en la modalidad de “autoconstrucción” empleando mano de obra y materiales locales aportados por los beneficiarios y un programa de capacitación en administración, operación y mantenimiento para operadores locales que permite la autogestión de los proyectos.

### **4. ACTIVIDADES DESARROLLADAS**

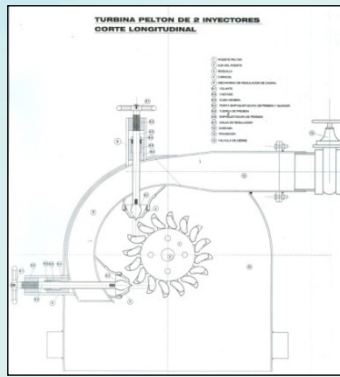
#### ***Desarrollo de turbinas hidráulicas tipo Pelton***

Considerando las características de los potenciales hidroenergéticos en la zona andina del país, es decir la existencia de altas caídas y reducidos caudales, se planteó la necesidad del desarrollo de turbinas tipo Pelton, adecuadas para este rango de aprovechamiento.

Las primeras turbinas tipo Pelton que se fabricaron contaban con rotores de diferentes materiales: aluminio, bronce e incluso poliuretano rígido. Eran micro turbinas que generaban reducidas potencias. El inyector tipo caracol, permitía la incorporación de cuatro toberas roscadas intercambiables de diferente diámetro; se usaba un juego de toberas en época normal y otro de menor diámetro para época seca cuando se reducía el caudal del río. El cambio de toberas requería el desmontaje del rotor para permitir acceso al inyector, esta operación se realizaba por lo menos una vez al año. Para evitar este trabajo, posteriormente se incorporaron al anterior inyector agujas de regulación de caudal de accionamiento externo, que permitían la regulación de la entrada de flujo al rotor sin desarmar la turbina.

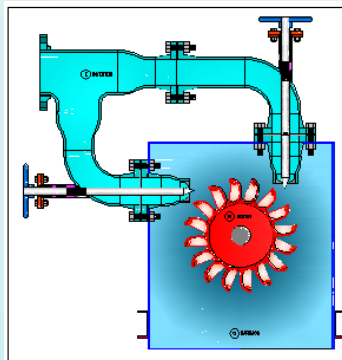


**Figuras 1, 2 y 3.** Rotores de turbinas Pelton de bronce, poliuretano rígido y aluminio fabricados en el iih.  
Fuente: Prog. Hidroenergía. IHH-UMSA



**Figuras 4 y 5.** Se observa una turbina Pelton con inyector tipo caracol y 4 toberas intercambiables. A la derecha el corte de una turbina Pelton de dos chorros con inyector tipo caracol y agujas de regulación de caudal de accionamiento externomaneual en las dos toberas.  
Fuente: Prog. Hidroenergía. IHH- UMSA

Posteriormente se desarrollaron turbinas Pelton de diámetros efectivos de 12, 20 ,26 y 33 cm., con rotores de acero, fierro fundido y bronce para caídas entre 20 y 200 m cubriendo un rango de potencias desde la pico – hidrogenación, hasta centrales de 250 kW de potencia, contando con uno a cuatro inyectores. La regulación de caudal se realiza mediante agujas de regulación de accionamiento manual, lo que permite el funcionamiento de la turbina con buen rendimiento para caudales parciales hasta el 30% del caudal de diseño. Estas máquinas cuentan con rendimientos máximos aceptables, considerando su tamaño, cercano al 80%.



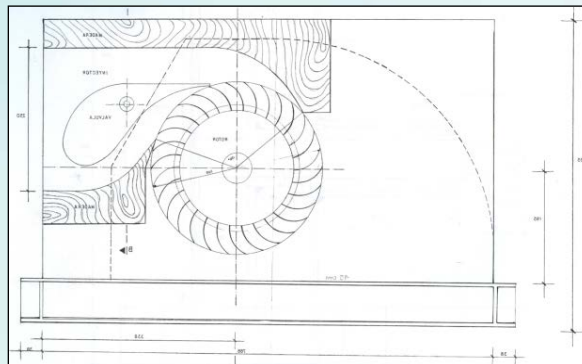
**Figuras 6, 7 y 8.** A la izq. Turbina Pelton con inyector tipo caracol y dos toberas de accionamiento externo, al centro corte transversal y a la derecha turbina fabricada, nuevo desarrollo de turbinas Pelton. Fuente: Prog. Hidroenergía. IHH- UMSA





## Desarrollo de turbinas hidráulicas tipo *Michell Banki*

Las turbinas tipo Banki cubren el rango de aplicación de medianas caídas y medianos caudales. Esta máquina es una turbina intermedia entre las Pelton de alta caída y bajo caudal y las Kaplan o Hélice de baja caída y gran caudal, cuyo rango de aplicación es similar a la turbina Francis. En el Instituto se han desarrollado varios modelos de turbinas de este tipo, realizando una serie de modificaciones del rotor, inyector, válvula de cierre y carcasa, buscando una eficiencia aceptable y diseño sencillo que implique reducida cantidad de materiales en su fabricación pero lo suficientemente robusta para garantizar su vida útil.



**Figuras 9 y 10.** Modelo de turbina Banki testada en el banco de pruebas del IHH. Fuente: Prog. Hidroenergía. IHH- UMSA

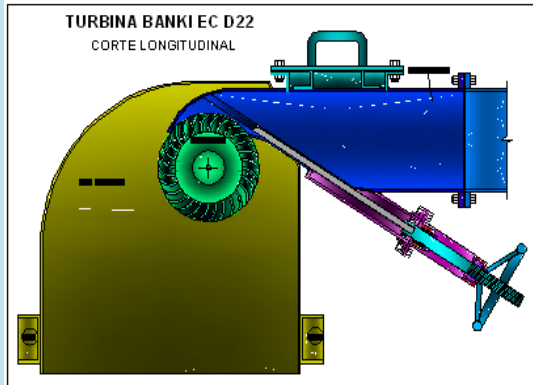
El último modelo diseñado en el Instituto no incluye la paleta o válvula de cierre tipo mariposa tradicional, fue reemplazada por una compuerta plana de diseño propio que se desliza en la pared inferior del inyector, regulando el caudal por estrangulamiento del arco de admisión. Este modelo de turbina se ha estandarizado con rotores de diámetros 20, 22, 25 y 30 cm. contando con 28 álabes en su periferie.



**Figura 11.** Rotor de turbina Banki. Cuenta con 28 álabes de acero inoxidable, diámetro externo del rotor de 22 cm. y un disco intermedio para impedir la flexión de los álabes. Fabricado para el proyecto Microcentral Hidroeléctrica Palmeras. Provincia Sud Yungas del Departamento de La Paz. Fuente: Prog. Hidroenergía. IHH- UMSA

La turbina puede cubrir un rango de caudales entre 50 y 500 l/s, con saltos netos entre 10 y 100 m. La eficiencia máxima se encuentra alrededor del 75%.

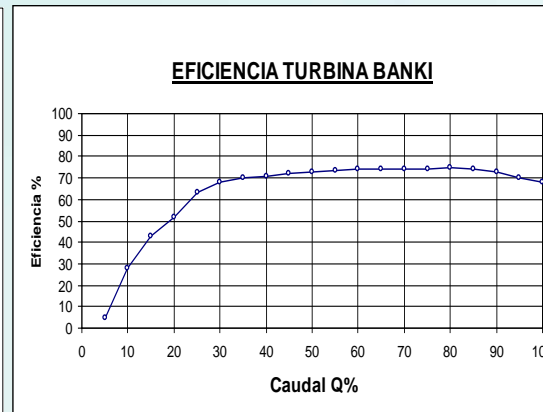
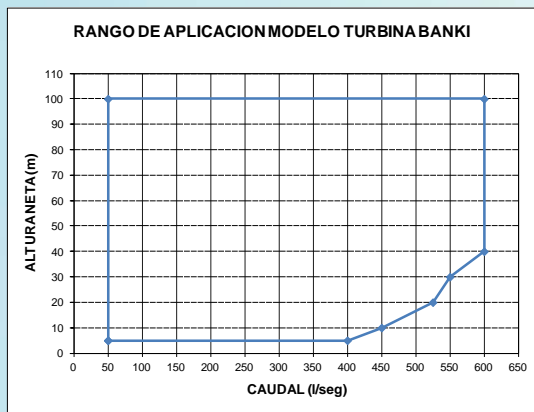




**Figura 12.** Corte turbina Banki con regulación de mediante compuerta plana deslizante  
Fuente: Prog. Hidroenergía. IHH- UMSA



**Figura13.** Turbina Banki fabricada para el proyecto caudal MCH Quinuni, Prov. Sud Yungas. La Paz.  
Fuente: Prog. Hidroenergía. IHH- UMSA

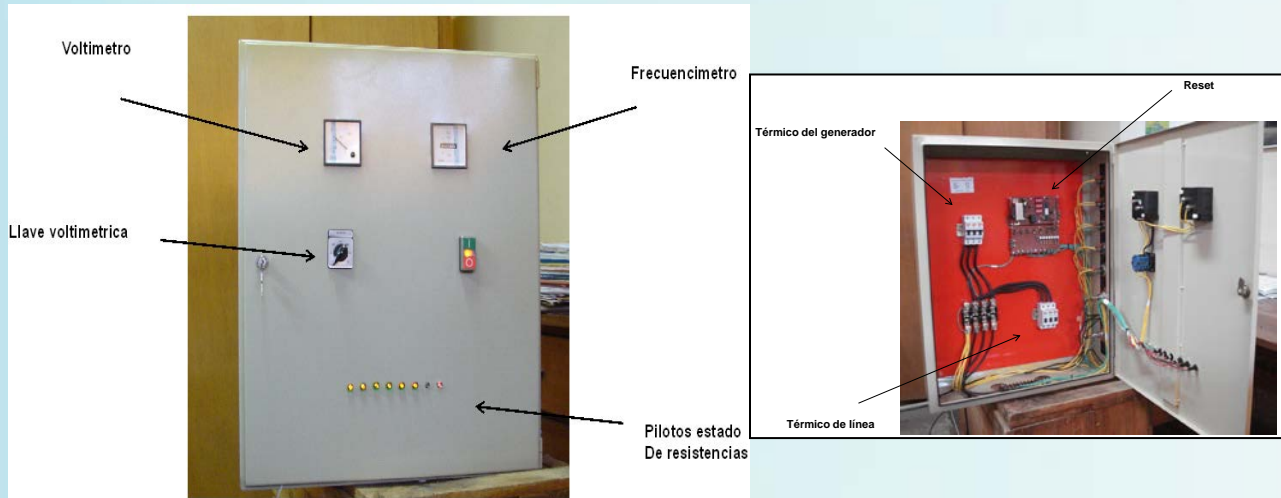


**Figuras 14 y 15.** Rango de Aplicación y curva de eficiencia. Fuente: Prog. Hidroenergía. IHH- UMSA

#### Desarrollo de reguladores de velocidad electrónicos (4)

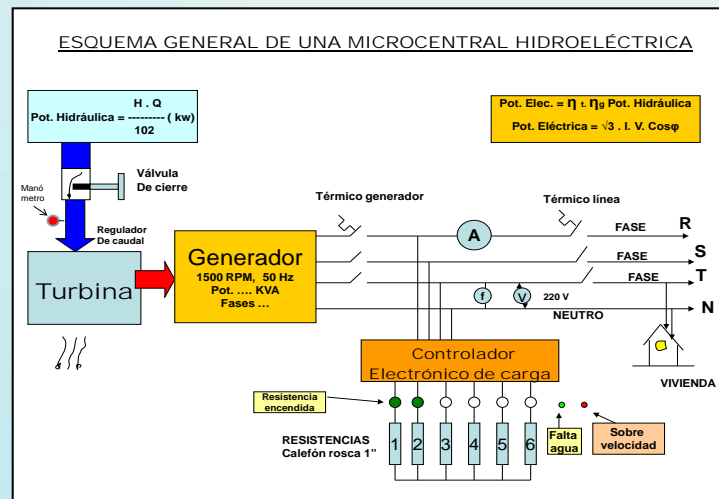
Una central hidroeléctrica en operación aislada requiere un equipo de regulación de velocidad para mantener constante la frecuencia y por tanto el voltaje de la energía producida, debido a que el grupo turbinagenerador se encuentra entre la potencia hidráulica de entrada y la potencia eléctrica de salida. Cualquier cambio a la salida, en la carga eléctrica, ocasiona también cambio en la velocidad del grupo y por tanto en la frecuencia y el voltaje. Si la carga baja la turbina se acelera y si la carga sube se frena.

Después de varios años de investigación se ha desarrollado un equipo totalmente operable y confiable, operando en por lo menos en 50 microcentrales hidroeléctricas en varios departamentos del país.



**Figuras 16 y 17.** Regulador de velocidad electrónico. Fuente: Prog. Hidroenergía. IHH- UMSA

Es un controlador diseñado para su aplicación con generadores monofásicos o trifásicos en conexión estrella, con disipadores blindados y sumergibles a 220 V tipo resistencias de calefón y potencia de control hasta 120 kw. El microcomputador integrado en un solo chip contiene el software de desarrollo propio, que ha demostrado su confiabilidad en las más variadas situaciones de operación del equipo electromecánico. Operación con mínima deformación de onda, que determina poca generación de radiofrecuencia, por el uso de conmutadores de estado sólido con disparo de cruce por cero TRIACs o relés de estado sólido. El equipo tiene la posibilidad de modificación para aprovechamiento mixto de energía mecánica y eléctrica y km para la disipación de la energía excedente.



**Figura 18.** Esquema general de una MCH con el regulador electrónico de velocidad. Fuente: Prog. Hidroenergía. IHH- UMSA



**Fig. 19.** Equipo completo de generación con regulador de velocidad electrónico. Proy. Sud Lípez, Potosí. Fuente: Prog. Hidroenergía. IHH- UMSA



**Fig. 20.** Tanque disipador de energía con resistencias blindadas tipo calefón. Fuente: Prog. Hidroenergía. IHH- UMSA



**Figuras 21, 22 y 23.** Equipos de generación proyectos Munaypata, Provincia Inquisivi, Quinuni y Palmeras, Provincia. Sud Yungas. La Paz. Fuente: Prog. Hidroenergía. IHH- UMSA

### **Proyectos ejecutados**

Hasta el año 2011, el Programa Hidroenergético ha intervenido en la ejecución a diferentes niveles, de más de 50 Proyectos hidroenergéticos en Bolivia. La gran mayoría de éstos construyeron bajo la modalidad de “autoconstrucción”.

### **Aplicaciones productivas**

Debido a que gran parte de la población campesina generalmente no permanece en sus domicilios durante el día debido a que trabajan en sus parcelas de cultivo, el consumo de energía diurno es reducido, limitándose a algunas horas por la noche. En consecuencia, los factores de planta de las microcentrales en el área rural son bastante reducidos, es decir, la potencia consumida, en relación a la instalada es reducida.

En los últimos años, la mayor parte de las microcentrales hidroeléctricas instaladas en el país, cuentan con reguladores electrónicos de velocidad que disipan la energía no consumida en un circuito secundario que generalmente es un tanque de resistencias eléctricas bajo agua o un calentador de aire.

Normalmente las plantas trabajan generando una potencia relativamente fija. En consecuencia, toda la energía que no consume la población se desperdicia disipándose en calentamiento de agua o aire que raras veces se aprovecha debido a su intermitencia. Con el fin de incrementar el consumo, fundamentalmente durante el día, incrementar los factores de planta de las





microcentrales y coadyuvar en la transformación de la producción local con el uso de la energía, el Programa Hidroenergético propuso asociar actividades productivas a los proyectos de consumo doméstico.

De esta forma se instalaron deshidratadoras de frutas, centros de molienda de granos, pre beneficiadoras de café, peladoras de arroz, carpinterías, centros de computación y otras actividades que permitieron dar valor agregado a la producción local y/o apoyar la educación y salud, como se muestra en las fotografías 24,25 y 26.



**Figuras 24, 25 y 26.** Horno de secado de locoto (izquierda), molino de café y cereales (centro) del proyecto Camata y tostadora eléctrica de café (derecha) del proyecto Charia. Fuente: Prog. Hidroenergía. IHH- UMSA



**Figuras 27 y 28.** Peladora eléctrica de arroz y taller de tallados en madera (izquierda y centro), Proyecto Poroma.



**Figura 29.** Tanques eléctricos de lavado y teñido de lana, proyecto Agua Blanca. Fuente: Prog. Hidroenergía. IHH- UMSA



**Figuras 30, 31 y 32.** Molino de cereales, Proyecto San José (izquierda), molino y despulpadora de café (centro y derecha), proyecto Nogalani. Fuente: Prog. Hidroenergía. IHH- UMSA



**Figuras 33, 34 y 35.** Molino para minería tipo Trapiche impulsado con energía hidráulica (izq). Productos alimenticios procesados, café y locoto molido. Proyecto Camata (centro). Deshidratado de frutas. Proyecto Charía (der.).

## 5. RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados obtenidos se pueden valorar a través del impacto de los proyectos ejecutados y se basan en el proyecto de grado: “Estudio sobre el impacto social, económico y ambiental de microcentrales hidroeléctricas implantadas en comunidades aisladas de Bolivia” (2) desarrollado por Andrés Hueso Gonzales de la Universidad Politécnica de Valencia, España, el año 2007, bajo convenio con el Instituto de Hidráulica e Hidrología, UMSA. Este trabajo constituye una evaluación externa de varios proyectos ejecutados por el Programa, cuyos resultados han sido extendidos al total de proyectos ejecutados.

### **Impacto económico**

- Reducción del 54% como promedio de los gastos mensuales familiares en energéticos originada por la sustitución de energéticos tradicionales (velas, querosén, GLP y pilas) por energía eléctrica generada por las plantas.
- Creación de un puesto de trabajo en la mayoría de los casos y dos puestos en algunos, como operador de la planta.
- El gasto medio ponderado en electricidad por familia y por mes era de 30 Bs. en 2007, 4,3 \$us al cambio actual (de acuerdo a sondeos recientes esta tarifa se mantiene en la actualidad),. Esta tarifa es inferior en todos los casos a la tarifa media del Sistema Interconectado Nacional en el área rural.
- Como promedio se calcula que la reducción de dinero que sale de las comunidades por conceptos energéticos se ha reducido en 70%. En comunidades pobres esto representa una contribución directa a la reducción de la pobreza a nivel de ahorro familiar.





### ***Impacto social***

La implementación de los proyectos ha provocado un impacto importante en el ámbito social, se han beneficiado aproximadamente 4.100 familias, que en promedio cinco componentes por familia hacen un aproximado de 20.500 personas.

- En la educación, los estudiantes se benefician aumentando su tiempo de estudio en el hogar, disponiendo de mejores centros educativos mejor iluminados y nuevos equipos como televisores y computadoras. Los maestros también mejoran sus condiciones de vida en sus viviendas y sus posibilidades de docencia contando con material audiovisual.
- En la salud se han evidenciado mejoras en el ámbito doméstico como la reducción de afecciones oculares y respiratorias causadas anteriormente por mecheros a querosén y, en alguna medida, la reducción de accidentes causados por la combustión de velas, querosén y GLP.
- Los impactos a nivel doméstico se sintetizan en: aumento de higiene en el hogar principalmente al cocinar. Mayor disponibilidad de tiempo para socializar, en promedio las familias se acuestan una hora y media más tarde. El uso de refrigeradores y licuadoras amplía la gama y calidad de alimentos disponibles mejorando la alimentación familiar. La televisión ofrece entretenimiento e información aumentando así el conocimiento de los comunarios y muchas veces se convierte en la única ventana disponible hacia el mundo, aunque tiene también su aspecto negativo tendiendo a reducir el rendimiento académico de los alumnos, fomentando la adopción de valores ajenos a la comunidad (consumismo, individualismo) y afectando a la comunicación intrafamiliar.
- Los proyectos han permitido también un aumento de la soberanía energética por los siguientes aspectos: los beneficiarios gestionan y operan su propio suministro energético (generan su propia energía), esto reduce el tiempo de dedicación a la obtención de combustibles (velas, querosén, GLP) que existía antes de la ejecución de los proyectos y los aísla de problemas de escasez de estos y de los incrementos de precios que son frecuentes en el país. La construcción y autogestión de las plantas incrementa los sentimientos de satisfacción y autoestima colectiva. La experiencia adquirida aumenta la capacidad de mejorar o ampliar los proyectos, realizar otros u otros mejoramientos comunales.

### ***Impacto ambiental***

Con relación a los impactos negativos de los proyectos se puede puntualizar:

- Los impactos por la deforestación, movimientos de tierras y los paisajísticos son prácticamente despreciables debido a la reducida dimensión de las obras realizadas.
- El impacto sobre los peces, originado por la construcción del azud es reducido, debido a que todos los proyectos se han construido en zonas andinas, en ríos de pendientes elevadas donde prácticamente no existen peces migratorios.
- En general, el impacto ambiental negativo es mínimo comparado con el de distintas alternativas de suministro a las comunidades como los generadores a combustibles fósiles y las líneas del sistema interconectado de considerable longitud.





Los impactos positivos de los proyectos se pueden sintetizar:

- Reducción del consumo mensual familiar de pilas secas o alcalinas para radio y linterna en 12,5 unidades, esto representa en promedio una reducción del 73% del consumo existente antes del proyecto. Si consideramos que hasta la fecha, con los proyectos ejecutados por el Programa se han beneficiado aproximadamente 4.100 familias, en consecuencia se han dejado de consumir 51.250 pilas por mes.
- Se estima que una sola pila seca puede contaminar hasta 3.000 litros de agua y una alcalina hasta 167.000 litros de agua. Suponiendo que solo la mitad de las pilas que se desechan acaben contaminando el agua, ya sea directamente en el río o debido a las lluvias, gracias a los proyectos, se ha reducido la contaminación mensual del agua entre 76.875 metros cúbicos debido a las pilas secas y 4.279.375 metros cúbicos debido a las alcalinas.
- De acuerdo al consumo de velas, querosen y GLP, se puede estimar que cada mes, como promedio se evita la emisión de 22,51 kg de CO<sub>2</sub> equivalente por familia. Considerando las aproximadamente 4.100 familias favorecidas con los proyectos, se calcula que gracias a estos, se ha evitado la emisión de 92.291 kg de CO<sub>2</sub> equivalentes por mes y 1.107.492 kg de CO<sub>2</sub> equivalentes por año.

## **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

- Se han desarrollado turbinas hidráulicas tipo Pelton robustas y confiables con eficiencias aceptables considerando su tamaño.
- Las turbinas tipo Banki desarrolladas tienen la particularidad, con relación a las convencionales, de contar con una compuerta de regulación de caudal sencilla y de fácil fabricación.
- Al presente se han equipado más de 35 microcentrales hidroeléctricas construidas por el Programa Hidroenergetico y otras con controladores de carga de diseño y fabricación local, en varios departamentos del país demostrando la confiabilidad de estos aparatos
- Se puede afirmar que la tecnología desarrollada en cuanto a equipos de generación, es confiable dada la existencia de centrales en funcionamiento por más de 18 años.
- La metodología desarrollada para la construcción de microcentrales hidroeléctricas por “autoconstrucción” permite costos muchos más reducidos que las metodologías convencionales, en promedio, 1700 \$us/kW instalado.
- Las plantas construidas por el Programa en comunidades rurales son totalmente autosostenibles a través de las tarifas por consumo eléctrico, sobre la base de su administración autogestionaria.
- La generación local de energía en comunidades aisladas genera ingresos económicos a las familias por sustitución de los energéticos tradicionales (querosen, velas, pilas secas), de mayor costo que las tarifas que se pagan (en promedio 2 \$us/mes). Estas tarifas son más bajas que las que normalmente se cobran en el área rural por el servicio del sistema interconectado nacional.
- La generación de tecnología local en la fabricación de equipos de generación hidroeléctricos permite ahorro de divisas al país.
- Se recomienda, a nivel gubernamental, implementar políticas de promoción y financiamiento para energías alternativas, que permitan a entidades no gubernamentales como las Universidades y las Organizaciones de Base de las comunidades acceder a estos recursos.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) COZ FEDERICO, et al. (1995) “Manual de mini y microcentrales hidroeléctricas”, Editores Programa de Energía de ITDG\_Perú, Intermediate Technology Development Group.
- (2) HUESO GONZALES ANDRES, (2007) “Estudio sobre el impacto social, económico y ambiental de microcentrales hidroeléctricas implantadas en comunidades rurales aisladas de Bolivia”, Proyecto de Grado inédito, Carrera de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad Mayor de San Andrés, Universidad Politécnica de Valencia, La Paz, Bolivia.
- (3) LAUTERJUNG HELMUT (1990) “Taller subregional sobre micro centrales hidroeléctricas”, Montevideo, Uruguay, 12 al 16 de Noviembre de 1990.
- (4) MONTAÑO GONZALES EMILIANO (2011), “Investigación y desarrollo de reguladores de velocidad para turbina – generador, por control de carga electrónico”, Informe de proyecto inédito, Instituto de Hidráulica e Hidrología, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.
- (5) MONROY CUELLAR JOSE LUIS, MONTAÑO GONZALES EMILIANO (2005) “Microcentral hidroeléctrica para el procesamiento de fibras naturales Agua Blanca”, Informe Final inédito, Instituto de Hidráulica e Hidrología, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.
- (6) MONROY CUELLAR JOSE LUIS, MONTAÑO GONZALES EMILIANO (2003) “Microcentral hidroeléctrica, planta procesadora de locoto y café Camata”, Informe Final inédito, Instituto de Hidráulica e Hidrología, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.
- (7) MONROY CUELLAR JOSE LUIS, MONTAÑO GONZALES EMILIANO (2004), “Microcentral hidroeléctrica, planta procesadora de plátano y café Charía”, Informe Final inédito, Instituto de Hidráulica e Hidrología, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.
- (8) MONROY CUELLAR JOSE LUIS, MONTAÑO GONZALES EMILIANO (2001), “Microcentral hidroeléctrica Flor de Mayo”, Informe Final inédito, Instituto de Hidráulica e Hidrología, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.
- (9) SCHOKLITSCH ARMIN (1961), “Tratado de Arquitectura Hidráulica”, Tomo II, 2a.ed., Tomo II. Editorial Gustavo Gili, Barcelona.
- (10) SWISS CENTER FOR APPROPRIATE TECHNOLOGY (1980) “Crossflow Turbine”, CH – 9000 St. Gallen, Switzerland.
- (11) WATER POWER & DAM CONSTRUCTION (1991) “Riva Hydroart” Quadrant House, Sutton, Surrey, SM2 5AS, UK, July 1991, Vol.43, N°8, pp.14
- (12) MONROY CUELLAR JOSE LUIS, MONTAÑO GONZALES EMILIANO (2010), “Microcentral hidroeléctrica Quinuni”. Informe Final inédito, Instituto de Hidráulica e Hidrología, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.



## ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR EN EL ALTIPLANO CENTRAL DE BOLIVIA POR EL MODELO DE HARSGREAVES – SAMANI

R. Torrez - [reneto\\_lp@yahoo.com](mailto:reneto_lp@yahoo.com), A. Burgoa - [anwibuma@yahoo.com](mailto:anwibuma@yahoo.com)

E. Ricaldi- [edgarricaldi@gmail.com](mailto:edgarricaldi@gmail.com)

Instituto de Investigaciones Físicas, Carrera de Física  
Universidad Mayor de San Andrés

**Resumen.** Con datos obtenidos de una reciente estación meteorológica automática instalada en la sub-sede universitaria de la Universidad de San Andrés en la localidad de Patacamaya ( $17^{\circ}, 15'S$ ,  $67^{\circ}, 59'W$  y 3890 msnm) durante el periodo agosto 2010 hasta julio 2012, se han ajustado los datos anteriormente obtenidos al modelo de estimación de radiación solar de Harsgreaves-Samani con el objeto de validarlo para extender la aplicación de este método a la evaluación de la radiación solar en diversas localidades del altiplano boliviano. La accesibilidad y facilidad para obtener datos de las temperaturas máximas y mínimas requeridas por este modelo, mas las expresiones conocidas para la evaluación de la radiación solar extraterrestre en el sitio de interés hacen factible este propósito.

**Palabras clave:** radiación solar, Harsgreaves-Samani, Altiplano Boliviano.

### 1. INTRODUCCIÓN

Ante los elevados costos de registro que significaba la evaluación de la radiación solar incidente en determinado lugar y dada la urgencia de lograr la factibilidad del uso de otras fuentes de energía alternativa a los combustibles fósiles, en la década de los años setenta (tras los episodios de crisis petrolera), diversos investigadores en ciencia y tecnología ensayaron la aplicación de métodos alternativos de evaluación de la radiación solar con instrumentos y métodos económicos y sencillos.

Para ello se profundizó en el conocimiento de la dinámica de la radiación solar, de manera que con la obtención de tablas y ábacos de cálculo de la radiación solar teórica, más el conocimiento de las características de los otros parámetros meteorológicos y atmosféricos relacionados, se logró desarrollar modelos de estimación de la radiación solar.

Uno de los primeros modelos fue desarrollado por Angstrong y Prescott (año?), basado en datos de horas de sol diarias, denominado también heliofanía. Aunque los equipos de registro de horas de sol son menos costosos que los piranómetros, son igualmente onerosos para la generalidad de localidades del altiplano boliviano por su alto grado de depresión económica. Sin embargo de ello, este método también denominado ecuación AP ha sido aplicado exitosamente en el Perú, Senamhi (2003), contribuyendo a elaborar su mapa solar integral.

Para las condiciones del altiplano y la disponibilidad de datos de libre acceso en la WEB o en boletines periódicos de la principal institución meteorológica de Bolivia país como es el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), el modelo mas apropiado resulta el planteado por Harsgreaves y Samani (año?), conocido también como correlación HS.

Este modelo hace uso de las temperaturas máxima y mínima diarias, o promedios mensuales de estas variables, más valores teóricos de la radiación incidente que son inmediatamente





calculables. La oficina del SENAMHI publica en su sitio de Internet los valores de las temperaturas máximas y mínimas diarias para varias localidades altiplánicas a pocos meses de su registro. De hecho para la aplicación del modelo a algunas regiones altiplánicas de nuestro país se han empleado estos valores para las estimaciones presentadas.

El modelo HS establece que la radiación incidente como energía diaria es proporcional a la raíz cuadrada de la amplitud térmica modulada por la variación anual de la radiación incidente estratosférica sobre el sitio en evaluación, es decir:

$$H = aH_o\sqrt{(T_{max} - T_{min})} \quad (1)$$

Donde:

$H_o$ , es la radiación extraterrestre sobre el sitio de interés.

$T_{max}$ , es la temperatura máxima promedio mensual.

$T_{min}$ , es la temperatura mínima promedio mensual

$a$ , es una constante de ajuste.

La radiación extraterrestre  $H_o$  puede ser obtenida por ejemplo con las expresiones: (Iqbal M. 1983)

$$\Gamma = 2\pi\left(\frac{N-1}{365}\right) \quad (2)$$

$$H_o = \left(\frac{24}{\pi}\right) I_{sc} E_o \left( \cos \lambda \cos \delta \sin \omega + \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega \sin \lambda \sin \delta \right) \quad (3)$$

$$E_o = 1.00011 + 0.034221 \cos \Gamma + 0.00128 \sin \Gamma + 0.000719 \cos 2\Gamma + 0.000077 \sin 2\Gamma \quad (4)$$

$$\delta = \left(\frac{180}{\pi}\right) \left( \frac{0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma - 0.006758 \cos 2\Gamma + 0.000907 \sin 2\Gamma - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma}{0.000907 \sin 2\Gamma - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma} \right) \quad (5)$$

$$\omega = \cos^{-1}(-\tan \lambda \tan \delta) \quad (6)$$

Donde  $I_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$ , es la constante solar.

$E_o$ , la corrección por excentricidad de la órbita.

$\delta$ , es la declinación solar que depende del día del año

$\Gamma$ , es el día de año expresado en radianes sobre un año normal.

$N$  es el día del año.



**Figura 1.** Estación Meteorológica de Patacamaya. En primer plano los sensores de evaporación y precipitación, y al fondo la torre con los sensores principales, la caja de control y la caseta de monitoreo.

## 2. LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA

El equipo seleccionado corresponde al tipo de una estación meteorológica profesional de procedencia alemana, con el sistema de adquisición de datos COMBILOG 1020, y dotada de sensores Fischer Barometric de humedad, temperatura, presión, velocidad y dirección de viento; a ello se añadieron sensores de radiación solar global Kipp & Zonen, y un pluviómetro Davis. Completan la instrumentación un sensor de evaporación NovaLynk 255-100, y un sensor de temperatura del suelo CS109 de Campbell Scientific, entre los más importantes. La estación meteorológica está instalada a 10 metros de altura, nivel en el que están instalados un primer conjunto de sensores constituido por un termohigrómetro digital para tener las mediciones de temperatura en grados centígrados y la humedad relativa porcentual. Sobre ambos brazos de una barra de soporte orientado en dirección E-O están instalados los medidores de velocidad y de dirección de viento. Al frente, en dirección norte, se encuentra instalado el medidor de radiación solar.

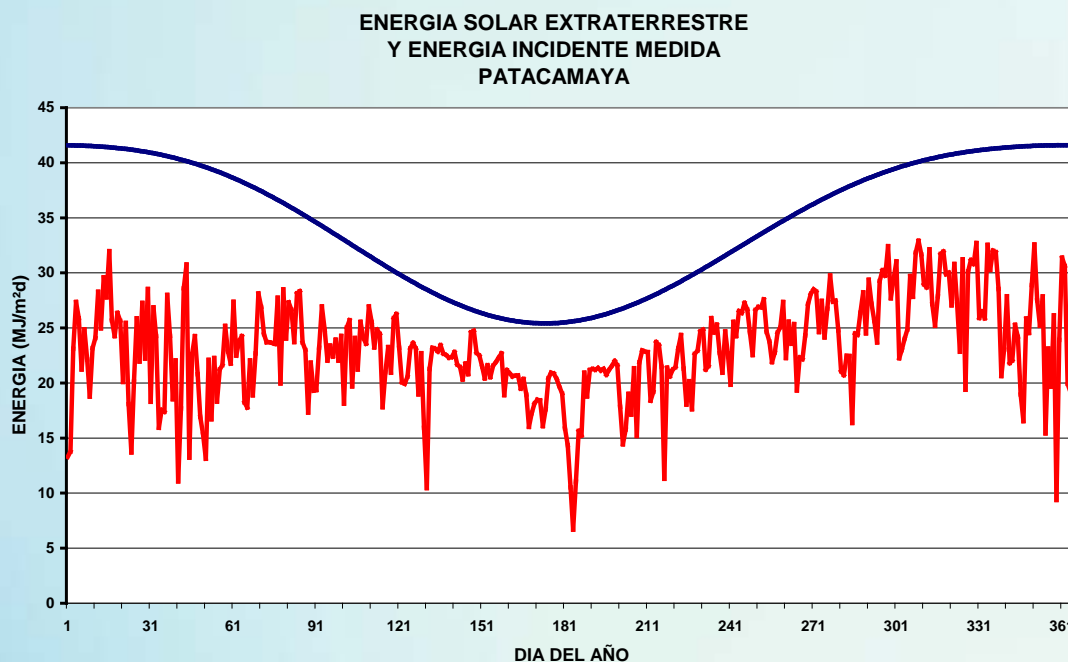
Por encima de este arreglo de sensores en cruz, se halla dispuesto un sistema pararrayos. Inmediatamente mas abajo se encuentra el panel solar para la alimentación de todo los sistemas de la estación; algunos metros abajo se encuentra el segundo conjunto de sensores constituidos por medidores de temperatura y humedad, velocidad de viento y dirección. A dos metros del suelo aproximadamente se tiene fijado el control central de la estación, y finalmente casi a nivel del suelo se tienen instalados los sensores de presión atmosférica, precipitación y evaporación. Al nivel del suelo y adecuadamente protegidos se halla otro conjunto de sensores independientes; de precipitación pluvial, de velocidad del viento y dirección, y un termohigrómetro con mando y control a distancia (Figura 1).



### 3. REGISTRO DE DATOS

Los datos analizados comprenden desde la fecha de instalación (septiembre 2010) hasta julio del presente año (julio 2012) que, por razones administrativas no es una serie continua en varios parámetros meteorológicos, fueron adquiridos a una tasa de registro de 1 por cada cinco minutos, y fueron presentados en informes, reportes, y boletines, como también referidos en artículos y trabajos técnicos (DIPGIS-UMSA, 2011).

De la base de datos obtenida se han seleccionado los registros de temperatura y radiación solar, con el objeto específico de emplearlos en el modelo de Harsgreaves Samani. Esta base de datos consta de 168768 registros, equivalentes a 586 días. De este conjunto se ha eliminado una cantidad de datos introducido probablemente en los procesos de descarga de datos y reinicialización de su sistema, quedando 580 registros diarios, sin embargo discontinuos. Para lograr una serie temporal continua se han realizado promedios de los datos existentes en los tres años de registro para los mismos días. Finalmente con el objeto de minimizar las variaciones introducidas por eventos extremos principalmente en la temporada húmeda, se procedió a obtener un registro final por medias móviles de 5 días.



**Figura 2.** El registro muestra la radiación extraterrestre incidente en el año 2011, comparada con la radiación registrada en el mismo año. Se puede observar una gran aproximación de las curvas durante el invierno, así como también los menores valores promedio en este periodo.

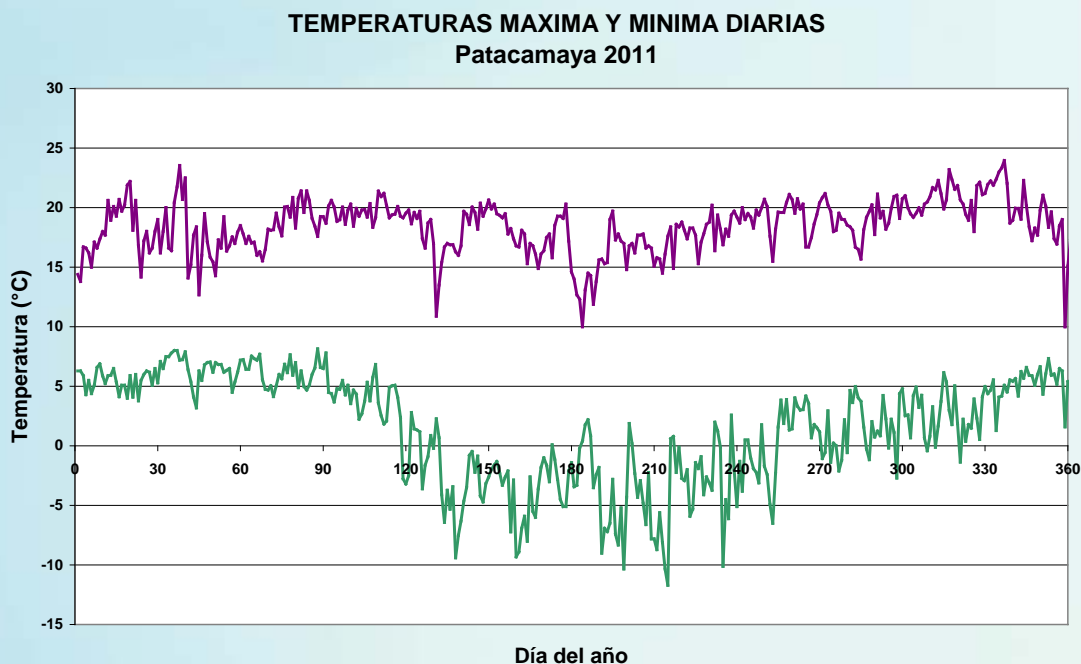
En cuanto a los registros de temperatura en el mismo periodo, la Figura 3 muestra el comportamiento anual en promedios diarios. Se puede observar en este gráfico que las temperaturas mínimas extremas se alcanzan alrededor del medio año; en la gestión analizada estos valores se sitúan alrededor de  $-10^{\circ}\text{C}$ , y los máximos extremos en el verano con valores entre  $20^{\circ}\text{C}$  y  $25^{\circ}\text{C}$ .





El gráfico permite apreciar también que la amplitud térmica diaria se incrementa durante el invierno, y se acorta durante el verano, como efectivamente establecen las condiciones teóricas por el efecto de la nubosidad.

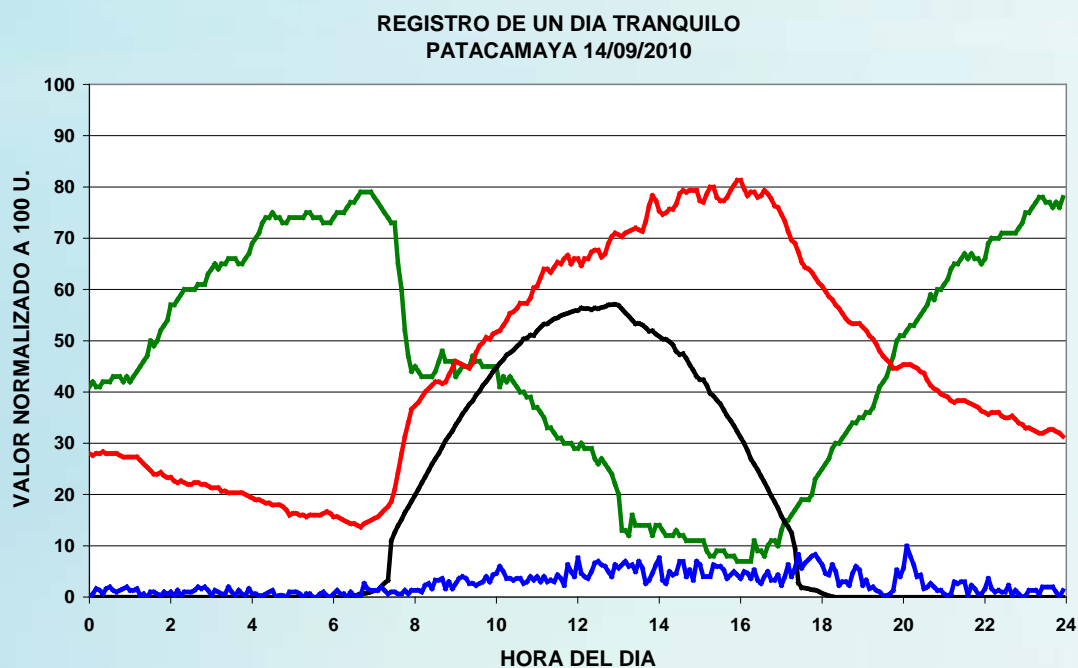
Los registros meteorológicos de Patacamaya pueden clasificarse en general en dos tipos de acuerdo a la evolución de la curva de radiación solar diaria. Unos en los cuales se puede apreciar como la curva de la radiación solar captada diaria sigue a la típica forma de la radiación solar ideal –de día despejado–, dado que la topografía de la localidad de Patacamaya por la característica plana y libre de obstáculos así lo permite, y otros, en los cuales la curva de la radiación diaria se ve deformada por la interferencia de nubes. En función de estas formas típicas la evolución de la temperatura y los otros parámetros meteorológicos durante el día sigue una forma regular, o se ve notablemente afectada, y al parecer sin ninguna relación entre una y otra variable.



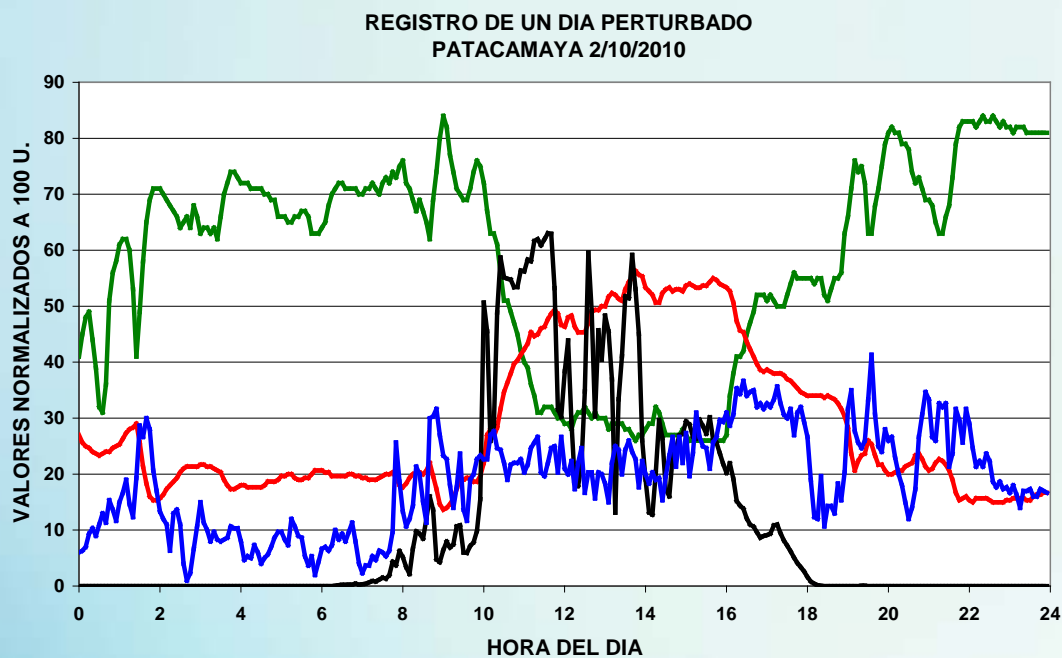
**Figura 3.** Variación de las temperaturas máxima y mínima diarias durante el periodo de observación. Se puede observar una mayor amplitud térmica durante el invierno que durante el verano.

De acuerdo con lo establecido anteriormente, las temporadas donde se hacen patentes estos registros de manera nítida son durante el invierno y durante el verano, con comportamientos intermedios en las otras estaciones. Así por ejemplo, si el registro de la radiación solar muestra la típica curva de día claro de manera completa, si la temperatura luego de alcanzar su mínimo al amanecer de un día se incrementa desde el alba hasta alcanzar su valor máximo cerca del ocaso para luego disminuir paulatinamente hasta el próximo día, y si al mismo tiempo la humedad disminuye suavemente durante el día y aumenta recíprocamente durante la noche, al mismo tiempo que el viento sople suavemente durante el día, denominamos este como un “día tranquilo”.

Por el contrario, si el registro de la radiación solar es irregular, la temperatura muy variable, así como la humedad, y el viento con fuertes variaciones durante el día y la noche, denominamos al día como “día perturbado” (Figuras 4 y 5). Está claro que con esta clasificación son pocos los días tranquilos, y muchos más los días perturbados con diferentes órdenes de perturbación.



**Figura 4.** Perfil de las variables meteorológicas en Patacamaya en un día muy tranquilo, se puede observar como la temperatura tiene un comportamiento inverso a la humedad relativa.

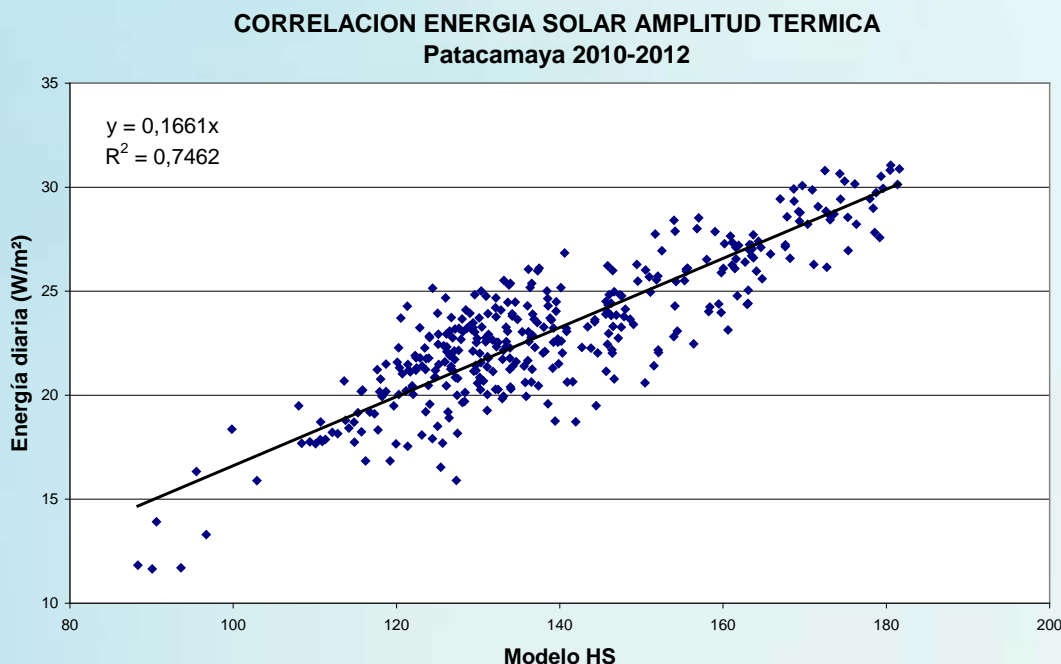


**Figura 5.** Las variables meteorológicas en un día perturbado se muestran muy afectadas aunque conservan su perfil principal en alguna medida.



#### 4. VALIDACIÓN DEL MODELO DE HARGREAVES SAMANI

Como se ha expresado en los párrafos precedentes, la correlación HS es función de la raíz cuadrada de la amplitud térmica diaria, modulada por el valor de la energía solar extraterrestre en el sitio en evaluación; la constante de proporcionalidad de esta relación se conoce como la transmisividad de la atmósfera. El gráfico de dispersión de la radiación medida contra la radiación estimada nos permite calcular esta constante y determinar el grado de correlación existente entre estas dos variables (Figura 6).



**Figura 7.** Correlación entre la energía solar diaria medida y la energía solar estimada por el método de Hargreaves Samani. El valor de la pendiente es la transmisividad de la atmósfera.

El coeficiente de correlación en este caso es de 0,86 significando una aceptabilidad moderada teniendo en cuenta que la serie temporal es reducida comparada con otros casos de validación por ejemplo en Baigorria G. A. (2004), en Dimas. F. A. et.al (2011), De la Casa (2003), Almorox J. (2009). Y el valor de la transmitancia obtenida esta en plena concordancia con los valores ampliamente aceptados de 0,16 para sitios en el interior de continente.

#### 5. CONSIDERACIÓN DE ERRORES

Para completar la validación del modelo se han evaluado adicionalmente los principales parámetros estadísticos de las series temporales medida y estimada, con el objeto de compararlos y analizarlos. Entre éstos tenemos la desviación media MBE; que es el valor medio de las diferencias entre los valores medido y estimado; la desviación absoluta media MABE, que representa el valor medio de todas las desviaciones sin considerar su signo y la desviación cuadrática media RMSE, que se interpreta como el valor efectivo de las desviaciones. El Cuadro 1 muestra el valor de estos indicadores estadísticos así como sus expresiones porcentuales.





Estadísticos	Valor en MJ/m <sup>2</sup> d	Valor %
Valor Medio Datos	23,1	
Valor Medio Modelo	23,082	
Coefficiente de correlación		86.4
Error Medio MBE	0,019	0,082
Error Medio Absoluto MABE	1,356	5,87
Error Cuadrático Medio RMSE	1,723	7,45

**Cuadro 1:** Valores Estadísticos

Analizando los errores se observa una ligera asimetría de la serie temporal hacia el lado de la serie medida, que en valor porcentual significa aproximadamente 1 unidad en 1000, que es prácticamente insignificante. Por otro lado la desviación absoluta media de 1.35 MJ/m<sup>2</sup>d es relativamente considerable, sin embargo vista en valor porcentual de aproximadamente 6 en 100 se considera aceptable, lo mismo que el error cuadrático medio de 7.5 unidades en 100, tomando en cuenta que la serie temporal es reducida.

Esto significa que para realizar una estimación mas aproximada a los valores reales en determinado lugar será preciso contar con una serie temporal más extensa, que de manera proporcional será mas precisa en la misma medida.

## 6. CONCLUSIONES

Este artículo fue elaborado con la finalidad de posibilitar una alternativa factible para la evaluación de la energía solar en cualquier punto de la geografía altiplánica boliviana de manera inmediata, real, y confiable.

Para este propósito se determinó de manera previa que las entradas de este modelo fueran únicamente temperaturas, entre ellas; máximas y mínimas en vista de la facilidad de obtenerlas en los servicios meteorológicos locales o en otras instituciones técnicas y/o científicas del medio, que efectivamente se evidencian.

Por la simplicidad de la fórmula se eligió el método de Harsgreaves-Samani sobre otros modelos, por ejemplo el de Bristow-Campbell que difiere en las comparaciones de error en centésimas porcentuales, con ventajas evidentes de inmediatez, validación, y facilidad de evaluación. Por todas estas consideraciones se concluye que: a) la aplicación es perfectamente posible, b) los errores son mínimos y fácilmente superables, y: c) la transmitancia atmosférica evaluada es ligeramente superior a la recomendada por los autores del método: es decir; 0.1661

## 7. AGRADECIMIENTOS

A menudo siempre se olvida al personal que realiza el mantenimiento de las estaciones meteorológicas, y al personal administrativo que hace posible que los proyectos culminen. En esta oportunidad hacemos patente nuestro reconocimiento a los Sres. V. Mamani, H. Monasterios, y M. Zuazo, por el apoyo brindado para que nuestros proyectos de investigación alcancen sus metas en los tiempos establecidos. Gracias por su colaboración.



## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Almorox J., Estimating Global Solar Radiation From Common Meteorological Data in Aranjuez, Spain, Turk J. Physics, 2011.
- (2) Baigorria G.A., Atmospheric Transmissivity: Distribution and Empirical Estimation around the Central Andes. International Journal Climatology, 2004.
- (3) De la Casa A., Estimación de la Radiación Solar Global en la Provincia de Cordova-Argentina, y su empleo en un Modelo de Rendimiento Potencial de la Papa. RIA. 2003.
- (4) Dimas F.A, et al., Hourly Solar Radiation Estimation from Limited Meteorological Data to Complete Missing Solar Radiation Data, IPCBEE, 2011.
- (5) Gallegos, et.al, Alternativas para la Evaluación del Recurso Solar en Argentina, 2005.
- (6) Senamhi, Perú, Atlas de energía solar del Perú. DGER. Ministerio de Energía y Minas. 2003.
- (7) Torrez R., Radiación Solar y Temperatura Superficial en una Atmosfera Plana y Uniforme. IIF-UMSA, 2007.
- (8) Iqbal M. Introduction to Solar Radiation. Pergamon Press, 1983.



## ESTUDIO DE CAMBIO CLIMÁTICO EN RECURSOS HIDRICOS Y DETERMINACIÓN DE SITIOS CON POTENCIAL HIDROENERGÉTICO, MEDIANTE EL EMPLEO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, DATOS DE SENSORIAMIENTO REMOTO Y FUENTES DE ACCESO GLOBAL

**Fernando Arturo Ledezma Perizza** – [fernandoledezma.p@gmail.com](mailto:fernandoledezma.p@gmail.com)  
Centro de Aguas Saneamiento Ambiental, Universidad Mayor de San Simón

**Resumen.** Los modelos de evaluación hídrica generalmente empleados requieren de bastante información que se encuentra en estaciones meteorológicas puntuales que difícilmente representan las condiciones ambientales de la diversa geografía espacial. El objetivo de este trabajo es dar a conocer los resultados obtenidos de la modelación hidrológica a nivel nacional con escenarios proyectados al 2050, así como transponer las barreras de la escasa información con la que cuenta actualmente Bolivia en su red meteorológica y la mala distribución espacial, aplicándola al estudio de determinación del potencial hidroeléctrico regional, mediante el empleo de Sistemas de Información Geográfica, productos que son entregados por el sensoramiento remoto de los satélites y fuentes libres de acceso global que, pueden ser útiles para realizar una estimación en la determinación de sitios con potencial hidroeléctrico, así como asistir al tomador de decisiones en el proceso de planificación y adaptación al cambio climático.*rev*

**Palabras-clave:** potencial hidroenergético, cambio climático, sistemas de información, geográfica, datos de acceso global, sensores remotos

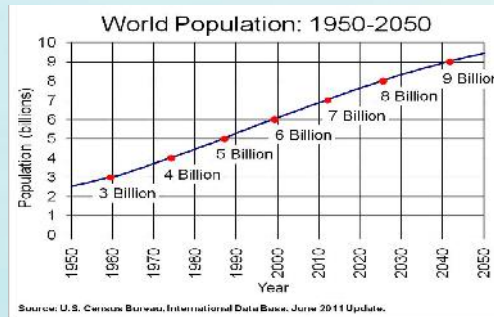
### 1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático se ha convertido en un tema de gran relevancia a nivel mundial, debido a la interconexión de partes afectadas y el desafío que plantea para su solución. Ningún país está libre, ni puede por sí solo afrontarlo ya que exige decisiones políticas por sus consecuencias mundiales de gran alcance. Para hacer frente a este desafío se requiere creatividad y cooperación entre todos. Se debe actuar en común acuerdo porque el cambio climático es una crisis de los bienes comunes; el clima de mañana dependerá de lo que hagamos hoy. Se debe actuar de manera diferente, pues no podemos prepararnos para el futuro tomando como base el clima pasado. Se debe realizar un enfoque de “cambio climático inteligente” ya que las necesidades climáticas del mañana nos obligarán a construir una infraestructura que pueda resistir a las nuevas condiciones y sustentar a un número mayor de personas y suministrar alimentos suficientes.

Para resolver el problema de cambio climático se requiere acción inmediata en todos los países y una adecuada planificación en los sistemas energéticos, esto es una significativa mejora en la eficiencia energética y un cambio decidido hacia las energías de producción limpia.

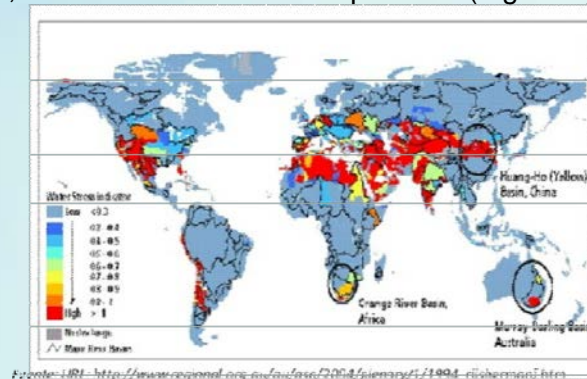
Se puede señalar que la demanda de agua ya excede la provisión en muchas partes de mundo y debido al crecimiento poblacional sus necesidades se van multiplicando. La Figura 1 muestra que para el 2050, se tendrá un incremento de aproximadamente un 50% en la población mundial.





**Figura 1.** Estimaciones de la población mundial para el 2050

A su vez, se estima que 4 billones de personas (la mitad de la población mundial) vivirán bajo condiciones severas de estrés de agua en el 2025 (Zonas de color rojizo Figura 2), y conflictos relacionados con el agua, en el mundo se van multiplicando (Figura 3).

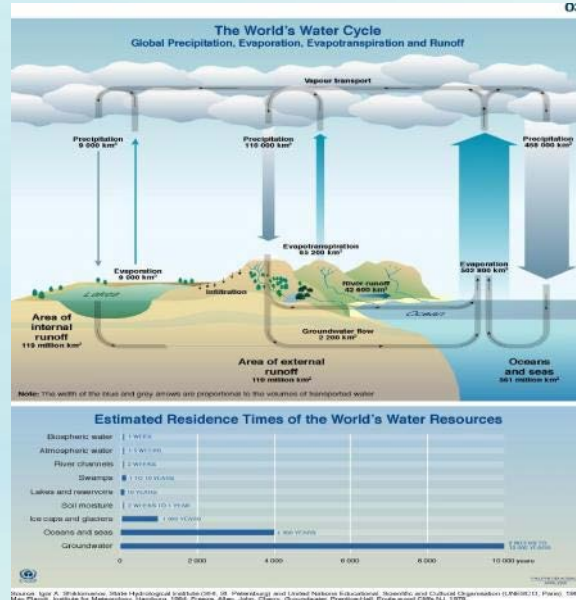


**Figura 2.** Mapa de estrés de agua



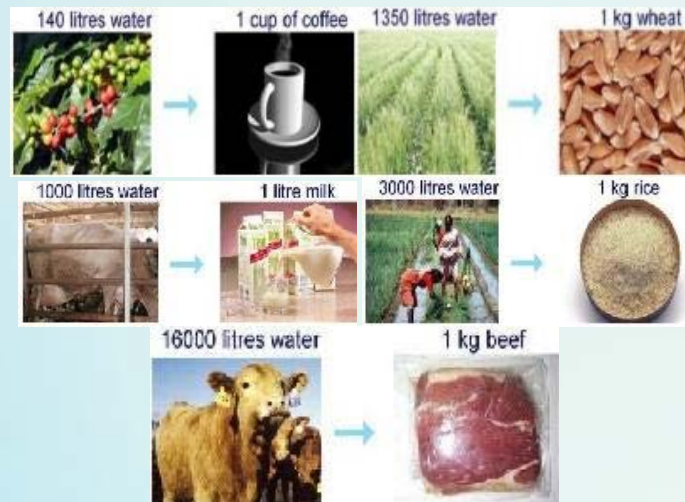
**Figura 3.** Mapa de conflictos de agua

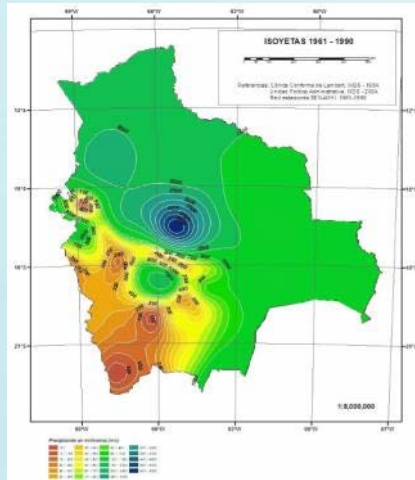
El ciclo anual mundial del agua (Figura 4), proporciona una estimación de las cantidades de agua global disponibles, así como el tiempo de retención en cada medio. Corresponde hacer notar que en todo ciclo existe un equilibrio natural, “nada se pierde, todo se transforma” y, consecuentemente, si existe una mayor evaporación debido al incremento de temperatura, variará la intensidad de las precipitaciones en las diferentes regiones.



**Figura 4. Ciclo anual mundial del agua**

Es conocido que en un futuro próximo el agua tendrá un tratamiento contable como lo establece el concepto de *Water footprint*, el problema radica en que la cantidad de agua está mal distribuida, como se puede observar en el mapa de Isoyetas (Figura 5). Este despliega en la parte central promedios de precipitación bastante altos y el sud-oeste valores casi nulos.





**Figura 5.** Mapa de Isoyetas- Mala Distribución Espacial  
Fuente: SENAMHI Bolivia

Es conocido que el 89% de la energía renovable es producida por centrales hidroeléctricas y el 16.6% de la energía total generada en el mundo. Dos tercios del potencial económico permanecen inexplorados; en este recurso está concentrado en el desarrollo del mundo.

### **Agua y energía en Bolivia**

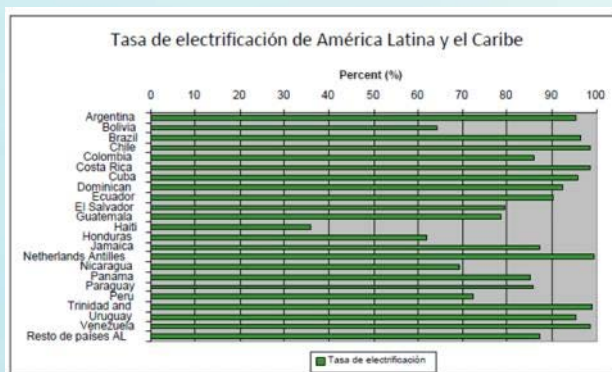
Bolivia se encuentra entre los países con mayor oferta de agua dulce por habitante en América Latina (aproximadamente 50.000 m<sup>3</sup>/habitante/año) sin embargo, es conocido también que las precipitaciones en la parte central y drenaje topográfico generan inundaciones en el nor-este del país (Figura 6).



**Figura 6.** Mapa de Inundaciones. Composición años 2006, 2007 y 2008.

Con referencia a la tasa de electrificación, en Bolivia es de aproximadamente el 64% (Figura 7), una de las más bajas de Latinoamérica, debido a que la red del Sistema Interconectado Nacional abastece a los principales centros poblados, concentrados en la región central del país, resultando difícil la cobertura hacia las áreas fronterizas (Figura 8).





**Figura 7.** Tasa de electrificación de Bolivia  
Fuente: U.S. Energy Information Administration



**Figura 8.** Sistema Interconectado Nacional (SIN) de electrificación

La Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) ha estimado que Bolivia emplea menos del 1% de su potencial hidroeléctrico como se presenta en la Figura N 9 y la Empresa Nacional de Electricidad (ENDE) por su parte, ha clasificado e inventariado 81 fuentes potenciales de aprovechamiento hidroeléctrico que permitirían alcanzar capacidad instalada de 11.000 megavatios.

AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE: NIVEL DE EXPLOTACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS CON FINES HIDROENERGÉTICOS, 2003 (Miles de kilovatios)			
Pais	Potencial hidroeléctrico económicamente aprovechable	Potencia hidroeléctrica instalada	Porcentaje del potencial hidroeléctrico que está siendo utilizado
Argentina	44 500	9 783	22
Bolivia	190 000	479	< 1

Fuente: OLADE (2004).

**Figura 9.** Tasa de electrificación de Bolivia (Mala Distribución Espacial)

La potencia instalada en centrales Hidroeléctricas en Bolivia se ha incrementado en un 60% en los últimos 12 años y constituye actualmente más de 1/3 de la generación total nacional, por lo cual cualquier disminución o modificación tiene grandes repercusiones a nivel del sector eléctrico nacional (Superintendencia de Electricidad, 2008).

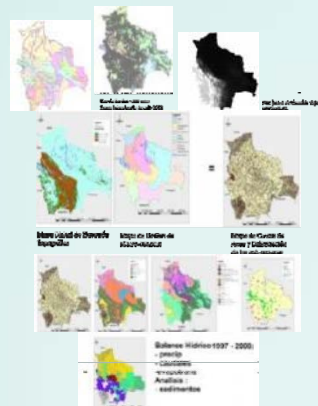


## Cambio climático en Bolivia

Entre enero 2009 y mayo 2010 el Banco Mundial (BM) realizó un esfuerzo preliminar de modelar las cuencas principales a nivel nacional con información disponible a través de una Asistencia Técnica No Reembolsable (ATNR) buscando el Fortalecimiento de Capacidades para la Adaptación a la Variabilidad y al Cambio Climático en el Ámbito de los Recursos Hídricos.

La modelación tuvo como objetivo simular la precipitación, escorrentía superficial, evapotranspiración, sedimentos y caudales generando escenarios de cambio climático a la década centrada en el año 2050 para 11 cuencas a nivel nacional.

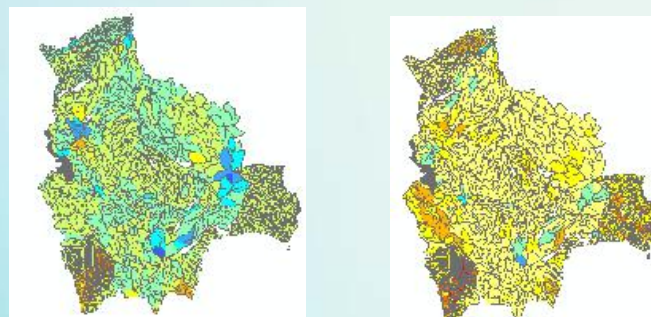
La Figura 10 muestra la corrida secuencial de modelo en SWAT cual emplea como base un Sistema de Información Geográfica (GIS) que permite integrar información proveniente de Climatología, Meteorología, Geomorfología, Suelos, Uso de suelo y vegetación entre otros.



**Figura 10.** Secuencia de imágenes con la corrida secuencial del modelo SWAT

Fuente: Taller de Modelación de Cambio Climático Banco Mundial

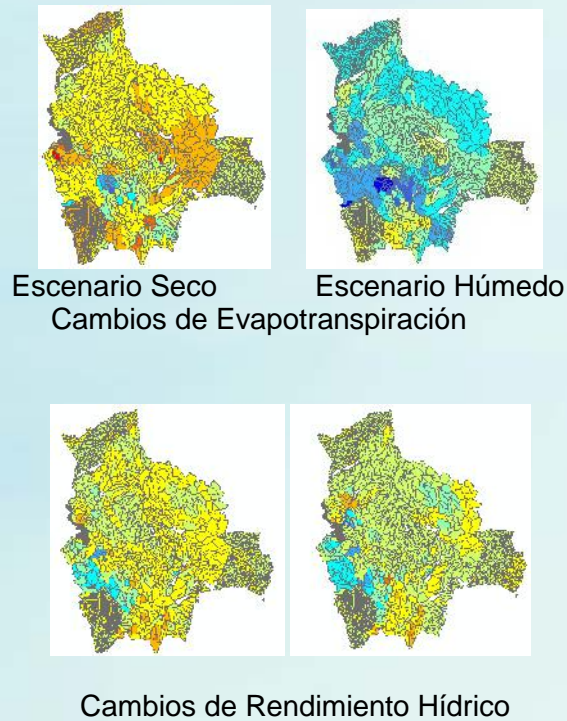
La Figura 11 muestra en cambios de tonalidad de color, los escenarios Húmedo y Seco proyectados de cambio climático para el 2050 correspondientes a precipitación, evapotranspiración y rendimiento hídrico.



Escenario Húmedo

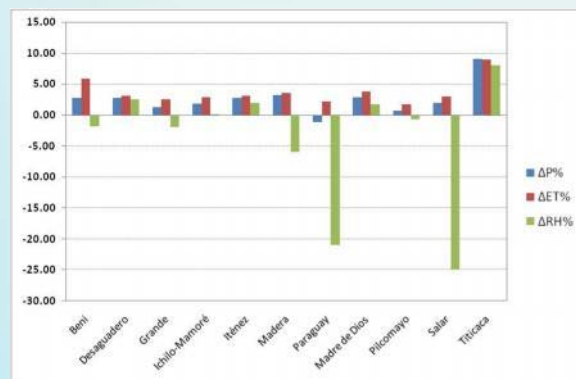
Escenario Seco

Cambios de Precipitación



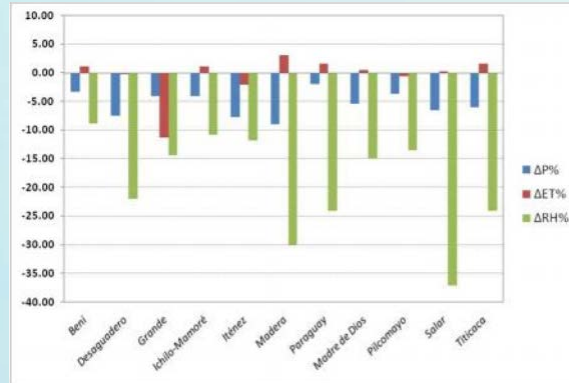
**Figura 11.** Cambios de Precipitación evapotranspiración y rendimiento hídrico bajo Cambio Climático al 2050  
Fuente: Presentación de Resultados Preliminares – Taller Banco Mundial Mayo 2010

En la Figura 12 cambios de rendimiento hídrico bajo Cambio Climático al 2050 se puede apreciar el balance hídrico para escenarios húmedo y seco para las macrocuencas modeladas, observando que casi para todas existirá un descenso de los recursos hídricos, incrementándose la evapotranspiración.



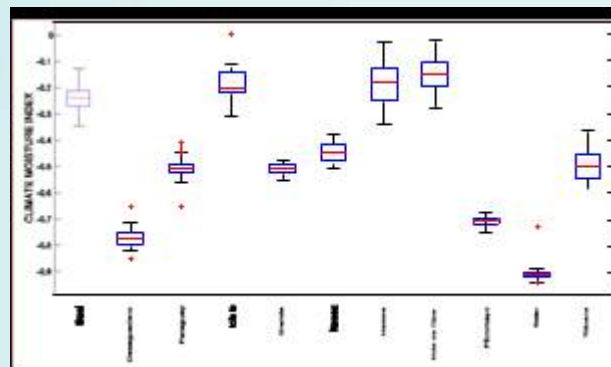
Cambio de rendimiento hídrico bajo cambio climático al 2050s - Escenario húmedo





*Cambio de rendimiento hídrico bajo cambio climático al 2050s-Escenario seco*  
*Fuente: Presentación Resultados Preliminares – Taller Banco Mundial Mayo 2010*  
**Figura 12. Impactos en el Balance Hídrico 2050s**

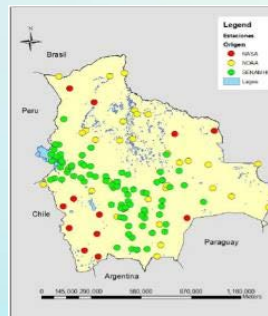
De los resultados obtenidos se pudo determinar que existe bastante incertidumbre asociada a la escasa cantidad y calidad espacial de datos en varias cuencas, como se presenta en la Figura 13 para cada cuenca modelada.



**Figura 13. Cuencas e incertidumbre asociada a la escasa cantidad y calidad espacial de datos**  
 Fuente: Taller de Modelación de Cambio Climático Banco Mundial.

Una de las debilidades detectadas en la modelación realizada es la escasa distribución espacial e información disponible de estaciones meteorológicas en Bolivia.

Se han identificado para Bolivia 93 estaciones meteorológicas que contienen datos de temperatura y precipitación (Figura 14), de las cuales solo 18 presentan datos entre los años 1996 a 2008.



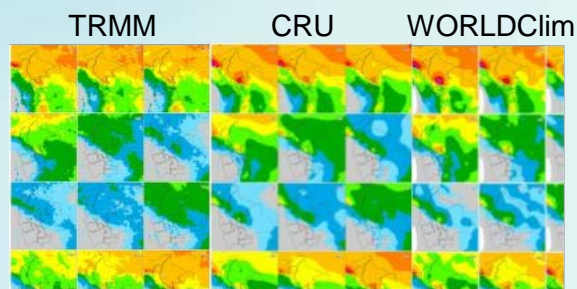
**Figura 14. Estaciones meteorológicas**



## ***Determinación del potencial hidroeléctrico mediante sensoramiento remoto***

El presente trabajo incorporó la información de nuevas fuentes como los datos colectados mediante sensoramiento remoto provista por los satélites y de acceso global. La metodología sugerida se refiere a los resultados empleados ya en otros países para la determinación de un balance Hídrico Superficial, como por ejemplo para la cuenca de Murray-Darling en Australia (Guerschman 2008) y existiendo a su vez numerosas publicaciones con referencia a esta temática (Wagner, Kunstmann et al. 2009) (Jasrotia, Majhi et al. 2009) (Bastiaanssen, Menenti et al. 1998) (Bastiaanssen, Pelgrum et al. 1998) y la metodología para la determinación de potencial hidroeléctrico concebida por Müller 2011.

Los datos empleados corresponden a tres fuentes Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), CRU y WORLDClm que se despliegan en la Figura 15.



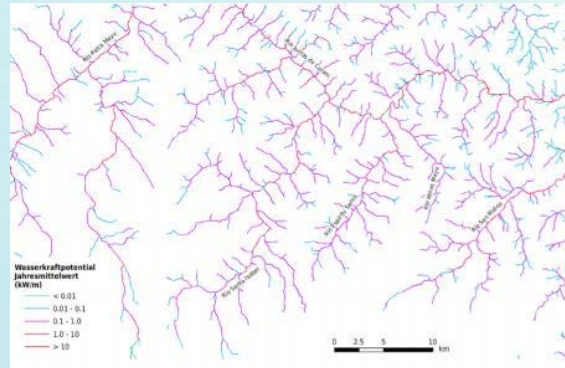
*Figura 15. Datos empleados*

## **2. RESULTADOS**

La corrida del modelo permitió determinar el caudal, así como el potencial hídrico anual en la parte central de Bolivia (Figura 16), obteniendo a su vez el potencial hidroeléctrico en sitios idóneos para la instalación de turbinas de 100, 1000 y 5000 kW (Figura 17).

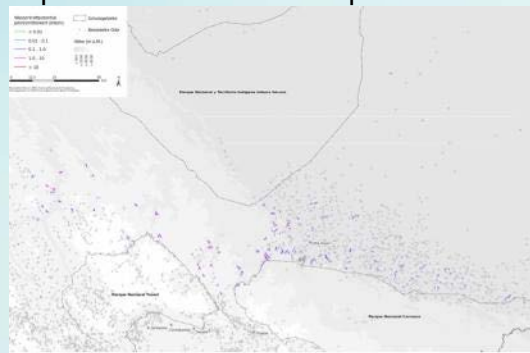


**Resultados – Potencial Hídrico Anual**



**Figura 16.** Resultados de caudal, potencial Hídrico anual y sitios con potencial eléctrico

Sitios con potencial hidroeléctrico para turbinas de 100 kW



Sitios con potencial hidroeléctrico para turbinas de 1000 kW



Sitios con potencial hidroeléctrico para turbinas de 5000 kW



**Figura 17.** Sitios con potencial hidroeléctrico para turbinas de 100, 1000 y 5000 kW





### 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La modelación hidrológica en combinación con los sistemas de información geográfica (GIS), datos de sensoramiento remoto y fuentes de acceso libre, pueden ser útiles para realizar una estimación en la determinación de sitios con potencial hidroeléctrico, así como para asistir al tomador de decisiones en el proceso de planificación y adaptación al cambio climático.

Es urgente vincular la temática de cambio climático con el potencial de energía hidroeléctrica para realizar la correcta toma de decisiones y de inversiones. Se debe integrar los esfuerzos de estudios en los diferentes grupos de investigación y difusión de sus resultados.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Bastiaanssen, W. G. M., M. Menenti, et al. (1998). "A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation." *Journal of Hydrology* 212-213:198-212.
- (2) Bastiaanssen, W. G. M., H. Pelgrum, et al. (1998). "A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 2: Validation." *Journal of Hydrology* 212-213: 213-229.
- (3) Espinosa (2006). Balance Hídrico Superficial Microregional de la Cuenca Alta del Río Pilcomayo. Licenciatura, Universidad Mayor de San Andrés.
- (4) Guerschman, e. a. (2008). Water balance estimates from satellite observations over the Murray-Darling Basin. CSIRO. Australia, Australian Government. 1: 83.
- (5) Jasrotia, A., A. Majhi, et al. (2009). "Water Balance Approach for Rainwater Harvesting using Remote Sensing and GIS Techniques, Jammu Himalaya, India." *Water Resources Management* 23(14): 3035-3055.
- (6) Molina (2006). Balance Hídrico Superficial de la cuenca del río Pilcomayo, Instituto de Hidráulica e Hidrología, UMSA. 1: 137.
- (7) PHI-UNESCO (2006). Evaluación de Recursos Hídricos - Elaboración del Balance Hídrico integrado por cuencas Hidrográficas. PHI- IV/Documento Técnico No 4. PHI-LAC. IMTA Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,
- (8) Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe. 1:98.
- (9) Muller (2011) GIS-gestutzte erarbeitung des Wasserkraft , IFU
- (9) Roche (1992). "Balance Hídrico Superficial de Bolivia." PHICAB: 28.
- (10) UNESCO-ROSTLAC (1982). "Guía metodológica para la elaboración del Balance Hídrico de América del Sur."
- (11) Wagner, S., H. Kunstmann, et al. (2009). "Water balance estimation of a poorly gauged catchment in West Africa using dynamically downscaled meteorological fields and remote sensing information." *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 34(4-5): 225-235.

### Referencias de Internet (Último Acceso Agosto 2012)

#### ASTER Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM):

URL: <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/>  
<http://www.wasim.ch/en/index.html>

#### CRU

URL: <http://www.cru.uea.ac.uk/>

#### Fundación Amigos de la Naturaleza (FAN)

URL: <http://www.fan-bo.org>

#### Global Runoff Database Centre (GDRC)

URL: <http://www.bafg.de/GRDC/EN/Home/home> page node.html



## **MODIS**

URL: <http://modis.gsfc.nasa.gov/>

<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswel> come

## **MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16)**

URL: <http://www.ntsug.umn.edu/project/mod16>

## **NCEP/NCAR Reanalysis**

URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis/reanalysis.shtml>

<http://www.emc.ncep.noaa.gov/>

<http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.html>

## **NOAA-AVHRR**

URL: <http://www.class.noaa.gov/nsaa/products/welcome>

## **SENAMHI**

URL: <http://www.senamhi.gob.bo/>

## **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)**

URL: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

## **TRMM**

URL: <http://trmm.gsfc.nasa.gov/>

## **Worldclim**

URL: <http://www.worldclim.org/>

## **Enciclopedia Geográfica de Bolivia**

URL: <http://www.bolivia.com/geografiadebolivia/cap13.htm>

## **World Resources Institute**

URL: <http://www.wri.org>

## **Water footprint network**

URL: <http://waterfootprintnetwork.org>

## **Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia**

URL: <http://essm.tamu.edu/bolivia/>

## **Bolivia Cambio Climático, Pobreza y adaptación (OXFAM Internacional)**

URL: <http://www.oxfam.org/es/policy/bolivia-cambio-climatico-pobreza-y-adaptacion>

## **Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia (SENAMHI)**

URL: <http://www.senamhi.gob.bo/>

## **Proyecto de Fortalecimiento de las Capacidades Nacionales de Sistematización, Información y Difusión del Cambio Climático en Bolivia PROYECTO BOL/60130**

URL: <http://www.cambioclimatico-pnud.org.bo/>

## **Plataforma boliviana frente al cambio climático**

URL: <http://www.cambioclimatico.org.bo/>

## **La organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación (FAO)**

URL: <http://coin.fao.org/cms/world/bolivia/es/PaginaInicial.html>

## **Plataforma Energética**

URL: <http://plataformaenergetica.org/>

## **Unidad de Análisis de Políticas Sociales y Económicas**

URL: <http://www.udape.gov.bo/>

## **Superintendencia de Electricidad, 2008 - Potencia de energía Termoeléctrica e Hidroeléctrica instalada de Bolivia**

URL: [http://www.superele.gov.bo/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_download&gid=291&Itemid=31&mode=view](http://www.superele.gov.bo/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=291&Itemid=31&mode=view)

## **World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), 2009**

URL: <http://www.climatebiz.com/resources/resource/water-energy-and-climate-change>

## **US. Bureau Census**

<http://blogs.census.gov/2011/10/31/the-world-population-at-7-billion/>



## BOMBEO DE AGUA CON SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NECESIDADES Y APLICACIONES EN BOLIVIA

**Renán Jorge Orellana Lafuente** - [renan@energetica.org.bo](mailto:renan@energetica.org.bo)

Responsable del Proyecto KarEn-Energética

Telf: 715 52924 / Calle La Paz Nro 573 – Cochabamba – Bolivia.

**Resumen.** *El agotamiento de las fuentes de agua superficiales ha dado lugar a la búsqueda de fuentes cada vez más profundas, para ello es necesario bombear el agua de un nivel inferior donde está disponible a un nivel superior donde debe ser utilizada.*

*Bombear agua requiere de alguna fuente de energía, sea esta la fuerza humana o animal, la electricidad o un derivado del petróleo (gasolina o diesel). Sin embargo, recientemente se ha considerado otro recurso que es gratuito, la energía del sol, que convertida en energía eléctrica a través de un conjunto de paneles solares, permite bombear agua en lugares remotos y en condiciones competitivas con otras fuentes de energía.*

*Un sistema de bombeo fotovoltaico, es simple, consta de un conjunto de paneles solares, un dispositivo de control y protección y la bomba que funciona con la energía (corriente continua) producida por los paneles. No se usan baterías, ya que el agua bombeada durante el día es almacenada para usarla en las horas de ausencia de radiación solar.*

*En Bolivia se han realizado algunas experiencias aisladas para el bombeo de agua potable, principalmente para el consumo humano. Un intento de masificar el uso de la tecnología solar para apoyar procesos productivos rurales, específicamente el bombeo de agua para bebederos de animales, está siendo desarrollado por Energética con el apoyo de la ONG Alemana KarEn. El presente artículo presenta datos iniciales de la implementación de este proyecto.*

**Palabras clave:** bombeo de agua, sistemas fotovoltaicos, electrificación rural.

### 1. INTRODUCCIÓN

La demanda de agua en Bolivia y el mundo cada vez es mayor, no sólo por el crecimiento de la población, sino también por la creciente escasez de recursos hídricos, debiendo realizarse grandes esfuerzos para lograr un suministro permanente.

La amenaza de sequía en Bolivia es alta en la zona suroeste, que comprende parte de los departamentos de Potosí y Oruro, en el altiplano; sin embargo, también afecta a la región del chaco de los departamentos de Santa Cruz, Chuquisaca y Tarija. Para resolver esta problemática se debe recurrir a los sistemas de bombeo.

Por otro lado, la cobertura de agua potable en Bolivia para el año 2008 llegó a 74,6%. El área urbana cuenta con mayor cobertura, alrededor de 87,1%; mientras que en el área rural sólo se llega a la mitad de la población (50,8%) (PNUD, 2011).

Frente a la situación expuesta, el bombeo solar o fotovoltaico es la forma más sencilla y económica para suministrar agua a las regiones rurales aisladas de la red eléctrica, empleando además una tecnología limpia. Mediante la energía solar se puede bombear agua desde un pozo, una vertiente o un río, y usarla para dotar de agua una pequeña comunidad, regar una huerta o cambiar el tipo de cultivo de una parcela agraria, de secano a regadío.

Energética, con el apoyo de la ONG alemana KarEn ejecuta el Proyecto Mejora del abastecimiento de agua para consumo humano y de animales en base de energías renovables





en Bolivia, con el objetivo mejorar de la calidad de vida de la población rural de la zona andina mediante el abastecimiento regular de agua para consumo humano y animal.

## 2. DEMANDA DE AGUA

El método más usado para el abastecimiento de agua es el desvío del curso de un río para que este fluya por gravedad hasta el lugar deseado, lamentablemente no es posible aplicar este método en todos los lugares ni en todas las épocas del año; por ello es necesario usar métodos de bombeo para extraer el agua del subsuelo o de las fuentes superficiales que se encuentran en niveles inferiores.

Especialmente en las zonas rurales donde la provisión de energía eléctrica convencional presenta dificultades, el bombeo fotovoltaico, que aprovecha la energía del sol, puede ser usado para extraer el agua desde un pozo u otro tipo de fuente.

Las necesidades de agua en el área rural pueden ser divididas en tres grandes grupos:

- agua para consumo humano,
- agua para consumo de animales y,
- agua para riego.

### 2.1 Agua para consumo humano

En las zonas rurales de los países en desarrollo las necesidades de agua varían principalmente en función de la zona geográfica y del estilo de vida. Pueden ser de 20 a 45 litros por persona por día, que sirven para cocinar y beber y aproximadamente 100 litros por persona por día, donde ya se tiene hábito de consumo, especialmente en uso de duchas, lavanderías y baños. Se deberá hacer una evaluación de cada sitio o comunidad (Eduardo Lorenzo, 2005).

### 2.2 Agua para consumo animal

La demanda de agua destinada a los animales dependerá del tipo de animal, la Tabla 1 presenta valores aproximados.

Animal	Consumo (l/animal/día)
Vaca	40
Caballo	30
Chancho	9
Llama	4
Oveja	4
Cabra	3
Gallina	0.2

**Tabla 1:** Consumo diario de agua de algunos animales  
Fuente: Elaboración propia



### 2.3 Agua para riego

La demanda de agua destinada al riego dependerá de la zona y el cultivo, además de la tecnología de riego.

### 3. ALTERNATIVAS PARA EL BOMBEO DE AGUA

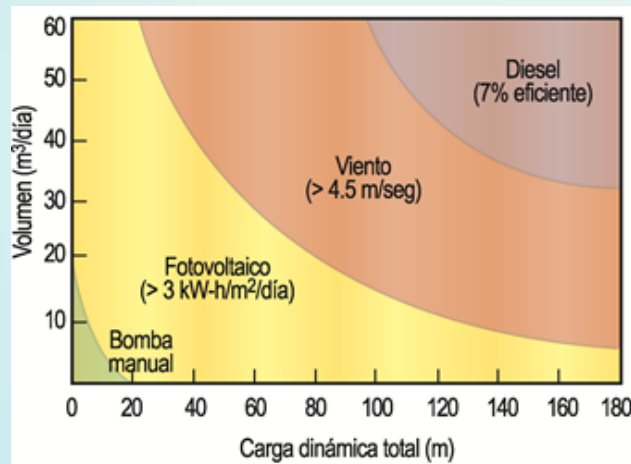
Las fuentes de abastecimiento de agua constituyen el elemento central a la hora de diseñar un sistema de bombeo.

De acuerdo a la forma de abastecimiento, hay dos tipos de fuentes: i) aguas superficiales y, ii) aguas subterráneas.

Los sistemas fotovoltaicos son competitivos con relación a los sistemas convencionales cuando:

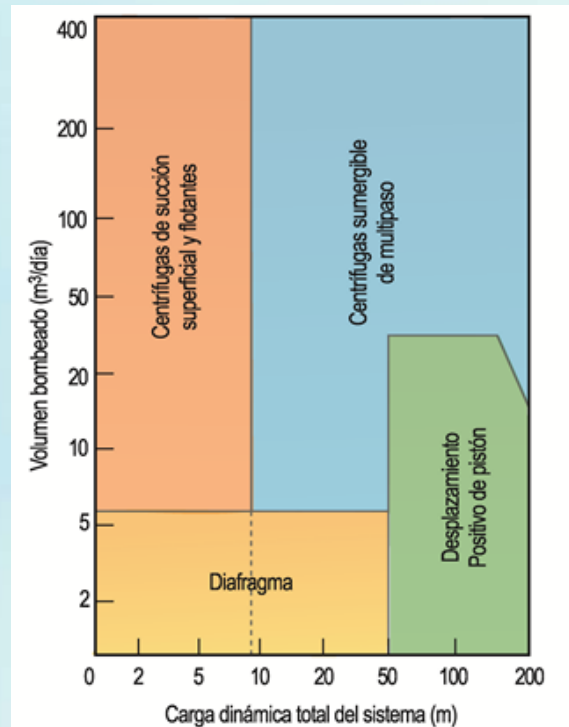
- Se requieren cantidades pequeñas de energía y la altura de bombeo no es muy elevada
- El lugar está alejado de la red eléctrica convencional o es de difícil acceso
- Se dispone de recurso solar suficiente (más de 3 kWh/m<sup>2</sup>/día) (Sandia National Laboratories, 2001)

La Figura 1 muestra la tecnología de bombeo más apropiada de acuerdo al volumen de agua requerido y a la altura de bombeo (carga dinámica total).



**Figura 1.** Tecnologías de bombeo apropiadas en función de altura y caudal  
Fuente: Sandia National Laboratories, 2001.

Cuando la alternativa seleccionada es el bombeo fotovoltaico (siguiendo los criterios anteriores), será importante conocer el tipo de bomba apropiado para una determinada carga dinámica total y un volumen diario requerido.



**Figura 2.** Aplicación de los diferentes tipos de bombas fotovoltaicas  
Fuente: Sandia National Laboratories, 2001.

La Figura 2 es referencial y de contrastación, ya que cada fabricante ofrece varios modelos de bombas y cada una tiene un rango óptimo de operación.

#### 4. LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS, UNA SOLUCIÓN PARA EL BOMBEO DE AGUA

Un sistema de bombeo fotovoltaico está constituido por un conjunto de paneles o módulos solares que convierten la energía del sol en energía eléctrica ; una bomba de agua que podrá ser superficial o sumergible, como se muestra en las figuras 3 y 4; el controlador que realiza el control del funcionamiento del sistema y además ofrece la protección necesaria a la bomba; el pozo o depósito de bombeo, el tanque de almacenamiento, los accesorios de plomería (tuberías, codos, uniones, etc.) y los accesorios eléctricos (cables, conectores, etc.)

Los paneles fotovoltaicos producen energía eléctrica a una tensión de 12, 24 o más voltios en corriente continua, dependiendo de las conexiones que se realicen entre los paneles. Esta electricidad es consumida por el motor de la bomba, que también trabaja en corriente continua; el agua es bombeada desde el fondo del pozo al tanque de almacenamiento ubicado a una determinada altura dependiendo de la demanda de agua.

Los sistemas de bombeo fotovoltaico, en la mayoría de los casos no funcionan conectados a una batería o banco de baterías, funcionan solamente en horas donde hay suficiente radiación solar. En ese tiempo debe bombear la suficiente cantidad de agua (al tanque superior) para que la misma pueda ser usada a lo largo del día. Sin embargo, en algunas aplicaciones especiales, como los casos donde hay dificultades para la construcción de un tanque elevado, la presión de distribución la dará la altura del depósito (Orellana, 2012).





**Figura 3.** Instalación de un sistema de bombeo fotovoltaico sumergible (Uyarani – Oruro)



**Figura4.** Instalación de un sistema de bombeo fotovoltaico superficial (Villa Nueva – Oruro)

## 5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL BOMBEO SOLAR



Comparados con los otros sistemas de bombeo, el bombeo solar presenta muchas ventajas que han dado lugar a una mayor difusión de la tecnología, especialmente en zonas rurales aisladas de los países en vías de desarrollo; éstas se muestran en la Tabla 2.

Ventaja	Descripción
Baja necesidad de mantenimiento	En general los sistemas fotovoltaicos requieren poco mantenimiento debido a que el generador (módulo) no tiene partes móviles; en este caso además no tienen baterías, lo que reduce más aún la necesidad de mantenimiento.
Es limpia y no agrede al medio ambiente	Los sistemas de energía renovable y este caso de energía solar fotovoltaica, debido a que no usan ninguna forma de combustible, no generan gases contaminantes.
No requiere combustible	Al convertir la energía solar en energía eléctrica y luego en energía mecánica o hidráulica, se prescinde de los combustibles que son costosos y contaminantes.
Fácil instalación	Simplicidad de conexión entre la fuente de energía (módulos solares) y la bomba a través de los dispositivos de control y protección.
Durabilidad y confiabilidad	Los materiales utilizados en la fabricación de las bombas y motores DC permiten garantizar tiempos de funcionamiento mayores, en las condiciones de instalación.
Operación sin necesidad de asistencia	Los sistemas de bombeo fotovoltaicos, normalmente cuentan con dispositivos electrónicos para el control y adecuación de la potencia. Éstos permiten automatizar su funcionamiento y no requieren de personal dedicado.
Bajos costos operativos	Al no requerir de combustible o suministro eléctrico ni personal dedicado, los costos operativos son reducidos.
Sistema modular	Los sistemas de bombeo fotovoltaicos pueden ser implementados a medida que la demanda aumenta, a diferencia de los sistemas tradicionales que deben tener la potencia de la demanda proyectada.
Adecuación de las épocas de mayor demanda de agua con la disponibilidad de recurso energético	A través de la inclinación adecuada de los módulos es posible modificar la época de mayor producción de energía y por tanto de agua, permitiendo adecuar la misma a las épocas de mayor demanda (falta de lluvias).

**Tabla 2:** Ventajas del bombeo fotovoltaico

*Fuente: Elaboración propia*

Aunque son pocas, también existen algunas limitaciones o desventajas que la tecnología presenta, las mismas se presentan en la Tabla 3.

Desventaja	Descripción
Costo inicial elevado	A pesar de la reducción de los precios de los módulos, un sistema de bombeo solar aún presenta un costo inicial elevado, que en muchos casos limita una mayor difusión de la tecnología.
Baja productividad en días nublados	Como todas las fuentes energéticas intermitentes, la energía solar depende de las condiciones atmosféricas y en este caso se producirá menos agua cuando existan días nublados.
No familiaridad de los usuarios con el sistema	Al ser una tecnología nueva, es necesario romper barreras de desconocimiento de los usuarios sobre esta solución tecnológica y sus ventajas. Es posible bombear agua con energías solar.
Necesidad de existencia de recurso solar adecuado	Los sistemas de bombeo fotovoltaico pueden ser utilizados en aquellos lugares donde existen buenos niveles de radiación, normalmente superiores a los 3,5 kWh/m <sup>2</sup> /día.

**Tabla 3:** Desventajas del bombeo fotovoltaico

*Fuente: Elaboración propia*

## 6. EL PROYECTO KAREN – LOGROS Y DESAFÍOS



Durante la gestión 2010, con el financiamiento de KarEn<sup>4</sup>, Energética ejecutó un proyecto piloto que benefició a 4 comunidades del Departamento de Oruro, en los municipios de Salinas de Garci Mendoza, Corque y Sabaya.

En los dos primeros casos se contó con la participación de los gobiernos municipales, mientras que en el caso de Uyarani fue la comunidad que realizó el aporte de contraparte (Orellana, 2011). Las comunidades, principalmente Uyarani, han realizado los trabajos comprometidos de manera coordinada y responsable, consistiendo básicamente en:

- Perforación de los pozos
- Fabricación y colocación de anillas de cemento para los pozos
- Acopio de material (piedra y arena)
- Construcción de pedestales para los tanques
- Excavación de zanjas para colocación de ductos
- Además del apoyo en todo el proceso de instalación de las bombas y ductos.

Los aportes de las comunidades han sido exclusivamente en especie (material y mano de obra) y fueron administrados por ellos mismos.

En el caso de los sistemas instalados en las comunidades de Villa Nueva (Corque) y Cotaña (Salinas de Garci Mendoza) los aportes de los gobiernos municipales fueron:

- Cerco perimetral
- Perforación de los pozos
- Tanque de almacenamiento
- Estructura de los tanques elevados
- Red de distribución en las comunidades
- Grifos en cada una de las viviendas
- Tuberías principales

Es valorable el trabajo de las comunidades, pero en algunos casos se requiere de una mayor participación de los gobiernos municipales. Las características de los cuatro sistemas de bombeo construidos en la primera fase del proyecto se muestran en la Tabla 4.

Sistema	Familias	Tipo de bomba	Potencia Wp	Volumen m <sup>3</sup> /día
Cotaña	18	sumergible	100	2,0
Villa Nueva	15 + escuela	superficial	100	2,5
Uyarani – A	10	sumergible	100	2,5
Uyarani – B	3	sumergible	100	1,2

**Tabla 4:** Características de los primeros sistemas de bombeo solar

Fuente: Elaboración propia

Los sistemas de bombeo instalados en estas cuatro comunidades, son monitoreados periódicamente y se observan beneficios después de un año de funcionamiento:

<sup>4</sup> KarEn, es la sociedad para el fomento de energías alternativas en el Caribe®, es una asociación de beneficio comunitario que fue fundada en 1992 con el objetivo de aportar al cambio energético en los países del Caribe y ayudar a reducir la dependencia de esos países a las importaciones de petróleo al aprovechar de manera más intensiva el sol, el viento, la fuerza del agua y la biomasa para el abastecimiento de energía.





- Disponibilidad regular de agua en los grifos de las viviendas.
- Reducción del trabajo de mujeres y niños para ir a buscar agua en la fuente más cercana.
- Disminución de la mortalidad de animales por efecto de sequías.
- Mejora de la salud y la calidad de vida de la población.

A partir de la primera experiencia se han planteado nuevas metas para la implementación del proyecto, previéndose en las gestiones 2011 al 2013 la instalación de sistemas de bombeo de agua usando fuentes energéticas renovables, solar y eólica, en la zona andina de Bolivia, principalmente los departamentos de Oruro y La Paz. En esta etapa el proyecto tiene tres componentes:

- Sistemas de bombeo fotovoltaico para productores de camélidos del departamento de Oruro. Proyecto destinado a instalar 40 sistemas de bombeo que beneficiarían a 200 familias de productores y a aproximadamente 20.000 cabezas de ganado camélido.
- Sistemas de bombeo fotovoltaico para agua potable en el departamento de Oruro. El proyecto beneficiará a 10 comunidades que ya tienen pozos perforados por la gobernación, las alcaldías de Oruro o por los propios beneficiarios y que están lejos de la red eléctrica.
- Sistemas de bombeo eólico y/o solar en la comunidad de *Jiska Ajaría* del municipio de Achacachi, La Paz; en la comunidad se están instalando sistemas de bombeo eólico para consumo humano y para el riego de pequeñas parcelas.

## 7. CONCLUSIONES

Los sistemas de bombeo fotovoltaico instalados en el departamento de Oruro se encuentran funcionando de acuerdo a lo previsto, satisfacen las demandas de agua de las comunidades, tanto para consumo humano como animal.

Se han realizado otras pruebas de sistemas de bombeo solar superficial (montados en flotador) en puestos ganaderos del Chaco boliviano, se pudo bombear agua de un atajado a un tanque australiano (tanque elevado de tierra); alternativa que permitiría evitar pérdidas de agua de los atajados por infiltración en las épocas posteriores a la lluvia.

La segunda fase del proyecto KarEn, donde se deben instalar 40 sistemas de bombeo fotovoltaicos para bebederos de animales, ha tenido gran aceptación de los grupos de productores organizados, para ello se ha contado con el apoyo del Servicio Departamental de Agricultura y Ganadería (SEDAG) de la Gobernación de Oruro. Actualmente los beneficiarios están realizando la construcción de sus pozos y bebederos para montar los paneles solares y las bombas.

Es posible realizar el bombeo de mayores volúmenes de agua y desde profundidades mayores, es el caso de las demandas en zonas críticas como el chaco, donde se deben bombear 10 a 20 litros por días desde profundidades que oscilan entre 100 y 200 metros; en estos casos los sistemas funcionarán con campos de paneles de hasta 4 kW.



## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Eduardo Lorenzo, Fernando Poza, Luis Narvarte, Maria Cristina Fedrizzi, Roberto Zilles. **Buenas prácticas en la implantación de sistemas fotovoltaicos de bombeo.** Madrid: Instituto de Energía Solar, Universidad Politécnica de Madrid, 2005
- (2) Orellana, Renán. **Informe de Cierre, 4 instalaciones de bombeo fotovoltaico.** Cochabamba: Energética, 2011.
- (3) Orellana, Renán. **Introducción a los sistemas de bombeo de agua.** Cochabamba: Energética, 10 de Marzo de 2012.
- (4) PNUD. **Tras las huellas del cambio climático.** La Paz: PNUD, 2011.
- (5) Sandia National Laboratories. **Guía para el desarrollo de proyectos de bombeo de agua con energía fotovoltaica.** Las Cruces: Southwest Technology Development Institute, 2001.



## CERTIFICACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DE ENERGÉTICA

Javier I. Baldiviezo Guzmán – [javier.baldiviezo@gmail.com](mailto:javier.baldiviezo@gmail.com)

Técnico en Proyectos - Energética

**Resumen.** Se da a conocer la experiencia de Energética en el proceso de certificación con la Norma Boliviana para Gases de Efecto Invernadero (NB-ISO 14064), y se esbozan de manera breve las connotaciones que esto tiene en las posibilidades de enfrentar el cambio climático, asumiendo que su cálculo nace precisamente de la necesidad de enfrentar el cambio climático. Para ello se explica lo que es el cambio climático, luego se analiza en detalle la huella de carbono, para finalmente dar a conocer los resultados de su cálculo para las actividades de Energética.

**Palabras clave:** energética, huella de carbono, cambio climático, certificación.

### 1. INTRODUCCIÓN

Con este artículo se da a conocer la experiencia de Energética<sup>5</sup> en el proceso de certificación de la Norma Boliviana para Gases de Efecto Invernadero (NB-ISO 14064), paso que en Bolivia inicia la contabilización de la huella de carbono organizacional.

### 2. EL CAMBIO CLIMÁTICO

La contabilización de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) es parte de un conjunto complejo de respuestas surgidas ante las transformaciones que sufre la sociedad en el marco de la reconfiguración del medio ambiente constatada durante la última centuria, la misma que se ha venido acentuando paulatinamente.

Se debe partir reconociendo la variabilidad natural del sistema climático (Vide, 2009),<sup>6</sup> pues éste puede ser influido por varias causas de origen natural, entre las cuales se pueden mencionar la acumulación de GEI, la actividad solar y la actividad volcánica (González, Jurado, González, Aguirre, Jiménez, & Navar, 2003). Debe entenderse como causa natural aquella que no depende del ser humano, distinción sumamente importante para comprender en profundidad este fenómeno; y que sólo recientemente la actividad humana se ha convertido en otra fuerza modificadora del clima, al menos con notable incidencia (Staines, 2008).

El carácter antropogénico del calentamiento global es, pues, un fenómeno relativamente nuevo; y entre sus principales factores coadyuvantes se puede mencionar también el incremento en la concentración de GEI,<sup>7</sup> los cambios en el uso del suelo y los aerosoles artificiales.

<sup>5</sup> Energética es una institución boliviana que busca universalizar el acceso a la energía, promoviendo un uso más racional de la misma, con una perspectiva equitativa, amplia, solidaria y proactiva; colaborando así al desarrollo sostenible nacional.

<sup>6</sup> También se sabe que el efecto invernadero tiene originalmente un carácter natural; además de que éste ayuda a mantener las condiciones de vida en el planeta, pues de no existir este efecto, la temperatura del planeta sería de alrededor de -18°C (Vide, 2009; González, y otros, 2003).

<sup>7</sup> Para 2010 la concentración de dióxido de carbono era de 388 ppm (partes por millón), en tanto que a fines de la década del cincuenta era de 315 ppm, y se estima que en el último tercio del siglo XX estaría entre 280 y 290 ppm (Vide, 2009:56).





De esta manera, es posible entender el cambio climático como “la variabilidad observada respecto al clima promedio en escalas de tiempo que van de unas cuantas décadas a millones de años” (Staines, 2008: 345), ya sea que entre sus causas medie la actividad humana o no.

La principal manifestación de este fenómeno es el incremento de la temperatura, que en los últimos años ha tenido una notoria elevación (González, Jurado, González, Aguirre, Jiménez, & Navar, 2003)(Vide, 2009); además se ha podido observar la subida del nivel marino y el retroceso de los glaciares (Ibídem.).<sup>8</sup>

### 3. LA HUELLA DE CARBONO

Al reconocer que la actividad humana tiene consecuencias en el ambiente, que transforman su capacidad de conservación, surge la necesidad de comprender los impactos que ésta tiene en el entorno. Es ante esa necesidad que emergen conceptos como el de la huella de carbono o, aquella más amplia, de huella ecológica.<sup>9</sup>

La huella ecológica puede entenderse como:

*...la superficie de tierra productiva o ecosistema acuático necesario para mantener el consumo de recursos y energía, así como para absorber los residuos producidos por una determinada población humana o economía, considerando la tecnología existente, independientemente de en qué parte del planeta está situada esa superficie (M. Wackernagel y W. E. Rees, cit. en (Carreño & Hoyos, 2010: 21).*

El supuesto subyacente a este concepto es que la reproducción de la vida en la tierra –no solamente la humana, valga la aclaración– está condicionada al mantenimiento de la sostenibilidad de los ecosistemas que la albergan. Refleja, en varios sentidos, “una demanda de naturaleza por parte de la humanidad” (Martínez, 2007:12).

Su cálculo toma en cuenta las necesidades referidas a la alimentación, los productos forestales, el gasto energético y la ocupación directa del terreno (Martínez, 2007).<sup>10</sup>

A pesar de su aceptación por amplios sectores de la sociedad, las dificultades para su medición práctica han hecho imposible su medida y posterior utilización masiva; esto a pesar de que hay quienes creen que es una medida cuyo fin debería ser solamente la concientización, al tratarse de un indicador sintético capaz de ser comprendido fácilmente por públicos no especialistas.

Es por ello que emerge la necesidad de utilizar conceptos que no adolezcan de las deficiencias del anterior.

De esta manera, se ha acudido al concepto de huella de carbono, que es definido de la siguiente manera:

<sup>8</sup> Incremento que se contrapondría a una supuesta tendencia de enfriamiento durante el último milenio (González, y otros, 2003).

<sup>9</sup> Otro concepto también utilizado es el de la huella hídrica, que no es de interés para este artículo, pero que puede ser definido como sigue: “La huella hídrica de un individuo, comunidad o comercio se define como el volumen total de agua dulce que se utiliza para producir los bienes y servicios consumidos por el individuo o comunidad así como los producidos por los comercios” (Water footprint network) .

<sup>10</sup> Estados Unidos es el país con mayor déficit en la relación entre su huella ecológica y la capacidad homeostática de su territorio, en tanto que en la vereda opuesta se encuentra Brasil, con una capacidad mayor de recarga del ambiente (Martínez, 2007).



*La huella de carbono es la medida del impacto de todos los gases de efecto invernadero producidos por nuestras actividades (individuales, colectivas, eventuales y de los productos) en el medio ambiente. Se refiere a la cantidad en toneladas o kilos de dióxido de carbono equivalente de gases de efecto invernadero, producida en el día a día, generados a partir de la quema de combustibles fósiles para la producción de energía, calefacción y transporte entre otros procesos(Schneider & Samaniego, 2010).*

Las aproximaciones metodológicas pueden agruparse en las siguientes categorías (Schneider & Samaniego, 2010):

- Guías generales: como el Protocolo de Gases de Efecto Invernadero o la mencionada norma ISO<sup>11</sup> 14064.
- Guías específicas: como PAS 2050, Bilan Carbone, o el GreenHouse Gas Protocol.
- Herramientas específicas: destinadas a áreas particulares, como el consumo de carbono en transporte, la generación de energía, etc.

La medida utilizada para su contabilización es, como queda expuesto por la definición, el CO<sub>2</sub> equivalente, que es una normalización del efecto conjunto de todos los GEI en el clima, y resulta de transformar el efecto de cada GEI en una cantidad de CO<sub>2</sub> que tendría un efecto equivalente. Es, por lo tanto, un índice integrado (Bórquez, 2010); además su cálculo debería considerar todas las emisiones realizadas en el ciclo productivo, desde la adquisición de materias primas hasta la eliminación de sus desechos.

Existe una discusión en torno a qué emisiones deben ser consideradas en su contabilización, sin embargo las metodologías actualmente en uso discriminan dos formas de catalogarlas.

La primera se aplica a empresas u otras instituciones, y comprende tres categorías de emisiones:

- Ámbito 1: emisiones directas, realizadas desde fuentes bajo control directo de la organización, principalmente derivadas de la quema de combustibles.
- Ámbito 2: emisiones indirectas derivadas de la generación, por terceros, de energía, calor o vapor, que finalmente son utilizados por la organización.
- Ámbito 3: otras emisiones indirectas, realizadas por terceros pero cuyos resultados, en la forma de bienes o servicios, son utilizados por la organización, como viajes, disposición de basura, etc.

La segunda forma de establecimiento de categorías de emisiones de GEI se la aplica a los individuos e identifica dos niveles:

- Huella primaria: conformada por las emisiones directas de CO<sub>2</sub> de actividades bajo control directo de las personas, como energía y transporte.
- Huella secundaria: conformada por las emisiones indirectas de CO<sub>2</sub> de todo el ciclo de vida de los productos y servicios consumidos.

---

<sup>11</sup> International Organization for Standardization (Organización Internacional de Normalización), es una entidad internacional, conformada por instituciones nacionales de normalización, encargada de promover el desarrollo de normas internacionales que regulen las actividades de las empresas, los gobiernos y la sociedad.



Normalmente las emisiones directas de CO<sub>2</sub> son contabilizadas con carácter obligatorio, en tanto que las restantes suelen quedar a discreción de las entidades involucradas en la certificación de la contabilidad realizada.

Por otra parte, el Protocolo de Kioto establece que seis GEI deberían ser cuantificados: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC), y hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>). Cada uno de estos gases tiene un diferente Potencial de calentamiento global (PCG), que se expresa mediante su relación con el CO<sub>2</sub>, como se puede ver en el Cuadro 1.

GEI	PCG
CO <sub>2</sub>	1
CH <sub>4</sub>	23
N <sub>2</sub> O	296
HFC	1.300
PFC	5.600
SF <sub>6</sub>	22.200

**Cuadro 1.** Potencial de calentamiento global  
Fuente: Basado en Reed & Ehrhart (2007).

Sin embargo de esta prevención, solamente los tres primeros gases de entre los seis son los usualmente contabilizados.

#### 4. LA CERTIFICACIÓN EN ENERGÉTICA

El Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA)<sup>12</sup> el 26 de enero de 2012 realizó la auditoría a Energética en el marco del proceso de certificación con la Norma Boliviana para Gases de efecto invernadero – Parte 1 (Especificación con orientación, a nivel de las organizaciones, para la cuantificación y el informe de las emisiones y remosiones (*sic*) de gases de efecto invernadero) NB-ISO 14064: 1<sup>13</sup> (IBNORCA, 2006a), convirtiéndose de esta manera en la primera institución boliviana en acceder la certificación de su huella de carbono.

Este objetivo pudo ser alcanzado con el apoyo del Proyecto Promoción y Difusión de la Norma Boliviana NB-ISO 14064, financiado por la Corporación Andina de Fomento (CAF) y ejecutado por IBNORCA y la Consultora boliviana Servicios Ambientales S. A. (SASA), con sede en la ciudad de La Paz.<sup>14</sup>

Este proyecto tiene como objetivo principal difundir, promocionar y aplicar la NB-ISO 14064 en los diferentes sectores económicos del país, promoviendo la participación de las empresas nacionales en acciones orientadas a la mitigación del cambio climático.

<sup>12</sup> Entidad delegada para realizar certificaciones en Bolivia.

<sup>13</sup> La NB-ISO 14064 tiene tres partes, las otras dos están referidas a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> mediante proyectos (IBNORCA, 2006b) y la verificación de declaraciones sobre gases de efecto invernadero (IBNORCA, 2006c), respectivamente.

<sup>14</sup> Este proyecto apoyó a siete empresas e instituciones en Bolivia en el cálculo de su huella de carbono (Banco Bisa, Industrias Fino, Saguapac, BZ Group, Mountain Biking, Energética y tres empresas ladrilleras apoyadas por Swisscontact).





El contenido del informe contempla los límites operativos en la identificación institucional de las emisiones a ser cuantificadas (Energética, 2012a), de acuerdo al siguiente detalle:

- Emisiones directas (alcance 1): combustión móvil por el transporte de personal y materiales.
- Emisiones indirectas de GEI por energía (alcance 2): generación de electricidad generada en el Sistema Interconectado Nacional (SIN) y consumida por la organización.
- Otras emisiones indirectas de GEI (alcance 3): transporte aéreo y buses.

Entre las exclusiones definidas por la organización están el consumo de garrafas de gas licuado de petróleo (GLP), agua y papel, por su baja contribución al total y por la dificultad de encontrar factores de emisión adecuados a la realidad del país.<sup>15</sup>

Los resultados arrojados por el cálculo se presentan en el Cuadro 2.

Emisiones directas de GEI		
	t CO <sub>2</sub> -e	(%)
Consumo de combustibles en vehículos propios y controlados por Energética (combustión móvil)	98,99	81,02%
Total Emisiones Directas de GEI	98,99	81,02%

Emisiones Indirectas de GEI por energía		
	t CO <sub>2</sub> -e	(%)
Consumo de energía eléctrica generada en el SIN	2,14	1,75%
Total Emisiones Indirectas de GEI por energía	2,14	1,75%

Otras Emisiones Indirectas de GEI		
	t CO <sub>2</sub> -e	(%)
Viajes por actividades de la organización en transporte público terrestre	0,74	0,61%
Viajes por actividades de la organización en transporte aéreo	20,31	16,62%
Total Emisiones Indirectas de GEI	21,05	17,23%

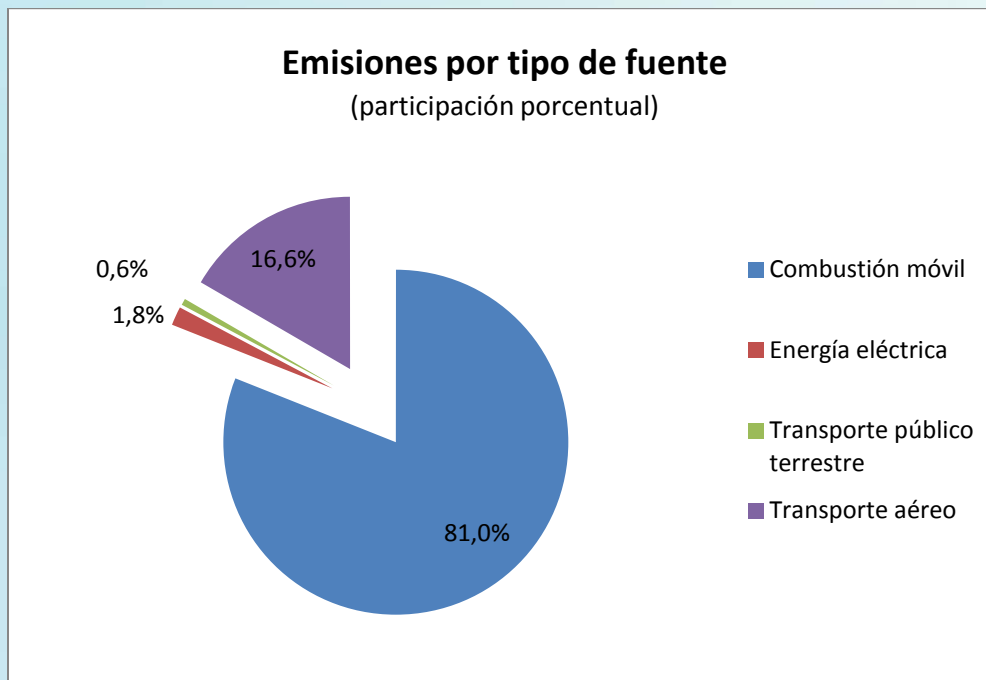
Emisiones totales ENERGÉTICA	
	t CO <sub>2</sub> -e
<b>Emisiones Totales</b>	<b>122,18</b>

**Cuadro 2:** Huella de carbono de Energética  
Fuente: Energética, 2012a.

<sup>15</sup> La lógica que rige el cálculo de las emisiones de GEI sigue el siguiente patrón: una vez identificadas las categorías de emisiones a ser calculadas por una organización, se procede a cuantificar su consumo, para luego multiplicar éste por un factor de emisión, el cual debe reflejar su aporte equivalente al fenómeno del calentamiento global; lo que falta en Bolivia aún es obtener estos factores, pues por el momento solamente se cuenta con el factor para electricidad (elaborado por SASA) y también se acude a varios factores internacionales, lo cual no acontece con el caso de el agua, el papel y el GLP.



La mayor parte de las emisiones de CO<sub>2</sub>-e corresponden a aquellas resultantes del consumo de combustible en vehículos de la organización, debido a que gran parte de sus actividades se realizan mediante visitas a lugares bastante alejados de sus oficinas ubicadas en la Ciudad de Cochabamba; ello puede apreciarse mejor prestando atención al Gráfico 1.



**Gráfico 1:** Huella de carbono de Energética  
Fuente: Energética (2012a).

El proceso de certificación incluyó además la elaboración de un documento anexo en el cual se contemplan aquellas medidas recomendadas para poder reducir las emisiones de la organización, principalmente referidas a la utilización de iluminación, equipos eléctricos, transporte aéreo y transporte terrestre (Energética, 2012b).

## 5. CONCLUSIONES

Bolivia inicia su andar en este sendero ya abierto por otros países, y parece ser una tendencia que se consolidará a nivel internacional. Esta práctica responde a la necesidad que tiene la sociedad de conocer el nivel de emisiones de GEI de los distintos actores institucionales; sin embargo, también debe reconocerse que, por lo menos por ahora, no existen los mecanismos suficientemente claros como para garantizar una adecuada contabilización de las emisiones de GEI.

En este sentido, la interrelación entre la necesidad de su realización y las limitaciones observables tanto en su diseño actual como en su inserción en los esquemas de compensación, ligados al mercado de carbono, plantean un escenario que puede caracterizarse como un claroscuro en espera de definición, donde parecen entrar en contradicción los derechos que la actual arquitectura jurídica internacional (y también nacional) otorga a las grandes empresas y la necesidad de la sociedad de enfrentar este fenómeno.



## Agradecimientos

Mis más sinceros agradecimientos van dirigidos a Virginia Aillón, quien me ayudó con una revisión de este texto puliendo varios errores contenidos en la primera versión; los que quedan, lógicamente, son de mi entera responsabilidad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Bórquez, R. (2010). *Huella de carbono*. Recuperado el 7 de Marzo de 2012, de <http://www.terram.cl/images/ADCMA/adcma-26-huella-de-carbono-final-ok.pdf>
- (2) Carballo, A., García, M. d., & Doménech, J. L. (Junio de 2009). *DELOS*. Recuperado el 05 de 03 de 2012, de Revista Desarrollo Local Sostenible: <http://www.eumed.net/rev/delos/05/pnq.pdf>
- (3) Carreño, C., & Hoyos, N. (2010). La huella ecológica: un indicador potencial de sostenibilidad. *Fragua*.
- (4) Energética. (2012b). *Acciones de reducción de la huella de carbono*. Cochabamba.
- (5) Energética. (2012a). *Huella de carbono: Energética 2010*. Cochabamba.
- (6) González, M., Jurado, E., González, S., Aguirre, O., Jiménez, J., & Navar, J. (2003). Cambio climático mundial: origen y consecuencias. *Ciencia UANL*, VI (VI).
- (7) IBNORCA. (2006a). NB-ISO 14064:1. *Gases de efecto invernadero - Parte 1: Especificación con orientación, a nivel de las organizaciones, para la cuantificación y el informe de las emisiones y remosiones de gases de efecto invernadero*.
- (8) IBNORCA. (2006b). NB-ISO 14064:2. *Gases de efecto invernadero - Parte 2: Especificación con orientación, a nivel de proyecto, para la cuantificación, el seguimiento y el informe de la reducción de emisiones o el aumento en las remosiones de gases de efecto invernadero*.
- (9) IBNORCA. (2006c). NB-ISO 14064:3. *Gases de efecto invernadero - Parte 3: Especificación con orientación para la validación y verificación de declaraciones sobre gases de efecto invernadero*.
- (10) IBNORCA. (2012). Seminario. *Huella de carbono: una oportunidad para las empresas en la mitigación del cambio climático*. Cochabamba.
- (11) Martínez, R. (2007). Algunos aspectos de la huella ecológica. *Inter Sedes*.
- (12) Reed, K., & Ehrhart, C. (2007). *Haciendo lo correcto: guía para responsabilizarnos de las emisiones de gases de efecto invernadero de CARE*. Recuperado el 15 de 03 de 2012
- (13) Schneider, H., & Samaniego, J. (2010). *La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios*. Santiago de Chile: Naciones Unidas.
- (14) Staines, F. (2008). Cambio climático: interpretando el pasado para entender el presente. *Ciencia Ergo Sum*, 14 (14).
- (15) Velázquez, F. (2005). Cambio climático y Protocolo de Kioto: ciencias y estrategias - compromisos para España. *Revista española de salud pública* (79).
- (16) Vide, J. (2009). Conceptos previos y conceptos nuevos en el estudio del cambio climático reciente. *Investigaciones geográficas* (49).
- (17) *Water footprint network*. (s.f.). Recuperado el 10 de 09 de 2012, de Huella hídrica: <http://www.huellahidrica.org/?page=files/home>





## SECADO SOLAR DE MADERA EXPERIENCIAS EN BOLIVIA Y PERÚ

Reinhard Mayer Falk – [falk\\_solar@hotmail.com](mailto:falk_solar@hotmail.com)

Fernando Castro Mina – [fecasmi@gmail.com](mailto:fecasmi@gmail.com) ECOENERGÍA FALK S.R.L.

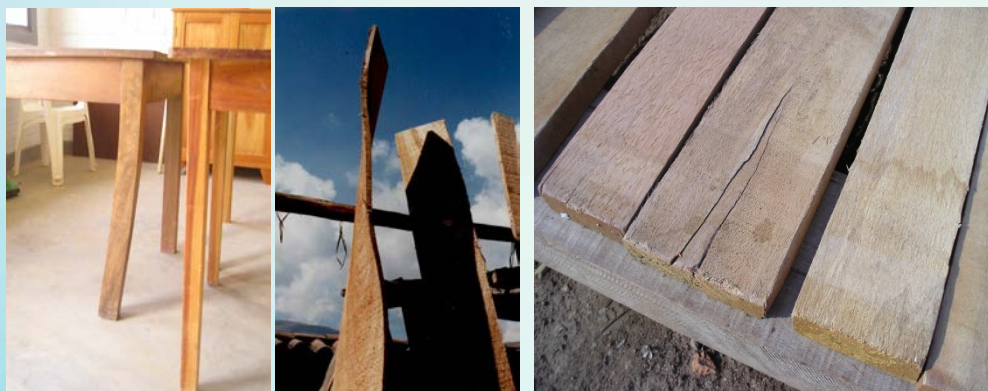
**Resumen.** Entre los años 1997 y 2007 se realizaron varios proyectos de secado solar técnico de madera. Para la planificación se utilizó un modelo matemático muy sencillo para dimensionar los secadores solares. Se construyeron equipos entre 500 y 5.000 pies de madera (1,18 y 11,79 m<sup>3</sup> respectivamente). Se lograron humedades finales entre 9 y 13 % dentro de 30 días para tablas de madera con 1 pulgada de espesor (=2,54 cm) para secadores solares de 500 a 1.500 pies (1,18 y 11,79 m<sup>3</sup>) de capacidad.

**Palabras clave:** secado solar técnico de madera, flujo forzado, balance energético.

### 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas principales de las pequeñas y medianas empresas (PyMEs) de fabricación de muebles es el suministro de madera seca para producir muebles de buena calidad. Por no contar con un suministro de la madera adecuadamente secada, los carpinteros compran madera muy húmeda de las barracas y secan al aire libre. Por no tener suficiente capital, el tiempo de secado se limita a un mes. Una investigación realizada por Mayer Falk en Cusco (Perú, 1998), ha mostrado que madera de la especie copaiba (una madera relativamente fácil de secar) tenían una humedad encima de los 22 % después de 3 meses de secado al aire libre. Para poder producir un mueble de buena calidad, se necesitan humedades finales de la madera de 12 %.

Muebles fabricados con madera con una humedad demasiado elevada tienen varios defectos, entre ellos componentes torcidos (ver Figura 1a), descomposición de las uniones, porque la madera del mueble elaborado sigue secándose hasta que encuentre su punto de equilibrio. Además de estos defectos de fabricación, existen mermas durante el secado natural (torceduras, rajaduras, ver también Figura 1b y 1c) que significan pérdidas para los carpinteros.



**Figura 1 (a-c).** Izquierda: Mueble con torcedura por uso de madera húmeda. Centro: Tabla de madera torcida durante el secado al aire libre. Derecha: Rajaduras en tablas expuestas al sol. Fuente: ECOENERGÍA FALK S.R.L.



Los secadores industriales son muy costosos para las PyMEs, tienen además capacidades demasiado elevadas y requieren personal especializado para su manejo. Es necesario contar con una tecnología intermedia para las PyMEs que cumplan con los siguientes criterios (Gate, 1979; Wengert, 1987 y Plumptre, 1988):

- Sistemas de fácil construcción o de autoconstrucción.
- Capacidades adaptadas a las necesidades de las PyMEs
- Fuentes de energía sin costos elevados
- Manejo sencillo

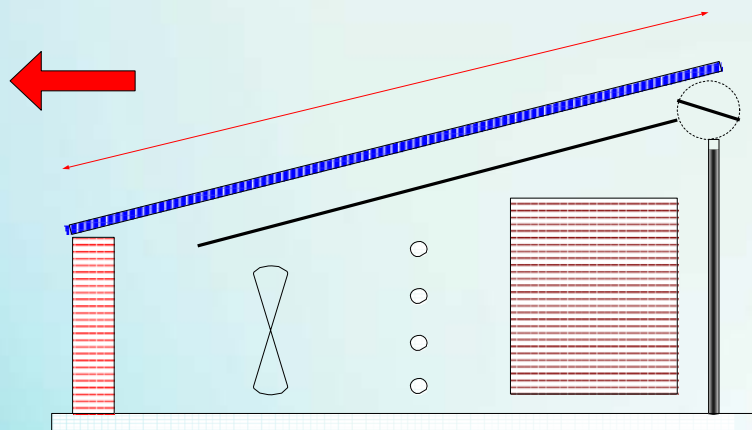
Un secador solar que funciona con un colector de aire para calentar el aire de secado y ventiladores eléctricos de baja potencia es una tecnología adecuada que evita la inversión en calderas y quemadores a gas. El aire se calienta directamente mediante energía solar utilizando colectores planos de aire que forman el techo del mismo secador. Ventiladores eléctricos guían el aire calentado hacia las tablas de madera a secar. Compuertas de ventilación expulsan el aire húmedo y dejan entrar aire fresco y seco.

## 2. EL SECADOR SOLAR

En su forma más sencilla consiste en un espacio para ubicar las tablas a secar. Delante la pila de las tablas de madera se instala ventiladores axiales con un diámetro amplio para garantizar la buena distribución del aire de secado. Succionan el aire caliente producido en el colector plano de aire que forma el techo de la cámara de secado. En la parte posterior del secador solar se encuentran las puertas de carga y descarga y las compuertas de ventilación.

El colector plano – techo del secador – consiste de una cubierta transparente (vidrio o policarbonato) y una superficie metálica pintada de negro por debajo. La cubierta transparente y superficie de absorción son separadas, de esta manera se forma un conducto de aire donde se calienta el aire de secado.

Las paredes del secador solar pueden ser de mampostería (adobe, ladrillos) para zonas frías o de policarbonato mismo para zonas tropicales. El equipo se construye sobre una plataforma de madera.



**Figura 2.** Esquema de un secador de madera que combina el uso de energía solar con calefacción auxiliar (indicada por el intercambiador de calor). Fuente: ECOENERGÍA FALK S.R.L.



El secador de la Figura 2 es un sistema híbrido que combina energía solar y biomasa para calentar el aire de secado. Este aire se mueve con ayuda de ventiladores eléctricos (flujo forzado). Se ha visto que el uso de una calefacción auxiliar raras veces es necesario.

### 3. BASES DE LA PLANIFICACIÓN

Para una modelación matemática sencilla, se necesitan los siguientes datos:

- Oferta de radiación solar del lugar de instalación del secador solar
- Cantidad de madera a secar
- Espesor de la madera a secar
- Humedad inicial e final de la madera
- Velocidad del secado
- Humedad del aire ambiental

### 4. MODELACIÓN MATEMÁTICA

#### **Capacidad del secador y demanda energética**

Como primer paso se define la capacidad del secador (volumen de madera a secar:  $V_{\text{madera}}$ ; unidad:  $\text{m}^3$ ). Muchas veces los datos llegan en pie de madera (pie). Es necesario realizar una conversión de las unidades:  $424 \text{ pie}^2 = 1 \text{ m}^3$ . Para los ejemplos de cálculos, se utilizan datos de planificación para la población de San Miguel de Velasco, Chiquitanía, Departamento de Santa Cruz. La capacidad del secador solar es de 1.500 pies (= 3,54  $\text{m}^3$ ). El tiempo de secado es de 30 días.

Estado	Humedad ( % )	Densidad ( g / $\text{cm}^3$ )
Verde	83	0,82
Equilibrio	15	0,55

**Tabla 1:** Densidades y humedades de la especie Tornillo

Para los cálculos de la cantidad de agua a extraer, se utilizan los datos de las diferentes especies de madera. La tabla 1 muestra los datos de la especie “tornillo” (Junta del Acuerdo de Cartagena, 1981):

Durante el secado, la madera pierde:

$$\text{Densidad inicial} - \text{Densidad final} = D_i - D_f = \Delta D \quad (1)$$

Ejemplo: Para contar con un factor de seguridad, se estima la densidad inicial ( $D_i$ ) con 0,90  $\text{g}/\text{cm}^3$  y

la densidad final ( $D_f$ ) con 0,50  $\text{g}/\text{cm}^3$ :

$$\begin{aligned} 0,90 \text{ g}/\text{cm}^3 - 0,50 \text{ g}/\text{cm}^3 &= 0,40 \text{ g}/\text{cm}^3 \\ 1 \text{ m}^3 &= 1.000.000,00 \text{ cm}^3. \end{aligned}$$

Según el ejemplo anterior, un metro cúbico pierde 400 kg de agua durante el proceso de secado. Pérdida total de agua durante el proceso de secado (Masa de agua =  $M_{\text{agua}}$ ):

$$M_{\text{agua}} = V_{\text{madera}} * \Delta D \quad (2)$$





Esto significa que para 1,500 pies = 3,54 m<sup>3</sup>, con 400 kg de agua expulsada por m<sup>3</sup>, una extracción de

$$400 \text{ kgagua/m}^3 \times 3,54 \text{ m}^3 = 1.416 \text{ kgagua}$$

Para extraer un kilo de agua de la madera se necesita según Wengert y Oliveira (1987) la siguiente energía (E<sub>kg agua</sub>):

$$651 \text{ W-h}$$

La energía útil (E<sub>útil</sub>) para expulsar la humedad de la madera es:

$$E_{\text{útil}} = \text{Magua} * E_{\text{kg agua}} \quad (3)$$

Entonces para 1.416 kg de agua se necesita:

$$\begin{aligned} &1.416 \text{ kgagua} \times 651 \text{ W-h/kgagua} \\ &= 921.816,0 \text{ W-h} \\ &= 921,82 \text{ kW-h} \end{aligned}$$

Para un secado seguro se calcula una pérdida (Phumedad diaria) de

$$3,5 \% \text{ de humedad / d}$$

Este es un valor promedio (Wengert, 1987). En la etapa final, la extracción de agua mediante energía solar es más lenta. Sin embargo, tomando en cuenta una baja de humedad de la madera de:

$$\text{Humedad inicial} - \text{Humedad final} = H_i - H_f = \Delta H \quad (4)$$

$$90 \% - 12 \% = 78 \%$$

y Phumedad diaria = 3,5 % disminución de humedad por día (Velocidad de secado: V<sub>secado</sub>):

$$\begin{aligned} V_{\text{secado}} &= \Delta H / \text{Phumedad diaria} \\ 78 \% / 3,5 \%/\text{día} &= 22,3 \text{ d} \end{aligned} \quad (5)$$

Tomando en cuenta un periodo de secado de 30 días, existe suficiente seguridad para evitar daños a la madera a secar. Dividiendo la energía necesaria durante todo el ciclo de secado (E<sub>útil</sub>) y el tiempo de secado (t<sub>secado</sub>); en el ejemplo 30 días, se obtiene:

$$E_{\text{util, diario}} = E_{\text{útil}} / t_{\text{secado}} \quad (6)$$

$$\frac{921,82 \text{ kW-h}}{30 \text{ d}} = 30,73 \text{ kW-h/d}$$

Esta es la energía necesaria o “útil” por día para expulsar el agua. Pero, ningún equipo puede convertir la energía solar u otra forma de energía en un 100 % a trabajo útil. Por esta razón, en el cálculo deben entrar las pérdidas. Para facilitar el cálculo, se estima un rendimiento de 25 % ( $\eta = 0,25$ ) para el secador solar. Por esta razón, la energía solar a captar por día (E<sub>solar, diaria</sub>) es de:



$$E \text{ demanda solar, diaria} = E_{\text{util, diaria}} / \eta \quad (7)$$

$$\frac{30,73 \text{ kW-h/d}}{0,25} = 122,92 \text{ kW-h/d} = 123 \text{ kW-h/d}$$

### **Dimensionamiento del secador**

Se estima una oferta de la radiación solar de 4,3 kWh / m<sup>2</sup> /día en base de experiencias de ECOEN- ERGÍA FALK S.R.L. en el Trópico de Bolivia. Con esta oferta de la radiación solar diaria promedio (Esolar diaria) se obtiene la siguiente superficie captora (Aabsorbedor):

$$A_{\text{absorbedor}} = E \text{ demanda solar, diaria} / E_{\text{solar, diaria}} \quad (8)$$

$$\frac{123 \text{ kW-h/d}}{4,3 \text{ kWh/m}^2/\text{d}} = 28,6 \text{ m}^2 = 29 \text{ m}^2$$

Los 29 m<sup>2</sup> son la base de planificación de las dimensiones del secador.

### **Sistema de distribución del aire**

La masa de agua (Magua) de 1.416 kgagua se extrae dentro del tiempo de secado (tsecado) de 30 días:

$$\begin{aligned} M_{\text{agua, diaria}} &= M_{\text{agua}} / t_{\text{secado}} \\ 1.416 \text{ kgagua} / 30 \text{ d} &= 47,2 \text{ kgagua/d} \end{aligned} \quad (9)$$

Se estima un funcionamiento de 5 horas del secador por día (tsecado, día) para calcular la masa de agua a extraer durante una hora (Magua, hora):

$$\begin{aligned} M_{\text{agua, hora}} &= M_{\text{agua, día}} / t_{\text{secado, día}} \\ (47,2 \text{ kgagua/d}) / (5 \text{ h/d}) &= 9,44 \text{ kgagua/h} \end{aligned} \quad (10)$$

### **Cantidad de aire mínima para la ventilación**

Para calcular la capacidad del aire de recibir humedad, se necesitan los datos climatológicos del lugar de la instalación del secador solar (temperatura promedio: Tpromedio, Humedad relativa promedio: Hrel, promedio). Mediante una estimación del aumento de temperatura del aire de secado y cartas psicrométricas para la altura sobre el nivel del mar de la instalación del secador, se obtiene la masa de aire de secado necesaria. El siguiente ejemplo utiliza datos para San Miguel de Velasco (Chiquitania) del departamento de Santa Cruz.

Aire con 24,7 °C y una humedad relativa de 70 % contiene la siguiente cantidad de agua (humedad absoluta); datos de GATE (1979):

$$0,0135 \text{ kgvapor} / \text{kgaire seco}$$

Calentando este aire a 40 °C, su humedad relativa baja a aprox. 30 % de humedad relativa. Este aire de secado se sature con humedad hasta un 80 %. Según la carta psicrometría (GATE, 1979), la temperatura del aire de secado baja hasta los 28 °C. Su humedad absoluta es de:



$$0,0185 \text{ kgvapor} / \text{kgaire seco}$$

De esta manera, el aire de secado puede recibir la siguiente cantidad de agua:

$$(0,0185 - 0,0135) \text{ kgvapor} / \text{kgaire seco} = 0,005 \text{ kgvapor/kgaire seco}$$

En otras palabras, para extraer 5 g de humedad, se necesita un kg de aire. La masa de aire para extraer 9,44 kgagua/h se calcula de la siguiente manera:

$$(9,44 \text{ kgagua/h}) / (0,005 \text{ kgvapor/kgaire seco}) = 1.888 \text{ kgaire seco/h} \approx 1.890 \text{ kgaire seco/h}$$

Estimando una densidad del aire con 1,29 kg/m<sup>3</sup>, el caudal de aire se calcula en:

$$(1.890 \text{ kgaire seco/h}) / (1,29 \text{ kg/m}^3) \approx 1.465 \text{ m}^3/\text{h}$$

La planificación de los ventiladores eléctricos se realiza mediante los datos de fabricantes de estos equipos.

## 5. RESULTADOS

Un secador solar instalado en la ciudad de Cusco (Perú, 1998) de 500 pies de capacidad, suministró madera de humedad promedio de 13 %. Se trató de las especies Leche Leche, Catahua, Copaiba, Moena y Aguano. Espesor de las tablas: 1 pulgada = 2,54 cm. Este resultado se obtuvo después de 30 días de secado solar durante la época de lluvia.

Mediante el secador solar instalado en San Miguel de Velasco – Chiquitania (departamento de Santa Cruz) se obtuvieron humedades finales de 9 % después de 30 días de secado. Se secaron tablas de Tajibo Amarillo (*Tabebuia serratifolia*) de una a una y media pulgada de espesor (2,5 y 3,7 cm, respectivamente).

El año 2009 se instaló un secador solar de 5.000 pies (= 11,79 m<sup>3</sup>) de capacidad en la ciudad de La Paz. Se trató de un trabajo de reingeniería. Se convirtió el techo de un galpón industrial en colector de aire y se rehabilitó una cámara de secado para barnizado existente.







**Figura 3 (a – b).** La fotografía a la izquierda muestra la parte posterior del secador híbrido de San Miguel. Se observan las puertas de carga y descarga. Al lado derecho de la construcción se observa la caseta para la calefacción auxiliar. La fotografía a la derecha muestra el secador híbrido visto de frente. Fuente: ECOENERGÍA FALK S.R.L.



**Figura 4 (a – b).** Secador solar de madera de 5.000 pies (= 11,79 m<sup>3</sup>) de capacidad, instalado en la ciudad de La Paz. Para madera de con espesores encima de las 2 pulgadas (= 5 cm) se necesitan más de 60 días para el proceso de secado (especie: roble). Izquierda: Techo – colector. Derecha: Cámara de secado. Fuente: ECOENERGÍA FALK S.R.L.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) GATE, 1979. Instalaciones para el Secado – Informe sobre el Estado tecnológico de las Soluciones intermedias para Aplicación Rural, Cooperación Técnica Alemana, República Federal de Alemania.
- (2) Junta del Acuerdo de Cartagena y PADT-REFORT – Proyectos Andinos de Desarrollo Tecnológico en el Área de Recursos Forestales Tropicales, 1981. Tablas de Propiedades Físicas y Mecánicas de la Madera de 20 Especies de Bolivia, Lima, Perú.
- (3) Plumptre, R.A., 1988. Technical Report: A simple Guide to Timber Drying. Editor: United Nations Industrial Development Organization, Viena, Austria.
- (4) Wengert, Eugen y Oliveira, Luiz Carlos, 1987. Solar heated, Lumbre Kiln Dry Designs. Department of Forest Products, Brooks Forest Products Center, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, Estados Unidos.



## MODELO DE SERVICIOS PARA MEJORAR LA SOSTENIBILIDAD DE PROYECTOS DE ELECTRIFICACIÓN FOTOVOLTAICA MASIVA

E. Daniela Zamora Alborno- [daniela@energetica.org.bo](mailto:daniela@energetica.org.bo)  
Miguel H. Fernández Fuentes- [miguel@energetica.org.bo](mailto:miguel@energetica.org.bo)

**Resumen.** El presente artículo propone un modelo de servicios de mantenimiento y distribución de accesorios y equipos de S FV 's <sup>16</sup> para lo cual se analiza la cadena de suministros de sistemas fotovoltaicos en los 17.028 sistemas instalados por ENERGÉTICA<sup>17</sup> en las áreas rurales de los nueve departamentos de Bolivia, entre los años 1994 a 2010<sup>18</sup>. Se toman como base del análisis las fallas de los componentes y necesidades de recambio, las demandas de los usuarios por nuevos equipos, etc. Se realiza un análisis de costos de los servicios que prestan actualmente las empresas del sector y se los compara con la propuesta que promueve la generación de emprendimientos locales, que presten el servicio de atención técnica y distribución en base a un modelo de negocios que aporte a la sostenibilidad de los proyectos de electrificación fotovoltaica y, de las mismas microempresas.

**Palabras clave:** sistema fotovoltaico, modelo de negocios, empresas locales, sostenibilidad de proyectos

### 1. INTRODUCCIÓN

La electrificación rural es uno de los retos mayores que tiene que vencer Bolivia para integrar a casi 3 millones de bolivianos a los beneficios de la energía. Iluminación, acceso a radio y televisión, energía para teléfonos celulares, lectores de DVD, etc. son las demandas de las familias campesinas en zonas rurales<sup>19</sup> del departamento de Cochabamba, donde aún se utilizan mecheros, velas, linternas. Los sistemas fotovoltaicos, aptos para responder a estas demandas, son una tecnología emergente en Bolivia.

Habiendo pasado la etapa experimental, ENERGÉTICA continuará en esta gestión, incrementando las instalaciones fotovoltaicas mediante la ejecución de proyectos como el GPOBA ("Prestación de Servicios para el Suministro de Servicios de Electricidad con Sistemas Fotovoltaicos en Zonas Rurales financiados por el GPOBA y suministro de lámparas y linternas solares (Pico PV)" ) (Terrazas, 2012) y el Proyecto ECOTUR- RENOVA (Contrato Institucional Energía sin Fronteras y ENERGÉTICA), como una respuesta alternativa a la problemática de la electrificación rural para esas regiones dispersas y aisladas<sup>20</sup>.

16 SFV's es la abreviación de Sistema Fotovoltaico que es un conjunto de dispositivos, cuya función es convertir directamente la energía del sol en energía eléctrica. (Ortiz Martínez & García Montellano, 2010)

17 ENERGÉTICA es una institución boliviana, privada sin fines de lucro, que trabaja en el área rural del país, en el campo de la energía – desarrollo - medio ambiente y pobreza. Las principales áreas de trabajo son: Desarrollo Energético Rural, Recursos Naturales y Medio Ambiente, Capacitación y Promoción en Energía y, Desarrollo Institucional y Gestión Empresarial.

18 Datos extraídos del Sistema de Gestión de Calidad Institucional de ENERGÉTICA(módulo reportes) y de entrevistas con el Director Ejecutivo de ENERGÉTICA y responsables de proyecto y revisión de (Fernández, Situación Actual de los Sistemas Fotovoltaicos de Aplicación Rural en Bolivia., 2010)

19 Se realizaron encuestas a los técnicos locales de ENERGÉTICA para validar las principales demandas de los usuarios, se plasmó esto en el informe: "Informe Equipamiento Sistemas Demostrativos MEM" (Zamora, 2010).

20 Se considera región dispersa a las que no se encuentran cercanas a la red eléctrica o al Sistema Interconectado Nacional (Que!, 2012)



Sin embargo, al incrementarse las instalaciones de SFV's, se presentarán reclamos de los usuarios de estos sistemas y para atender estos reclamos, las empresas instaladoras, contratan a personas de las comunidades a quienes los capacitan en aspectos técnicos de sistemas fotovoltaicos y para atender reclamos, efectuar recambios y nuevas instalaciones en sus áreas de acción. Una vez finalizados los proyectos, estos técnicos concluyen sus contratos y vuelven a sus ocupaciones anteriores, o en algunos casos, migran, pues disponen ya de un conocimiento técnico que les permite desempeñarse en otras áreas.

Estos aspectos imponen el desarrollo de modelos de atención a los usuarios para la sostenibilidad de los proyectos.

## 2. MÉTODOS

Con el análisis de las cadenas de suministros, se pretende mostrar el funcionamiento del actual modelo de servicio de atención de reclamos de los usuarios y la distribución o recambio de accesorios o equipos que las empresas utilizan, tomando en cuenta para esto las diferentes relaciones que existen entre los actores de la cadena, de forma que se preste una atención oportuna y de calidad a los usuarios finales.

Para determinar las opciones en esta cadena, se aplicó el método de observación directa y entrevistas con los principales actores:

- Empresa mayorista
- Empresa distribuidora
- Técnicos instaladores
- Técnicos locales
- Usuarios finales

Las seis opciones al interior de la cadena se presentan en los resultados del presente artículo. Los métodos para determinar las fallas técnicas fueron:

- Revisión documental sobre la vida útil de los componentes según el tiempo determinado por la fábrica y por el tiempo de uso.
- Revisión documental del índice de FCC (Frecuencia de reposición del componente), que se presenta cuando existe un problema en algún componente del sistema fotovoltaico, el mismo que deriva en el cambio del accesorio. Esto puede deberse a fallas de fábrica, mal uso por parte del usuario o tiempo de vida útil del accesorio o componente.

El índice de frecuencia de reposición se calcula de la siguiente manera:

$$\text{FCC} = \frac{\text{Cantidad de componentes específicos cambiados} \times 100 (\%)}{\text{Cantidad de componentes específicos instalados}}$$





Este índice fue calculado en diferentes estudios de fallas de proyectos: Inti K'anchay, GEF Totorá y estudios que fueron realizados de forma interna en ENERGÉTICA de los proyectos IDTR e ISOFOTON (Suministro de Servicios de Electricidad con Sistemas Fotovoltaicos en Zonas Rurales de Bolivia), en base a datos obtenidos del Sistema de Gestión de Calidad Institucional de ENERGÉTICA (SGCI).

La determinación del tipo de fallas que se presenta se hizo mediante la revisión del SGCI de las boletas de reclamos y mantenimiento preventivo que son generados por los usuarios de los Proyectos IDTR, Inti K'anchay e ISOFOTON.

### **3. RESULTADOS**

Durante los primeros años después de instalados los sistemas fotovoltaicos no presentan problemas sensibles; pero a medida que pasa el tiempo, presentan fallas técnicas, algunas ocasionadas por los usuarios, y otras propias de la tecnología. Por tanto, para responder de forma rápida a la atención de estas fallas es necesario emplear una estrategia de respuesta.

En ese sentido las instalaciones cuentan con servicios de mantenimiento y garantías durante el tiempo que dura el proyecto, sin embargo ello no asegura su sostenibilidad. En el presente trabajo analiza brevemente el modelo de servicios basados en una cadena de suministro donde intervienen las empresas instaladoras, los técnicos instaladores y técnicos locales que brindan el servicio de operación y mantenimiento.

Así mismo se analizan alternativas en caso de tener que desarrollar un modelo de negocios basados en el ingreso de empresas privadas con base urbana o el apoyo a la creación de emprendimientos locales, vale decir de tipo rural que fortalezcan la actual cadena de suministro y contribuyan a mejorar la sostenibilidad de la tecnología, y mejorar la calidad de los servicios a los usuarios finales.

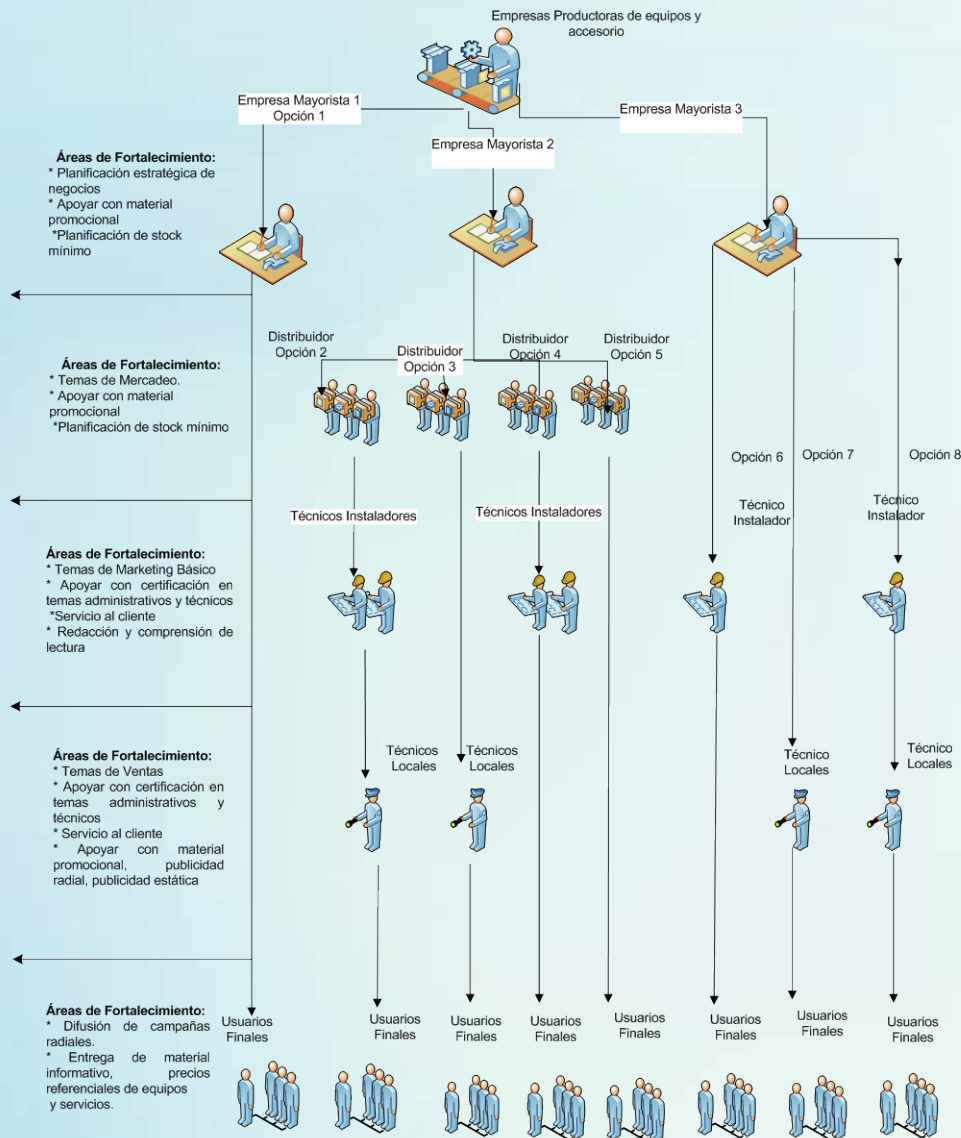
Este estudio demuestra la necesidad de contar con personal técnico encargado de la prestación de servicios de mantenimiento y de distribución de accesorios y equipos, en campo. El actual modelo basado en empresas y técnicos que tienen una base urbana, es aplicable solo durante el tiempo que se ejecutan los proyectos.

Analizando el actual modelo de gestión de reclamos, se pudo evidenciar que en el proceso de comercialización existen varias opciones de eslabones, que varían de acuerdo a las características geográficas, demográficas, psicográficas, el tamaño del segmento de mercado de instalaciones realizadas, la importancia de cada uno de los mercados que se atienden, etc.

Se cuenta con al menos ocho opciones de procesos, dentro una misma cadena de suministro, como se puede observar en la imagen de la próxima plana.



**Figura 1. Opciones de comercialización en la cadena de suministros**



*Fuente: Elaboración propia con base en el método de observación.*

Analizando el actual modelo de gestión de reclamos, se evidenció que en el proceso de comercialización existen varias opciones de eslabones, que varían de acuerdo a las características geográficas, demográficas, psicográficas, el tamaño del segmento de mercado de instalaciones realizadas, la importancia de cada uno de los mercados que se atienden, etc.

Se cuenta con al menos ocho opciones de procesos, dentro una misma cadena de suministro, como se puede observar en la Figura 1.



Al presentarse estas diferentes opciones de comercialización de los accesorios y repuestos de los sistemas fotovoltaicos, los principales problemas que se presentan son:

- el período de atención que transcurre desde que el usuario presenta su reclamo o demanda un cambio de accesorio que suele tomar mucho tiempo.
- el stock de accesorios entregado por las empresas mayoristas a los técnicos locales e instaladores no es la adecuada ante la demanda de mercado<sup>21</sup>.

Una vez analizada la cadena de suministro y las diferentes opciones que actualmente presenta el mercado de fotovoltaicos, se pretende realizar un análisis de alternativas de atención a los usuarios, considerando la participación de empresas que tienen base el área urbana vs. el fortalecimiento y creación de emprendimientos locales; en base a esto se puede realizar una simulación de modelo de negocio.

### **Análisis de alternativas de costos**

Para este análisis de alternativas, se realiza una comparación de costos entre las empresas con base urbana y las empresas con base rural, esto se puede observar en el siguiente cuadro:

Empresa privada/costo por técnico*		Empresa local /costo técnico	
Detalle	\$us Total	Detalle	\$us Total
Sueldo	120	Sueldo	120
Seguros	50	Seguros	0
Viáticos 15 días	91	Viáticos	0
Ropa de trabajo	65	Oficina	14
Caja de herramientas	42	Moto	30
Capacitación corta	42	Gasolina	50
Gasolina	450	Aceite	20
Movilidad	300	Reparaciones moto	20
Material de escritorio	4	Comunicaciones	11,3
Comunicaciones	11	Papeles y otros	4
<b>Total</b>	<b>1.176</b>	<b>Total</b>	<b>269</b>

**Tabla 1: Análisis de alternativas de costos/mes**

\*Para el cálculo de los costos, se considera en este caso 15 días de trabajo en campo distribuidos en 1 mes.

Esta comparación de alternativas indica que:

- La promoción de empresas privadas en el área rural representa un alto costo logístico y de atención a los reclamos, en relación al establecimiento de emprendimientos locales cuyo costo es alrededor del 50% más bajo que el de las empresas privadas. Se debe tomar en cuenta el tiempo de atención tanto del servicio de mantenimiento como de los reclamos y reposición de accesorios; el tiempo que transcurre entre que la empresa recibe el reclamo y realiza la atención, el costo que representa para los usuarios esta espera y el costo de comunicación que el usuario tuvo que realizar, lo cual se reduce al tener un negocio local que atienda directamente a los usuarios de las comunidades, de

<sup>21</sup> Entrevistas realizadas a los técnicos locales "Informe Equipamiento Sistemas Demostrativos MEM" (Zamora, 2010)





manera inmediata o en períodos de tiempo mucho más reducidos que el empleado por las empresas privadas.

- Dada la dispersión de las viviendas de los usuarios, resulta poco atractiva la inversión de empresas privadas urbanas para atender a este sector.
- Las tarifas de los servicios de mantenimiento y de los accesorios de una empresa privada del área urbana podrían diferir dado que los ingresos deberían cubrir los costos y generar una utilidad, lo cual resulta ser poco rentable. Por el contrario, las pequeñas empresas locales pueden generar ingresos adicionales que a la vez cubren sus costos y generan una utilidad mucho más atractiva que las de las otras empresas.
  - Los conocimientos sobre la vida en área rural, también son una diferencia sustancial entre ambas alternativas de empresas.
  - La generación de microempresas locales se justifica debido a que se puede observar cambios a escala de la comunidad.
  - La generación de nuevos ingresos para microempresarios locales coopera con el desarrollo local de las comunidades.

### ***Modelo de negocio***

Un modelo de negocio (también llamado diseño de negocio) es el mecanismo por el cual se generan ingresos y beneficios. Es un plan de cómo un negocio planifica servir a sus clientes. Implica tanto el concepto de estrategia como el de implementación.

Considerando las cifras de las instalaciones que se han indicado líneas arriba, así como la estimación de cantidades de reposiciones esperadas, se puede concluir que existe un mercado potencial sin explorar, que podría ser atendido por actores locales como son los técnicos que actualmente atienden el mantenimiento de proyectos. La permanencia de los proyectos en las comunidades, con periodos de 2 a 4 años, es coincidente con el tiempo de garantía de los accesorios y equipos (también de 2 a 4 años). Pasado ese periodo, en prácticamente todos los casos, micro empresas locales podrían comenzar a atender a los usuarios y prestar sus servicios, generando utilidades en su negocio, mismas que en los siguientes años se apreciarán con mayor claridad.

Así mismo y considerando que existe una cobertura de electricidad rural del 50.8% a nivel nacional y que una de las metas del actual gobierno es llegar al 70% de cobertura eléctrica rural hasta el año 2015<sup>22</sup>, existe un mercado de usuarios potenciales puesto que las estimaciones existentes calculan que aún se pueden instalar cerca de 200.000 sistemas fotovoltaicos familiares en los próximos 15 años (Fernández, 2010 a). Este hecho justifica la creación de pequeñas empresas, debido a que sus ingresos no estarán limitados a los proyectos actuales, si no a la existencia de demanda aún insatisfecha de energía en el área rural, lo que representa un mercado potencial importante.

Habiendo realizado un test de marketing de los accesorios y equipos más demandados por los usuarios y tomando como referencia varios análisis<sup>23</sup> de fallas de componentes, a continuación se presenta una estimación de los productos demandados, sus precios y los posibles márgenes de utilidad.

<sup>22</sup> Plan Electricidad para vivir con dignidad. VMEEA, 2006

<sup>23</sup> Análisis de Fallas (GEF Tarija, EASE). (Terrazas, 2010)



En el caso de los servicios de operación y mantenimiento el margen de utilidad es el 100%, porque es un servicio que prestarán directamente los técnicos locales, en el caso de los demás productos el margen es variable, debido a que deben ser adquiridos de la empresa mayorista que fija un porcentaje de comisión de venta. Tomando como base estos productos, a continuación se presentan los ingresos, atendiendo un promedio de 200 usuarios año.

Producto	Precio Unitario Bs	Margen utilidad
Agua destilada	3	2
Lámparas	90	10%
Baterías	1200	8%
Fusibles	1.5	0.5
Cargadores de celular	10	5
Televisores	420	8%
Lector de DVD	600	8%
Cargado de baterías	30	70%
Servicios O & M	60	100%
Equipo SFV	4.200	8%
Biodigestores	1.750	8%

**Tabla 2:** Productos mayormente demandados

Fuente: Elaborado en base a Modelo de Negocios (EASE, 2008)

Nota: El tipo de cambio de bolivianos a dólares de 1 \$US = 6.96 Bs.

En el caso de los servicios de operación y mantenimiento el margen de utilidad es el 100%, porque es un servicio que prestarán directamente los técnicos locales, en el caso de los demás productos el margen es variable, debido a que deben ser adquiridos de la empresa mayorista que fija un porcentaje de comisión de venta. Tomando como base estos productos, a continuación se presentan los ingresos, atendiendo un promedio de 200 usuarios año (Tabla 3).

Ingresos	Cantidad	Und.	Margen Bs	Total Bs
Agua destilada	140	litros	2	280
Lámparas	150	und	9,6	1440
Baterías	50	und	96	4800
Fusibles	200	und	0,5	100
Cargadores celular	20	und	5	100
TV Color	10	und	33,6	336
Lector DVD	10	und	48	480
Baterías	40	cargas	21	840
Servicios de O&M	30	visitas	60	1800
Venta equipos FV	2	SFV	336	672
Venta biodigestores	2	und	140	280
<b>Total ingresos Bs</b>				<b>11.128</b>
<b>Total ingresos \$US</b>				<b>1589,71</b>

**Tabla 3:** Ingresos anuales atendiendo a 200 usuarios/ año

Fuente: Elaborado en base a Modelo de Negocios (EASE, 2008)

Para este caso, los costos anuales en los que incurre la micro empresa, dedicando un tiempo parcial al negocio se detallan en la Tabla 4.

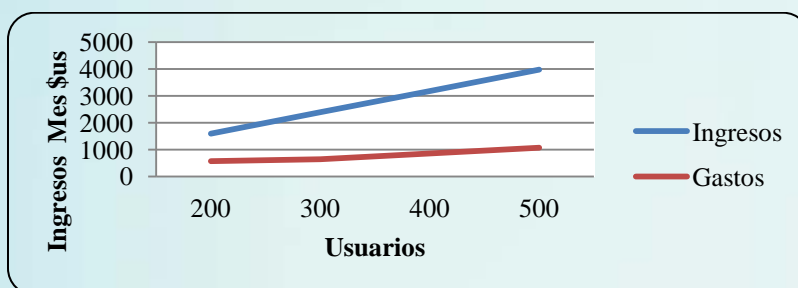


Gastos	Meses	PU \$US	Total \$US 200
Oficina	6	4	24
Moto	6	30	180
Gasolina	6	20	120
Aceite	6	4	24
Reparaciones moto	1	50	50
Comunicaciones	12	10	120
Papeles y otros	12	4	48
	<b>Total</b>		<b>566</b>

**Tabla 4:** Costos aproximados de funcionamiento, atendiendo a 200 usuarios/año  
Fuente: Elaborado en base a Modelo de Negocios (EASE, 2008)

En resumen, si se tiene ingresos por 1589.71 \$us y costos anuales de 566 \$us, se dispone de una utilidad anual de 1023.71 \$us.

En caso de que se incremente la atención a más usuarios se tendría el resultado del modelo de negocio que se plantea en el Gráfico 1:



**Gráfico 1.** Ingresos vs. Egresos en función del número de clientes  
Fuente: Elaborado en base a Modelo de Negocios (EASE, 2008)

La existencia de una demanda potencial de atención y de recambio de equipamiento para los SFV's, el análisis de la cadena de suministros que busca dotar de un buen servicio de energía al usuario final y el análisis de costos realizado, permiten plantear la necesidad de apoyar la creación de emprendimientos locales denominados MEM (Microempresas de Mantenimiento), teniendo como base a los técnicos locales actuales de las empresas, quienes tienen el conocimiento y la experiencia en el tema de Sistemas Fotovoltaicos y atención al cliente rural.

El nuevo modelo de gestión administrativa debería reflejarse como detalla la Figura 2.



**Figura 2.** Cadena de suministro con participación MEM  
Fuente: Elaboración propia con base en el método de observación.





En este caso, se contaría con cuatro eslabones para llegar al usuario final aunque es necesario generar mecanismos de difusión y estrategias de posicionamiento de estos actores dentro el mercado.

En este sentido las MEM's prestarían servicios de:

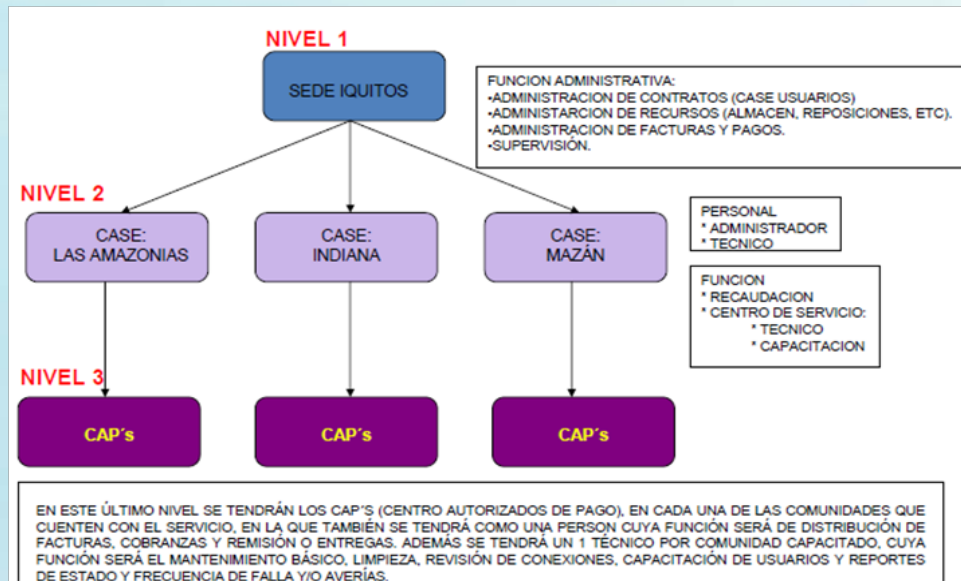
- Reparación y mantenimiento de los SFV.
- Diversificación de la oferta mediante la introducción de equipos complementarios como ser televisores, lectores de DVD, radiograbadoras y similares que funciones a 12 V.
- Distribución de accesorios como ser lámparas, reguladores, fusibles, etc. propios de un SFV.
- Servicios de ampliación de puntos de energía en instalaciones ya existentes.
- Servicios de distribución de agua destilada, carga de celulares, baterías.
- Promocionar nuevas tecnologías mediante la inserción de nuevos productos en el mercado, relacionados siempre con energías renovables.
- Instalación de SFV's, biodigestores, cocinas, termosolares, etc., previa formación técnica, de los microempresarios locales.

Estos emprendimientos dependerían de las empresas ya existentes, vale decir SIE, APLITEC, SERVITECSOL y otras, de forma que sean considerados como distribuidores de las mismas. La importancia de contar con el apoyo de estas empresas radica en que, desde su instalación, estas pequeñas empresa puedan contar con un stock de material y equipo que les sea entregado en consignación por las grandes empresas, hasta que generen un capital de trabajo. Este es un aspecto clave, pues las grandes empresas ya conocen a los técnicos locales.

Para la distribución del mercado -y no crear una competencia entre éstas-, cada MEM, representada por un técnico local cuenta ya con un área de intervención que incluye un bolsón atractivo de usuarios por encima de 300 usuarios, hecho que convierte en aplicable este modelo de negocio. Así mismo, con el desarrollo de estos emprendimientos se generaría una red de microempresas solares a nivel nacional, que permitiría promocionar la tecnología de energías renovables, difundir su existencia en el área rural, mejorar su uso y lograr la sostenibilidad de los proyectos.

#### **4. DISCUSIÓN**

Para el planteamiento del modelo de servicio se estudiaron modelos de gestión administrativa de proyectos fotovoltaicos en otros países, especialmente de Perú y Nicaragua. En el caso de Perú (Piura y Loreto) se aplicó la gestión administrativa "basada en el desarrollo de pequeñas empresas locales, con los cuales contratan parte de la gestión, operación y mantenimiento de los sistemas eléctricos rurales convencionales. Estas pequeñas empresas, conocidas como CASEs (Centros de Autorizados de Servicio Eléctrico) constituyen el medio más eficiente de operar económicamente los sistemas eléctricos rurales que tienen las empresas de distribución y ofrece un abanico de oportunidades para la operación de los SFVs." (República del Perú). La organización de estos Centros de Servicio está definida de acuerdo a lo expuesto en la Figura 3.



**Figura 3.** Gestión administrativa de los CASE en Perú.

Fuente: (República del Perú)

En el modelo propuesto en este artículo, las MEM's estarían al nivel de las CAP's, que son las que directamente brindarían la atención al usuario final; además, siendo que las CASES se encontrarían en el nivel de las empresas mayoristas, la gestión administrativa estaría a su cargo; es decir, estarían encargadas de proveer los accesorios de reposición (reguladores, convertidores, baterías, fusibles, luminarias, conductores), productos como ser paneles solares, radio grabadoras DVD, etc. El servicio de mantenimiento sería provisto directamente por los técnicos locales (MEM's).

A diferencia de esta experiencia en Perú, en los proyectos de SFV's ejecutados por ENERGÉTICA no hay una base tarifaria, las únicas tarifas son las de servicios de mantenimiento que están definidas por las empresas mayoritarias.

En el caso de Nicaragua y Ecuador, el modelo de gestión administrativa para lograr la sostenibilidad de los proyectos de sistemas fotovoltaicos, está definido por la creación de micro empresas pertenecientes a las comunidades.

Para contribuir con los costos de inversión se recurre a mecanismos de participación comunitaria; ejemplo de ello es el proyecto ejecutado por el Grupo FENIX (Grupo voluntario del Programa de Fuentes Alternas de Energía de la Universidad Nacional de Ingeniería) en la comunidad de Sabana Grande en Somoto, donde un grupo de mujeres se organizaron con el nombre de Mujeres Solares. (Blanco, Salazar, & Salazar, 2009).

En estas experiencias mencionadas anteriormente se plantea también la posibilidad de crear cooperativas de servicios, opción que no parece factible para el caso de las MEM's, debido a que los técnicos locales se encuentran dispersos en los nueve departamentos, hecho que impediría una organización administrativa adecuada.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Alternativas, M. d. (2006). Plan Electricidad para vivir con dignidad. La Paz.
- (2) Blanco, N., Salazar, O., & Salazar, E. (08 de 2009). Modelo de administración de proyectos de electrificación. Modelo de administración de proyectos de electrificación . Facultad de Electrotecnia y computación, Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).
- (3) Fernández, M. (2010a). Rol e impacto socio económico de las energías renovables en el área rural de Bolivia. CEDLA. Plataforma Energética. La Paz.
- (4) Fernández, M. (2010b). Situación Actual de los Sistemas Fotovoltaicos de Aplicación Rural en Bolivia. Cochabamba.
- (5) Ministerio de Hidrocarburos, V. M. (2006). Plan Electricidad para vivir con dignidad. La Paz.
- (6) Ortiz Martínez, G., & García Montellano, E. (2010). Energía Solar Fotovoltaica. [http://www.todo-solar.com.mx/pdf/docs\\_tecnicos/fotovoltaico.pdf](http://www.todo-solar.com.mx/pdf/docs_tecnicos/fotovoltaico.pdf). México.
- (7) República del Perú, M. d. (s.f.). <http://perusolar.org>. Recuperado el 04 de 03 de 2012, de <http://perusolar.org/16-spes-taller/EXPOS%20TALLER%20ER%20AREQUIPA.pdf>
- (8) (Que!, 2012) <http://www.que.es/>. Recuperado el 18 del 09 de 2012, de [http://esto.xn--qu-cja.es/ultimas-noticias/internacionales/201205011832-transportadora-electricidad-nombre-empresa-afectada-cont.html?anker\\_2](http://esto.xn--qu-cja.es/ultimas-noticias/internacionales/201205011832-transportadora-electricidad-nombre-empresa-afectada-cont.html?anker_2)
- (9) Terrazas, E. (2012). [borradorum.blogspot.com](http://borradorum.blogspot.com). (l. d. fotovoltaica, Productor) Obtenido de <http://borradorum.blogspot.com/2011/11/inicio-del-proyecto-gpobaelectrificacio.html>
- (10) Terrazas, H. (2010). Comportamiento de la ocurrencia de fallas en sistemas fotovoltaicos domésticos instalados en el Departamento de Tarija (Proyecto GEF/BOL/97/G31 Tarija). Cochabamba: Universidad Mayor de San Simón.
- (11) Zamora, E. D. (2010). Informe Equipamiento Sistemas Demostrativos MEM. ENERGÉTICA, Cochabamba.





## OPTIMIZACIÓN DE LA EFICIENCIA DE PANELES FOTOVOLTAICOS A TRAVÉS DEL CONTROL DE LA TEMPERATURA – RESULTADOS PRELIMINARES

**Omar Ormachea** – [oormachea@upb.edu](mailto:oormachea@upb.edu)

(Universidad Privada Boliviana, Centro de Investigaciones Ópticas - CIO)

**Augusta Abrahamse** – [aabrahamse@gmail.com](mailto:aabrahamse@gmail.com)

(Universidad Privada Boliviana, Centro de Investigaciones Ópticas - CIO)

**Diego Molina** – [dimolmen@gmail.com](mailto:dimolmen@gmail.com)

(Universidad Privada Boliviana, Centro de Investigaciones Ópticas - CIO)

**Resumen.** *El presente trabajo de investigación tiene por objeto el estudio del efecto de pulverizar agua sobre la superficie de un panel fotovoltaico convencional en funcionamiento, mediante un atomizador para controlar la temperatura y mantenerla constante. Se realizaron medidas de potencia en circuito abierto de un panel de 55 W<sub>p</sub> de la marca ZYTECH manteniendo la temperatura prácticamente constante a un valor medio de 33°C; se recopilaban datos durante un día entero obteniendo un aumento medio en la eficiencia del panel fotovoltaico de aproximadamente 5,6 % en los valores de potencia medidos. Estos datos se compararon con un panel fotovoltaico de características similares que no fue enfriado. Ambos paneles fueron orientados al norte geográfico encontrándose ambos en predios de la Universidad Privada Boliviana.*

**Palabras clave:** *energía solar, eficiencia energética, paneles fotovoltaicos.*

### 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se realizan grandes esfuerzos para el desarrollo de nuevos procesos de fabricación de células fotovoltaicas (Algora et al. 1996, Carey et al. 2009) y se exploran activamente nuevos métodos para el incremento de la eficiencia de estos sistemas (Abdolzadeh et al. 2009, Strumpel et al. 2007, Klampaftis et al. 2009), como consecuencia del alza de precios de los combustibles fósiles y la polémica internacional relativa al calentamiento global.

El aprovechamiento óptimo del espectro solar en sistemas fotovoltaicos (SFV), se ha ido desarrollando de manera activa en los últimos años. Se está trabajando en el desarrollo de nuevos materiales que competirán con los elementos más conocidos como son el silicio y el GaAs, tal es el caso del llamado black-silicon, que tiene una respuesta óptica mucho más amplia que los elementos mencionados, pudiendo utilizar el espectro solar en el rango de 300 nm a 1700 nm (Carey et al. 2009).

Se tiene además tres direcciones importantes de investigación que buscan aumentar la eficiencia de las células fabricadas con silicio, a través de técnicas basadas en un aprovechamiento más efectivo del espectro solar. Estas son: *Down-conversion*, técnica que permite dividir un fotón de alta energía en dos fotones de menor energía; *Foto-luminiscencia*, que consiste en el corrimiento o desplazamiento de los fotones de la radiación solar a una región de longitud de onda que es mejor aceptada por la célula solar; y *Up-conversion*, que combina fotones de baja energía para dar lugar a fotones de alta energía (Strumpel et al. 2007, Klampaftis et al. 2009).



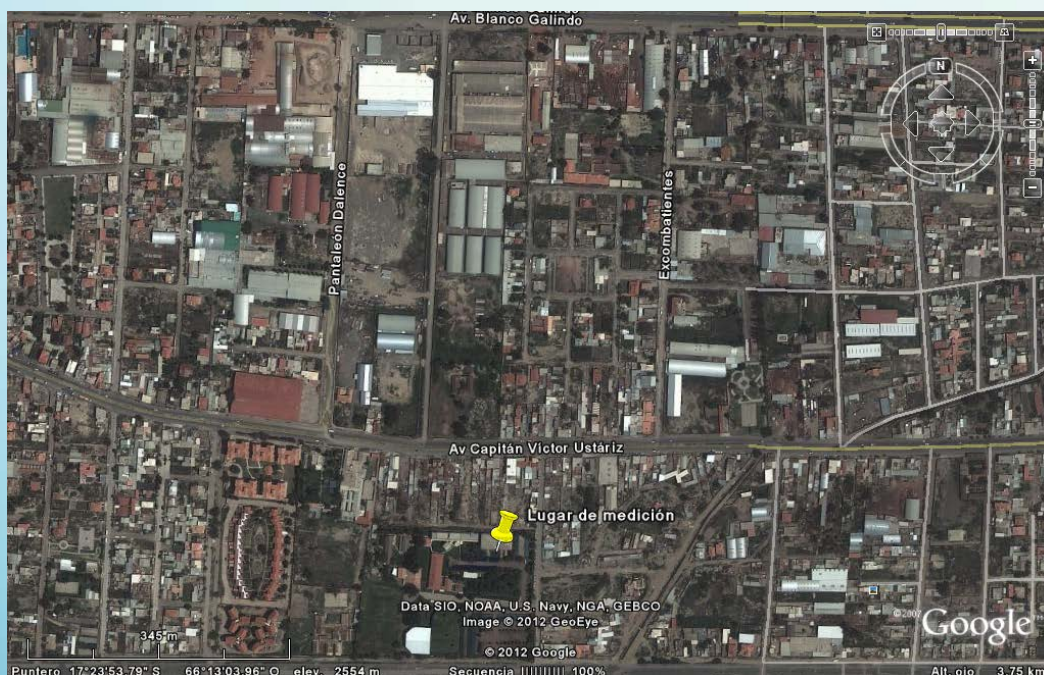
La importancia del estudio de técnicas y métodos para incrementar la eficiencia de paneles solares está no sólo en su extensa aplicación científica, sino también en las aplicaciones prácticas para aumentar la producción de la energía eléctrica llamada *green energy*, que en un futuro cercano, se posicionará establemente como una alternativa limpia al uso de combustibles fósiles, tomando en cuenta las nuevas normativas y leyes que se aplican actualmente en el mundo (CYTED 2009).

Uno de los parámetros fundamentales que influyen en la eficiencia y la vida útil de estos elementos es la temperatura. En los SFV, la eficiencia de los mismos decrece con el aumento de la temperatura e.g. en el caso del silicio se tiene un  $dV/dT = -2,09 \text{ mV/oC}$  y para el GaAs  $dV/dT = -1,76 \text{ mV/oC}$ , lo que significa que la influencia de la temperatura es tal que las células solares de Si pierden 2,09 mV por cada grado de aumento de temperatura, en tanto que las de GaAs pierden 1,76 mV (Algora et al. 1996). Generalmente, los paneles solares tienen parámetros óptimos de funcionamiento que garantizan una vida útil muy larga (40 años), sin embargo, en situaciones reales, estos parámetros, fundamentalmente la temperatura, están muy por encima de los parámetros óptimos.

El objetivo de este estudio es investigar el efecto de pulverizar agua encima de la superficie de un panel fotovoltaico convencional, mediante un atomizador para reducir la temperatura y mantenerla constante, y realizar medidas de potencia en función de la temperatura.

## 2. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El experimento se realizó en el campus Cochabamba de la Universidad Privada Boliviana. Las condiciones del lugar y clima permitieron realizar medidas sin sombra, desde las 9:00 hasta las 17:00. La posición del sector donde se realizaron las medidas fueron ( $17^{\circ}23'53.79''\text{S}$ ;  $66^{\circ}13'03.96''\text{O}$ ) y a una altitud de 2554 msnm (ver Figura 1).



**Figura 1.** Fotografía de la posición geográfica, donde se realizaron las medidas





Los datos fueron obtenidos preliminarmente el viernes 7 de septiembre de 2012, en un día completamente despejado, sin nubes como se puede ver en la Figura 2, donde se presentan fotografías de como se veía el cielo en el lugar de *medida*.

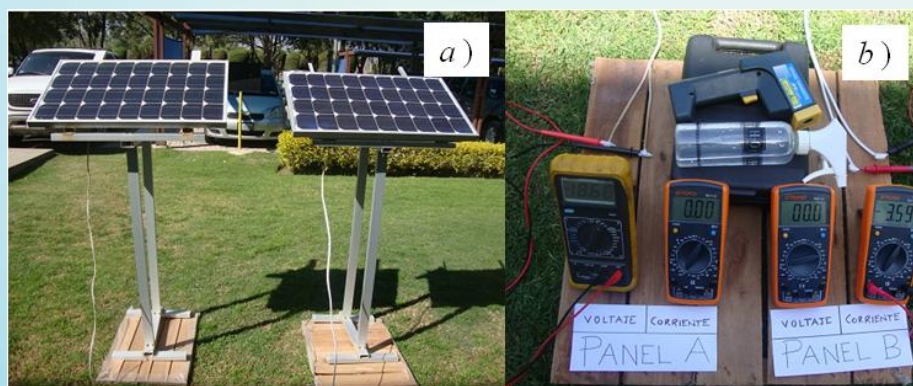


**Figura 2.** Fotografía del estado del día desde el punto de medición de los parámetros de potencia.

El esquema utilizado en el presente trabajo fue el de circuito abierto, donde se tomaron datos de corriente y voltaje para la obtención de la potencia producida por cada panel utilizado. Se configuró un arreglo de 2 paneles fotovoltaicos de silicio idénticos, modelo ZT55S de 55 Wp de potencia, voltaje en circuito abierto 21,7 V, corriente en short-circuit 3,85 A a 1000W/m<sup>2</sup>, según datos del fabricante.

Para monitorear los datos con control de temperatura a través de pulverización de agua se denominó a uno de los paneles como (Panel A) y sin pulverización de agua (Panel B). La pulverización de agua en el Panel A se efectuó mediante un atomizador doméstico.

El monitoreo de voltaje y de corriente se realizó utilizando 4 multímetros digitales, y la medición de temperaturas con un termómetro infrarrojo (Figura 3). La orientación de los paneles fue en dirección norte, geográfica, y una inclinación de 30° respecto a la horizontal.



**Figura 3.** Fotografía del sistema conformado (a) y los elementos de medición utilizados (b).

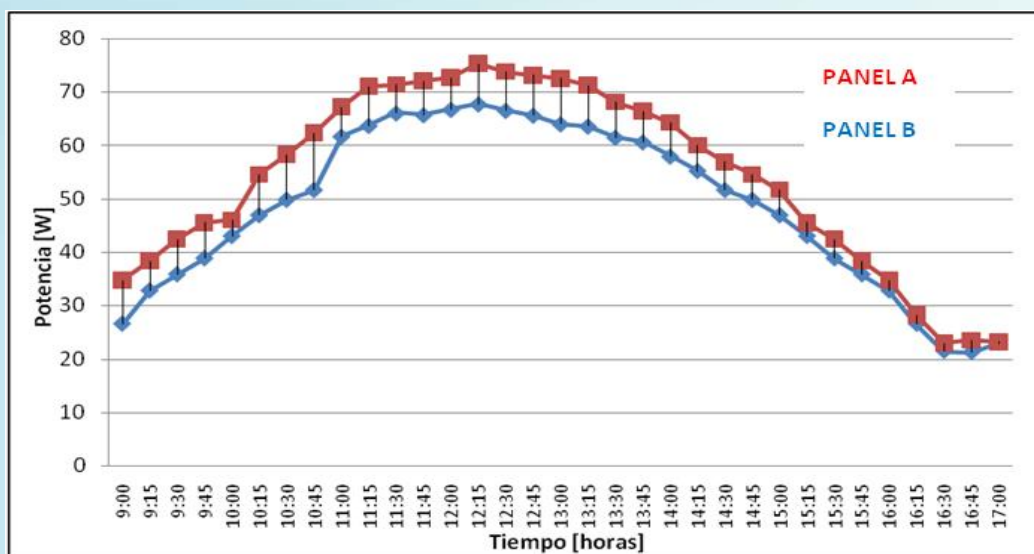
La recopilación de datos se realizó cada 15 minutos, el Panel B sin modificación de temperatura y manteniendo la temperatura del Panel A en un rango de 32-34°C, a través de la pulverización del agua. Esta temperatura fue la que se obtuvo con una frecuencia de pulverización indicada arriba.





La temperatura del agua que se utilizó a condiciones ambientales normales medida fue de un rango de 18,5 – 20°C, la temperatura inicial tomada del grifo y la segunda después de nivelarse por efectos de convección con el aire ambiental. Se utilizó también una probeta graduada de 500 ml para obtener un aproximado del volumen de agua necesaria para mantener la temperatura del Panel A en el rango indicado.

En la figura 4, se presentan los resultados preliminares de este trabajo de investigación, donde podemos observar el comportamiento de la potencia en función del tiempo para un día entero de adquisición de datos para el sistema descrito anteriormente. Analizando la gráfica obtenía se tiene un incremento en la eficiencia del panel solar de 5,62% en promedio en el día y un incremento de potencia instantánea a las 12:15 horas del 11,1%.



**Figura 4 .** Comparación de potencia durante el día entre los paneles A y B.

En la Figura 5, se presenta la relación de la temperatura de ambos paneles en función de las horas del día. Se puede apreciar que la temperatura del panel A se mantuvo prácticamente constante a diferencia del panel B que no fue enfriado por el proceso de pulverización con agua.



**Figura 5.** Comportamiento de la temperatura del sistema en función del tiempo



### 3. CONCLUSIONES

En el presente trabajo de investigación se logró demostrar que se puede obtener un incremento en la eficiencia de sistemas fotovoltaicos, a través de un control simple de la temperatura de estos sistemas. El control propuesto se basa en la pulverización de agua mediante atomizadores domésticos convencionales. Se logró mantener la temperatura de un panel de marca ZYTECH de 55Wp a un nivel medio de 33°C y un incremento en su potencia media de 5,6%, en el punto máximo de irradiancia solar se midió un valor instantáneo en la potencia de 11,1%. Se demostró que con métodos sencillos es posible tener un incremento en la eficiencia de los SFV.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) C. Algora et al., Células solares de semiconductores III-V para la generación de electricidad a costes competitivos, REF, (Enero-Marzo 1996), pp. 32 - 38.
- (2) J.E. Carey, J. Sickler, Black silicon sees further into the IR, Laser Focus World, (August - 2009), pp. 39 - 44.
- (3) M. Abdolzadeh, M. Ameri, Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells, Renewable Energy, 34, (2009), pp. 91 - 96.
- (4) C. Strumpel et al., Modifying the solar spectrum to enhance silicon solar efficiency – An overview of available materials, Solar Energy Materials and Solar Cells, 91, (2007), pp. 238 - 249.
- (5) E. Klampaftis et al., Enhancing the performance of solar cells via luminescent down-shifting of the incident spectrum: A review, Solar Energy Materials and Solar Cells, 93, (2009), pp. 1182 - 1194.
- (6) CYTED, Guías de normas y protocolos técnicos para la electrificación rural con energías renovables, 2009.



## ENERGÍAS RENOVABLES PARA EL ACCESO UNIVERSAL A LA ELECTRICIDAD DE LA POBLACION RURAL DISPERSA EN EL DEPARTAMENTO DE COCHABAMBA

**Miguel H. Fernández Fuentes** – [miguel@energetica.org.bo](mailto:miguel@energetica.org.bo)

ENERGETICA - Universidad Mayor de San Simón, Bolivia / Programa de Doctorado en Energía

**Gustavo M. Rodríguez C.** – [gustavo@energetica.org.bo](mailto:gustavo@energetica.org.bo)

ENERGETICA – Universidad Mayor de San Simon, Bolivia / Maestría en Hidrocarburos CESU

**Miguel Edgar Morales Udaeta** - [udaeta@pea.ups.br](mailto:udaeta@pea.ups.br)

Universidade de São Paulo, Brasil – GEPEA / EPUSP - Escola Politécnica Grupo de Energia do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétrica

**Resumen.** Aunque se establece que para lograr el acceso universal a la electricidad en áreas rurales dispersas deberán utilizar sistemas de energía renovable, solo existen estimaciones gruesas de la cantidad de potenciales usuarios de estas tecnologías a nivel nacional. Este trabajo identifica y cuantifica la población que utilizaría estos sistemas principalmente fotovoltaicos- en Cochabamba, analizando como variable principal la expansión de redes rurales y sus límites económicos y técnicos. Se utilizan bases de datos georeferenciadas de las comunidades de todo el departamento, las que se cruzan con mapas de las redes eléctricas actuales y los proyectos en marcha. Para estimar un crecimiento de la red, se han construido escenarios de expansión en varias escalas que consideran opciones de densificación de redes, extensiones en baja tensión y extensiones de líneas en media tensión. Una vez estimada la penetración de la red, por diferencia se obtiene el alcance de los sistemas que utilizarían energías renovables, y de todo el conjunto, la inversión correspondiente. Finalmente se realizan recomendaciones sobre las fuentes renovables a utilizar de manera intensiva, así como consideraciones acerca de un modelo de gestión a emplear y políticas públicas necesarias para enfrentar este desafío de manera orientativa.

**Palabras clave:** electrificación rural, energías renovables, energía solar, sistemas fotovoltaicos

### 1. INTRODUCCIÓN

El acceso universal a los servicios básicos, entre ellos la electricidad, es un derecho de todos los habitantes bolivianos, incorporado en la nueva Constitución Política del Estado Plurinacional de Bolivia. La manera para poder alcanzar este objetivo se materializa poco a poco en diferentes planes y programas del Estado, impulsados por el Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas.

En ese contexto se tiene también constancia de que no será posible alcanzar a todos los bolivianos con las extensiones de red eléctrica y, que será necesario incorporar las fuentes de energías renovables a través de tecnologías como la fotovoltaica, eólica y micro hidráulica, entre otras, para poder abastecer de energía a las poblaciones rurales, aisladas y dispersas, más allá de los límites de la red eléctrica convencional (Cedla, 2010; Lidema, 2011)

En Cochabamba, la cobertura rural ha superado el 50% de la población (ELFEC, 2011), pero aún existe una demanda importante de población que atender, la cual puede ser cubierta por la red eléctrica de manera parcial. El resto deberá ser atendida a través de sistemas descentralizados de generación eléctrica, basados en fuentes renovables. Sin embargo para determinar el rol de las energías renovables, la primera pregunta que surge es ¿cuál es el límite





de expansión de la red eléctrica?, pues la introducción de tecnologías de energías renovables se hará en zonas y regiones donde la expansión de la red no sea factible en términos económicos y técnicos.

En ese sentido, el trabajo estima los límites de expansión del sistema convencional de electrificación rural, para calcular, por diferencia, el potencial de familias que serían atendidas con energías renovables, estimando el potencial de inversiones necesarias para cada tipo de operación (densificación de redes, extensión de redes y energías renovables en sus diferentes aspectos).

## **2. METODOLOGÍA EMPLEADA PARA EL ESTUDIO**

En la primera etapa del trabajo se ha procedido a revisar y validar las proyecciones de población realizadas por el INE (2011): para ello se contrastó la información del INE con la información de la AE (2011), y a su vez se procedió a consultar a personas clave de los municipios para reajustar las proyecciones del INE. Así se consiguió generar datos de población, número de hogares y número de viviendas para cada municipio, aunque con un alto nivel de certidumbre en la medida que se baja a cantón, localidad y comunidad.

Con la información de las memorias elaboradas por la Autoridad de Electricidad (AE), se ha estimado el número de familias que utilizan electricidad y las familias que no tienen acceso a la misma; gracias a la información geo referenciada sobre las localidades y, comparando con los mapas de las redes eléctricas de ELFEC (2011), se estimó la distancia de la red eléctrica a cada comunidad y los requerimientos necesarios para aumentar el número de conexiones a la red y/o llevar la red hasta la comunidad.

Con la información en SIG de las redes eléctricas existentes, se realizan escenarios de ampliaciones: a) 100m a 500m. Estas ampliaciones corresponden a proyectos típicos de densificación de redes (DBT); b) 500m a 1000m. En esta categoría se tiene consignados hogares agrupados en una cantidad mínima que justifique una extensión en media tensión (MT) y su correspondiente red de BT. Se ha llamado densificación en MT (DMT); c) 1000m a 5000m. En este grupo están aquellas comunidades en las que se tiene que hacer extensiones hasta de 5km de red en MT y también se considera su correspondiente red en BT. A esta categoría se ha llamado extensión en MT (EMT); d) Más de 5000 m. Se revisa si existen poblaciones importantes que podrían ser incorporadas aún en este proceso de extensión de redes a más de 5000 m de distancia de las actuales redes existentes. A esta categoría se ha llamado extensión en MT (incluye la estimación de la extensión de redes en BT).

La población rural no comprendida en estas categorías, no tendría acceso a la red eléctrica y sería atendida con sistemas descentralizados de generación eléctrica, en función del potencial renovables en la zona. Con esa información se estima el potencial de hogares susceptibles de uso de energías renovables.

A partir de esa información integrada se puede estimar los costos de conexión de usuarios en aquellas comunidades donde existe red eléctrica, y los costos de extensión de redes electrificación en las comunidades no conectadas. En todos los casos en que el costo por hogar fuera mayor a 1.200 dólares, se clasificó como un hogar viable para la aplicación de Energías Renovables.



Para la selección adecuada de las fuentes renovables a priorizarse en Cochabamba, se ha tomado como referencia los siguientes estudios: el mapa de radiación solar (Proyecto de Energía Solar - UMSS, 2010), que fue preparado usando datos meteorológicos satelitales y validado localmente con mediciones puntuales; el mapa eólico (TDE, 2008), elaborado por la consultora 3Tier y apoyo del IFC, que utilizó bases de datos, imágenes satelitales y modelos de relieve topográfico del país; el mapa de potencial hidroeléctrico de Bolivia (Ruths, 1990); y, finalmente, el mapa de productividad de biomasa (Ruths, 1990) que muestra el potencial posible a utilizar en las diferentes ecoregiones.

### **3. MARCO LEGAL PARA LA ELECTRIFICACIÓN RURAL CON ENERGÍAS RENOVABLES**

La nueva Constitución Política del Estado establece competencias en relación a las energías alternativas y renovables en los niveles del gobierno departamental y del gobierno municipal. Las competencias asignadas a estas instancias son “exclusivas” y se definen en los artículos 299, 300, 302 y 304, así, la responsabilidad para la implementación de proyectos con energías renovables (diseño, ejecución y financiamiento) recae estos dos niveles de gobierno. Si la electrificación en territorios indígenas, incluyera la utilización de fuentes energéticas renovables, las autonomías indígenas tendrían también competencias sobre estas fuentes energéticas. El artículo 378 explicita que el acceso a la energía es un derecho fundamental y esencial para el desarrollo integral y social del país y que es facultad privativa del Estado el desarrollo de la cadena productiva energética a través de empresas públicas, mixtas, instituciones sin fines de lucro, cooperativas, empresas privadas, y empresas comunitarias y sociales, con participación y control social, donde la participación privada será regulada por la ley.

El Plan Nacional de Desarrollo (DS 29272) señala que los proyectos a través de los cuales se incrementará la cobertura del servicio eléctrico son la “interconexión de sistemas aislados, la extensión de redes eléctricas, la densificación de usuarios en redes de distribución, el incremento de la capacidad de distribución eléctrica; la generación a gas natural y las energías renovables” (UCB-Jelare, 2011).

El Plan de Universalización del Servicio de Electricidad 2011-2025 (MHE, 2011), propone que “... en el área urbana, la cobertura deberá pasar del 90% (2010) al 97% en el 2015 y luego al 100% para el año 2020. En el área rural deberá pasar del 50% (2010) al 70% en el 2015, luego al 87% en el año 2020 y lograrse la universalización del servicio en el año 2025.” El Plan considera que las energías renovables lograrían una penetración del 10% en el área rural dispersa.

Finalmente, el Programa Electricidad para Vivir con Dignidad (VMEEA, 2011), plantea la extensión y densificación de la red eléctrica para atender las demandas rurales y recurrir a las energías renovables, que además están disponibles localmente. El Programa, también ha definido costos máximos por hogar, para acceder al servicio de electricidad en función al tipo de operaciones a realizarse para tal objeto, que se muestran en la Tabla 1.



Tecnología	Área Urbana	Área Rural
Extensiones de redes eléctricas	No financia	Hasta US\$ 1.200 por hogar
Densificación de redes	Hasta US\$ 600 por hogar	Hasta US\$ 750 por hogar
Energías Alternativas (solar, hidroelectricidad, eólica, biomasa entre otros)	No financia	Hasta US\$ 1.200 por hogar

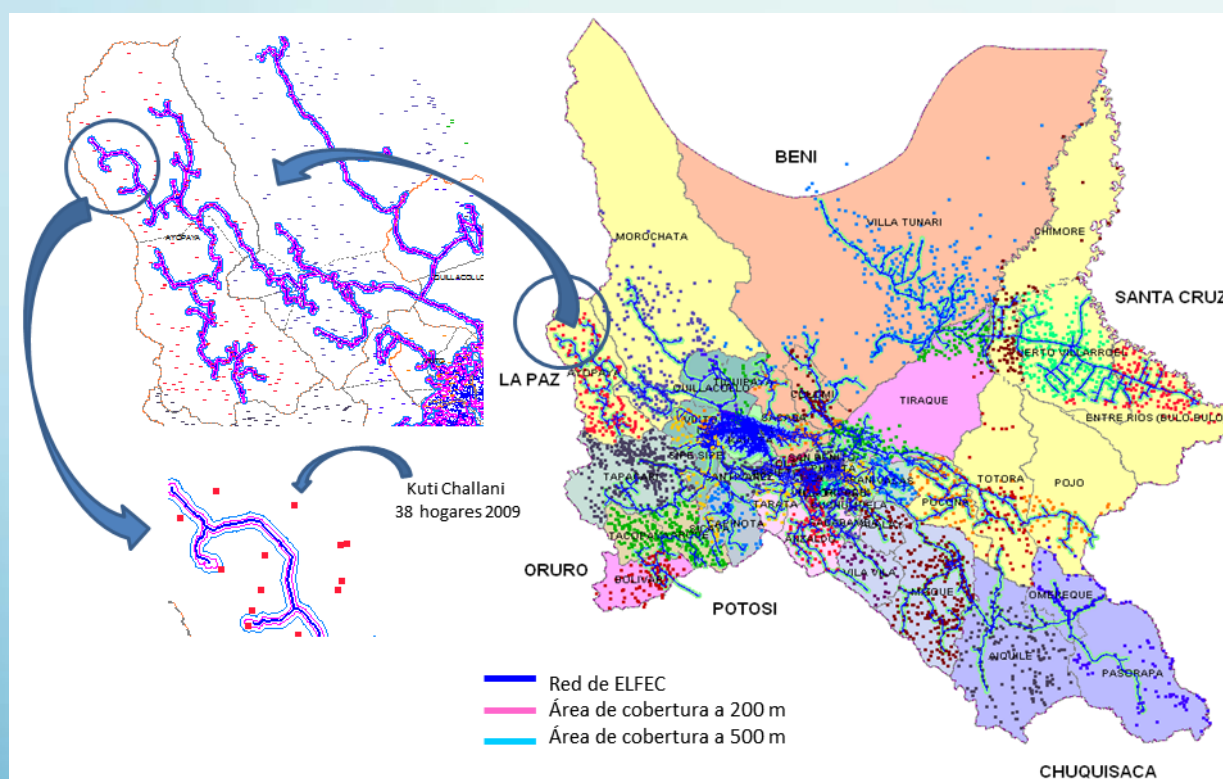
**Tabla 1.** Costos máximos de inversión por hogar del Servicio de Electricidad por tecnología  
Fuente: Programa Electricidad para Vivir con Dignidad-VMEEA

El Decreto Supremo 29635 que crea dicho Programa señala: “Componente Energías Renovables: Se refiere a la implementación de fuentes energéticas renovables y alternativas: Sistemas Fotovoltaicos, Micro Centrales Hidroeléctricas, Biomasa, Eólico. Se estima que por lo menos 180.000 hogares rurales deberán ser atendidos mediante estos sistemas descentralizados por la alta dispersión de los asentamientos”.

#### 4. ANÁLISIS DE COBERTURA ELÉCTRICA DEL DEPARTAMENTO DE COCHABAMBA

##### 4.1 Cobertura eléctrica actual departamental y municipal

La Figura 1 muestra las diferentes comunidades existentes y georeferenciadas en el Departamento de Cochabamba, de acuerdo al Censo 2001 del INE. Asimismo es posible ver la red eléctrica de ELFEC en media tensión y el alcance geográfico real que tiene. Como ejemplo se muestra el caso de la Comunidad Kuti Challani en Ayoapaya que tiene 38 familias.



**Figura 1.** Comunidades georeferenciadas y cobertura eléctrica en media tensión en Cochabamba 2010





Una primera estimación muestra que 4.283 comunidades no tienen acceso a la electricidad en el área rural de Cochabamba, y que el tamaño promedio de esas comunidades es de 37 familias. Adicionalmente la dispersión entre familias puede ser entre 100m y 500 m entre viviendas.

Tabla 2. Estimación: Cobertura Eléctrica en Cochabamba, 2010

Población estimada al año 2010:	2'005.019
Hogares estimados al año 2010:	530.910
Hogares con electricidad al 2010:	381.623
Cobertura total estimada al 2010:	72 %
Total Hogares sin electricidad al 2010	149.287

La cobertura eléctrica total para Cochabamba al año 2010, se ve en la Tabla 2, donde la estimación de hogares sin acceso a electricidad es de aproximadamente 150.000 hogares. El operador mayoritario es ELFEC con un 97% de clientes, otros operadores atienden un 2% de clientes y 1% de hogares tienen acceso a electricidad a través de sistemas fotovoltaicos.2010. Una distribución de la cobertura eléctrica por Municipio se ve en la Figura 2.

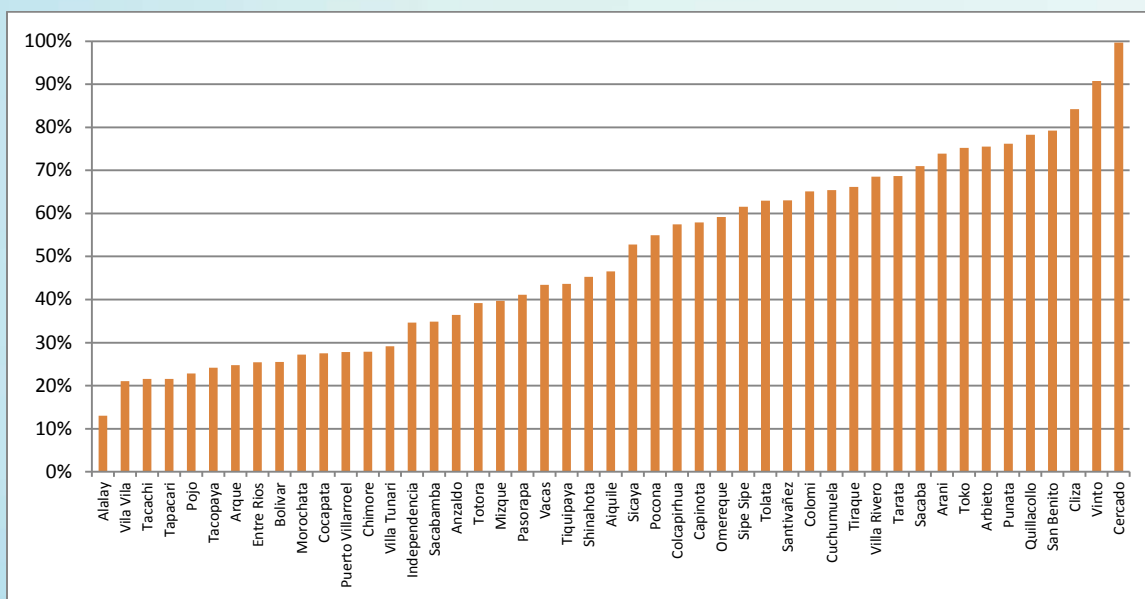


Figura 2. Cobertura municipal en Cochabamba, 2010

#### 4.2 Cobertura eléctrica y pobreza

Al cruzar la variable pobreza y cobertura eléctrica (ver Figura 3), se observa que a mayor nivel de pobreza, el grado de cobertura eléctrica es menor, salvo algunas excepciones. Esta situación muestra la necesidad de trabajar en los Municipios de menor cobertura eléctrica, desde un punto de vista de equidad. Todos los Municipios que tienen una cobertura menor al 50% tienen los índices más altos de pobreza extrema. Esto representa a 24 municipios entre los cuales destacan los del área andina y los del trópico; la Tabla 3, muestra el detalle por municipio.

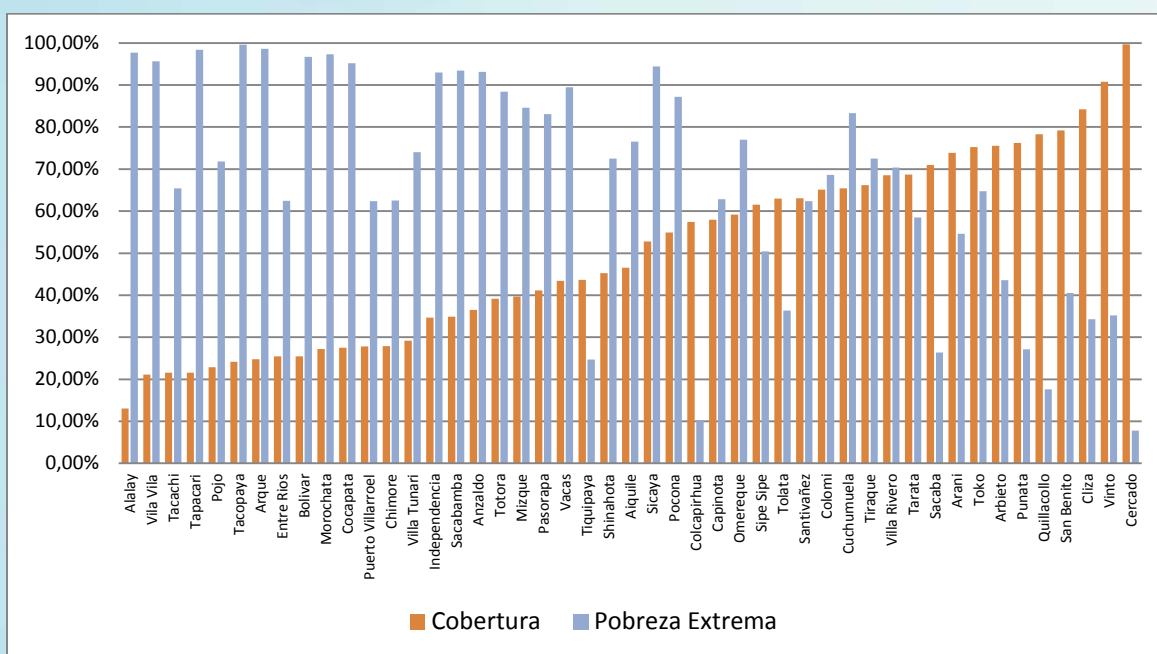


N°	Municipios	Hog2011	Viv2011	Hog c/Elect	Hog s/Elect	Cobertura	Pobreza Extrema
1	Alalay	1.421	1.745	185	1.236	13,02%	97,70%
2	Vila Vila	1.338	1.707	282	1.057	21,08%	95,60%
3	Tacachi	965	1.305	208	757	21,56%	65,40%
4	Tapacari	9.866	11.674	2.127	7.738	21,56%	98,40%
5	Pojo	4.893	7.112	1.118	3.775	22,85%	71,80%
6	Tacopaya	4.152	4.561	1.003	3.149	24,16%	99,60%
7	Arque	3.796	4.368	939	2.856	24,74%	98,60%
8	Entre Rios	10.781	12.469	2.745	8.036	25,46%	62,45%
9	Bolivar	2.912	3.129	742	2.170	25,48%	96,70%
10	Morochata	6.521	7.804	1.773	4.748	27,19%	97,30%
11	Cocapata	4.142	4.761	1.139	3.003	27,50%	95,15%
12	Puerto Villarroel	16.064	19.142	4.471	11.593	27,83%	62,40%
13	Chimore	6.618	8.080	1.847	4.771	27,91%	62,50%
14	Villa Tunari	16.764	20.989	4.888	11.876	29,16%	74,00%
15	Independencia	7.113	8.913	2.467	4.646	34,68%	93,00%
16	Sacabamba	1.437	2.123	501	936	34,86%	93,40%
17	Anzaldo	3.056	4.081	1.114	1.942	36,45%	93,10%
18	Totora	3.889	5.080	1.523	2.366	39,16%	88,40%
19	Mizque	8.823	11.684	3.501	5.322	39,68%	84,60%
20	Pasorapa	1.347	1.799	554	793	41,13%	83,10%
21	Vacas	4.361	6.330	1.895	2.466	43,45%	89,50%
22	Tiquipaya	24.462	28.037	10.668	13.794	43,61%	24,70%
23	Shinahota	4.775	5.463	2.161	2.614	45,25%	72,50%
24	Aiquile	7.858	9.957	3.657	4.203	46,54%	76,50%
25	Sicaya	697	792	368	329	52,77%	94,40%
26	Pocona	4.021	5.238	2.208	1.813	54,91%	87,20%
27	Colcapirhua	21.345	24.376	12.262	9.083	57,45%	10,30%
28	Capinota	4.674	5.924	2.707	1.968	57,92%	62,80%
29	Omereque	1.703	2.098	1.008	695	59,19%	77,00%
30	Sipe Sipe	12.722	15.566	7.829	4.893	61,54%	50,40%
31	Tolata	1.743	2.034	1.098	645	63,00%	36,30%
32	Santivañez	2.101	2.817	1.324	780	63,02%	62,40%
33	Colomi	5.083	6.297	3.311	1.773	65,14%	68,60%
34	Cuchumuela	546	662	357	188	65,43%	83,30%
35	Tiraque	6.012	7.260	3.978	2.033	66,17%	72,50%
36	Villa Rivero	1.855	2.281	1.272	583	68,57%	70,40%
37	Tarata	2.508	2.853	1.723	785	68,69%	58,50%
38	Sacaba	44.929	50.659	31.889	13.043	70,98%	26,40%



39	Arani	3.750	5.027	2.770	981	73,86%	54,60%
40	Toko	1.808	2.371	1.360	448	75,21%	64,70%
41	Arbieto	3.061	4.006	2.312	749	75,52%	43,60%
42	Punata	8.054	9.420	6.138	1.916	76,21%	27,10%
43	Quillacollo	38.938	44.371	30.476	8.462	78,27%	17,60%
44	San Benito	3.958	5.098	3.136	822	79,23%	40,50%
45	Cliza	5.485	6.454	4.619	866	84,21%	34,30%
46	Vinto	13.518	15.514	12.265	1.253	90,73%	35,20%
47	Cercado	185.045	196.620	184.437	608	99,67%	7,80%
Totales		530.910	610.051	370.355	160.563	69,76%	39,00%

**Tabla 3:** Cobertura eléctrica municipal 2010 y pobreza extrema en Cochabamba

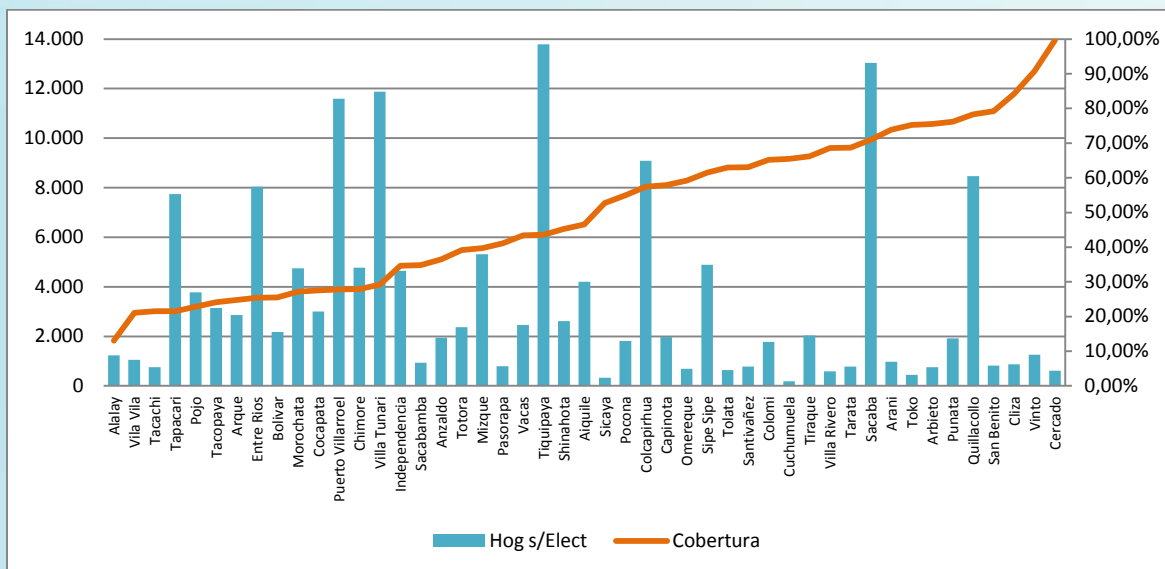


**Figura 3.** Cobertura eléctrica Vs. Nivel de pobreza por municipios, 2010

#### 4.3 Población sin acceso a la electricidad

Como se puede observar en la Figura 4, al combinar los datos de la población sin acceso a la electricidad de acuerdo al nivel de cobertura, se tiene un nivel adicional de análisis que orienta a la priorización de intervenciones en municipios con baja cobertura y gran cantidad de familias sin electricidad. En ese sentido, destacan los municipios de Tapacarí, Morochata, Independencia en la zona andina y, Entre Ríos, Villa Tunari, Chimore en el trópico. Otros municipios que destacan también son Sacaba, Quillacollo, Tiquipaya, los cuales son eminentemente urbanos.





**Figura 4.** Hogares sin electricidad Vs. Cobertura eléctrica. 2010

## 5. POBLACIÓN A ELECTRIFICAR CON REDES Y ENERGÍAS RENOVABLES

La estimación total de población a electrificar según tipo de operación (densificación en baja y media tensión, extensión de redes y energías renovables) se muestra en la Tabla 4 con un desglose municipal. En general son 160.564 hogares a electrificar, de los cuales un 66,4% serán electrificados a través de proyectos de densificación en baja tensión (106.601 hogares), un 18,5% será electrificado con energías renovables (29.847 hogares), 11,5% con extensión en media tensión (18.540 hogares), 2,1% con densificación en media tensión (3.482 hogares), y finalmente 1,3% para extensión +5.000m.

La operación que tiene impacto sobre un mayor número de hogares es la densificación en baja tensión, le sigue en orden la electrificación con energías renovables y, luego la extensión de redes en media tensión. Finalmente la extensión en media tensión de más de 5000 metros y la densificación en media tensión, cierran el cuadro total.

N°	Municipios	Densificación Baja Tensión	Densificación Media Tensión	Extensión Media Tensión	Extensión +5000	Energías Renovables	Totales
1	Cercado	608	0	0	0	0	608
2	Aiquile	1.566	101	712	349	1.474	4.203
3	Pasorapa	160	0	0	0	633	793
4	Omereque	328	0	40	0	327	695
5	Independencia	2.521	179	840	68	1.039	4.646
6	Morochata	1.606	464	1.431	448	798	4.748
7	Cocapata	1.291	184	737	255	536	3.003
8	Tarata	594	0	85	0	107	785
9	Anzaldo	1.244	58	172	0	469	1.942



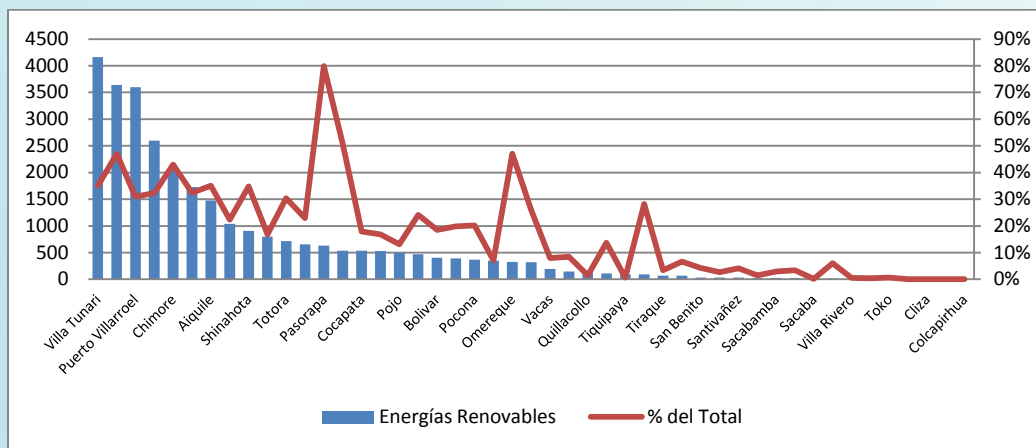
10	Arbieto	664	15	46	0	25	749
11	Sacabamba	818	50	41	0	27	936
12	Arani	884	0	32	0	65	981
13	Vacas	1.972	116	182	0	197	2.466
14	Arque	1.057	119	1.024	0	656	2.856
15	Tacopaya	1.342	212	1.064	0	531	3.149
16	Capinota	1.401	15	161	0	391	1.968
17	Santivañez	726	22	0	0	32	780
18	Sicaya	127	46	63	0	93	329
19	Cliza	866	0	0	0	0	866
20	Toko	409	14	22	0	3	448
21	Tolata	615	0	30	0	0	645
22	Quillacollo	8.242	18	72	0	130	8.462
23	Sipe Sipe	3.851	106	588	0	348	4.893
24	Tiquipaya	13.297	24	380	0	94	13.794
25	Vinto	1.153	35	31	0	34	1.253
26	Colcapirhua	9.083	0	0	0	0	9.083
27	Sacaba	12.888	28	111	0	16	13.043
28	Colomi	1.486	58	80	0	149	1.773
29	Villa Tunari	5.742	323	1.503	143	4.165	11.876
30	Tapacari	2.105	33	1.534	423	3.643	7.738
31	Totora	1.072	70	507	0	718	2.366
32	Pojo	1.733	26	1.384	135	497	3.775
33	Pocona	1.293	97	58	0	366	1.813
34	Chimore	2.008	147	417	150	2.049	4.771
35	Puerto Villarroel	6.382	170	1.444	0	3.597	11.593
36	Entre Rios	4.272	155	888	122	2.600	8.036
37	Mizque	2.061	281	1.253	0	1.726	5.322
38	Vila Vila	220	23	278	0	536	1.057
39	Alalay	346	51	519	0	321	1.236
40	Punata	1.859	30	0	0	27	1.916
41	Villa Rivero	531	49	0	0	3	583
42	San Benito	788	0	0	0	34	822
43	Tacachi	716	38	0	0	3	757
44	Cuchumuela	155	0	22	0	11	188
45	Bolivar	1.467	24	278	0	401	2.170
46	Tiraque	1.715	71	178	0	68	2.033
47	Shinahota	1.341	32	332	0	909	2.614
Totales		106.601	3.482	18.540	2.094	29.847	160.563

**Tabla 4:** Estimación de hogares a electrificar según tipo de operación

En relación a las energías renovables, se han identificado casi 30.000 hogares que tendrían suministro de electricidad a través de fuentes renovables. Cuando se analiza la cantidad de instalaciones con energías renovables a realizar por los diferentes municipios, comparando con el total de conexiones a realizar, se puede identificar aquellas regiones en las cuales, las



energías renovables significan un aporte importante a la electrificación rural, pues en muchos casos significan más del 30% del total a realizar (ver Figura 5).



**Figura 5.** Hogares a electrificar con energías renovables

Dada la diversidad existente en los municipios y los diferentes ecosistemas presentes, es posible mencionar que el recurso renovable con mayor nivel de aprovechamiento posible y tecnologías disponibles para generación de electricidad a pequeña escala y de manera competitiva, es la energía solar, a través de los sistemas fotovoltaicos. El potencial existente, prácticamente lo habilita a ser aprovechado en todo el Departamento de Cochabamba.

En segundo lugar, estarían las microcentrales hidroeléctricas como fuente recomendada para el suministro de electricidad a poblados relativamente concentrados, aunque alejados de la red. Sin embargo para esto, es necesaria la presencia del recurso hídrico y sus condiciones topográficas de aprovechamiento, a una distancia relativamente cerca de la o las comunidades a electrificar. Es decir que el sistema de canales de aducción no sea excesivamente largo y, luego que las redes de transmisión de electricidad sean lo más cortas posibles, caso contrario esta alternativa no es interesante. Este recurso podría aprovecharse de manera puntual en los municipios de la zona andina y de valles, siempre y cuando existan las condiciones mencionadas.

La energía eólica es una alternativa mucho más puntual, aunque válida en las regiones donde existe el potencial. Para esto es necesario realizar mediciones puntuales que permitan validar los indicios y valores indicativos que se pueden extraer de mapa eólico de Bolivia. La región encontrada como más apta es la de los municipios situados en la región de Epizana –Totora – Pocona.

Finalmente, la biomasa como fuente para la generación de electricidad sería recomendada para la región de trópico solamente.





## 6. INVERSIONES ESTIMADAS

En base a las distancias encontradas a la red de MT y BT es posible realizar una estimación de inversiones como se muestra en la Tabla 5 tanto para redes, como energías renovables basado en costos unitarios (Fernandez; Morales, 2011). En base a la estimación de población al 2010 se necesita poco más de 100 millones de dólares para lograr el acceso universal de electricidad a todos los habitantes del Cochabamba. Hasta el 2011 los montos comprometidos de inversión se estiman en 16 millones de dólares.

Como se observa la inversión faltante aún es de casi 84 millones de dólares, para beneficiar a 144.482 hogares que no cuentan con electricidad. La operación con mayor número de beneficiarios y también que requiere mayor inversión es la de densificación en baja tensión, que exigirá el 51% de las inversiones estimadas, pero podría llegar a dar servicio al 66% del total de hogares sin electricidad (más de 100.000 hogares), lo que muestra el proceso de urbanización a nivel de capitales de municipio y ciudades intermedias que se da. El monto es de 51,1 MM\$US.

La siguiente operación en tamaño es la atención de familias aisladas con energías renovables, representan al 20% de la población sin electricidad (casi 30.000 familias) y consumirán un 27% del total de los recursos necesarios. El monto estimado es de 26,8 MM\$US.

La tercera operación en magnitud es la extensión en media tensión a hogares que se encuentran entre 1000 y 5000 metros, son aproximadamente 18.540 hogares. El monto estimado es de 16,6 MM\$US.

La densificación en media tensión cubrirá a casi 3500 familias y exige un presupuesto de 2,7 MM\$US.

Finalmente, la última operación son las extensiones a más de 5000 m de distancia. Son 2000 familias, representan el 1% del total y una inversión de casi 2,5 MM\$US.

Concepto	N° Comunidades	Hogares a electrificar	Inversión (\$US)	Promedio inv. hogar (\$US)	Porcentaje inversión
Densificación Baja Tensión	2.130	106.601	51'168.480	480	51%
Densificación Media Tensión	120	3.482	2'785.600	800	3%
Extensión Media Tensión	365	18.540	16'686.000	900	17%
Extensión a +5000	21	2.094	2'512.800	1200	3%
Energías Renovables	1.647	29.847	26'862.300	900	27%
Totales	4.283	160.563	100'015.180		100%
Financiamiento comprometido (hasta Diciembre 2011)					
BID (Fase V)	578	14.881	15.107.758,00	1015,24	15%
GPOBA (Fotovoltaicos)		1.200	1.020.000,00	850	1%
Total comprometido		16.081	16.127.758,00		16%
Saldo por electrificar		144.482	83.887.422,00		84%

**Tabla 5:** Inversión total estimada por operación y número de beneficiarios



## 7. CONCLUSIONES

Este estudio no desarrolló un trabajo de campo específico, los resultados son producto de un modelo estadístico y que responden a criterios técnicos que deben ser validados de manera general con visitas en terreno.

Este estudio permitió evaluar de manera inicial los requerimientos de inversión del Departamento de Cochabamba, para lograr las metas del acceso universal en el área rural con energías renovables.

El análisis de cobertura realizado también debe ser considerado como indicativo, puesto que el trabajo usa las fuentes del censo 2001, y en ciertas zonas se notan distorsiones respecto, a las proyecciones realizadas. Las mismas se han intentado corregir pero siguen siendo estimaciones. Los resultados encontrados en las proyecciones de población se deben revisar en función de visitas de campo, sobre todo en aquellas zonas o municipios que parecieran tener un comportamiento anormal.

En cuanto a las diferentes fuentes de energía renovable en cada municipio, se puede recomendar de manera general a la energía solar, pues las otras fuentes dependen de la ubicación del recurso y su posibilidad de aprovechamiento por alguna comunidad cercana. Sin trabajo de campo no será posible realizar una identificación precisa de MCH's o Aerogeneradores; a pesar de ello es posible detectar zonas de manera macro, que permiten inducir a explotar uno u otro recurso.

El desarrollo de la electrificación rural a través de redes convencionales, a pesar de la magnitud que representa, es mucho más sencilla de realizar, pues existen actores, conocimientos y recursos de relativamente fácil acceso. Este no es el caso de las energías renovables, por tanto es importante concentrar esfuerzos en el desarrollo de estas energías, la consecución del financiamiento, los modelos de gestión mas apropiados, el fortalecimiento de actores y la sensibilización en general de los principales actores involucrados.

Este trabajo no debe ser tomado como conclusivo y si como indicativo de los desafíos que se tienen en el campo de la electrificación rural en Cochabamba.

## 8. RECOMENDACIONES

Una de las debilidades de los proyectos de electrificación rural y con energías renovables, es la falta de una corriente de fondos continua que permita el desarrollo de proyectos de manera permanente. En ese sentido, se debería establecer una asignación de fondos periódica que permita la ejecución de proyectos ininterrumpida. Estos recursos deberán ser financiados por el Estado (por ejemplo: IDH), créditos externos e internos, y recursos de la cooperación internacional, considerando que se debe destinar una línea de subsidios a la inversión inicial, dado los niveles de pobreza de la población beneficiaria.

Por otro lado, la electrificación rural con energías renovables adolece aún de control de calidad, por lo que es necesario que la Autoridad de Fiscalización y Control Social de Electricidad (AE) supervise el cumplimiento de las normas de calidad y los estándares de un buen servicio, incorporándolas en su sistema de monitoreo y seguimiento, pues hasta la fecha la electrificación con energías renovables se encuentra al margen de la fiscalización estatal.



Es estudiar e innovar los modelos de gestión vigentes, logrando una administración global de los sistemas de electrificación con energías renovables, evitando que los sistemas caigan en desuso ante fallas pequeñas y facilitando el acceso a la electricidad de aquellos grupos poblacionales, que a pesar de los subsidios existentes, aún no pueden acceder a la misma.

Finalmente recomendar el impulso de manera diferenciada de aquellas conexiones que van directamente a beneficiar a la población dispersa, dado el impacto que tiene en varios municipios, en cantidades absolutas. Como un dato referencial, el programa GPOBA (*The Global Partnership on Output- Based-Aid*) del Gobierno prevé en 2012 la instalación de 7.000 SFV en todo el país. Pero la demanda de Cochabamba es de casi 30.000 unidades, y solamente se destinarán a esta región 1.600 sistemas.

### **Agradecimientos**

Los autores agradecen los aportes y sugerencias del Ing. Yudin Pozo para el tratamiento de los proyectos de redes eléctricas, así como los criterios aportados para la segmentación y clasificación de la demanda georeferenciada, y la construcción del algoritmo que permite el costeo respectivo de los proyectos comunidad por comunidad en la base de datos y su discriminación en las categorías respectivas.

### **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- (1) A.E., 2011. Memoria Anual del Sector Eléctrico 2010. La Paz, Bolivia.
- (2) Cedla, 2010. Rol e impacto socio económico de las energías renovables en el área rural de Bolivia". La Paz, Bolivia.
- (3) Constitución Política del Estado Plurinacional de Bolivia.
- (4) ELFEC, 2011. Mapas de redes rurales en media tensión, informacion digital.
- (5) Fernandez, M. Morales, M, 2011. Generación de electricidad aislada y distribuida con fuentes renovables en Bolivia. Costos y barreras para su expansión. XVIII Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (XVIII- SPES), Lima, Perú.
- (6) INE, 2011. Bolivia: Proyección de la población total por quinquenios según piso ecológico, departamento y sexo, 2000 2030. La Paz, Bolivia
- (7) Lidema, 2011. Estado Ambiental de Bolivia 2010. La Paz. Bolivia.
- (8) MHE, 2011. Plan de Universalización Bolivia con Energía. Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas. 2011. La Paz – Bolivia.
- (9) Ruths, G., 1990. Planificación Energética Rural para Bolivia. MEH. La Paz, Bolivia.
- (10) Proyecto de Energía Solar- UMSS, 2010. Mapa Solar. Proyecto de Energía Solar. Cochabamba, Bolivia.
- (11) TDE, 2009. Mapa de Potencial Eólico de Bolivia. Transportadora de Electricidad. Cochabamba, Bolivia
- (12) UCB – Jelare, 2011. Marco Político Legal y Regulatorio para la Electrificación con Energías Renovables en Bolivia. Energética – UCB Jelare. La Paz, Bolivia.
- (13) VMEEA. MHE, 2009. Plan Energético Nacional 2009 – 2014. La Paz, Bolivia.
- (14) VMEEA, 2001. Programa Electricidad para Vivir con Dignidad, 2011. Memoria Anual 2009. 2010. La Paz-Bolivia.





## EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA INDUSTRIA. CICLO ORGÁNICO RANKINE PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE CALOR RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DEL CEMENTO

**Alonso Ojanguren**, Laura (1); **Bruno**, Joan Carles (2), **Maiztegi Eriz**, Asier (1)  
**Coronas**, Alberto (2).

[laura.alonso@tecnalia.com](mailto:laura.alonso@tecnalia.com)

(1)TECNALIA, División de Energía y Medioambiente, TECNALIA Research and Innovation

(2)Universitat Rovira i Virgili, Grupo of Applied Thermal Engineering-CREVER

**Resumen.** *En el proceso de fabricación del cemento una parte importante de la energía consumida se emite a la atmósfera como energía residual. Este calor residual puede ser aprovechado para la generación de electricidad. La utilización de un ciclo convencional Rankine no permite una recuperación eficiente del calor residual por debajo de 370 °C; la utilización del Ciclo Orgánico Rankine resulta económicamente viable para baja potencia y temperatura.*

*En el proceso de fabricación del cemento existen principalmente dos fuentes de calor residual, los gases de salida del precalcinador y los gases de salida del enfriador de clínker. En este trabajo se analizó la viabilidad de la recuperación de calor de ambas fuentes.*

*Se han considerado diferentes tecnologías atendiendo a las características de fuentes de calor residual, las propiedades termodinámicas de estos fluidos, así como a su aspecto medioambiental y otros aspectos relevantes. Se desarrollaron modelos para los diferentes componentes del ciclo, así como un modelo global, con el fin de analizar la eficiencia del ciclo y potencia neta producida. También se estudió el impacto del uso de un regenerador. Se ha analizado y comparado la eficiencia de los ciclos con diferentes fluidos de trabajo y condiciones de operación.*

**Palabras clave:** *Ciclo Orgánico Rankine, recuperación de calor.*

### 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La fabricación de cemento es una actividad industrial intensiva en energía: térmica para la cocción de las materias primas; y eléctrica para las operaciones de molienda, manipulación de materiales e impulsión de gases. Los gases calientes provenientes del precalcinador y el enfriador de clínker pueden ser aprovechados para la generación de electricidad. Una de las técnicas emergentes mencionadas en el documento BREF del cemento es la recuperación del calor residual de proceso para cogeneración [1]. En diferentes estudios de auditoría energética en los que se analiza el uso de la energía y las oportunidades de ahorro en plantas de cemento, se considera el aprovechamiento del calor residual disponible para generación de electricidad, utilizando el Ciclo Rankine con vapor de agua [2-4]. Sin embargo, la utilización de un ciclo convencional Rankine no permite una recuperación eficiente del calor residual por debajo de 370 °C, especialmente para pequeñas potencias (<1-2 MW). Por otra parte, el Ciclo Orgánico Rankine (ORC) tiene gran flexibilidad, alta seguridad y pocos requerimientos de mantenimiento, resultando económicamente viable para bajas temperaturas y potencias [5].

Un fluido adecuado para un Ciclo Orgánico Rankine debe reunir ciertas propiedades físicas, químicas, medioambientales, de seguridad y económicas. Los criterios de selección de los fluidos de trabajo han sido ampliamente analizados en trabajos anteriores. Así, por ejemplo, Chen et al. [6] realizaron una revisión del Ciclo Orgánico Rankine y el Ciclo Supercrítico, así



como los criterios de selección del fluido de trabajo para ambos ciclos. Hung [7] analizó la eficiencia del Ciclo Orgánico Rankine para recuperación de calor utilizando fluidos secos. Lai et al. [8] analizaron la utilización de diferentes fluidos orgánicos para Ciclos Orgánicos Rankine de alta temperatura. Marciniak et al. [9] realizaron un análisis comparativo de siete fluidos para utilización en ciclos Rankine considerando aspectos termodinámicos, económicos, medioambientales y de seguridad.

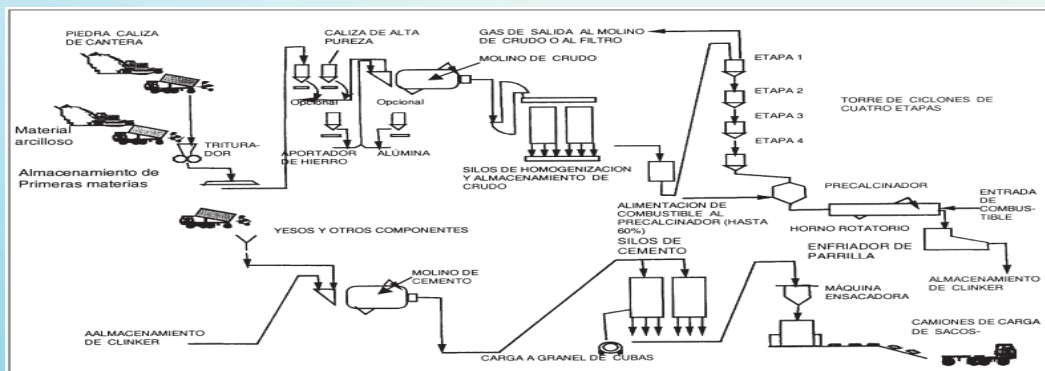
El Ciclo Orgánico Rankine ha sido estudiado para diferentes aplicaciones, como son la cogeneración con biomasa, plantas geotérmicas, plantas termosolares, desalinación solar, recuperación de calor de motores de combustión interna y turbinas de gas, recuperación de calor industrial, etc. [10-14]. Wang et al. [15] analizaron el ciclo simple de vapor, el ciclo de vapor a dos presiones, el ciclo Kalina y el Ciclo Orgánico Rankine utilizando R245fa como fluido de trabajo, para recuperar energía residual del precalcinador y el enfriador de clínker en cementeras. Los resultados obtenidos mostraron que el ciclo Kalina presentaba la mayor eficiencia energética para el caso estudiado.

En el presente trabajo se analiza la utilización de un Ciclo Orgánico Rankine para recuperación de calor en una planta cementera aprovechando el calor de los gases de salida del precalcinador y del enfriador de clínker. Se ha estudiado el funcionamiento del ciclo utilizando los siguientes fluidos orgánicos de trabajo: tolueno, n-heptano, n-pentano, R134a, hexametildisiloxano y octametiltetrasiloxano.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA CEMENTERA

La Figura 1 muestra el proceso de fabricación de cemento por vía seca con precalcinador. En Europa, alrededor del 90% de la producción de cemento se fabrica por vía seca [1]. A continuación se resumen las principales etapas del proceso de fabricación de cemento por vía seca:

1. Almacenamiento y preparación de materias primas.
2. Almacenamiento y preparación de combustibles.
3. Cocción de las materias primas para la fabricación de clínker.
4. Molienda y almacenamiento de cemento



**Figura 1.** Proceso de fabricación de cemento [16]

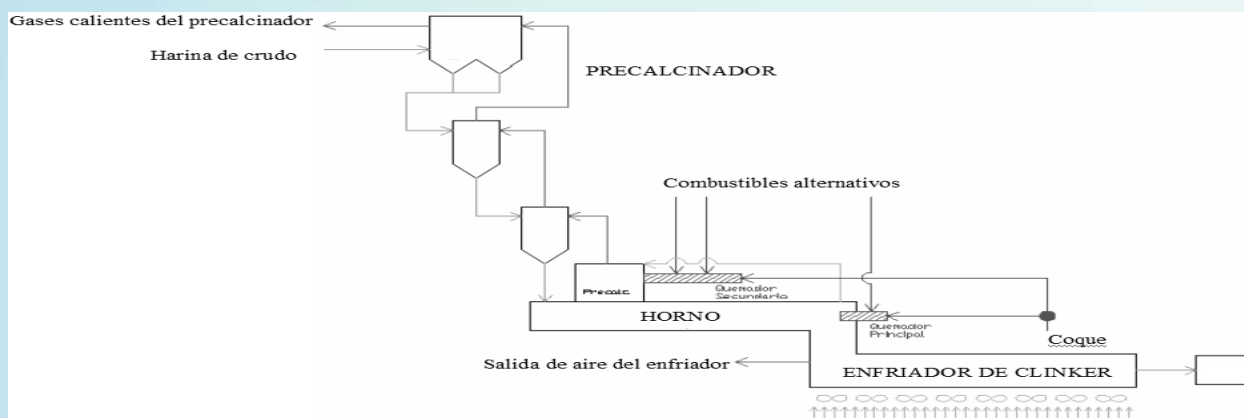
La demanda térmica teórica para la producción del clínker viene determinada por la energía requerida para las reacciones químicas producidas en el horno (1700-1800 MJ/tn clínker), y para el secado y precalentamiento de las materias primas, que depende fundamentalmente del



contenido en humedad de las materias primas. Alrededor de un 30-40% de la energía utilizada en el proceso escapa con los gases de salida del precalcinador y el aire del enfriador de clinker, o se pierde por radiación y convección de la superficie del precalcinador, enfriador y principalmente el horno [1].

La Figura 2 muestra un esquema simplificado del conjunto precalcinador-horno-enfriador de clinker de una planta cementera. Parte del calor recuperable está contenido en los gases de escape del horno a través del precalcinador, y parte en el aire de salida del enfriador de clinker.

El calor residual recuperable depende del diseño de la planta, siendo los parámetros más importantes la capacidad de la planta, tipo de configuración, consumo térmico, número de etapas del precalcinador y tipo de enfriador de clinker. Asimismo, el grado de humedad de las materias primas también influye en la cantidad de calor recuperable, ya que en la mayoría de las ocasiones los gases de salida del precalcinador se utilizan para el secado y precalentamiento de las materias primas [17].



**Figura 2:** Conjunto precalcinador-horno-enfriador de clinker en una planta cementera.

En la Tabla 1 se muestran los caudales y temperaturas de las corrientes de salida del precalcinador y del enfriador de clinker considerados para este estudio. Estos valores han sido seleccionados tomando caudales y temperaturas medias en diferentes plantas de fabricación de cemento [17].

	Caudal (kg/s)	Temperatura (°C)
Gases de salida del precalcinador	80	370
Gases de salida del enfriador de clinker	86	185

**Tabla 1:** Corriente de salida de gases del precalcinador y enfriador de clinker

### 3. CICLO ORGÁNICO RANKINE

El Ciclo Orgánico Rankine (ORC) se basa en la misma tecnología que el Ciclo Rankine convencional, utilizando prácticamente los mismos componentes, pero con un fluido orgánico en lugar de agua. El funcionamiento eficiente de un Ciclo Orgánico Rankine depende de manera importante de las propiedades termofísicas de los fluidos de trabajo. La pendiente de la curva de saturación de vapor del fluido en el diagrama temperatura-entropía es la característica más importante para determinar la aplicabilidad, eficiencia, trabajo obtenido y configuración del

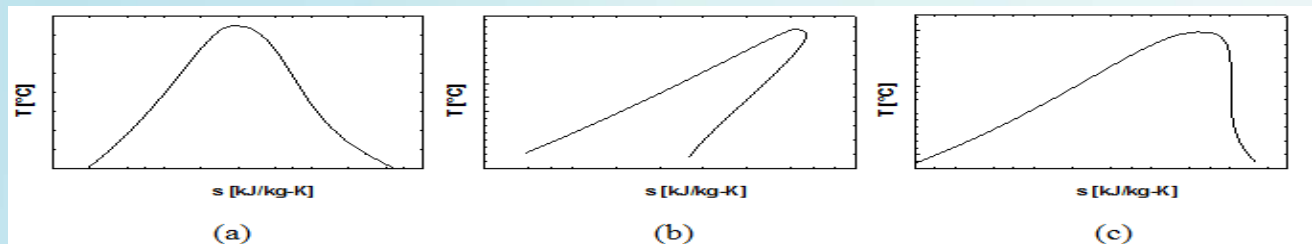




ciclo [18]. Los fluidos se pueden clasificar en tres grupos, en función de la pendiente de la curva de saturación de vapor [19]:

- Los fluidos húmedos tienen una pendiente negativa y son, en general, de bajo peso molecular, como el agua.
- Los fluidos secos tienen una pendiente positiva y son generalmente de alto peso molecular, como el hexametildisiloxano.
- Los fluidos isentrópicos tienen curvas de saturación de vapor casi verticales, como el R11.

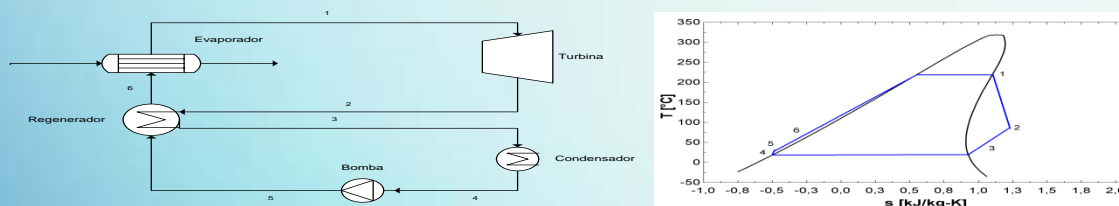
La Figura 3 muestra los diferentes tipos de fluidos en función de la pendiente de la curva de saturación de vapor en el diagrama temperatura-entropía.



**Figura 3.** Tipos de fluidos en función de la pendiente de la curva de saturación de vapor. (a) fluido húmedo, (b) fluido seco, (c) fluido isentrópico.

Debido a la pendiente negativa en los fluidos húmedos, la corriente de salida de la turbina contendrá una proporción significativa de líquido saturado. Para evitar un contenido en humedad elevado a la salida de la turbina, el fluido requiere ser sobrecalentado. Sin embargo, la fuente de calor disponible puede no ser suficiente para conseguir este sobrecalentamiento. En los fluidos secos e isentrópicos no existe este problema, ya que la corriente de salida de la turbina se encontrará sobrecalentada o saturada.

Además, debido a sus propiedades termodinámicas, los fluidos orgánicos pueden trabajar con menores presiones y temperaturas de evaporación. La temperatura mínima a la que se puede aplicar un ORC está en torno a 55°C [11]. Aunque, naturalmente, la eficiencia del ciclo dependería de la diferencia de temperaturas entre la evaporación y la condensación. La elección del fluido también está estrechamente relacionada con el nivel de temperatura de la fuente de calor residual. Los refrigerantes son los más utilizados con fuentes de calor de baja temperatura, mientras que para aplicaciones de alta temperatura, se utilizan otros fluidos, como tolueno o siloxanos. La Figura muestra el esquema de un Ciclo Orgánico Rankine con regenerador. Los estados correspondientes a los diferentes puntos del ciclo se pueden representar en un diagrama T-s, tal como se muestra en esta figura.



**Figura 4.** Esquema de un Ciclo Orgánico Rankine.



Un fluido de trabajo se considera adecuado cuando muestra, buenas propiedades termodinámicas, obteniendo sistemas de alta eficiencia, baja toxicidad, características de inflamabilidad controlables, compatibilidad con los materiales utilizados, bajo coste y alta disponibilidad.

Otras características importantes de los fluidos de trabajo son las siguientes:

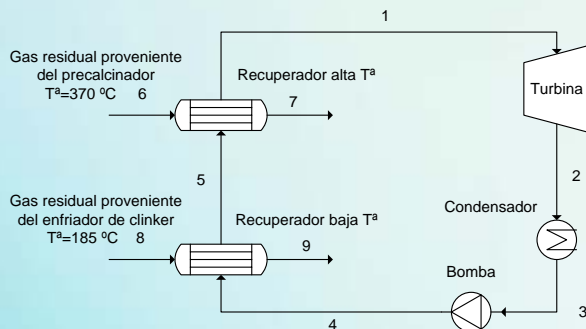
- Estabilidad del fluido a altas temperaturas
- Calor latente de vaporización y densidad.
- Impacto medioambiental.

#### 4. MÉTODO DE TRABAJO

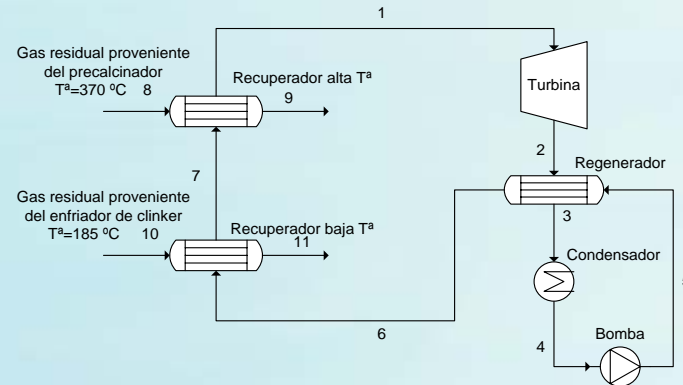
Se ha modelizado un Ciclo Orgánico Rankine que utiliza el calor residual proveniente tanto del precalcinador como del enfriador de clínker. En aquellos fluidos con la curva de saturación de vapor con pendiente positiva se ha analizado también la inclusión de un regenerador, para recuperar parte del calor de la corriente de salida de la turbina.

La Figura muestra los ciclos propuestos sin y con regenerador. En este estudio se han considerado las siguientes hipótesis de cálculo: Vapor saturado a la entrada de la turbina; Líquido saturado a la salida del condensador; Temperatura de condensación: 30°C; Pérdida de carga nula en todos los componentes, excepto la turbina y la bomba; Se desprecian pérdidas de calor; Operación en estado estacionario; Eficiencia isentrópica en la turbina y la bomba de 75%; Diferencia mínima de temperaturas en los intercambiadores igual a 10°C; Temperatura mínima de salida de gases de los intercambiadores: 120 °C.

Para modelizar los ciclos se ha utilizado el software de simulación de procesos Aspen Hysys [20]. Las propiedades termodinámicas de los fluidos han sido calculadas utilizando la ecuación de Estado Peng-Robinson modificada. Los fluidos de trabajo analizados han sido seleccionados por ser considerados habitualmente en sistemas ORC para otras aplicaciones [14]. La Tabla 2 muestra las principales propiedades de dichos fluidos. La elección de fluidos se realiza teniendo en cuenta el nivel de temperatura de la fuente de calor residual. En este caso se dispone de dos fuentes de calor residual a diferentes niveles de temperatura. Se han elegido fluidos adecuados para fuentes de media y alta temperatura, y además se ha analizado el R134a, utilizado habitualmente a menores temperaturas. Al no disponer de la composición de los gases de salida del precalcinador, se ha considerado que la composición de las dos corrientes de gases residuales es similar a la del aire.



**Figura 5.** Ciclo Orgánico Rankine para recuperación de calor residual en una planta cementera.  
(a) Sin regenerador



(b) Con regenerador

Todos los fluidos excepto el R134a han sido analizados con las dos configuraciones, sin regenerador y con regenerador. La curva de vapor saturado casi recta que presenta el R134a hace que no sea necesaria la inclusión del regenerador.

Fluido	Peso molecular (g/mol)	Tª crit. (°C)	P crit. (kPa)	Tª ebullición normal (°C)
Tolueno	92	318,6	4.100	110,6
n-pentano	72	196,5	3.375	36,06
n-heptano	100	267	2.737	98,4
Hexametildisiloxano (MM)	162	245,6	1.914	100,5
Octametilciclotetrasiloxano (D4)	296	313,4	1.332	175
R134a	102	101	4.055	-26,22

**Tabla 1:** Propiedades termofísicas de los fluidos de trabajo

Para ambas configuraciones se ha optimizado la potencia neta, calculada como:

$$W_{neto} = W_{turbina} - W_{bomba}$$

Para hallar las condiciones de operación que maximicen la función objetivo, en este caso, la potencia neta obtenida se ha utilizado la herramienta de optimización de Hysys. Las variables primarias, cuyos valores se manipulan para optimizar la función objetivo son el caudal másico del fluido de trabajo y la presión a la entrada de la turbina.

Asimismo, se han tenido en cuenta las siguientes restricciones:

- Diferencia mínima de temperaturas en los intercambiadores igual a 10°C.
- Temperatura mínima de salida de gases de los intercambiadores: 120 °C.

También se ha calculado el rendimiento del ciclo y el trabajo neto específico obtenido en la turbina, definidos como:

$$\eta_c = \frac{W_{neto}}{Q_{recuperado}} \quad W_{esp} = \frac{W_{turbina}}{\dot{m}_{fluido}}$$





## 5. RESULTADOS

En primer lugar se analizan los resultados obtenidos para la configuración del ciclo sin regenerador. La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos para el ciclo sin regenerador con tolueno, en las condiciones óptimas de operación.

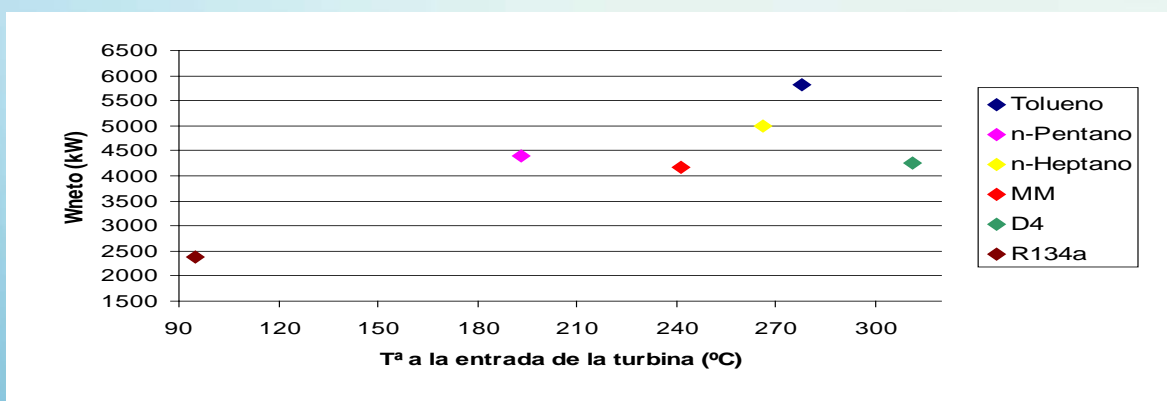
$P_{alta}$ (kPa)	2.501	$\eta_c$ (%)	23,6
$T_{entrada\ turbina}$ (°C)	278,2	$Q_{intercambiador\ alta}$ (°C)	19.050
$\rho_{salida\ turbina}$ (kg/m <sup>3</sup> )	0,1301	$Q_{intercambiador\ baja}$ (°C)	5.680
$W_t$ (kW)	5.962	$Q_{recuperado}$ (°C)	24.730
$W_b$ (kW)	129,5	$T_{salida\ intercambiador\ alta}$ (°C)	140,5
$Q_{cond}$ (kW)	18.900	$T_{salida\ intercambiador\ baja}$ (°C)	120

**Tabla 2:** Resultados obtenidos para el tolueno en las condiciones óptimas de operación.  
Ciclo sin regenerador.

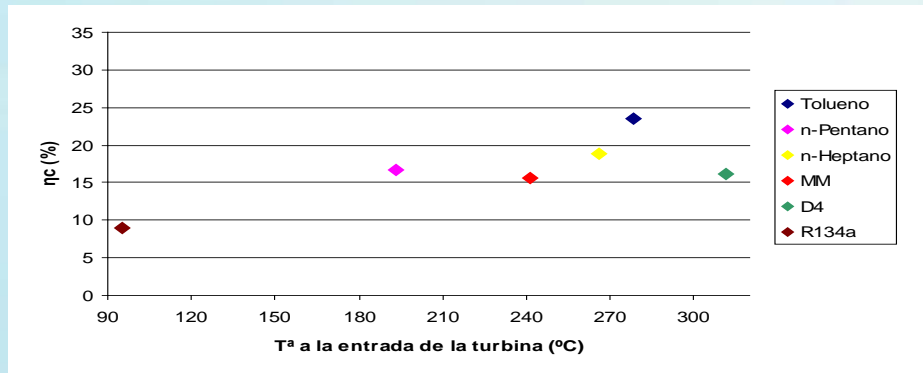
La Figura 6 muestra el trabajo neto producido en las condiciones óptimas de operación para cada fluido de trabajo. El mayor trabajo neto se obtiene con el tolueno, probablemente porque muestra la mayor presión crítica. El R134a obtiene el menor trabajo neto, debido a una menor diferencia de temperaturas entre la evaporación y la condensación. La Figura 7 muestra el rendimiento obtenido en las condiciones óptimas de operación para los diferentes fluidos de trabajo. Los valores se encuentran en un rango de 9 a 23%. El rendimiento más alto se obtiene con el tolueno.

La Figura 8 muestra la densidad de los fluidos a la salida de la turbina en las condiciones óptimas de operación. El R134a no aparece en el gráfico, siendo el de mayor densidad a la salida de la turbina. Cuanto menor es la densidad del fluido a la salida de la turbina, mayor es el caudal volumétrico en la turbina y el condensador, y mayor será el tamaño de los equipos, aumentando el coste de la instalación.

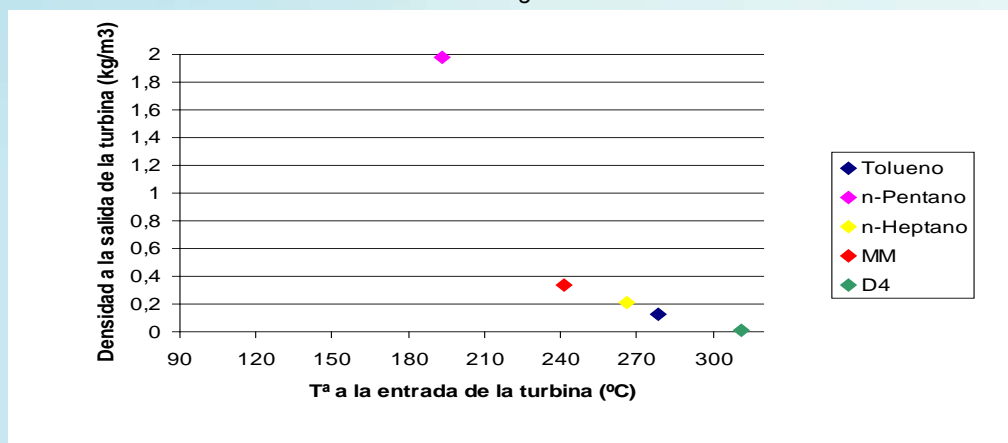
La viscosidad de los fluidos también es un parámetro a considerar en la elección de los fluidos. Una baja viscosidad favorece la transferencia de calor, y también reduce el consumo para bombeo del fluido.



**Figura 6.** Trabajo neto producido para cada fluido de trabajo en las condiciones óptimas de operación.  
Ciclo sin regenerador.



**Figura 7.** Rendimiento obtenido para cada fluido de trabajo en las condiciones óptimas de operación. Ciclo sin regenerador.

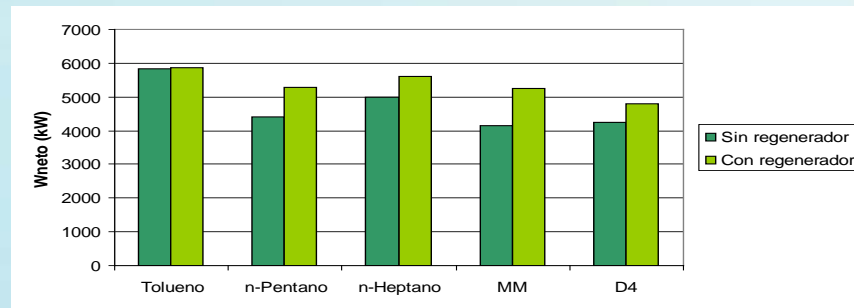


**Figura 8.** Densidad a la salida de la turbina para cada fluido de trabajo en las condiciones óptimas de operación. Ciclo sin regenerador.

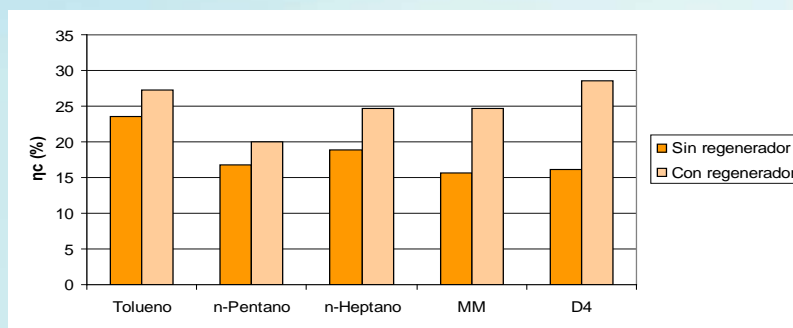
En segundo lugar, se han comparado los resultados obtenidos para la configuración del ciclo sin regenerador y con regenerador. Para el R134a no ha sido analizada la configuración con regenerador, por lo que no aparece en el siguiente análisis.

La Figura 9 muestra la comparación del trabajo neto producido con los diferentes fluidos de trabajo en las configuraciones del ciclo con y sin regenerador, en las condiciones óptimas de operación. En el caso del tolueno, no se observa apenas aumento del trabajo neto producido, mientras que en el resto si se produce un aumento del trabajo neto. Además, para todos los fluidos de trabajo el rendimiento del ciclo aumenta, como puede observarse en la Figura 10. Sin embargo, la cantidad de calor recuperada de las fuentes de calor residual disminuye para todos los fluidos, como se aprecia en la Figura 11. En general, cuanto mayor es el aumento relativo del rendimiento con la inclusión del regenerador, menor es la cantidad de calor recuperado de la fuente de calor residual, en comparación con la configuración sin regenerador.

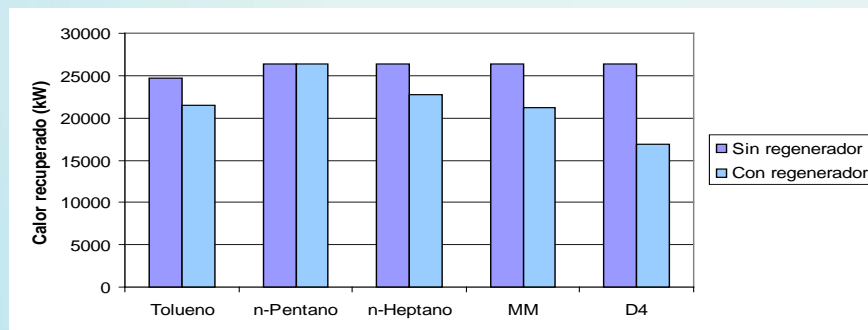
La Figura 12 muestra el trabajo específico obtenido para cada fluido en las configuraciones del ciclo con y sin regenerador. En general, el trabajo específico disminuye con la inclusión del regenerador.



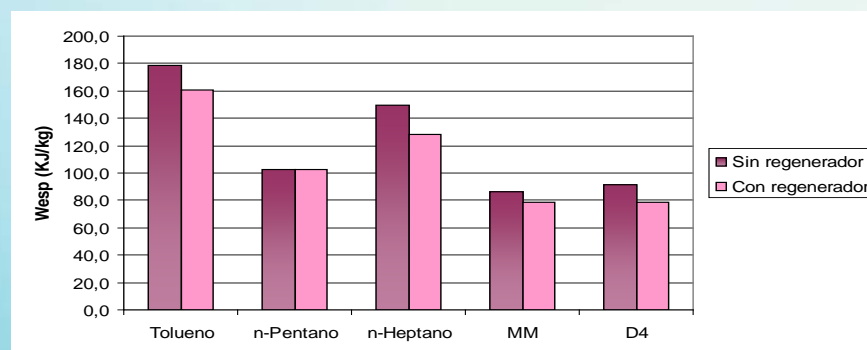
**Figura 9.** Trabajo neto producido con los diferentes fluidos de trabajo.



**Figura 10.** Rendimiento obtenido con los diferentes fluidos de trabajo.



**Figura 11.** Calor recuperado con los diferentes fluidos de trabajo.



**Figura 12.** Trabajo específico con los diferentes fluidos de trabajo.





La toxicidad e inflamabilidad de los fluidos son parámetros importantes a considerar. Todos los fluidos considerados son inflamables, excepto el R134a. Respecto a la toxicidad, el n-pentano, los siloxanos y el R134a muestran menor toxicidad que el tolueno y el n-heptano. En general, los fluidos de trabajo no superan la temperatura de autoignición en las condiciones de trabajo, excepto en el caso del n-heptano.

Por lo tanto, para esta aplicación sería recomendable el uso de siloxanos (D4 o MM) si se prioriza el rendimiento del ciclo. La potencia generada es similar a la del n-pentano aunque el equipo sería algo más voluminoso atendiendo al volumen específico del ciclo.

## 6. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

En el presente trabajo se ha analizado la utilización de un Ciclo Orgánico Rankine para recuperación de calor residual en una planta cementera, utilizando parámetros característicos de las dos fuentes de calor residual existentes en la industria de fabricación de cemento. Se han analizado las configuraciones con y sin regenerador, determinando con diferentes fluidos de trabajo los valores óptimos de trabajo neto, el rendimiento del ciclo y la cantidad de energía recuperada de la fuente de calor residual.

Los mejores resultados han sido obtenidos con el tolueno como fluido de trabajo. La inclusión de un regenerador mejora el trabajo neto obtenido y el rendimiento del ciclo; sin embargo, la cantidad de energía recuperada de la fuente de calor residual es menor con esta configuración. Considerando estos resultados, sería interesante analizar la posibilidad de aprovechar el calor restante para producción de agua caliente o agua fría, mediante la tecnología de refrigeración por absorción y su empleo en el acondicionamiento de aire en los edificios de oficinas y control de la cementera.

Teniendo en cuenta además las características de toxicidad e inflamabilidad de los fluidos, la conclusión es que tanto el n-pentano y los siloxanos resultan adecuados para el ORC aplicado a recuperación de calor en cementeras, obteniendo los siloxanos eficiencias mayores en el caso de incluir un regenerador en el ciclo.

Finalmente, el caso considerado incluye la recuperación de energía de fuentes de calor residual a diferentes niveles de temperatura, utilizando un único fluido de trabajo. En la actualidad se trabaja en el análisis de la integración de dos ciclos que aprovechan cada una de las fuentes con un fluido de trabajo más adecuado al nivel térmico de la fuente.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) European Commission, "Reference Document on Best Available Techniques in the Cement, Lime, and Magnesium Oxide Manufacturing Industries", (2010). Disponible en: <http://eippcb.jrc.es>
- (2) G. Kabir, A. I. Abubakar, U. A. El-Nafaty. "Energy audit and conservation opportunities for pyroprocessing unit of a typical dry process cement plant". Energy 35 (2010) 1237–1243.
- (3) S. Khurana, R. Banerjee, U. Gaitonde. "Energy balance and cogeneration for a cement plant". Applied Thermal Engineering 22 (2002) 485–494.



- (4) T. Engin, V. Ari. "Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems – A case Study". *Energy conversion and management*, 46 (2005) 551-562.
- (5) D. Wei, X. Lu, Z. Lu, J. Gu. "Performance analysis and optimization of organic Rankine cycle (ORC) for waste heat recovery". *Energy Conversion and Management* 48 (2007) 1113-1119.
- (6) H. Chen, D. Goswami, E. K. Stefanakos. "A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 3059–3067.
- (7) T. C. Hung. "Waste heat recovery of organic Rankine cycle using dry fluids". *Energy Conversion and Management* 42 (2001) 539-553.
- (8) N. A. Lai, M. Wendland, J. Fischer. "Working fluids for high-temperature organic Rankine cycles". *Energy* 36 (2011) 199-211.
- (9) T.J. Marciniak, J.L. Krazinski, J.C. Bratis, H.M. Bushby, E.H. Buyco. "Comparison of Rankine-cycle power systems: Effects of seven working fluids". ANL/CNSV-TM-87 Argonne National Laboratory, IL, 1981.
- (10) Schuster, S. Karellas, E. Kakaras, H. Spliethoff. "Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications". *Applied Thermal Engineering* 29 (2009) 1809-1817.
- (11) Vanslambrouck, I. Vankeirsbilck, S. Gusev, M. de Paepe. "Turn waste heat into electricity by using an Organic Rankine Cycle". 2nd European Conference on Polygeneration. April 2011. Tarragona.
- (12) Saavedra, J. C. Bruno, A. Coronas. "Thermodynamic optimization of organic Ranking cycles at several condensing temperaturas: case study of waste heat recovery in a natural gas compressor station". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, Vol. 224, N° 7, pp. 917-930 (2010).
- (13) J. C. Bruno, J. López-Villada, E. Letelier, S. Romera, A. Coronas. "Modelling and optimisation of solar organic ranking cycle engines for reverse osmosis desalination". *Applied Thermal Engineering*, 28 (2008) 2212-2226.
- (14) S. Quoilin, V. Lemort. "Technological and Economical Survey of Organic Rankine Cycle Systems". 5th European Conference: economics and management of energy in industry, 14-17 Abril, 2009, Vilamoura, Portugal.
- (15) J. Wang, Y. Dai, L. Gao. "Exergy analyses and parametric optimizations for different cogeneration power plants in cement industry". *Applied Energy* 86 (2009) 941-948.
- (16) Ministerio de Medio Ambiente. "Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España de fabricación de cemento". (2004). Disponible en: <http://www.oficemen.com>
- (17) "Cogeneration of Power Utilising Waste Heat in Cement Manufacture: Technological Perspectives". 7th NCB International Seminar on Cement and Building Materials. New Delhi, 21-24 November 2000.
- (18) J. P. Roy, M. K. Mishra, A. Misra. "Parametric optimization and performance analysis of a waste heat recovery system using Organic Rankine Cycle". *Energy* 35 (2010) 5049-5062.
- (19) T. C. Hung, T. Y. Shai, S. K. Wang. "A review of Organic Rankine Cycles (ORCs) for the recovery of low-grade waste heat". *Energy* Vol. 22, N°. 7, pp. 661-667, 1997.
- (20) Aspen Hysys. Aspen Technology, Inc., Wheeler Road, Burlington, Massachusetts, USA, <http://www.aspentech.com>



## COGENERACIÓN SOLAR HÍBRIDA EN BRASIL

**C. E. L. Oliveira** - Prof. Asociado, FZEA USP [celsooli@usp.br](mailto:celsooli@usp.br)

**C. Carrer** - -Prof. Asociado, FZEA USP [celsocarrer@usp.br](mailto:celsocarrer@usp.br)

**Vorobieff, CL** – Investigador, Solinova [crithian@solinova.com.br](mailto:crithian@solinova.com.br)

**Gonsales Neto, R** – Investigador, Solinova [rafael@solinova.com.br](mailto:rafael@solinova.com.br)

**Resumen.** *Muchas regiones del país tienen altos niveles de irradiación solar que pueden ser utilizados eficientemente en las plantas solares. Además, la agroindustria es la búsqueda de métodos ecológicos de producción de energía, incluyendo el uso eficiente de los residuos de sus procesos de producción. Hay una variedad de pequeños consumidores (agro) industriales que requieren un suministro fiable de energía y calor en este sector, como industrias de leche y carnes. Los resultados demuestran la viabilidad del uso de energía solar híbrida y plantas de co-generación que trabajan con las industrias agrícolas medianas o pequeñas para atender su demanda de energía.*

**Palabras clave:** *CSP, energía solar de alta temperatura, generación de energía distribuida, sistemas híbridos de energía, torre solar, termoelectricidad.*

### NOMENCLATURA

SMILE – Tecnología de sistemas solares híbridos de microturbinas de cogeneración de electricidad y calor

SOLHYCO – Proyecto de Energía Solar Híbrida y Cogeneración.

SONDA – Proyecto del Sistema de la Organización Nacional de Datos Ambientales.

SWERA – Proyecto de Evaluación de recursos energéticos Solar y Eólico.

## 1. INTRODUCCIÓN

Brasil tiene como objetivo político público el desarrollo sostenible con el uso de la energía renovable y mejorar la eficiencia energética para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Muchas regiones del país tienen altos niveles de irradiación solar que pueden ser utilizados eficientemente en plantas solares en acuerdo con el proyecto SWERA. Además, la (agro) industria mantiene una búsqueda de métodos sostenibles de producción de energía, incluyendo el uso eficiente de los residuos de sus procesos de producción (por ejemplo, la producción de azúcar) (Khanna, 1967; Toral, 2011; Bujedo, 2011 a,b; Fuller, 2011; Jaisankar, 2011; Mekhilef, 2011; Chen, 2011; Escobar-Romero, 2011). Hay una variedad de pequeños consumidores (agro) industriales que requieren un suministro fiable de energía y calor (Muster-Slawitsch, 2011) en este sector (agro) industrial, tales como la lechería (Quijara, 2011 a,b) y las industrias cárnicas. Debido al gran aumento en la producción de leche, Brasil se ha convertido en el sexto productor mundial de leche, ascendiendo a una tasa del 4% anual.

La exportación de carne de Brasil es una de las más altas del mundo, entretanto se ha visto afectada por el alto costo de la energía, que influye en el costo de la producción. Una fuente de energía alternativa puede ser una manera de mantener o incluso aumentar la competitividad de la (agro)industria en los mercados (agro)industriales.





Algunos programas y acciones relacionados con el desarrollo sostenible implican en el uso de fuentes renovables como los sistemas de energía eficientes y que son responsables por las bajas emisiones de gases de efecto invernadero en el sector de la energía. La cogeneración de bagazo de caña de azúcar, la energía eólica y pequeñas centrales hidroeléctricas se han incrementado en Brasil. Sin embargo, estas acciones no son capaces de llegar a las (agro) industrias medianas o pequeñas empresas, así como cumplir con sus requerimientos de energía. El proyecto Energía Solar Híbrida y Cogeneración (SOLHYCO) cumplió con este requisito.

Por otra parte, las grandes inversiones en energía solar en Brasil son inhibidas por la falta de información adecuada y fiable sobre la disponibilidad y variabilidad de dichos recursos. De esta manera, la demostración de una tecnología innovadora de energía solar-híbrida utilizando microturbinas con trigeneración de frío (Tora, 2010), electricidad y calor, como la hibridización con biocombustible, asegura la disponibilidad máxima potencia (potencia sobre demanda) (Amsbeck et al., 2009), representa una buena oportunidad para inversionistas en esta tecnología que tienen acceso al mercado brasileño.

## 2. PREPARACIÓN TÉCNICA DEL TRABAJO

Elaboración de una propuesta para tres sitios distintos y sus aplicaciones. Son propuestas tres ubicaciones distintas y aplicaciones como propone los siguientes:

**a) Caso 1:** El clima y la adquisición de datos de mercado para el interior de la región nordeste de Brasil en Río Grande do Norte, donde GEAGRO-USP ya ha estado llevando a cabo otro proyecto denominado “Portal dos Ventos” ([www.usp.br/unicetex](http://www.usp.br/unicetex)). La idea es analizar la viabilidad de la implementación de una planta piloto que permita, al mismo tiempo la difusión de la tecnología y la cooperación entre empresas públicas y privadas para lograr el desarrollo social y económico de la región.

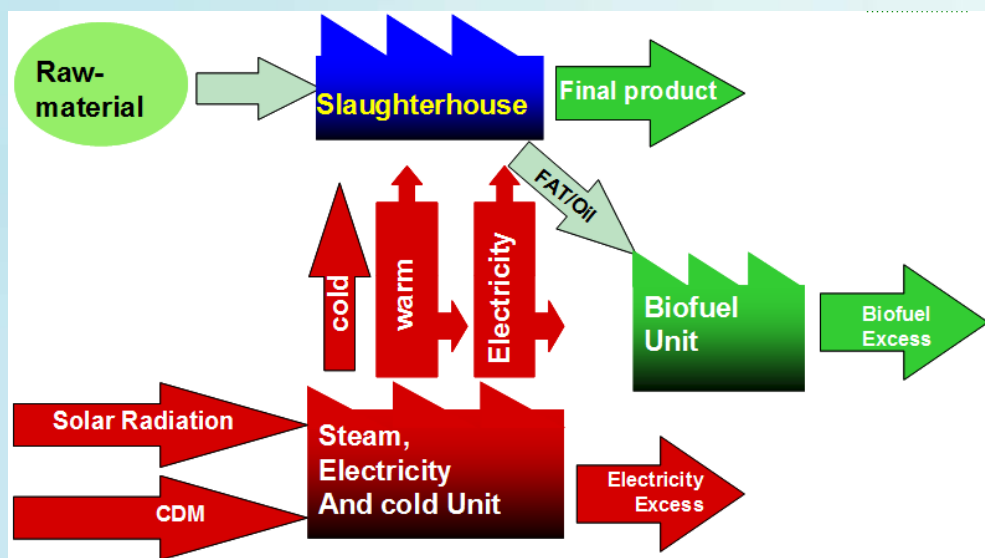
**b) Caso 2:** Clima y adquisición de datos de mercado para la región nordeste de Brasil, que en nivel local presenta un gran desarrollo agrícola (basada en el uso racional de los cultivos de regadío de frutas tropicales) en una región cerca de Petrolina, PE. En este caso, las ventajas climáticas que se presentan y las demandas de energía de cogeneración producen porque las empresas (empaquetadoras) se basan en el procesamiento de frutas y refrigeración, dirigido al abastecimiento de los mercados internos y externos.

**c) Caso 3:** Clima y adquisición de datos de mercado para la región sureste de Brasil en Lins, SP, que comprende una región estratégica en términos de desarrollo (agro)industrial y la producción de biocombustibles (etanol y biodiesel). Una estrecha relación se sugiere con JBS (industria frigorífica) una sociedad que ya emplea la cogeneración sobre la base de Biodiesel. Específicamente en el caso “3”, el sistema puede incluir una fábrica de biodiesel para mejorar la sostenibilidad del proceso general, como muestra la Figura 1.

En el esquema básico es mostrada una aplicación (agro) industrial en la Figura 2, el sistema propuesto proporciona electricidad, calor y frío usando un enfriador por trigeneración, las fuentes son la radiación solar y un biocombustible durante periodos sin sol. Para cada caso, el uso de calor o de frío puede ser estimado según la aplicación (agro) industrial, y lo hizo por simulación.



**Figura 1.** Energía solar concentrada en cadena de producción de carne, el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).



**Figura 2.** Representación esquemática de la aplicación del suministro de la energía en las (agro)industrias

### 3. RESULTADOS

Cada caso fue simulado y los resultados se muestran en las tablas siguientes considerando el sistema tal como se presenta en la Tabla 1.

Específico para el caso “3”, el sistema puede incluir la fábrica de biodiesel para mejorar la sostenibilidad del proceso global, como en la Figura 2. La cadena en la imagen muestran un ciclo del proceso completo incluye la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la posibilidad de mejorar la rentabilidad del sistema de obtención de créditos del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL). De esta manera el sistema tiene tres entradas de un sistema económico por el material del MDL, crudo y un aporte de energía por la radiación solar, las salidas son producto final (carne de vacuno), biocombustibles (biodiesel) y electricidad.

Internamente, el suministro de la planta solar de frío, calor y electricidad para el sistema (matadero y la fábrica de biodiesel). En Brasil hay un sistema similar utilizando bagazo de caña de azúcar como fuente de energía y sin el apoyo de frío, en donde se localizan Lins el caso 3.



	Demanda de Energía					Temperatura Anual Media (°C)	DNI
	Elec. (GWh/año)	Calor (Gcal/año)	Calor (Gcal/hora)	Frio (Mcal/año)	Frio (Kcal/hora)		Anual (kWh/m²año*)
1	5,0	0,050	0,005	714,84	82,27	28,0	1,999
2*	0,2					26,7	2,041
3	5,7	41,273	4,750			23,3	2,065

**Tabla 1:** Los datos locales a simulado tres casos citados para utilizar la tecnología Solhyco en el sector (agro) industrial en Brasil

**a) Caso 1:** Cada caso fue simulado y los resultados se muestran en las tablas siguientes considerando el sistema tal como se presenta en la Tabla 2.

Salida del motor	357,14 kW
Energía eléctrica	100 kW
$\eta_e$ rendimiento (real)	28,0%
Grado de eficiencia de energía solar térmica por año	47,0%
Horas a plena carga	4,000 h/a
Radiación solar	1,999 kWh/m²a
Superficie total de Espejo	388,8 m²
Grado de eficiencia del campo	63,41 %
Grado de eficiencia del receptor	77,7 %
Volumen de flujo de calor por año	1.428.571 kWh
Calor solar generado	382,929 kWh
Calor fósil generado	1.045.643 kWh
Participación Solar	27 %
Horas solares de carga completa	1,072 h
Ingresos eléctricos totales por año	400,000 kWh
Ingresos eléctricos solar por año	107,220 kWh
Ingresos eléctricos de Biocombustibles por año	292,780 kWh

**Tabla 2:** Rendimiento para el caso 1: Lácteos en Caiçara do Río do Vento (región Nordeste).

Potencia de calor	177,30 kW
Temperatura de entrada del sistema de cogeneración	280,00 °C
Temperatura de salida del sistema de cogeneración	50 °C
Temperatura media del fluido	165,00 °C
Capacidad de calor, aire @ 1bar	1.027,80 J/kgK
Ingresos anuales de un sistema de cogeneración	709,182 kWh

**Tabla 3:** Pérdidas de calor sin cogeneración.





Potencia de calor	108,47 kW
Temperatura de entrada del sistema de cogeneración	280 °C
Temperatura de salida del sistema de cogeneración	140 °C
Temperatura media del fluido	210,00 °C
Temperatura media del fluido	483,15 K
Capacidad de calor, aire @ 1bar	1.033,01 J/kgK
Capacidad de calor, aire @ 4,5 bar	1.031,48 J/kgK
$\eta$ Eficiencia del sistema de cogeneración	0,2 %
Potencia del motor	21,69 kW
Ingresos anuales de un sistema de cogeneración	86,773 kWh

**Tabla 4:** Entrada del sistema de cogeneración.

Potencia de calor	69,05 kW
Temperatura de entrada del sistema de cogeneración	140,00 °C
Temperatura de salida del sistema de cogeneración	50 °C
Temperatura media del fluido	95,00 °C
Capacidad de calor, aire @ 1bar	1.023,02 J/kgK
Ingresos anuales de un sistema de cogeneración	276,214 kWh

**Tabla 5:** Pérdidas de calor con cogeneración.

En este caso la lechería usaría 100% de la energía generada en el sistema híbrido que es bueno para esta región desde un punto de vista técnico.

Con la tecnología SOLHYCO y el uso de biodiesel (B100) la generación de electricidad y calor es posible sin emisiones de Gases de Efecto Invernadero (teniendo en cuenta las metodologías del MDL) y una mejora económica para la población local que pueda producir el biocombustible a nivel local.

Adaptando el diseño conceptual del sistema a las condiciones comerciales y casos brasileños, se propone para proporcionar el campo de helióstatos por un productor comercial, pero con la posibilidad de ser hecho en Brasil. El receptor, de la cavidad aislante y la torre también se pueden fabricar en el país por socios del SOLHYCO o por otros proveedores nacionales. Hasta alcanzar un volumen de mercado siendo atractivo para las producciones locales, la microturbina ciertamente tendría que ser importada de países europeos o estados unidos para atender a los proyectos latinoamericanos.

**b) Caso 2:** Datos de radiación de Petrolina de acuerdo con los estudios de CEPEL (Centro Brasileño de Investigaciones Eléctricas). Las siguientes tablas muestran los resultados simuladas del sistema aplicado a las empaquetadoras.



Salida del motor	357,14 kW
Energía eléctrica	100 kW
$\eta_{el}$ rendimiento (real)	28,0 %
Grado de eficiencia de energía solar térmica por año	47,0 %
Horas a plena carga	4,000 h/a
Radiación solar	2,041 kWh/m <sup>2</sup> a
Superficie total de Espejo	440 m <sup>2</sup>
Grado de eficiencia del campo	60,5 %
Grado de eficiencia del receptor	77,7 %
Volumen de flujo de calor por año	1.428.571 kWh
Calor solar generado	422,155 kWh
Calor fósil generado	1.006.416 kWh
Participación Solar	30 %
Horas solares de carga completa	1,182 h
Ingresos eléctricos totales por año	400,000 kWh
Ingresos eléctricos solar por año	118,203 kWh
Ingresos eléctricos de Biocombustibles por año	281,797 kWh

**Tabla 6:** Rendimiento para el Caso 2: CASA de Embalaje en ciudad Petrolina (región Nordeste)

Potencia de calor	340,41 kW
Temperatura de entrada del sistema de cogeneración	280,00 °C
Temperatura de salida del sistema de cogeneración	50 °C
Temperatura media del fluido	165,00 °C
Capacidad de calor, aire @ 1bar	1.027,80 J/kgK
Ingresos anuales de un sistema de cogeneración	1.361.629 kWh

**Tabla 7.** Pérdidas de calor sin cogeneración

Salida del motor	357,14 kW
Energía eléctrica	100 kW
Flujo másico	1,44 kg/s
Temperatura de salida recuperador	280 °C

**Tabla 8:** Rendimiento del sistema de cogeneración

Potencia de calor	208,25 kW
Temperatura de entrada del sistema de cogeneración	280 °C
Temperatura de salida del sistema de cogeneración	140 °C
Temperatura media del fluido	210,00 °C
Temperatura media del fluido	483,15 K
Capacidad de calor, aire @ 1bar	1.033,01 J/KgK
Capacidad de calor, aire @ 4,5 bar	1.031,48 J/kgK
$\eta$ Eficiencia del sistema de cogeneración	0,2 %/100
Potencia del motor	41,65 kW
Ingresos anuales de un sistema de cogeneración	166,603 kWh

**Tabla 9:** Entrada del sistema de cogeneración.



Potencia de calor	132,58 kW
Temperatura de entrada del sistema de cogeneración	140,00 °C
Temperatura de salida del sistema de cogeneración	50 °C
Temperatura media del fluido	95,00 °C
Capacidad de calor, aire @ 1bar	1.023,02 J/kgK
Ingresos anuales de un sistema de cogeneración	530,332 kWh

**Tabla 10:** Pérdidas de calor con cogeneración.

**c) Caso 3:** Datos de radiación de São Paulo, IAG (Tablas 11 a 14) del sistema muestran los resultados de la simulación del sistema aplicado a un matadero.

Salida del motor	357,14 kW
Energía eléctrica	100 kW
$\eta_{el}$ rendimiento (real)	28,0 %
Grado de eficiencia de energía solar térmica por año	47,0 %
Horas a plena carga	4.000 h/a
Radiación solar	2.065 kWh/m²a
Superficie total de Espejo	440 m²
Grado de eficiencia del campo	60,5 %
Grado de eficiencia del receptor	77,7 %
Volumen de flujo de calor por año	1.428.571 kWh
Calor solar generado	427 119. kWh
Calor fósil generado	1.001.452 kWh
Participación Solar	30 %
Horas solares de carga completa	1.196 h
Ingresos eléctricos totales por año	400.000 kWh
Ingresos eléctricos solar por año	119.593 kWh
Ingresos eléctricos de Biocombustibles por año	280.407 kWh

**Tabla 11:** Rendimiento de Caso 3: Matadero en Lins ciudad (región sudeste).

Potencia de calor	340,41 kW
Temperatura de entrada del sistema de cogeneración	280,00 °C
Temperatura de salida del sistema de cogeneración	50 °C
Temperatura media del fluido	165,00 °C
Capacidad de calor, aire @ 1bar	1.027,80 J/kgK
Ingresos anuales de un sistema de cogeneración	1.361.629 kWh

**Tabla 12:** Pérdidas de calor sin cogeneración





Salida del motor	357,14 Kw
Energía eléctrica	100 kW
Flujo másico	1,44 kg/s
Temperatura de salida recuperador	280 °C

**Tabla 13:** Rendimiento del sistema de cogeneración

Potencia de calor	208,25 kW
Temperatura de entrada del sistema de cogeneración	280 °C
Temperatura de salida del sistema de cogeneración	140 °C
Temperatura media del fluido	210,00 °C
Temperatura media del fluido	483,15 K
Capacidad de calor, aire @ 1bar	1.033,01 J/Kg K
Capacidad de calor, aire @ 4,5 bar	1.031,48 J/kgK
$\eta$ Eficiencia del sistema de cogeneración	0,2 %/100
Potencia del motor	41,65 kW
Ingresos anuales de un sistema de cogeneración	166.603 kWh

**Tabla 14:** Entrada del sistema de cogeneración

En este caso, el modelo considera un lado la fábrica de biodiesel a lado con la planta solar y la posibilidad de producción de frío por el sistema de cogeneración actualizado con un enfriador. El matadero está cerca del complejo de energía (planta solar y la fábrica de biodiesel). Debido que destacar el alto grado de sostenibilidad de este modelo, ya que la grasa utilizada en la fábrica de biodiesel es un problema difícil de solucionar en el medio ambiente, en algunos mataderos de grande porte hay exceso de grasa, (normalmente se utiliza para hacer jabón). El mecanismo para un desarrollo limpio se abre la posibilidad de aplicar los proyectos de eficiencia energética y la reducción de metano o reducir el consumo de combustibles fósiles. En cualquier de los casos de MDL que se puede aplicar a este sistema, ya que los resultados condujo a la mejor eficiencia energética, la reducción en el combustible en el proceso de biodiesel y reducir el consumo de electricidad de la red.

#### 4. CONCLUSIÓN

De los documentos oficiales se pueden detectar tres diferentes puntos de vista de la fuente solar en Brasil:

Brasil ha hecho cambios en su política energética con el fin de promover una mayor diversificación en la matriz de generación de electricidad;

Las fuentes alternativas de energía en Brasil se han introducido mediante políticas de incentivos, basados en la formación de un mercado, usando el poder de compra del Estado como su principal estímulo;



El valor del kWh generado aún no era competitiva con las fuentes utilizadas tradicionalmente en la matriz energética brasileña, y el proceso de expansión previsto por el Gobierno prevé un aumento gradual en el uso de energía a partir de combustibles fósiles o la energía nuclear, aumenta el interés en fuentes que pueden sostener capaz el nivel actual de baja emisión de suministro de electricidad.

Para el recurso solar gobierno brasileño necesita una drástica reducción de costes para ser competitiva con la energía hidroeléctrica y en un futuro próximo con la energía eólica.

Aunque las tendencias internacionales para reducir los costos que se presenta en la CSP road map y otros documentos de la Agencia Internacional de Energía (AIE), el Brasil no va participar en estos escenarios favorables si no participa en la investigación y el desarrollo tecnológico. Se espera que las plantas solares de torre tengan su valor del MWh a partir de 300 USD a menos 50 USD en 20 años (CSP road map, IEA).

En este escenario, el estudio de mercado para la tecnología puede concluir que:

Los cambios en la matriz energética brasileña podrán llevar a un aumento en la emisión de gases de efecto invernadero representando una oportunidad para las tecnologías limpias.

La expectativa internacional de una reducción de costes puede ser un factor de estímulo a nuevas inversiones en plantas de energía solar en Brasil como son los objetivos del proyecto/tecnología SMILE, proyecto spin-off del proyecto SOLHYCO.

El sector (agro) industrial como consumidor de energía eléctrica y térmica la energía es un nicho de mercado para la cogeneración sobre la base de energía solar.

Por último, el gobierno de Brasil y el sector privado deben estimular la investigación y el desarrollo para el solar híbrido participar en el mercado global para introducir las plantas de energía solar en el país.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) B. Muster-Slawitsch, C. Brunner, R. Padinger, H. Schnitzer. "Methodology for Batch Heat Integration and Storage System Design for Ideal Integration of Solar Process Heat" in 2011 Chemical Engineering transactions, vol. 25, pp 887-892.
- (2) E. A. Tora, M. M. El-Halwa. "Integration of Solar Energy into Absorption Refrigerators and Industrial Processes" in 2010 Chem. Eng. Technol., No. 9, pp.1495–1505.
- (3) E. A. Toral, M. M. El-Halwagi, "Integration of Solar Energy into Absorption Refrigerators and Industrial Processes", in 2010 Chem. Eng. Technol, 33, No. 9, pp.1495–1505.
- (4) J F M Escobar-Romero, S Vázquez y Montiel, F Granados-Agustín, V M Cruz-Martínez, E Rodríguez- Rivera, L Martínez-Yáñez, " Building a parabolic solar concentrator prototype" in 2011, Journal of Physics: Conference Series 274.
- (5) J. A. Quijera, M. G. Alriols, J. Labidi. "Integration of a Solar Thermal System in a Dairy Process" in 2011 Renewable Energy, No. 36, pp.1843-1853.
- (6) J. A. Quijera, M. G. Alriols, J. Labidi. "Usage of solar energy in industrial process" in 2011 Chemical Engineering transactions, vol. 25, pp 875-880.
- (7) L. A. Bujedo, J. Rodríguez, P. J. Martínez "Experimental Results of Different Control Strategies in a Solar Air-Conditioning System at Part Load", Solar energy 85 (2011), No.7, pp.1302-1315



- (8) L. A. Bujedo, J. Rodríguez, P. J. Martínez, "Experimental results of different control strategies in a solar air-conditioning system at part load", in 2011, Solar Energy ed.85, pp. 1302–1315.
- (9) L. Amsbeck, P. Heller, J. Jedamski, R. Uhlig, M. Ebert, M. Svensson, T. Denk, C. Hilgert, U., Fisher, J. Sinai, C. Gertig, P. Tochon. "Development of A Solar-Hybrid Microturbine System For A Mini-Tower" in SolarPaces, 2009.
- (10) M. L. Khanna, N. M. Singh, "Industrial Solar Drying", in 1967, Solar Energy Conference, vol.11, pp.87-89.
- (11) R.J. Fuller. "Solar industrial process heating in Australia - Past and current status" in 2011 Renewable Energy, no.36, pp. 216-221.
- (12) S. Jaisankar, J. Ananth, S. Thulasi, S.T. Jayasuthakar, K.N. Sheeba, "A comprehensive review on solar water heaters", in 2011 Renewable and Sustainable Energy Reviews, ed.15, pp,3045–3050.
- (13) S. Mekhilef, R. Saidur, A. Safari, "A review on solar energy use in industries", in 2011 Renewable and Sustainable Energy Reviews, ed. 15, pp. 1777–1790.
- (14) Yang Chen, Allen Y. Yi, "Design and fabrication of freeform glass concentrating mirrors using a high volume thermal slumping process ", in 2011 Solar Energy Materials & Solar Cells ed.95, pp. 1654–1664.





## ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN LA GESTIÓN DEL AGUA

**Emilio Gudemos** – [egudemos@ciec.com.ar](mailto:egudemos@ciec.com.ar) - 0054 –351 – 4840065

Laboratorio de Baja Tensión – Departamento Electrotecnia

Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales - Universidad Nacional de Córdoba, Argentina

Cátedra Energías Renovables Licenciatura en Ambiente y Energías Renovables

Universidad Nacional de Villa María

**Resumen.** Experiencias desarrolladas en la aplicación de Sistemas Solares Fotovoltaicos en el bombeo de agua en zonas semiáridas en apoyo al desarrollo socio económico de regiones carentes de suministro de energía eléctrica convencional. El agua bombeada es empleada para consumo humano y animal.

**Palabras clave:** fotovoltaica, gestión del agua.

### 1. INTRODUCCIÓN

Dada la necesidad de fuentes energéticas limpias, no contaminantes de bajos impactos ambientales y a la vez renovables, es que los sistemas solares fotovoltaicos cumplen un papel preponderante en la provisión de energía eléctrica.

En la mayoría los países en vías de desarrollo la energía eléctrica convencional no esta aún disponible en vastas regiones aisladas. La construcción y el mantenimiento de redes de distribución resultan onerosos, por lo menos hasta la actualidad. Lo mismo ocurre con los grupos electrógenos.

En las regiones rurales dispersas generalmente las necesidades energéticas son pequeñas y existe una baja densidad poblacional en donde los usuarios potenciales están ampliamente diseminados.

En las condiciones mencionadas los generadores solares fotovoltaicos resultan una solución fiable para el desarrollo rural, suministrando energía eléctrica destinada a bombeo y al tratamiento de agua en cualquier sitio y en cantidades razonables, facilitando el consumo humano y animal, riego, impulsando el desarrollo socio-económico de áreas rurales alejadas.

La provisión de electrificación rural destinada a iluminación, bombeo de agua, aparatos electrodomésticos brinda mejores condiciones de vida, facilitando las comunicaciones y el acceso a la información, proveyendo de infraestructura básica necesaria para el afincamiento y arraigo de pobladores, evitando de manera notable la emigración a los grandes centros urbanos.

### 2. GENERADORES FOTOVOLTAICOS

La energía solar Fotovoltaica, se basa en la conversión de la radiación solar lumínica en electricidad de corriente continua mediante las celdas fotovoltaicas.



Los módulos solares son el conjunto de celdas conectadas entre sí y ensambladas con las debidas protecciones para los agentes climáticos, un marco metálico de aluminio anodizado le proporciona rigidez mecánica, facilitando su montaje en estructuras soportes.

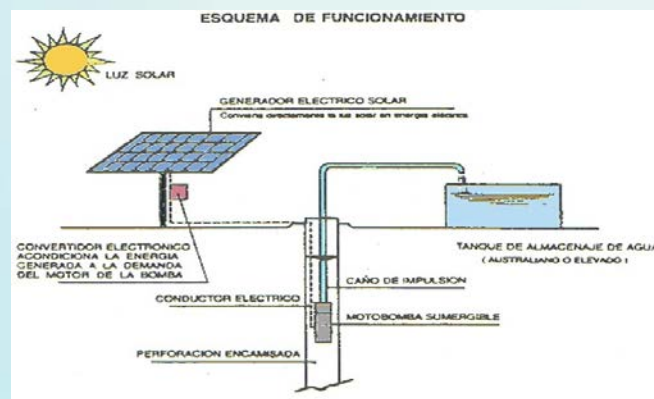
Las principales ventajas de los sistemas solares Fotovoltaicos son:

- No requieren el tendido de Líneas de transmisión.
- La energía se produce en el lugar donde se utiliza.
- No consumen combustible.
- No tienen partes mecánicas en movimiento, ni sometidas a desgaste.
- Son totalmente silenciosos.
- Resisten condiciones extremas de viento, granizo, temperatura y humedad.
- La vida útil de los módulos fotovoltaicos es superior a los veinte años en condiciones normales de uso.
- Es modular, lo que permite aumentar la potencia instalada sin interrumpir el funcionamiento del generador.
- Alta confiabilidad y mínimo mantenimiento, Independencia en cuanto a la provisión.

### 3. SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA

#### **Componentes**

Un sistema de bombeo de agua energizado por generador fotovoltaico esta constituido por los siguientes componentes:



**Figura 1.** Esquema de funcionamiento

#### **Generador Solar Fotovoltaico**

Está constituido por uno o más módulos solares fotovoltaicos en un arreglo (conexión) que proporcione los parámetros eléctricos correspondientes a la bomba a utilizar.



Generalmente los módulos constan de celdas de silicio mono o policristalino, con cubierta de vidrio templado con bajo contenido de hierro y excelente resistencia a las inclemencias atmosféricas.

La cantidad de módulos conectados en serie está en relación directa con la tensión de trabajo del sistema.

La cantidad de ramas en paralelo necesaria se calculan de acuerdo a la corriente eléctrica que consumirá la electro bomba a instalar.

La estructura soporte debe estar constituida por materiales aptos para intemperie (aluminio anodizado, hierro galvanizado, etc.). El ángulo de inclinación estará en consonancia con la latitud del lugar de emplazamiento.

### ***Convertidores***

En los sistemas con motores de corriente alterna, se debe convertir la corriente continua suministrada por el generador fotovoltaico en corriente alterna.

### ***Regulador del punto de máxima potencia***

Sirve para acoplar las variaciones de la carga de la bomba al generador solar. Cuando los módulos fotovoltaicos funcionan con carga, ésta determinará el punto de operación correspondiente.

Por lo general el punto de operación no corresponde al Punto de Máxima Potencia que el generador solar puede suministrar. Es por ello que la eficiencia total se degrada como consecuencia de que no se aprovecha completamente la potencia suministrada.

Empleando este sistema en conexión con un convertidor (c.c./c.a.) se regulan la corriente y la tensión, de tal manera que, para cada valor de carga, el punto de operación quede en el Punto de Máxima Potencia.

De esta forma se incrementa la eficiencia y se emplea mejor la instalación

### ***Motor Eléctrico***

En general se pueden utilizar motores de c.c. pero en la práctica los motores trifásicos son los empleados en instalaciones de mayor capacidad.

### ***Electro bomba***

En mercado existen unidades motor-bomba en forma completa e integrada en diseños que se diferencian por su diámetro, altura de elevación y caudal.





**Figura 2.** Corte de electro bomba Grundfos

### **Tuberías**

En las tuberías se originan pérdidas por rozamiento, estas deben ser consideradas en todo el sistema como una función del caudal. Es evidente que las pérdidas por fricción en las tuberías se incrementan de manera proporcional al caudal. Por tal motivo se recomienda seleccionar un diámetro adecuado para que las pérdidas sean mínimas.

### **Griferías**

La constituyen los hidrómetros (contadores de cantidad de agua), codos, las curvas, uniones, reducciones y las válvulas

### **Tanque de almacenamiento**

Las baterías como elementos de almacenamiento de energía eléctrica ocasionan gastos de provisión y mantenimiento y además tienen una determinada vida útil, dependiente de la cantidad de ciclos de cargas descargas.

Por tal motivo en los sistemas de bombeo fotovoltaico, se emplean configuraciones independiente de las baterías, alimentando directamente las electro bombas y almacenando el agua bombeado durante las horas de insolación adecuada.

## **4. METODOLOGÍA DE CÁLCULO**

Con el objetivo de lograr un diseño óptimo del sistema después de conocer las características de los componentes, es necesario establecer una metodología de cálculo que permita ejecutar la simulación de los procesos con la mayor fidelidad posible, reflejando el comportamiento de la tecnología seleccionada para integrar la instalación [1].

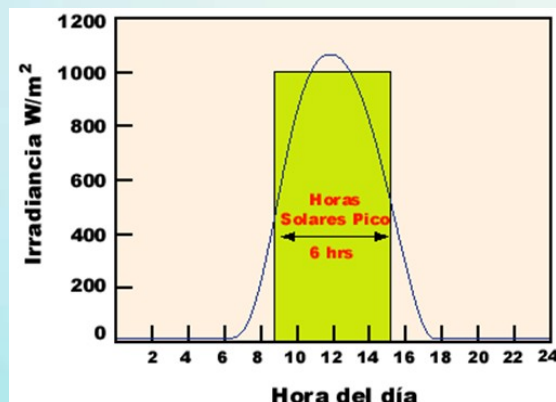


**Figura. 3.** Sistema de bombeo Fotovoltaico

Cada empresa proveedora de módulos fotovoltaicos y de bombas ha desarrollado curvas de rendimientos y catálogos que permiten calcular distintos sistemas de bombeo fotovoltaico.

Se describe sintéticamente los pasos a seguir.

1. Datos de ubicación geográfica (Continente, país, localidad). Especificando la localización mediante coordenadas (Latitud y Longitud).
2. Se seleccionan los datos de Insolación para cada mes (medida diaria de la insolación). La Insolación corresponde al valor acumulado de la irradiancia en un tiempo dado. El tiempo se mide en Horas, la Insolación se expresa Watts-hora por metro cuadrado (Wh/m<sup>2</sup>). Este valor se reporta como una acumulación de energía que puede ser horaria, diaria, estacional o anual. La Insolación también se expresa en términos de Horas solares pico, una hora solar pico es equivalente a la energía recibida durante una hora a una irradiancia promedio de 1 KW/ m<sup>2</sup> la energía que produce un panel fotovoltaico es directamente proporcional a la insolación que recibe.
3. Selección del sistema fotovoltaico y control de potencia (con utilización o no de baterías).
4. Selección de montaje (estructura soporte) fijo ó móvil.

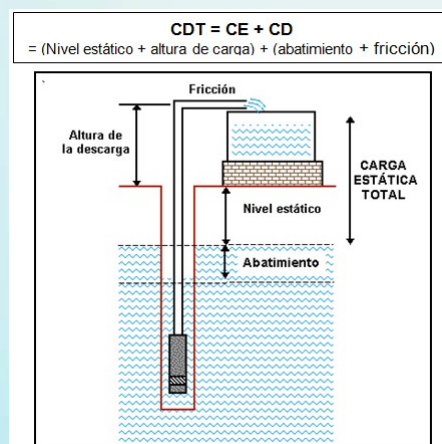


**Figura. 4.** Irradiancia y horas solares pico (insolación) [2]



**Figura 5.** Estructura Soporte de Panel Fotovoltaico de 24 [3]

Requerimiento de agua diaria en distintas estaciones del año. Previo a determinar la potencia del sistema fotovoltaico y el tipo de bomba a emplear, se debe conocer las necesidades de agua diaria y algunos valores relacionados a las condiciones hidráulicas de una estación de bombeo. La potencia del generador está en relación directa con el producto de la Carga Dinámica Total (CDT) y el volumen de agua diario necesario. El producto se denomina Ciclo Hidráulico. La Carga Dinámica total es la suma de la carga Estática (CE) y la Carga Dinámica (CD).



**Figura 6.** Componentes hidráulicos de un sistema de bombeo





## Fórmula de Manning

Este es un método matemático que se puede realizar fácilmente con una simple calculadora. La fórmula de Manning se expresa así:

$$H_f = K \times L \times Q^2$$

Donde:

$H_f$  es el incremento en la presión causada por la fricción y expresada en distancia lineal (m).

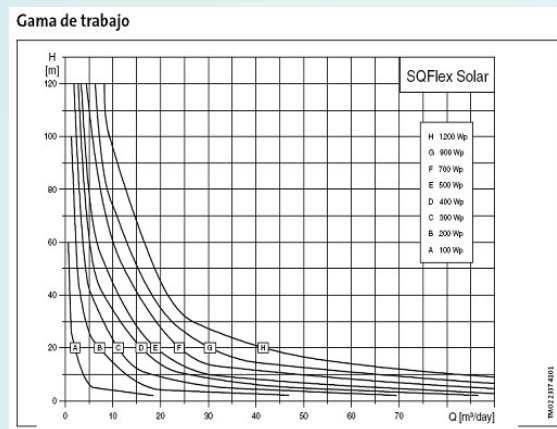
$K$  es una constante empírica con unidades de  $(m^3/s)^{-2}$

$L$  es la distancia total recorrida por el agua por las tuberías. Su unidad es metros (m).

$Q$  es el flujo expresado en metros cúbicos por segundo  $(m^3/s)$ .

La constante  $K$  se obtuvo después de experimentar con varios materiales y tamaños de tuberías de ahí que se denomine “empírica”. Existen tablas que proporcionan estos valores de  $K$  en  $(m^3/s)^{-2}$  para tuberías de plástico PVC y acero galvanizado. [2]

1. Selección del tipo de bomba más adecuada para cada implantación (donde figuran tensión de trabajo, profundidades óptimas de trabajo). Para esto nos valemos de las curvas proporcionadas por los fabricantes.



**Figura 7.** Curva rendimiento de Bomba Grundfos SQ Flex

2. Elección de los módulos fotovoltaicos (de acuerdo a potencia suministrada).
3. Determinación del ángulo de mayor insolación, inclinación del panel de acuerdo a los datos de insolación (ángulos óptimos para cada mes)
4. Finalmente se obtiene la insolación de acuerdo al ángulo elegido.
5. Se elabora un reporte definitivo en el que consta:
  - El tipo de generador determinado (cantidad de módulos),
  - Modelo de bomba,
  - Cantidad de agua a obtener de acuerdo al ángulo de inclinación y la radiación solar de la zona.



## 5. ASPECTOS ECONÓMICOS

### ***Comparación de alternativas de bombeo***

Por su relativamente alto costo inicial, los sistemas Fotovoltaicos generalmente no son competitivos en sitios con servicio de energía eléctrica de red. Cuando no hay acceso a la red eléctrica, los sistemas solares y los grupos electrógenos son seguramente las alternativas más viables.

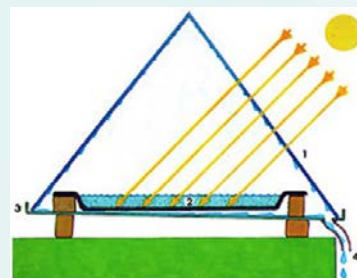
Si existe un buen recurso solar en el lugar de instalación como mínimo 3.0 horas pico) y cuando se requiere un ciclo hidráulico menor que 1,500 m<sup>3</sup> por día, los sistemas solares podrían resultar más económicos a largo plazo que los sistemas de combustión interna. Aunque los sistemas de combustión interna generalmente cuestan menos inicialmente, su costo a largo plazo es elevado si se toma en consideración los gastos de combustible, mantenimiento y reparaciones. [2]5.2.

### ***Tratamiento del agua***

La destilación del agua, es una réplica del mecanismo en que la naturaleza purifica el agua. La Energía del Sol calienta el agua hasta su punto de evaporación. Al evaporarse, el vapor de agua se eleva y se condensa en la superficie del cristal para su recolección. Mediante este proceso, se remueven impurezas tales como sales y metales pesados, y a al vez, se destruyen o eliminan los microorganismos. Los destiladores de este tipo solo requieren energía solar para operar, no tienen partes móviles sujetas a desgastes.

Los destiladores solares eliminan:

- Sales y minerales (Fe, Mn)
- Metales Pesados (Pb, As, Hg)
- Bacterias y Parásitos ( E. Coli ) [4]



### ***Funcionamiento***

La radiación solar atraviesa el metacrilato transparente (1) y calienta el agua sucia contenida en la bandeja negra (2), que se va evaporando. El vapor de agua se condensa en pequeñas gotitas al entrar en contacto con las paredes del invernadero, que están más frías que el ambiente interior del destilador. Estas gotas van resbalando por los laterales inclinados del destilador, yendo a caer en la bandeja de aluminio (3). Esta bandeja de recogida del agua limpia (3) está inclinada, de manera que todas las gotas confluyan en el tubo de salida (4). [5]

### ***Ejemplos de sistemas fotovoltaicos destinados a bombeo de agua***

Se describen a continuación sistemas de Bombeo de Agua energizados con sistemas Fotovoltaicos en Provincia de La Rioja – Rep. Argentina.

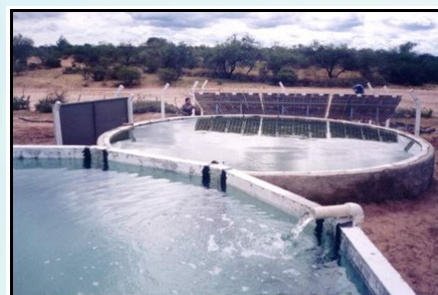


### Sistema 1

Localidad: El Retamo  
Dpto.: Chemical  
Datos Solares: Chemical, La Rioja  
Lat. Sur: 30:22  
Long. Oeste: 66:16  
Asnm: 416 m  
Montaje de Panel: Fijo  
Inclinación de Panel: 30°  
Total de Módulos Fotovoltaicos: 32  
Serie: 8 ---- Paralelo: 4  
Potencia: 1600 Wp.  
I. máx.: 7 A  
I.cc.: 12,7 A  
V.máx: 136,8 v  
V. en vacío: 168,8 v  
Bomba: Grundfos SA 1800/SP5A-7  
Total perforación: 28 m.

### Rendimiento Estimado

Mes	KWh/m <sup>2</sup>	Agua Bombeada m <sup>3</sup>
Enero	5,33	30,31
Febrero	5,76	34,12
Marzo	4,68	27,01
Abril	4,41	25,79
Mayo	3,31	18,49
Junio	2,57	12,77
Julio	3,19	18,10
Agosto	4,63	28,51
Setiembre	4,37	25,42
Octubre	5,49	33,00
Noviembre	5,89	34,78
Diciembre	5,54	31,75



### Sistema 2

Localidad: Torrecitas  
Dpto.: General Ocampo  
Datos Solares: Chemical, La Rioja  
Lat. Sur: 30:22  
Long. Oeste: 66:16  
Asnm: 416 m  
Montaje de Panel: Fijo  
Inclinación de Panel: 30°  
Total de Módulos Fotovoltaicos: 32  
Serie: 8 ---- Paralelo: 4  
Potencia: 1600 Wp.  
I. máx.: 7 A  
I.cc.: 12,7 A  
V.máx: 136,8 v  
V. en vacío: 168,8 v  
Bomba: Grundfos SA 1800/SP5A-7  
Total perforación: 33 m.

### Rendimiento Estimado

Mes	KWh/m <sup>2</sup>	Agua Bombeada m <sup>3</sup>
Enero	5,33	23,69
Febrero	5,76	27,40
Marzo	4,68	21,02
Abril	4,41	20,37
Mayo	3,31	13,61
Junio	2,57	9,03
Julio	3,19	13,43
Agosto	4,63	23,02
Setiembre	4,37	19,87
Octubre	5,49	26,34
Noviembre	5,89	28,02
Diciembre	5,54	25,05



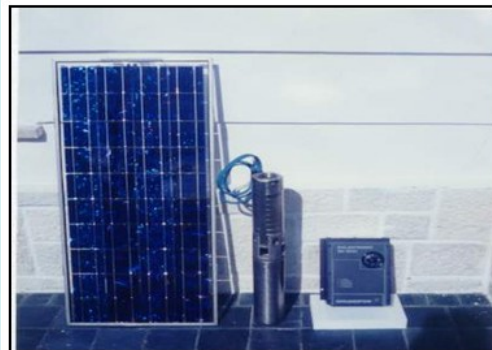




## Prueba de sistema en laboratorio



Medición de panel Fotovoltaico



Prueba de Equipo de Control



Cuba de Ensayos



Sistema Doméstico de Bombeo de Agua





## 6. CONCLUSIÓN

La Asamblea Mundial de las Energías Renovables 2005 celebrada en Bonn (Alemania) finalizó sus sesiones con la adopción de una declaración final titulada “El Derecho Humano a la Energía Renovable”.

El Derecho Humano a la Energía Renovable “Todos los seres humanos nacen iguales en dignidad y derechos”. Este primer artículo de la Declaración Universal de los Derechos Humanos articula un compromiso básico. Sólo respetando este compromiso se puede asegurar una vida humana en paz. La energía es el prerequisite fundamental de cada vida humana. La disponibilidad de energía es un derecho humano fundamental e indivisible.

La experiencia del siglo XX demuestra que los sistemas de suministro energético establecidos, que se basan principalmente en los combustibles fósiles y la energía nuclear, no son capaces de garantizar este derecho humano a cada persona del planeta. El derecho humano a la energía se viola cotidianamente miles de millones de veces. Debido al agotamiento de las fuentes de energía convencionales y a los daños ambientales y climáticos asociados a su uso, este derecho no puede garantizarse a un número siempre creciente de personas. El derecho humano a la energía sólo puede garantizarse mediante las energías renovables.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Bombeo de Agua Mediante Energías Alternativas Gudemos - Revista Mediterránea Ingeniería & Tecnología. Nº 21
- (2) Sandia Nacional Laboratories
- (3) Obras de Estudio Integral de Ingeniería –Energías Alternativas – Electricidad Integral
- (4) Santana – Foster. Experiencias en el uso de destiladores solares
- (5) Destilador solar de dos vertientes. Terra Org.
- (6) Quadri, Néstor P. Energía Fotovoltaica –Editorial Alsina. Catálogo Técnico Grundfos.





## PIRÓLISIS RÁPIDA DE ACEITES VEGETALES: UNA ALTERNATIVA ENERGÉTICA

Erick González – [gonzalezerick@yahoo.com](mailto:gonzalezerick@yahoo.com)  
HIDROXSOL-CUNOC-CONCYT

**Resumen.** Los procesos de pirólisis han venido ocurriendo desde la existencia de materia orgánica sometida a la actividad volcánica. La humanidad utiliza la pirólisis para producir carbón desde la era del hierro (1200 años a de C). Desde entonces, las técnicas para pirólisis han evolucionado en sus tres formas: pirólisis lenta, pirólisis de gasificación y pirólisis rápida. La pirólisis rápida es menos conocida y ha sido investigada ampliamente utilizando biomasa sólida, principalmente fragmentos de madera para la obtención de pirolizatos condensados en una mezcla de líquidos llamado bio-petróleo; incluso ya existen aplicaciones a nivel industrial. Con menor énfasis se ha investigado la pirólisis rápida utilizando aceites vegetales para obtención de bio-petróleo. Y aún menos investigadores han incursionado en la pirólisis rápida de aceites vegetales para producir compuestos hidrocarburos de cadena corta para quemarlos directamente al salir del reactor. Este es el caso de los quemadores de aceite vegetal investigados en la Universidad de Hohenheim, Stuttgart, Alemania y en el Centro Universitario de Occidente de la Universidad de San Carlos de Guatemala. En este trabajo se describen los procesos de la pirólisis, haciendo énfasis en pirólisis rápida y una breve descripción del quemador elaborado en Guatemala.

**Palabras clave:** pirólisis rápida, aceite vegetal, bio-petróleo, quemador, combustión.

### 1. INTRODUCCIÓN

La pirólisis es el proceso termo-químico en ausencia parcial o total de oxígeno a que se somete la biomasa para obtener productos combustibles. Es someter a la materia orgánica a temperaturas superior a 200 °C con restricción de oxígeno. Estos productos pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos según la temperatura alcanzada y la velocidad con la cual se entrega energía calorífica. Los procesos de pirólisis se pueden clasificar de la siguiente manera:

1. Pirólisis lenta: proceso para fabricación de carbón vegetal utilizado por la humanidad desde hace siglos (1200 a. C para metalurgia). Básicamente consiste en someter a la materia orgánica a temperaturas en un rango de 280 a 500 °C (FAO, 1983) con períodos de retención que varían entre unos 3 a 6 días y hasta 30 días con presencia reducida de oxígeno. El producto obtenido son líquidos piroleñosos y fundamentalmente carbón vegetal que es un combustible sólido.
2. Gasificación: proceso llevado a cabo a temperaturas entre 700 y 1200 °C en presencia restringida de aire. Se obtienen principalmente los gases: nitrógeno, hidrógeno, metano y monóxido de carbono (Carrasco, 2009: 42)
3. Pirólisis rápida: Es el proceso termoquímico de “muy alto flujo de calor hacia la biomasa con la correspondiente alta tasa de calentamiento de la biomasa. Por lo tanto, muy poco tiempo de residencia es requerido en la zona de reacción térmica, idealmente solo unos pocos cientos de milisegundos (Ringer, Putsche y Scahill, 2006:5) . En el quemador CUNOC II-D se sometieron los diversos aceites vegetales desde una temperatura inicial de 350 °C en el precalentamiento hasta una mayor, a





los 800 °C, en la etapa final de gasificación. El atractivo de la Pirólisis Rápida son sus rendimientos: “ rinde hasta 80% en peso líquido en alimentación seca (Maher y Bressler, 2006:2353) y el valor del poder calorífico de sus productos comparado con la biomasa original; en el caso de madera ésta tiene un poder calorífico de 18MJ/Kg mientras que el bio-petróleo tiene 17MJ/Kg según citan Ringer, Putsche y Scahill (2006:6).

4. “Tres productos primarios son obtenidos de la pirólisis de la biomasa. Esos son el alquitrán, gases permanentes y vapores, estos últimos condensan a temperatura ambiente en un viscoso líquido oscuro café”. (Ringer, Putsche y Scahill, 2006: 5).

Es menester hacer notar que los procesos de pirólisis no son nuevos pues han ocurrido de forma natural en la Tierra desde que el momento en que hubo materia orgánica sometida a la actividad eruptiva de los volcanes. “En la naturaleza han ocurrido casos en que la materia orgánica es destruida y transformada en gases y líquidos debido al calor de material piroclástico (lapilli, cenizas o pómez) con temperaturas superiores a los 500 °C eyectado por volcanes. Se citan por ejemplo, a las personas que murieron en Pompeya y Herculano en el año 79 d.C o los restos de carbón vegetal en los afloramientos de pumicita a orillas de la carretera que conduce a la cabecera del Municipio de San Juan Ostuncalco, Quetzaltenango, Guatemala. Ambos casos son ejemplo de pirólisis natural, el primero probablemente en ausencia de oxígeno gasificando los cuerpos y el segundo una pirólisis en presencia parcial de oxígeno” (González, 2012:15).

## 2. BREVE HISTORIA DE LA PIRÓLISIS APLICADA A ACEITES VEGETALES

- 1888: Engler aplicó esta tecnología en sus intentos de demostrar que el petróleo tiene origen en materia orgánica (Kac, Aleksander, 2001: 1)
- 1932: Egloff y Morrel, citados por Maher y Bressler (2006: 2356) hacen los primeros trabajos que incluyen el fracturamiento de aceite de algodón
- 1933: Egloff y Nelson trabajan con pirólisis aplicada en aceite de foca de Alaska. Tanto en las pruebas de 1932 y ésta, se trabajó con temperaturas de 445 a 485 C y presiones de 0.93a 1.3 MPa (135-200 PSI) para producir gasolina con rendimientos entre 57 a 60% (Maher y Bressler, 2006: 2356)
- 1914 a 1947: Según cita Maher y Bressler (2006:2356) y Aleksander Kac (2001), la carencia de combustibles durante la Primera y Segunda Guerra Mundial obligó a utilizar la pirólisis de los triglicéridos de los aceites vegetales utilizando procesos de fracturamiento (“cracking”) de moléculas de aceite de Tung.
- 1947: Chan y Wan continúan con las investigaciones utilizando aceite de tung y “Ya para 1947... continuaron estos procesos y reportaron rendimientos de hasta 70%, de los cuales el 25% se reportó como gasolina siempre sobre la base de aceite de tung, incluso para producir combustible diesel (Maher y Bressler,2006:2356)
- 1980 a 1990: Fue la era dorada del desarrollo de la pirólisis de la biomasa gracias a los avances realizados por equipos de investigación de Estados Unidos de América y Canadá. Para los años 90, Europa toma el liderazgo en los avances de la tecnología de pirólisis rápida de biomasa; e hicieron investigaciones en Reino Unido y Francia (Ringer, Putsche y Scahill, 2006:4). En este período la atención se centra en biomasa sólida: material leñoso y de madera.
- 1983 Alencar y su equipo de investigadores pirolizaron aceite de piqui, Babbasu y aceite de palma.



- 1988 Schwab realiza estudios de pirólisis rápida con aceites de girasol, canola soya y alazor.
- 1998 Dandik y Aksoy hacen pirólisis empleando aceites usados de frituras.
- 2002. Elmar Stumpf de la Universidad de Hohenheim, Stuttgart, Alemania investiga el diseño de un quemador para pirolizar aceites vegetales, trabajando diversos aceites tales como colza, algodón, coco, ricino entre otros. Sus investigaciones incluyen pruebas en Alemania, Guatemala, Filipinas, Rwanda y Kenia.
- 2003: En Brasil Daniela Lima y su equipo de investigadores hacen estudios en aceites de palma, soya y ricino.
- 2005: Los investigadores europeos Oasmaa, A; Peacocke, C.; Gust, S.; Meier, D.; McLellan, R., elaboran normas y estándares para líquidos pirolizados
- 2006: Los investigadores de Europa llevan a cabo el proyecto de Investigación Avanzada en Combustión para Energía de los Aceites Vegetales llamado ACREVO en sus siglas en Inglés: “Advanced Combustion Research for Energy from Vegetable Oils” (ACREVO,2001:1).
- 2006: Maher, K.D. y BRESSLER, D.C. publican: Pyrolysis of triglyceride materials for the production of renewable fuels and chemicals Department of Agriculture, Food and Nutritional Sciences, University of Alberta, 410 Ag/For Building, Edmonton, AB, Canada T6G 2P5 2006.

### 3. COMPUESTOS PRODUCIDOS CON PIRÓLISIS RÁPIDA DE ACEITES VEGETALES

Se desconoce con precisión la secuencia de reacciones químicas que ocurren durante la pirólisis rápida de aceites vegetales a alta temperatura así como de los productos finales. Un resumen tentativo se presenta a continuación:

Temperaturas entre 200 y 300 °C, por medio de una pirólisis gruesa de las grasas, resulta en la polimerización: una degradación de los aceites vegetales en acroleína, ketenos, ácidos grasos (ácidos carboxílicos) (Maher y Bressler 2006: 2356).

Entre 300 y 500 °C la formación de alcanos ( $C_nH_{n+2}$ ) y alquenos ( $C_nH_n$ ) (ACREVO, 2001:2) Maher y Bressler (2006:2356) cita a Fortes and Baugh (1999) quienes pirolizaron aceite de fruta macauba a temperaturas entre 400 y 1000 °C y con tiempos de 10 a 30 segundos obteniendo los siguientes pirolizatos principales: aldehídos, alquenos, ácidos carboxílicos y como productos secundarios los alcanos, cicloalcanos y otros desconocidos. “No aromáticos fueron detectados, lo cual es contrario a resultados previos (Schwab et al., 1988)” (Maher y Bressler, 2006:2356). Sabemos sin embargo, que si estos compuestos no son rápidamente extinguidos pueden fracturarse adicionalmente en fragmentos de pequeño peso molecular y/o polimerizar en grandes fragmentos, ambos a expensas de los fragmentos formados en el producto líquido deseado. (Ringer, Putsche y Scahill, 2006:5). Aplicando este calor a los componentes macropoliméricos resultará en su rompimiento en fragmentos más pequeños. Debido al oxígeno presente en estos fragmentos, ellos tenderán a ser inestables arriba de los 400 °C y continuarán haciendo cambios químicos a menos que sean térmicamente extinguidos (Ringer, Putsche y Scahill, 2006:5). “En este rango de temperaturas los pirolizatos gaseosos producidos durante la pirólisis y luego sometidos a condensación en un intercambiador enfriado por agua se convierten en dos tipos de líquidos: una fracción acuosa y otra fracción orgánica” (Lima et al., 2003: 989).



#### 4. VENTAJAS DE LA PIRÓLISIS RÁPIDA DE ACEITES VEGETALES

- Varios tipos de aceites vegetales pueden utilizarse en pirólisis como se muestra en la tabla 1.

Aceite vegetal	Investigadores
Aceite usado en frituras	Dandik y Aksoy 1998
Acido Oleico	Alencar et al 1983
Alazor	Schwab et al 1988
Algodón	Egloff y Nelson 1933
Babbasu	Alencar et al 1983
Canola	schwab 1988, González 2007
Coco	Stumpf 2002
Girasol	Schwab 1988, Gonzalez 2007
Macauba	Fortes y Baugh 1999, 2004
Maíz	González 2007
Palma africana	Alencar et al 1983, Lima et al 2004
Piqui,	Alencar et al 1983
Ricino	lima et al 2004, González 2007, Stumpf 2002
Soya	lima et al 2004, Schwab et al 1988, González 2007,
Tung	Chang y Wan 1947
Trigliceridos puros	
Trialurin	Kitamura 1971
tripalmitin	Higman et al 1973 y Kitamura 1971
Triestearina	Higman et al 1973 y Kitamura 1971

**Tabla 1:** Aceites vegetales y trigliceridos utilizados en pirólisis rápida

- No necesariamente se utilizan aceites vegetales alimenticios, puede utilizarse aceite de ricino, de Jatropha, y da opción, previo filtrado de utilizar aceites usados procedentes de frituras.
- Facilidad de transporte y almacenamiento de los aceites.
- En aceites vegetales nuevos el contenido de agua es nulo o extremadamente escaso. No es el caso de aceites ya tilizados en frituras.
- A altas temperaturas todos los compuestos producidos pueden someterse a combustión directa evitando la producción de bio-petróleo.
- A altas temperaturas mayores a los 600 °C se producen escasas o nulas cantidades compuestos aromáticos.
- A alta temperaturas > 800 °C los componentes principales predominantes son el etileno y el propileno. Además la acroleína es fracturada en otros compuestos de menor tamaño de cadena y queda eliminada a partir de los 400 °C. A más alta temperatura, el fracturamiento ocurre produciendo hidrocarburos de cadena corta. Reacciones de rompimiento térmico son muy complejas y no han sido bien caracterizadas, pues se piensa que muchos compuestos tipo radicales libres están presentes en los prontamente formados productos (Ringer, Putsche y Scahill, 2006:5).





- Por su naturaleza líquida no se requiere energía adicional de preparación previo al reactor de pirólisis pues evita uso de energía para corte, astillado, cribado y secado, procesos que se requieren cuando se trata de pirólisis rápida de restos de madera.
- No se requiere adición de gases inertes de arrastre como los requeridos cuando se utilizan partículas de biomasa sólida.
- La pirólisis se realiza sin la presencia del oxígeno del aire.
- Los condensables que se obtienen forman bio-petróleo muy similar al petróleo y por lo tanto al destilarlos se pueden obtener derivados similares a éste.

## **5. QUEMADOR PIROLIZADOR DE ACEITES VEGETALES CUNOC II-D**

### **5.1 Origen del quemador CUNOC II-D**

CUNOC IID es el nombre con el cual se bautizó un modelo que quemador y no es más que las siglas del Centro Universitario de Occidente –CUNOC- de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Tuvo sus orígenes en 2002, cuando después de haber colaborado con Elmar Stumpf del Instituto de Agricultura Tropical y Subtropical de la Universidad de Hohenheim, Stuttgart, Alemania, con un quemador traído de esa universidad. Este quemador tuvo deficiencias y se crea otro diseño bautizado CUNOC I (2003), que tampoco los resolvió pero dio las bases para crear un modelo mejorado: el CUNOC II en 2004.

Con financiamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de Guatemala –CONCYT- fueron construidos cinco prototipos CUNOC II modelos A, B,C que sucesivamente fueron resolviendo los problemas de carbonización, tiempo de arranque, emisión de humos y flameo resonante, hasta llegar al diseño CUNOC II-D en el año 2007. Con dicho quemador se hicieron pruebas de pirólisis rápida con aceites de maíz, soya, canola, mezcla de aceites vegetales, girasol, ricino y biodiesel.

Los problemas a resolver en esta investigación, en orden de importancia fueron: las incrustaciones de carbón en el tubo gasificador, la dificultad de eliminar esas incrustaciones y el flameo resonante la formación de humos irritantes al apagar el quemador. Esto se hizo con la restauración y evaluación del quemador CUNOC II original, los rediseños, construcción y evaluación de los modelos hasta llegar al modelo CUNOC II-D.

### **5.2 Resultados obtenidos con el Quemador CUNOC II-D**

- Consumo específico promedio: 50 cc/ Litro de agua.
- Rangos de Potencia Neta: 356<sup>a</sup> 1071 Watt
- Potencia neta promedio: 550 Watt
- Se obtuvo mejor transferencia de calor y aprovechamiento de la energía con el uso de olla de Peltre (ver Fotografía 2)
- El exceso de aceite origina llama amarilla, enfriamiento del quemador y creación de humos.
- El precalentamiento se hizo con antorcha de gas propano y duraba en promedio 1 minuto.
- No se detectaron depósitos de bio-oil.



- La temperatura en el tubo gasificador fue mayor a 800 °C lo cual hace prever la formación de hidrocarburos insaturados de cadena corta, principalmente etileno y propileno (ver Fotografía 1)

## 6. PERSPECTIVA DE INVESTIGACIONES BASADAS EN APLICACIONES DE LA PIRÓLISIS RÁPIDA DE ACEITES VEGETALES

Los productos de la pirólisis rápida pueden tener dos destinos:

- a) Obtención de Bio-petróleo:** Obtención de compuestos condensables en una mezcla de líquidos o Bio-petróleo para posterior destilación de combustibles hidrocarburos similares a los obtenidos por destilación de petróleo.
- b) Combustión directa de los productos obtenidos:**
  - I. Estufas utilizando como base el diseño del quemador CUNOC IID.
  - II. Combustible para motores estacionarios de ciclo Otto (encendidos por chispa). Aunque falta investigar, el rango de temperaturas hace prever que un buen porcentaje de gases combustibles se produzcan con la pirólisis rápida.
  - III. Combustible complementario en motores estacionarios ciclo Diesel.

## 7. CONCLUSIONES

- La pirólisis rápida ha ocurrido de forma natural como consecuencia del contacto de productos volcánicos con materia orgánica.
- La pirólisis rápida en aceites vegetales es un hecho pudiéndose utilizar los pirolizatos para condensarlos y producir bio-petróleo o quemarlos directamente.
- La pirólisis rápida en aceites vegetales es más eficiente que la pirólisis rápida en materia orgánica sólida debido a que se puede controlar el volumen de la biomasa y su área de transferencia de calor más rápidamente. Además los aceites no contienen agua (como el caso de productos de madera) y no se requiere inversión de energía en procesos para preparar previamente la biomasa tal como corte, cribado y deshidratado.
- La masificación del quemador CUNOCII-D puede convertirse en una alternativa al utilizarlos como estufas que quemen aceites vegetales no comestibles tales como aceite de Piñon (*Jatropha Curcas L.*) o de Ricino (*Ricinus Communis*).
- Hace falta investigar aplicaciones de pirólisis rápida de aceites vegetales en motores de combustión interna estacionarios.



Fotografía 1. Quemador CUNOC IID. Vista inferior  
y fusión de fibra de vidrio. Fuente: González



Fotografía 2. Pruebas de eficiencia utilizando olla  
de cocción

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ACREVO Project. Final Report, Advanced Combustion Research for Energy from Vegetable Oils. Laboratoire de Combustion et Systemes Reactifs, Orleans France, 2006 - biomatnet@biomatnet.org
- (2) Alencar J, Alves P.y Craveiro A. Pyrolysis of tropical Vegetable Oils. 1983.
- (3) Carrasco, Juan Esteban. Modulo V: Energía de la biomasa: Biocombustibles sólidos. Ministerio de Ciencia e Innovación, CIEMAR y CEDDET. España 2009.
- (4) González, Erick. Optimización del diseño y evaluación de quemador tipo CUNOC II para estufas a base de aceite vegetal y biodiesel. Proyecto FODECYT 10-2007. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología –CONCYT- Guatemala 2012.
- (5) FAO. Métodos simples para fabricar carbon vegetal M-37. ISBN 92-5-301328-1 1983.
- (6) Fortes I.C.P, y BAUGH, P.J. Study of Analytical On-line Pyrolysis of Oils from Macauba Fruit (*Acrocomia sclerocarpa* M) via GC/MS. Departamento de Química, ICEx, Universidade Federal de Minas Gerais, 31270-901 Belo Horizonte - MG, Brazil and Department of Chemistry and Applied Chemistry, University of Salford Salford M5 4WT, UK 1999.
- (7) Kac, Aleksander. YAHOO .(<http://tech.groups.yahoo.com/group/Biodiesel/message/1031> <[Biodiesel@yahoo.com](mailto:Biodiesel@yahoo.com), February 01, 2001)
- (8) Maher, K.D. y BRESSLER, D.C. Pyrolysis of triglyceride materials for the production of renewable fuels and chemicals Department of Agriculture, Food and Nutritional Sciences, University of Alberta, 410 Ag/For Building, Edmonton, AB, Canada T6G 2P5 2006.
- (9) Lima, Daniela; SOARES, Valerio; Ribeiro, et al. Diesel-like fuel obtained by pyrolysis of vegetable oila Instituto de Química, Universidade de Brasília, CP 4478, 70919-970 Brasília-DF, Brazil b CEPAT-ANP, Brasília-DF, Brazil. 2003
- (10) Oasmaa, A; Peacocke, C.; Gust, S.; Meier, D.; McLellan, R. Norms and Standards for Pyrolysis Liquids. End-User Requirements and Specifications. Finland, United Kindom, Germany. 2005.
- (11) Ringer M.; Putshe V. y Scahill, J. Large-Scale Pyrolysis Oil Production: A Technology Assessment and Economic Analysis. National Renewable Energy Laboratory/TP-510-37779. 2006
- (12) Stumpf, Elmar. Estufa Hohenheim a base de aceites de plantas. Universidad Hohenheim, Sttutgart, Alemania , 2003.





## BIODIGESTOR FLEXIBLE ENERGÍAS DEL SOL S.A. BIOGAS Y BIOFERTILIZANTE AL ALCANCE DE TU MANO

Juan Martín Andrés – [energiasdelsolsa@gmail.com](mailto:energiasdelsolsa@gmail.com)  
Energías del Sol S.A.

**Resumen.** Actualmente, la digestión anaeróbica en el ámbito rural, se encuentra poco difundida a nivel mundial. Se cree que su poca divulgación se debe a desconocimiento del tema y a que los precios de los digestores no se adecuan a lo que un productor rural puede pagar. Energías del Sol S.A. ha desarrollado un digestor flexible confeccionado con materiales durables y seguros que se encuentra al alcance del presupuesto de los usuarios rurales.

**Palabras clave:** biogás, digestor flexible, energías del Sol.

Energías del Sol S.A. es una empresa que fabrica y comercializa digestores flexibles anaerobicos para tratamiento de efluentes orgánicos. Se obtiene como subproductos del proceso de fermentación anaerobica, Biogás y Biofertilizante.

Si bien en China e India el uso de biodigestores en el ambito rural está bastante difundido, parece ser que en el resto del mundo todavía no se admiran sus virtudes. El campo de acción de los digestores anaeróbicos comprende el tratamiento de muchos efluentes agrarios e industriales, como ser las heces generadas por animales confinados en:

- Feed Lots
- Tambos
- Frigoríficos
- Criaderos de cerdos, caballos, aves y otros animales confinados.

Pero también existen otras industrias generadoras de efluentes con características adecuadas para ser procesados mediante fermentación anaeróbica:

- Orujos de industria olivícola.
- Mostos de industria vitivinícola
- Vinaza de la industria azucarera.
- Residuos de industria de conservas.
- Residuos solidos urbanos.
- Efluentes cloacales urbanos.

Además de los molestos olores, la proliferación de moscas, ratas, vectores transmisores de enfermedades y la posibilidad de contaminación de napas, dichos lugares deben gastar energía y mano de obra en el manejo de los residuos.

Llama poderosamente la atención que ni siquiera en las áreas rurales se hayan apropiado de dicha tecnología. Se ha concluido que la falta de difusión masiva se debe a cuatro factores principales:



- a) Desconocimiento de la tecnología por parte de los usuarios finales.
- b) Para los digestores contruidos in situ con materiales tradicionales, como cemento, ladrillos, etc., se debe contar con conocimientos previos en el uso de los mismos y tener suficiente tiempo y habilidades para realizarlos. En digestores mayores a 5 metros cúbicos, el incremento de costos en movimiento de suelo, mano de obra y complejidad de la construcción atenta contra el éxito final de su implementación.
- c) Los digestores mayores a 5 metros cúbicos, ya sean metálicos o de materiales compuestos o plásticos, contruidos de manera serial en fábricas, poseen un costo logístico y de instalación muy elevado. Dicho incremento influye en el costo total de la instalación.
- d) La operatoria de los digestores parece ser complicada. Se debe prestar atención a factores como porcentaje de sólidos disueltos, temperatura, agitación, tiempo de residencia. El mantenimiento de la fermentación parece ser un proceso dificultoso y de alta demanda de atención.

Para que la tecnología de la digestión anaeróbica tenga posibilidades de masificarse se deben resolver los problemas arriba enunciados y el digestor, preferiblemente, debe poseer las siguientes características:

- 1. El precio del digestor debe ser accesible para los emprendimientos rurales.
- 2. Su instalación no debe requerir movimientos de suelos.
- 3. El costo logístico debe ser una fracción menor del precio del digestor.
- 4. Debe poder manipularse como máximo con dos personas.
- 5. El usuario debe poder instalarlo sin dificultad a partir de un manual de instalación.
- 6. Debe estar confeccionado con materiales que duren por lo menos 10 años expuestos a la intemperie.
- 7. No debe agregar una complicación a las tareas habituales del emprendimiento.
- 8. Su operatoria debe ser sencilla y libre de problemas.
- 9. Debe solucionar el problema de la disposición de los efluentes.
- 10. Debe tener el visto bueno de las autoridades sanitarias y leyes de aplicación en el tratamiento de efluentes.
- 11. Al finalizar su vida útil, los materiales del producto deben poder reciclarse en un 100%.

Energías del Sol S.A. ha resuelto estos problemas y ha diseñado y patentado su digestor flexible. Es un producto que se comercializa en un *kit* listo para armar. Las dimensiones estándar son de 1, 5, 10, 25 y 50 metros cúbicos. Se traslada sin inconvenientes en la caja de una camioneta. Cuando se encuentra desarmado, el digestor solo ocupa una fracción mínima del tamaño final, un 3/1000 del volumen desplegado para el digestor de 5mts<sup>3</sup>. El usuario final instalará los digestores con la ayuda de otra persona a partir de un manual de procedimientos paso a paso. Asimismo, contará con videos explicativos de su uso en internet. Una vez armado, el digestor tiene un sistema de presiones autocompensados, mediante el cual, nunca se supera la presión de diseño del mismo. Posee capacidad de almacenar una porción de biogás generado, permitiendo actuar de amortiguador del consumo.





*Fotografía: Digestor flexible Energías del Sol S.A. Tamaño: 5 metros cúbicos.*

## **Conclusiones**

El digestor flexible Energías del Sol S.A. permitirá a los usuarios acceder a la tecnología de la digestión anaeróbica de manera segura y a bajo costo, convertir su problema de efluentes en una fuente renovable de energía y devolverle al suelo los nutrientes en formato de fertilizante orgánico.

## **Agradecimientos**

A los emprendedores. Porque no todo está inventado

A mis Padres. Ejemplos y Maestros del camino de la vida. Por su amor y apoyo incondicional.

A mi Esposa Lorena. Por su apoyo, comprensión, paciencia, perseverancia, coraje, optimismo y energía.

Cualidades muy pequeñas comparadas con el Amor que nos tenemos.





## **MINIFORO IBEROEKA USO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN SISTEMAS PRODUCTIVOS**

---



### **3. MINIFORO IBEROEKA USO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN SISTEMAS PRODUCTIVOS**

#### **3.1 ANTECEDENTES**

El Ministerio de Educación, a través del Viceministerio de Ciencia y Tecnología, el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo - CYTED - y la Red Boliviana de Investigación e Innovación de Energías Renovables, organizaron el Miniforo IBEROEKA sobre “Uso de las Energías Renovables en Sistemas Productivos” realizado el 4 y 5 de octubre de 2012 en el departamento de Cochabamba-Bolivia.

El evento fue desarrollado en sesiones plenarias para la discusión de mecanismos de interacción, entre industrias, universidades y centros de I+D, para el desarrollo y transferencia de tecnologías relacionadas con la temática principal del evento.

El Miniforo IBEROEKA es un evento focalizado a empresarios e investigadores que participan en actividades relacionadas con las Energías Renovables. El principal objetivo es el de generar Proyectos de Innovación IBEROEKA, para lo cual se realizaron encuentros bilaterales y multilaterales entre empresarios y representantes de centros de investigación y universidades de los diferentes países participantes.

CYTED es el programa intergubernamental que gestiona los Miniforos IBEROEKA. Tiene como objetivo principal contribuir al desarrollo de la Región Iberoamericana mediante el establecimiento de mecanismos de cooperación entre grupos de investigación de Universidades, Centros de I+D y Empresas innovadoras de los países iberoamericanos, que pretenden la consecución de resultados científicos y tecnológicos transferibles a los sistemas productivos y a las políticas sociales.

CYTED promueve la investigación e innovación como herramientas esenciales para el desarrollo tecnológico y social, así como para la modernización productiva y el aumento de la competitividad para el desarrollo.

Este evento se realiza en el marco de la política nacional para el sector energético de acuerdo a los criterios de universalidad, responsabilidad, accesibilidad, continuidad, calidad, eficiencia, eficacia, tarifas y cobertura necesaria.

El Miniforo IBEROEKA es organizado por el Ministerio de Educación, a través del Viceministerio de Ciencia y Tecnología, y el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo - CYTED, con el apoyo de la Red Boliviana de Investigación e Innovación de Energías Renovables.

#### **3.2 OBJETIVO DEL MINIFORO**

Generar un espacio de intercambio de experiencias y socialización de conocimientos en cuanto a la aplicación de las energías renovables en sistemas productivos, como respuesta a comunidades alejadas y de difícil acceso a la Red Troncal.



### 3.3 LA ENERGÍA SEGÚN CYTED

La energía constituye un pilar del desarrollo socioeconómico y la calidad de vida. Sin embargo, como los sistemas energéticos constituyen una compleja y entrelazada red de actores relacionados con los recursos, fuentes y tecnologías, procesos de extracción, minería, transporte, almacenamiento, conversión, distribución, comercialización, operación y mantenimiento, etc. y como la mayoría de los recursos energéticos no están distribuidos de forma equitativa, el acceso a los servicios energéticos se convierte cada vez más en un problema.

Por otro lado la situación se presenta alarmante, aún cuando se han tomado medidas encaminadas a una mayor utilización de fuentes energéticas de origen renovable, la potenciación del ahorro energético y la diversificación, la mejora de los sistemas de combustión tradicional, la reconsideración de la energía nuclear y la búsqueda de nuevos portadores energéticos. Debido a la posible disminución del acceso a los combustibles tradicionales, el encarecimiento de sus precios y al impacto ambiental de los combustibles fósiles, los problemas derivados del suministro energético podrían convertirse en factores limitantes del desarrollo, y por tanto del bienestar.

Cubrir las necesidades de crecimiento energético de los países considerados desarrollados, y posibilitar al resto las mismas o parecidas opciones, en algunos casos las mínimas necesarias, para conseguir un desarrollo sostenible implica necesariamente la potenciación de la I+D+I.

### 3.4 EMPRESAS PARTICIPANTES

EMPRESA		SOLINOVA INNOVACIÓN EMPRESARIAL Y TECNOLÓGICA	
País	Brasil		
Representante	Cristhian Lao Vorobieff	Ciudad	Pirassununga, SP - Brasil
Email	<a href="mailto:contato@solinova.com.br">contato@solinova.com.br</a>	Código postal	13631-020
Cargo	Administrador asociado y Jefe de Proyecto e ingeniería	Dirección	Rua Joaquim Procópio de Araújo, 1891
Sitio-Web	<a href="http://www.solinova.com.br">www.solinova.com.br</a>	Teléfono	+55 19 3055 2428

SERVICIOS DEMANDADOS	Investigación y Desarrollo	Licencias/ Patentes
	Investigación y Desarrollo en nuevo control y automatización, sistemas SCADA, tarjetas controladoras (PCAs y PCBs), metalurgia, espejos técnicos, intercambiadores de calor de alto rendimiento, las tuberías de calor, termosifón, micro-turbinas, aislamiento térmico y actuadores lineales y de giro.	Desarrollo de aleación de bajo costo que resiste altas temperaturas (> 900°C) para paletas de turbinas e intercambiadores de calor de alta eficiencia.
SERVICIOS OFRECIDOS	Investigación y Desarrollo	Licencias/ Patentes
	Fuentes Renovables de Energía, Energía Eólica, Energía solar (fotovoltaica y térmica convencionales y concentrada), Energía de Biomasa, Biocombustibles líquidos y gaseosos, Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH), Eficiencia y Gestión de la Energía.	Intercambiador de calor con tubos multicapa para receptores solares.





EMPRESA		ENERGÍAS ALTERNATIVAS – ELECTRICIDAD INTEGRAL	
País	Argentina	Ciudad	Córdoba
Representante	Emilio Gudemos	Código postal	
Email	<a href="mailto:egudemos@ciec.com.ar">egudemos@ciec.com.ar</a>	Dirección	Venta y Media 5555
Cargo	Consultor Independiente	Teléfono	+54 351 4840065
Sitio-Web	<a href="http://www.todoagro.com.ar/documentos/2012/energia-salternativas.html">http://www.todoagro.com.ar/documentos/2012/energia-salternativas.html</a>		

SERVICIOS DEMANDADOS	Investigación y Desarrollo	Cooperación Comercial
	Intercambio de experiencias	Conformación de Grupos de trabajos gubernamentales, universitarios y privados en desarrollo e implementación de Sistemas Solares Fotovoltaicos. Entidades Gubernamentales, de Capacitación (Universidades, Colegios de profesionales, Escuelas, etc.) y Empresas privadas, que planeen ó estén desarrollando e implementando sistemas de energías renovables en planes de electrificación, iluminación, bombeo de agua, energía para telecomunicaciones, calefacción de agua. Así como también definiendo programas de capacitación a técnicos y usuarios.
SERVICIOS OFRECIDOS	Investigación y Desarrollo	Cooperación Comercial
	Investigación, e valuación de recursos energéticos naturales locales, pruebas, ensayo de equipos asociados a sistemas Fotovoltaicos	Consultorías, Asesoramientos, Capacitación, Formación de Formadores Técnicos relacionados a la aplicación concreta de Energías Renovables, Solar Fotovoltaica y Térmica, Eólica y Mini hidráulicas. Investigación, evaluación de recursos energéticos naturales locales aplicables a planes de provisión de energía eléctrica y calefacción mediante sistemas alternativos, confección de programas sistemáticos e integrales de instalaciones, relevamientos a campo destinados a proyectos específicos, Proyectos, Cálculos y Diseños de Generadores, Recomendaciones para instalaciones de sistemas Solares Fotovoltaicos y Eólicos primordialmente destinados al sector rural, Confección de especificaciones técnicas destinadas a Pliegos de Licitación, Aplicación de normativas técnicas, Evaluación de ofertas técnicas y económicas de Licitaciones, Dirección de obras. Capacitación y Formación Técnica Propuestas de Desarrollo de Cursos teóricos y prácticos, Seminarios, Conferencias, destinados a promover y difundir el aprovechamiento de recursos energéticos naturales en diversos niveles, técnicos, universitarios, gubernamentales, etc. Planes de Capacitación a autoridades, técnicos y usuarios. Conformación de equipos humanos técnicos de instalaciones y de mantenimiento.



EMPRESA		ENERGÍAS DEL SOL S.A.	
País	Argentina	Ciudad	Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
Representante	Juan M. Andrés	Dirección	San Martín 575 1er piso departamento "A"
Email	juanmandres@soldelas-pampas.com.ar	Código postal	1004
Cargo	Presidente	Teléfono	+54 0383 445 6221
Sitio-Web	<a href="http://www.energiasdelsol.com.ar">www.energiasdelsol.com.ar</a> <a href="http://www.digestoflexible.com.ar">www.digestoflexible.com.ar</a>		

SERVICIOS DEMANDADOS	Investigación y Desarrollo	Licencias/Patentes	Cooperación Comercial
	Se desarrollan y construyen Digestores Flexibles de Diferentes escalas patrones (las cuales pueden ser instaladas modularmente).		Si. Buscamos socios comerciales que quieran distribuir o fabricar bajo licencia nuestros productos (Digestores Flexibles).
SERVICIOS OFRECIDOS	Investigación y Desarrollo	Licencias/Patentes	Cooperación Comercial
		Licencia o Patente para Construcción de Digestor Flexible	

EMPRESA		AQUA LIMPIA	
País	Ecuador	Ciudad	Quito
Representante	Santiago Arcos	Dirección	La Condamine N17-15
Email	<a href="mailto:proarcos@aqualimpia.com">proarcos@aqualimpia.com</a>	Fax	+593 2506403
Cargo	Representante para Ecuador	Teléfono	+593 22565610 +593 999782600
Sitio-Web	<a href="http://www.aqualimpia.com">www.aqualimpia.com</a>		

SERVICIOS DEMANDADOS	Investigación y Desarrollo	Licencias/Patentes	Cooperación Comercial
	Se desarrollan y construyen Digestores Flexibles de Difer- entes escalas patrones (las cuales pueden ser instaladas modularmente).		Buscamos socios comerciales que quieran distribuir o fabricar bajo licencia nuestros productos (Digestores Flexibles).
SERVICIOS OFRECIDOS	Investigación y Desarrollo	Licencias/Patentes	Cooperación Comercial
	Realizadas en Alemania	Realizadas en Alemania	Biodigestores-Biogas-Biol; Ingeniería Sanitaria y Ambiental; Lagunas de Oxidacion; Protocolo De Kyoto-Proyect. Mdl; Capacitación; Reciclaje de Residuos Agrícolas.



EMPRESA		HIDROXSOL	
País	Guatemala		
Representante	Erick Mauricio Gonzalez De Leon	Ciudad	Quetzaltenango
Email	<a href="mailto:gonzalez Erick@yahoo.com">gonzalez Erick@yahoo.com</a>	Dirección	41 Av. 2.06 Zona 8
Cargo	Gerente Propietario	Fax	+502 77635005
Teléfono	+ 502 42125403	Teléfono	+502 77635005

SERVICIOS DEMANDADOS	Investigación y Desarrollo	Licencias/ Patentes
	Socios para investigación consorciada en biocombustibles-geotermia	Servir de distribuidor de componentes solares y pequeñas hidroeléctricas
SERVICIOS OFRECIDOS	Investigación y Desarrollo	Licencias/ Patentes
	Investigación consorciada en biocombustibles-geotermia	Elaboración de Leyes energéticas especialmente geotermia de media y baja entalpía.

EMPRESA		NOVA SOLAR	
País	Bolivia		
Representante	Rodolfo Astete Paredes	Ciudad	Cochabamba
Email	<a href="mailto:info@novasolar.com.bo">info@novasolar.com.bo</a>	Dirección	Av. Villazón Km1 (C.a a Sacaba)
Cargo	Propietario	Teléfono	+ 591 4 4534104
Sitio web	<a href="http://www.novasolar.com.bo">www.novasolar.com.bo</a>	Fax	+ 591 4 4534104

SERVICIOS DEMANDADOS	Investigación y Desarrollo	Licencias/Patentes	Cooperación Comercial
	Investigación y desarrollo de nuevos productos. Innovación de procesos de producción. Innovación tecnológica. Capacitación en Sistemas termosolares Sistemas fotovoltaicos Gestión comercial y de Marketing de energías renovables Gestión de energías renovables Gestión empresarial	Registro de propiedad intelectual para productos y procesos.	Servicios de importación y de trámites aduaneros Distribución y representación comercial a nivel nacional. Gestión comercial y de marketing Gestión administrativa y contable Asesoramiento legal Financiamiento para clientes a través del sistema bancario.
SERVICIOS OFRECIDOS	Investigación y Desarrollo	Licencias/Patentes	Cooperación Comercial
	Asesoramiento, elaboración, desarrollo e implementación de proyectos en el área termosolar y fotovoltaico. Capacitación en: Sistemas de Gestión de la Calidad Sistemas de Gestión Ambiental Instalación de Sistemas termosolares	Realizadas en Alemania	Asesoramiento y asistencia técnica para proyectos termosolares y fotovoltaico. Comercialización de sistemas termosolares para uso domiciliario e industrial. Instalación de sistemas termosolares. Comercialización de sistemas fotovoltaicos. Instalación de sistemas fotovoltaicos.





EMPRESA	POWER QUALITY INGENIEROS CONSULTORES ASOCIADOS S.A.C. – POWER QUALITY ICA S.A.C.		
País	Perú		
Representante	Perú	Ciudad	Ica
Email	<a href="mailto:powerqualityica@speedy.com.pe">powerqualityica@speedy.com.pe</a>	Dirección	Urbanización San Luis D-3, Ica, Ica, Perú
Cargo	Gerente General / Gerente de Proyectos e Ingeniería	Fax	+ 51 56 21-9696
Sitio web	<a href="http://www.pqica.com.pe">www.pqica.com.pe</a>	Teléfono	+ 51 961 1010 66

SERVICIOS DEMANDADOS	Investigación y Desarrollo	Cooperación Comercial
	Desarrollo de equipamiento numérico de control y de telecomunicaciones, software (Administradores y/o Gestores de Plataformas de Medición de Energía y Plataformas de Comunicación Remota - SCADA) y de servicios especializados de todo tipo, dirigido a la implementación de PLATAFORMAS SMART GRID [sistemas de automatización, sistemas inteligentes de telemedida y/o telemedición de energía (AMR, AMI, otros), sistemas inteligentes de teleprotección eléctrica, sistemas inteligentes de telecontrol y otros temas análogos y/o complementarios].	Empresas y/o profesionales suministradores de equipamiento numérico de control y de telecomunicaciones, software (Administradores y/o Gestores de Plataformas de Medición de Energía y Plataformas de Comunicación Remota - SCADA) y de servicios especializados de todo tipo, dirigido a la implementación de PLATAFORMAS SMART GRID destinado al mejoramiento, aprovechamiento y optimización de los recursos energéticos y aplicados a los sistemas de energía eléctrica operados- consumidos por las Empresas Concesionarias de Electricidad y por los Clientes Industriales Finales.
SERVICIOS OFRECIDOS	Investigación y Desarrollo	Cooperación Comercial
		Prestación de servicios profesionales en auditoría, asesoría, consultoría y capacitación en general destinado al mejoramiento, aprovechamiento y optimización de los recursos energéticos aplicados a los sistemas de energía eléctrica habilitados en Muy Alta Tensión (MAT), Alta Tensión (AT), Media Tensión (MT) y Baja Tensión (BT) de Empresas Concesionarias de Electricidad y Clientes Industriales Finales; en las especialidades de eficiencia y ahorro energético general, calidad de los servicios eléctricos, iluminación, protección de sistemas eléctricos, mediciones en electricidad, tarificación de la electricidad, generación distribuida eléctrica, planificación, administración y operación de redes o sistemas eléctricos de distribución y de potencia, pérdidas de energía eléctrica, energía térmica y otros tipos de fuentes de energía y PLATAFORMAS SMART GRID [sistemas de automatización, sistemas inteligentes de telemedida y/o telemedición de energía (AMR, AMI, otros), sistemas inteligentes de teleprotección eléctrica, sistemas inteligentes de telecontrol y otros temas análogos y/o complementarios]. .



EMPRESA			
SITAP - SERVICIO INTEGRAL TÉCNICO Y ASESORIA EN PROYECTOS			
País	Bolivia		
Representante	Cesar Guerra Chacón	Ciudad	La Paz
Email	<a href="mailto:ce_guerra@yahoo.es">ce_guerra@yahoo.es</a> <a href="mailto:sitap@accelerate.com">sitap@accelerate.com</a>	Dirección	Pje. Holguín N° 33 Sopocachi
Cargo	Gerente Técnico	Teléfono	+ 591 2 2413256 + 591 67327470
		Fax	+ 591 2 2413256

SERVICIOS DEMANDADOS	Investigación y Desarrollo	Cooperación Comercial
	Toda investigación, aplicable al desarrollo comunitario que nos brinde productos económicos, eficientes y que respeten el medio ambiente.	Provisión de insumos para nuestras actividades. Calderas, tuberías, alefones, radiadores y demás accesorios.
SERVICIOS OFRECIDOS	Investigación y Desarrollo	Cooperación Comercial
		Proyectos de desarrollo comunitario instalaciones de sap, riego, producción, implicando la utilización de energías alternativas. Instalaciones de gas natural, domiciliaria y comercial, agua caliente sanitaria, etc. Asesoría sobre eficacia eficiencia energética para la economía y confort en los hogares. Eficiencia energética de edificios.

EMPRESA			
ENERGÉTICA			
País	Bolivia		
Representante	Renan Jorge Orellana Lafuente	Ciudad	Cochabamba
Email	<a href="mailto:renan@energetica.org.bo">renan@energetica.org.bo</a>	Dirección	Calle La Paz Nro 573
Cargo	Coordinador de Proyectos	Teléfono	+591 4 4253647
Sitio Web	<a href="http://www.energetica.org.bo">www.energetica.org.bo</a>	Fax	+591 4 4253825

SERVICIOS DEMANDADOS	Investigación y Desarrollo	Licencias/Patentes	Cooperación Comercial
	Sistemas fotovoltaicos conectados a la red.	Biodigestores, aprovechamiento de la biomasa para generación de electricidad.	Créditos de carbono para la implementación de proyectos con energías renovables. Tornillo de Arquímedes. Condensadores de agua potable para uso profesional y particular Estaciones autónomas, energía para sitios aislados. Estaciones solares portátiles.
SERVICIOS OFRECIDOS	Investigación y Desarrollo	Licencias/Patentes	Cooperación Comercial
	Asesoramiento en energías renovables y eficiencia energética.	Cocinas eficientes a leña.	Implementación de proyectos de bombeo de agua y electrificación rural con sistemas fotovoltaicos.



EMPRESA	POWER QUALITY INGENIEROS CONSULTORES ASOCIADOS S.A.C. POWER QUALITY ICA S.A.C.		
País	España		
Representante	Asier Maiztegi Eriz	Ciudad	Azpeitia
Email	<a href="mailto:asier.maiztegi@tecnalia.com">asier.maiztegi@tecnalia.com</a>	Dirección	Area Anardi N°5, 20730
Cargo	Dirección de Desarrollo de Negocio	Teléfono	
Sitio Web	<a href="http://www.tecnalia.com">www.tecnalia.com</a>	Fax	+ 34 687413716

SERVICIOS DEMANDADOS	Investigación y Desarrollo	Cooperación Comercial
	<p>TECNALIA ofrece en el ámbito energético:</p> <p>Tecnologías renovables:</p> <p>Solar Térmica y Termoeléctrica, Solar Fotovoltaica</p> <p>Redes inteligentes, microrredes y smart metering</p> <p>Bioenergía, Almacenamiento de energía eléctrica y térmica</p> <p>Materiales para energía</p> <p>Energía Térmica, Energías del mar, Energía Eólica, Cogeneración (renovable)</p> <p>Tecnologías de generación convencional, transporte, distribución y consumo</p> <p>Captura y almacenamiento de CO2</p> <p>Trigeneración</p> <p>Optimización de procesos industriales y mejora de la eficiencia energética. Aprovechamiento de calores residuales</p> <p>Planificación energética. Análisis y desarrollo de planes estratégicos regionales y nacionales y definición de modelos energéticos. Master Plan, Road Map y simulación avanzada.</p> <p>Análisis y asesoría en la regulación del mercado y evaluación del impacto macro económico y microeconómico.</p> <p>Desarrollo territorial sostenible</p> <p>Gestión de residuos y valorización (energética...)</p> <p>Ofrecemos consultoría y asesoría en estas áreas de conocimiento así como asesoría para la creación de empresas de base tecnológica, y el desarrollo de proyectos de investigación tanto con empresas como con universidades y centros de investigación.</p> <p>Ofrecemos colaboración para trabajar conjuntamente en proyectos de desarrollo con impactos sociales y económicos que mejoren el desarrollo regional nacional.</p>	<p>Demandamos colaboración activa con socios locales nacionales (entidades públicas y privadas, empresas, universidades, centros e institutos de investigación) para trabajar conjuntamente en el desarrollo de proyectos en las áreas de interés indicadas en el apartado anterior.</p>
SERVICIOS OFRECIDOS	Investigación y Desarrollo	Cooperación Comercial
	<p>En las áreas indicadas anteriormente, tanto con empresas, entidades de la administración como universidades, en proyectos de investigación, consultoría y proyectos de desarrollo Humano, Social y Empresarial</p>	<p>En las áreas indicadas anteriormente, tanto con empresas, entidades de la administración como universidades, en proyectos de investigación, consultoría y proyectos de desarrollo Humano, Social y Empresarial</p>





EMPRESA		AC TENER BOLIVIA INTERNACIONAL	
País	Bolivia		
Representante	Elizabeth Espinoza Coli	Ciudad	Cochabamba
Email	<a href="mailto:eespinoza@abi.com.bo">eespinoza@abi.com.bo</a>	Dirección	Calle Luis Quintin Villa 0936
Cargo	Presidenta	Teléfono	+ 591 4 4535000 + 591 60757116
Sitio Web	<a href="http://www.abi.com.bo">www.abi.com.bo</a>		Cochabamba

SERVICIOS DEMANDADOS	Investigación y Desarrollo	Licencias/Patentes	Cooperación Comercial
			Teniendo las soluciones tecnológicas para cada necesidad: regulador de carga solar/ eólico Banco de pruebas para componentes hidráulicos. Eólicas Urbanas Verticales De 400 W A 6,6 Kw. Eólicas Industriales Verticales De 15 Kw A 60 Kw. Eólicas Horizontales De 400 W A 50kw. Tornillo De Arquímedes. Condensadores de agua potable para uso profesional y particular estaciones autónomas, energía para sitios aislados. Estaciones Solares Portátiles. Luz Verdes, Luminarias Led: para uso domiciliario y alumbrado público. Calentador de agua solar. Cellcube (almacenador de energía)
SERVICIOS OFRECIDOS	Investigación y Desarrollo	Licencias/Patentes	Cooperación Comercial
	Convenios con universidades	Eólicas y productos franceses tecnología de punta	Ofrecemos soluciones técnicas para mejorar la calidad de vida priorizando la atención de las necesidades básicas de sus habitantes, proporcionando innovaciones tecnológicas que respeten el medio ambiente además de dar apoyo técnico a instituciones y organismos regionales de desarrollo.

EMPRESA		FALK ECOENERGÍA	
País	Bolivia		
Representante	Reinhard Helmut Mayer Falk	Ciudad	La Paz
Email	<a href="mailto:falk_solar@hotmail.com">falk_solar@hotmail.com</a>	Dirección	Avenida 2 No. 269 Esq. Calle 9 Bologna
Cargo	Gerente Técnico	Teléfono	+591 2 2 72 26 72
Sitio Web	<a href="http://www.falksolar.com">www.falksolar.com</a>	Fax	+591 2 2 72 26 72

SERVICIOS DEMANDADOS	Investigación y Desarrollo	Cooperación Comercial
	Biogas	Interés en sistemas fotovoltaicos de pequeño tamaño (lámparas solares) y de calefones solares. Sistemas de calefacción solar de edificios (piso radiante, colector al vacío). Materiales y tecnologías para biogás.
SERVICIOS OFRECIDOS	Investigación y Desarrollo	Cooperación Comercial
	Secado solar de productos agrícolas y de madera. Cocinas de bajo consumo de leña. Sistemas fotovoltaicos de tamaño familiar.	Secado solar técnico de madera y productos agrícolas. Proyectos de implementación de cocinas de bajo consumo de leña. Arquitectura solar para casas particulares y empresas de turismo. Climatización solar de establos para ganado en zonas frías. Instalación de sistemas fotovoltaicos.



### 3.5 CONCLUSIONES Y RESULTADOS MINIFORO IBEROEKA

El Miniforo IBEROEKA sobre Uso de las Energías Renovables en Sistemas Productivos organizado por el Ministerio de Educación, a través del Viceministerio de Ciencia y Tecnología, el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo CYTED y la Red Boliviana de Investigación e Innovación de Energías Renovables se realizó los días 4 y 5 de octubre del 2012.

El Miniforo se desarrolló en instalaciones de la Universidad Simón I. Patiño, en el departamento de Cochabamba y estuvo organizado en tres sesiones de trabajo con temáticas diferentes:

- 1) Térmica, Eólica, Biodigestores, Biomasa, Biogás,
- 2) Energía Solar y Mirocentrales Hidroeléctricas, y
- 3) Eficiencia Energética en Energías Renovables.

En cada sesión se presentaron las empresas participantes indicando los servicios que ofrecen y demandan, posteriormente se realizó un intercambio de experiencias y se concluyó con el desarrollo de bi-laterales y multi-laterales. Las empresas representadas en el Miniforo fueron 13, de las cuales 7 eran extranjeras y 6 de nuestro país. Ver Cuadro c.

Las sesiones de trabajo fueron desarrolladas cumpliendo con la distribución de etapas en cada una de ellas. A través de un formulario llenado por los participantes del Miniforo fue posible realizar un resumen de los contactos establecidos y de los proyectos propuestos en la última etapa de las sesiones de trabajo. Ver Cuadro d.

A modo de ejemplo, se citan a continuación algunos tipos de proyectos propuestos en los encuentros bi-laterales y multi-laterales:

- Proyectos de capacitación y evaluación de recursos naturales y energéticos.
- 
- Proyectos de representación de empresas internacionales en Bolivia y el exterior.
- 
- Proyectos de cooperación tecnológica entre empresas y universidades.
- 
- Proyectos de legislación y normativa energética.
- 
- Proyectos de ensayos y tests de productos en diferentes ciudades de Bolivia, que presentan condiciones ambientales drásticamente diferentes.



EMPRESA	PAÍS
Aqualimpia	Ecuador
Consultor Energía y Medio Ambiente	Bolivia
Ecoenergía FALK	Bolivia
Ecotecnologías Energéticas y Productivas	Bolivia
Energética	Bolivia
Sitap	Bolivia
ACT ENER	Bolivia
Energías Alternativas – Electricidad Integral	Argentina
Hidroxsol	Guatemala
Power Quality Ingenieros Consultores Asociados S.A.C.	Perú
Sol de las pampas S.A.	Argentina
Solinova Inovação Tecnológica E Empresarial Ltda.	Brasil
Tecnalia	España

*Cuadro c: Empresas representadas en el Miniforo Iberoeka*

#### d1

Contactos	Argentina	Bolivia	Brasil	Ecuador	España	Guatemala	Perú
Argentina	1						
Bolivia	2	8					
Brasil	2	5					
Ecuador	2	4	1				
España	2	5	1	1			
Guatemala	2	4	1	1	1		
Perú	2	4	1	1	1	1	

#### d2

Proyectos	Argentina	Bolivia	Brasil	Ecuador	España	Guatemala	Perú
Argentina							
Bolivia	4						
Brasil		3					
Ecuador		1					
España	1						
Guatemala	1	1			1		
Perú		1		1	1		

*Cuadro d. Contactos establecidos (d1) y proyectos propuestos (d2)*

Durante el evento los ponentes destacaron que Bolivia comparte algunas dificultades con el resto de países latinoamericanos, las cuales se relacionan con: la incertidumbre acerca de la falta de legislación para la generación distribuida (Smart Grids); la complejidad de los procesos administrativos y la necesidad de proyectos basados en energías renovables, particularmente en zonas rurales.





Para alcanzar el éxito deseado en la instalación de estos sistemas de generación en zonas rurales, es decir aislados de la red, la capacitación a las comunidades juega un papel fundamental para el mantenimiento, uso eficiente y duración de estos sistemas. La experiencia de las empresas nacionales e internacionales coincide en resaltar no solamente este aspecto de capacitación sino también el de enseñanza a las comunidades sobre los beneficios reales que obtendrán a partir de estos sistemas.

En lo referido a la interacción Universidad-Empresa, muchas intervenciones hicieron referencia a la falta de trabajo conjunto. Docentes universitarios comentaron sobre la escasa búsqueda por parte de las empresas a las universidades para la solución de eventuales problemas técnicos. Por su parte, las empresas comentaron sobre la necesidad de que los proyectos de grado de las universidades se aproximen más a las necesidades de las empresas locales. Una de las vías de solución expuesta fue la de realizar pasantías o trabajos de grado dirigidos, que permitan a los estudiantes, y a través de ellos a los docentes universitarios, involucrarse en los problemas de las empresas y ofrecer servicios a las mismas.

En este sentido, el Miniforo posibilitó el intercambio de experiencias y socialización de conocimientos en cuanto a la generación de proyectos y aplicación de las energías renovables en sistemas productivos, como respuesta a la problemática de comunidades, alejadas y de difícil acceso al sistema interconectado nacional.



## **NANOANDES 2013**

### **LA PAZ - 2013**

---



## **4. NANOANDES 2013**

### **4.1 ANTECEDENTES**

Esta memoria reúne el reporte del resultado de la vigésima versión del NanoAndes que contó con la participación de profesores y estudiantes de Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Ecuador, México, Perú, Venezuela y Francia. Se desarrollaron presentaciones orales en el marco de la temática de las nanociencias y la nanotecnología, enfocadas a los nanomateriales, energía, minería y medio ambiente. Dichas presentaciones se presentan en forma resumida.

Dentro de las actividades de evento también se contó con una Escuela NanoAndes, que se constituye en la componente práctica del evento, en la cual participaron estudiantes nacionales e internacionales.

El evento se llevó a cabo desde el 11 al 15 de Noviembre del 2013, en las instalaciones del Hotel Calacoto, y la Escuela NanoAndes en los laboratorios de las carreras de Ciencias Químicas y Física de la Universidad Mayor de San Andrés.

Se desarrollaron exposiciones magistrales a cargo de los profesores internacionales miembros de la Red NanoAndes, durante todas las mañanas del evento del 11 al 14 de noviembre. Por las tardes se llevaron a cabo presentaciones por profesores y profesionales, tanto nacionales como internacionales, en el marco de la temática de Energías Renovables.

También se contó con la presentación de Posters bajo la temática de Nanomateriales para la Energía y Minería por parte de estudiantes nacionales e internacionales.

La organización estuvo a cargo del Ministerio de Educación, a través del Viceministerio de Ciencia y Tecnología, la Universidad Mayor de San Andrés y la Red NanoAndes. El Comité Organizador Internacional de la Red NanoAndes estaba conformado por el Dr. Saul Cabrera, de Bolivia; el Dr. Anwar Hasmy, de Venezuela, y el Dr. Walter Torres, de Colombia.

El Comité Nacional estuvo conformado por el Msc. Pedro Crespo Alvizuri y MBA. Bernardo Aspiazu Arce, en representación del Viceministerio de Ciencia y Tecnología; y por la Dra. María Eugenia García Moreno, el Dr. Saul Cabrera, el M.Sc. Carlos Santelises, el Dr. Heriberto Castañeta, el Ing. Fabián Benavente, el Lic. Max Vargas, el Lic. Edgar Cárdenas y las estudiantes María Estela Ticona y Mery Laura Saniz, en representación de la Universidad Mayor de San Andrés.





## 4.2 OBJETIVOS

Tiene el objetivo de: "Reunir a investigadores y científicos de Latinoamérica y el Caribe, industriales, representantes de empresas, docentes y estudiantes investigadores universitarios, instituciones estatales, y público en general para identificar el Estado de Arte de la Ciencia y Tecnología de los Nanomateriales y la Nanotecnología relativas a los sectores de Energía y Minería, y generar sinergias entre los países participantes orientadas al desarrollo de la ciencia, tecnología e innovación que permitan contribuir al desarrollo de estos sectores".

## 4.3 AGRADECIMIENTOS

A la Red NanoAndes por su apoyo en la elección de la temática y la organización del evento.

A la Universidad Mayor de San Andrés que, a través de la Dirección de Investigación Postgrado Gestión e Interacción Social en el marco del Programa de Cooperación ASDI/UMSA, financio parte del evento.

Al Viceministerio de Ciencia y Tecnología por el apoyo logístico y financiero, que ayudo al buen y oportuno desenvolvimiento del evento.

Al Gobierno de Francia que, a través de su Embajada y sus Agencias de Cooperación, financiaron parte del evento.

A la Universidad Técnica Federico Santa María de Chile que, a través de sus delegados, se incorporaron a la Red NanoAndes fortaleciendo y apoyando económicamente.

A todas las personas que participaron en la organización y ejecución del evento, sin su esfuerzo no se hubiera logrado el éxito alcanzado.



## 4.4 PROGRAMA DEL EVENTO

Horas	Lunes 11	Martes 12	Miércoles 13	Jueves 14	Viernes 15
8:30 a 9:30	Introducción a nanomateriales y nanotecnología, Prof. Frederic Chandezon	Nanomateriales y Nanotecnología para el campo hidrocarburifero (Gas y Petróleo), Freddy Imbert Venezuela	Nanomateriales y nanotecnología - tierras raras y sus aplicaciones, Prof. Margarita Sánchez	Nanomateriales arcillosos, y arcillas modificadas, Prof. Víctor Gurrero (Ecuador)	<b>FORO:</b> Nanomateriales y Nanotecnología en América latina y el Caribe. – Estado de situación y perspectivas
9:30 a 10:30	Síntesis y caracterización de nanomateriales, Parte I, Prof. Sara Aldabe	Nanomateriales y Nanotecnología en biotecnología y biorefinerías, José Roberto Vega Costa Rica	Nanomateriales y nanotecnología - conductores iónico y sus aplicaciones, Rubén A. Vargas Colombia	Nanomateriales magnéticos y sus aplicaciones, Prof. Edgar Mosquera, Chile	
10:30 a 10:50	<b>REFRIGERIO PRESENTACIÓN DE POSTERS</b>				
10:50 a 11:50	Síntesis y caracterización de nanomateriales, Parte II, Prof. Roberto Candal, Argentina	Nanomateriales y Nanotecnología en Energías Renovables, Prof. Frederic Chandezon, Francia	Nanomateriales y Nanotecnología para Sistemas de Remediación Ambiental, Prof. Juan Rodríguez, Perú	Nanomateriales zeolíticos y sus aplicaciones, Prof. Gema Gonzalez, Venezuela	<b>FORO:</b> Nanomateriales y nanotecnología en América latina y el Caribe. – Estado de situación y perspectivas
11:50 a 12:50	Síntesis y caracterización de nanomateriales, Parte III, Prof. Sara Aldabe	Nanomateriales aplicados a Sistemas de Almacenamiento de Energía de ion Litio, Prof. Fritz Huguenin	Nanomateriales y nanotecnología en celdas de combustible de óxido sólido, Prof. Adriana Serquis, Argentina		
12:50 a 14:30	<b>DESCANSO</b>				
14:30 a 19:00 (En paralelo)	Ponencias: I Congreso Boliviano de Energías Renovables: Energía Eólica y Sistemas Termo solares	Ponencias: I Congreso Boliviano de Energías Renovables: Sistemas Fotovoltaicos, y Sistemas de almacenamiento de Energía	Ponencias: I Congreso Boliviano de Energías Renovables: Micro centrales Hidroeléctricas y Bioenergías	Ponencias: I Congreso Boliviano de Energías Renovables: Sistemas Híbridos, Eficiencia Energética, y otras.	<b>FORO:</b> Nanomateriales y nanotecnología en América latina y el Caribe. – Estado de situación y perspectivas
	Escuela NanoAndes 2013(Cursos Prácticos) Taller Síntesis de Nanomateriales (Sara Aldabe, Roberto Candal, y Alan Ibañez) Taller Nanomateriales para celdas de ion litio (Saúl Cabrera, Eduardo Palenque, y Waldo Yapu) Taller Modelaje Computacional en Nanotecnología (Anwar Azmy , Javier Torrez, Luis Rincón)				<b>18:30 – 19:30 Clausura</b>
19:00 a 20:30	Inauguración	Reunión I: Red de Energía VCT	Reunión II: Red de materiales - VCT	Reunión III. Reunión de NanoAndes	



**RESÚMENES PRESENTACIONES  
NANOANDES  
LA PAZ - 2013**

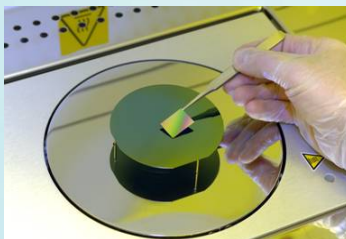
---





## NANOMATERIALES Y NANOTECNOLOGÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES (SISTEMAS FOTOVOLTAICOS)

### NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES FOR THIRD GENERATION SOLAR CELLS



#### Frédéric Chandezon

Laboratory on the Structure and Properties of Molecular Architecture UMR 5819  
(CEA-CNRS-UJF)

Institute of Nanoscience and Cryogenics (INAC)

CEA Grenoble

17, rue des Martyrs

F-38041 Grenoble Cedex 9 (France)

[\\*frederic.chandezon@cea.fr](mailto:frederic.chandezon@cea.fr)

**Key Words:** organic solar cells, hybrid solar cells, thin film, quantum dot, solution processed

The photovoltaic market is presently dominated by silicon-based  $\mu\text{m}$  thick “first generation” solar cells with a rising share of thin film “second generation” solar cells based on e.g. CdTe or CIGS as the active material. Although ongoing work aims at both at rising the power conversion efficiency and lowering the costs of such technologies, a large part of the research and development in the field of photovoltaics is presently focusing on so-called “third generation” thin film solar cells [1,2].

The term “third generation” a solar cell encompasses a broad range of technologies including inorganic thin films, dye sensitized (Grätzel), organic, quantum dot solar cells. The main target is to the lower the cost of the watt-peak through

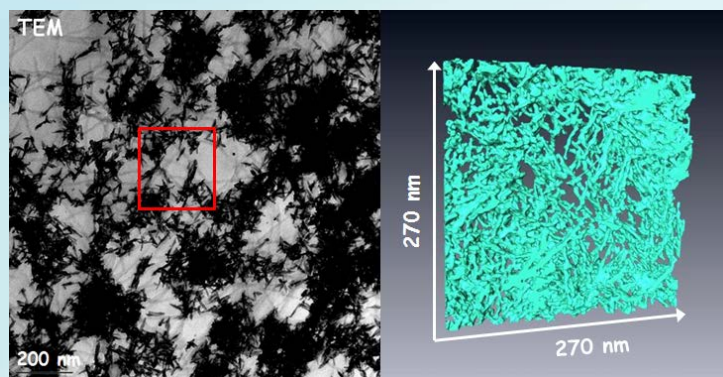
- an increase of the power conversion efficiency;
- a decrease in the cost of the active layer - the thin film strategy – via diminishing the thickness of the active and developing novel materials made of abundant and (preferably) non toxic materials.

In order to meet both aspects of this winning strategy, nanotechnologies and nanomaterials can bring efficient solutions with e.g. nanostructured materials in the case of DSSCs [3,4], a more efficient light management through the use of plasmonic effects [5] or benefitting of quantum effects in quantum dots solar cells [6,7].



Such developments also call for novel state-of-the-art techniques to study these new generations of devices. An example is presented in Figure 1 for an hybrid material consisting of a blend of semiconductor nanoparticles (CdSe nanorods) and nanofibers of a semiconducting polymer, namely poly(3-butylthiophene) in the present case. For such hybrid nanostructured materials, one aims at having nanostructured percolating networks of both materials [7, 8]. Standard 2D transmission electron microscopy image does not allow to get a full picture of the network (Figure 1, *left*) whilst electron tomography can render the 3 D distribution of the materials (Figure 1, *right*) [9].

The talk will thus present an overview of the benefits of nanomaterials and nanotechnologies for cost-efficient “third generation” solar cells.



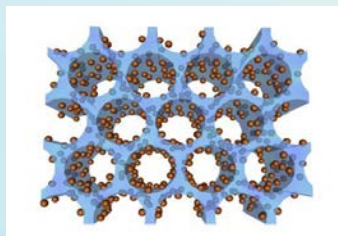
**Figure 1** *Left*: Transmission Electron Microscopy (TEM) micrograph of an hybrid material constituted of CdSe nanorods (80 wt%) and poly(3-butylthiophene) (P3BT) nanofibers (20 wt%) used as an active layer in a solution processed solar cell. One can distinguish the long P3BT nanofibers in the background as long grey stripes. The total size of the image is ca.  $1,3\ \mu\text{m} \times 1,3\ \mu\text{m}$ . *Right*: 3D surface rendered of the same hybrid as derived from electron tomography. The green areas correspond to CdSe NRs while the polymer areas are transparent. The red square on the left TEM image is meant to indicate the size of the surface area as probed by electron tomography. See refs. [8,9].

## References

1. Green, M.A., *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 9, 123 (2001).
2. Green, M.A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W. and Dunlop, E.D. *Prog. Photovol. Res. Appl.* 21, 1 (2013).
3. Graetzel, M., Janssen, R.A.J., Mitzi, D.B. and Sargent, E.H. *Nature* 488, 304 (2012).
4. Choi, S.-H., Hwang, D. Kim D.-Y., Kervella, Y., Maldivi, P., Jang, S.-Y., Demadrille, R. and Kim, I.-D. *Adv. Mater.* 3146 (2013).
5. Atwater, H.A. and Polman, A. *Nature Materials* 9, 205 (2010).
6. Sargent, E.H. *Nature Photonics* 6, 133 (2012).
7. Reiss, P., Couderc, E., De Girolamo, J. and Pron, A. *Nanoscale* 3, 446 (2011).
8. Jiu, T., Reiss, P., Guillerez, S., de Bettignies, R., Bailly, S. and Chandezon F. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1619 (2010),
9. Lopez-Haro, M., Jiu, T., Bayle-Guillemaud, P., Jouneau, P.H. and Chandezon, F. *Nanoscale* DOI: 10.1039/c3nr03202g.



## SÍNTESIS DE NANOPARTICULAS Y NANESTRUCTURAS POR VÍAS SUAVES



**Sara Aldabe Bilmes**

INQUIMAE-DQIAQF; Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires

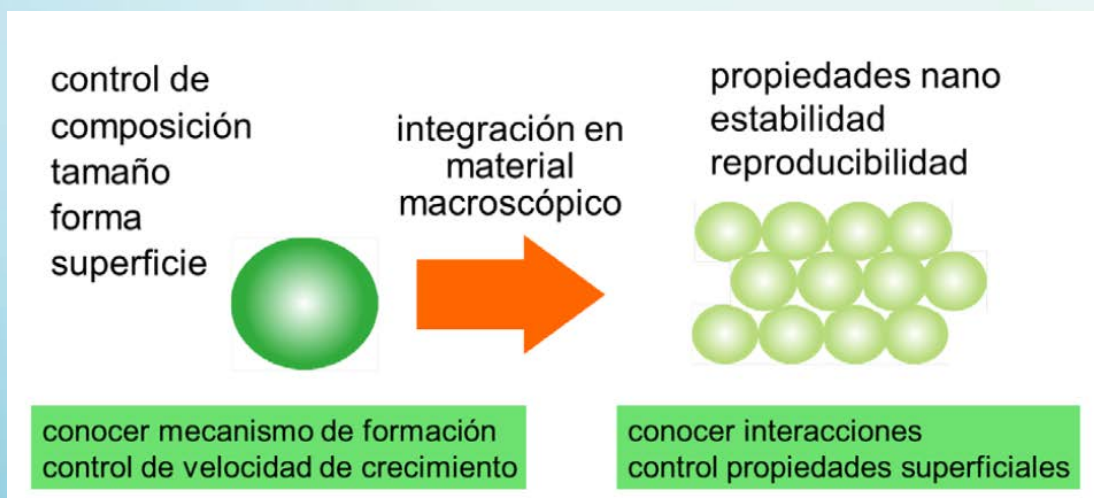
### Resumen

*La síntesis de nanopartículas involucra un mecanismo de nucleación y crecimiento. Existen numerosas vías para alcanzar el producto deseado, entre ellas, las más versátiles son las que proceden en solución.*

*En esta clase se describirán los mecanismos de nucleación y crecimiento en solución, analizando el rol de los precursores, la influencia de pH y fuerza iónica y se discutirán los pasos de control del tamaño por medio de aditivos adsorbidos.*

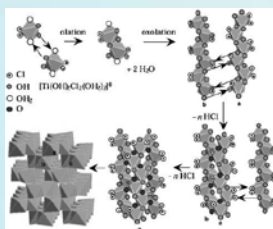
*Se analizará también la formación de nanoestructuras por interacciones entre las nanopartículas, haciendo énfasis en la estructura de la interfaz y en la química de la superficie de las nanopartículas.*

*Se discutirán algunos métodos de caracterización imprescindibles para monitorear el proceso de síntesis y el producto de ésta.*





## SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS POR EL MÉTODO DE PRECIPITACIÓN-PEPTIZACIÓN



**Roberto J. Candal**

Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de San Martín  
Instituto de Fisicoquímica de Materiales, Ambiente y Energía, CONICET-UBA

Un conjunto importante de materiales con aplicaciones en el desarrollo de dispositivos generadores de energía deben parte de sus propiedades a su dimensionalidad nanométrica. Entre ellos, el  $\text{TiO}_2$  es un ejemplo muy interesante por su capacidad para fotocatálisis de reacciones químicas por absorción de luz UVA (presente en el sol), que le permiten intervenir en procesos de generación de corriente eléctrica a través de la generación de pares hueco-electrón. Esta propiedad, junto a su elevada estabilidad química, condujo al desarrollo de celdas fotovoltaicas en base a  $\text{TiO}_2$ , cuya viabilidad está relacionada con la posibilidad de generar películas nanoparticuladas de  $\text{TiO}_2$ .

La síntesis de  $\text{TiO}_2$  nanoparticulado en la forma de soles estables es actualmente un ejemplo clásico de la aplicación del método de precipitación-peptización para la síntesis de soles de base acuosa de óxidos metálicos. Por esta vía también pueden prepararse nanopartículas de  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  y  $\text{AlOOH}$  entre muchos otros.

El método de precipitación-peptización consiste en obtener un precipitado del óxido metálico deseado por hidrólisis y condensación rápida de un precursor adecuado en exceso de agua. El precipitado formado, debido al rápido proceso de hidrólisis-condensación suele estar formado de partículas de dimensiones nanométricas, fuertemente agregadas como consecuencia de las interacciones de van der Waals. Si al sistema se incorpora un agente peptizante como el ácido nítrico, las nanopartículas adquieren carga neta positiva como consecuencia de la protonación de la superficie. En estas condiciones se establece una fuerza de repulsión electrostática que contrarresta la de van der Waals conduciendo a la separación de las partículas. De esta manera se obtiene un sol de  $\text{TiO}_2$  cinéticamente estable, adecuado para la preparación de películas o membranas soportadas de alta área superficial. Debido a la repulsión entre partículas, estas se ordenan en forma de empaquetamientos compactos minimizando el espacio ocupado. Estas películas son adecuadas para aplicaciones donde se necesita elevada área superficial, como en fotocatálisis y fotovoltaica. Existen otros agentes peptizantes, como las bases de amonio cuaternario, que también actúan sobre estos sistemas.

La presencia de diferentes ácidos o bases como catalizadores de la hidrólisis tiene efecto sobre la estructura del óxido resultante. Por ejemplo en el caso del  $\text{TiO}_2$ , si la peptización se realiza en presencia de concentraciones relativamente elevadas de ácido nítrico, la fase cristalina final es principalmente rutilo. En condiciones menos ácidas o en presencia de amonios cuaternarios predomina anatasa, en presencia de altas concentraciones de cloruros puede obtenerse



brookita. Estos ejemplos ilustran sobre la posibilidad de seleccionar la fase cristalina prioritaria a través de una correcta manipulación de las condiciones iniciales.

Este método de síntesis es adecuado para incluir agentes dopantes en el óxido metálico sintetizado. La incorporación del dopante se realiza en fase homogénea, obteniéndose una buena dispersión del agente modificador (por ejemplo un ion de un metal de transición) en el precipitado inicial. Después de la peptización el dopante se distribuye entre las partículas del óxido, para finalmente generar una película o una membrana del óxido principal (por ejemplo  $\text{TiO}_2$ ) dopado con el metal modificador (por ejemplo W (VI)).

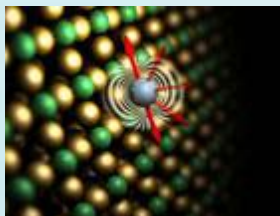
La versatilidad de esta técnica y su relativa economía la hacen adecuadas y atractivas para la preparación de películas con aplicaciones en diversos campos, como la generación de electricidad, descomposición fotocatalítica de agua para generar  $\text{H}_2$  y  $\text{O}_2$ , fotocátalisis oxidativa, y muchos otros usos. El curso experimental de síntesis ejemplificará sobre la aplicación de esta metodología en la preparación de xerogeles de  $\text{TiO}_2$  puro y dopado con W (VI).

### Referencias generales

- Bischoff B.L., Anderson M.A, Peptization Process in the Sol-Gel Preparation of Porous Anatase ( $\text{TiO}_2$ ) Chem. Mater., 1995, 7:1772-1778  
Alcober C.S., Bilmes S. A., Alvarez F., Candal R.J., Photochromic W- $\text{TiO}_2$  Membranes, Journal of Materials Science Letters, 2002, 21(6): 501-504.  
Pottier A.,Chaneac C.,Tronc E., Mazerrolles L., Jolivet J.P., J.Mater.Chem., 2001, 11: 1116-1121.



## NANOMATERIALES Y NANOTECNOLOGÍA PARA EL CAMPO HIDROCARBURIFERO



**Freddy Imbert**

Universidad de Los Andes, Mérida - Venezuela

### OBJETIVO GENERAL

Sintetizar catalizadores de Ni y Co soportados sobre nanopartículas de MgO y evaluar sus propiedades catalíticas en la reacción de reformado seco de metano.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Síntesis de la nanopartículas de MgO.
2. Modificación de la nanopartículas de MgO mediante la incorporación con fases activas mono y bi-metálicas de Ni y Co, por los métodos de a) impregnación convencional, b) impregnación asistida con surfactante y c) combustión con urea.
3. Caracterización de la estructura, porosidad, composición de los sólidos obtenidos.
4. Evaluar el desempeño catalítico en la reacción de reformado seco de metano.

### SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS POR COMBUSTIÓN

La reacción de oxidación-reducción ocurre a temperaturas superiores a 500° C.

La combustión es altamente exotérmica y provee la energía necesaria para que ocurra la oxidación.

La temperatura es auto sostenida en el tiempo, debido a la llama de la combustión

Los tamaños promedios generalmente son pequeños (<100nm), dado el rápido suministro de calor, lo cual dispersa las partículas.

Combustibles más usados hidrazida maleíca ( $C_4H_4N_2O_2$ ) y la carbohidrazida ( $CO(N_2H_3)_2$ ), la sacarosa ( $C_{14}O_{12}H_{20}$ ) y la urea ( $CON_2H_4$ )

### CONCLUSIONES

La adición de Co al catalizador de Ni/MgO mejora sustancialmente el comportamiento catalítico debido a su efecto promotor.

La disminución del tamaño de las nanopartículas aumenta la conversión de metano y dióxido de carbono.

Existe un tamaño óptimo de las nanopartículas para el cual el ciclo catalítico (TOF) alcanza un máximo





## NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGY TO OBTAIN BIOTECHNOLOGY AND BIOREFINERY PRODUCTS



**Dr. José Roberto Vega-Baudrit**

Laboratorio Nacional de Nanotecnología LANOTEC-CeNAT, San José, Costa Rica  
jvegab@gmail.com

### Abstract

*In previous work, which has been used waste generated by the agro-industrialization of sugar cane, it was determined that the use of 70% of sugar cane molasses generated adequate mechanical properties and a bulk density consistent with what is required. Recent research, results were used in the preparation of polyurethanes with sugar cane molasses; finally they were reinforced with fiber bagasse from sugar cane to produce a composite material. All of this is part of biorefinery.*

*A biorefinery is a kind of facility that integrates biomass conversion processes and equipment to produce fuels, power, and chemicals from biomass. The biorefinery concept is analogous to today's petroleum refineries, which produce multiple fuels and products from petroleum. Industrial biorefineries have been identified as the most promising route to the creation of a new domestic biobased industry.*

*By producing multiple products, a biorefinery can take advantage of the differences in biomass components and intermediates and maximize the value derived from the biomass feedstock. A biorefinery might, for example, produce one or several low-volume, but high-value, chemical products and a low-value, but high-volume liquid transportation fuel, while generating electricity and process heat for its own use and perhaps enough for sale of electricity. The high-value products enhance profitability, the high-volume fuel helps meet national energy needs, and the power production reduces costs and avoids greenhouse-gas emissions. Figure 1 shows a example of biorefinery.*

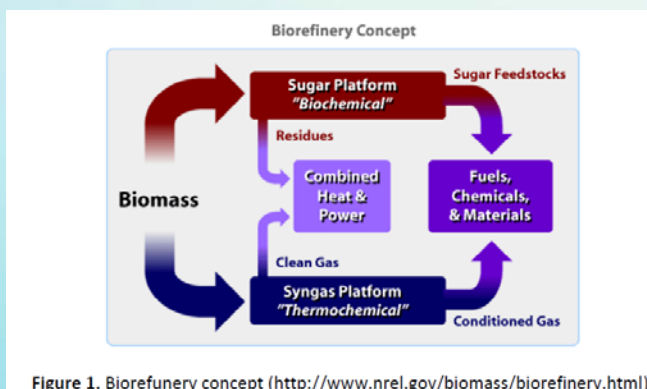
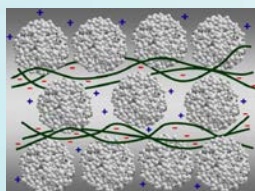


Figure 1. Biorefinery concept (<http://www.nrel.gov/biomass/biorefinery.html>).

## NANOMATERIAIS APLICADOS A SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA



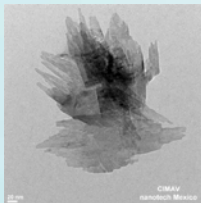
### Fritz Huguenin

Departamento de Química, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto –  
Universidade de São Paulo, 14040-901 Ribeirão Preto (SP), Brazil

**Palavras Chave:** *Baterias de Íon Lítio, Baterias de Lítio-Ar, Baterias de Mistura Entrópica.*

Aspectos relacionados à eletro-inserção de íons lítio em eletrodos nanocompósitos, como também à eletro-conversão de íons lítio e espécies reativas de oxigênio, serão abordados nesta apresentação, visando armazenamento e conversão eletroquímica de energia. Primeiramente, será discutido o transporte de carga em matrizes hospedeiras auto-organizadas e nanoestruturadas, constituídas de óxidos de titânio e vanádio, e nanopartículas metálicas de prata e carbono. Nestes sistemas, o método de automontagem *Layer-by-Layer*, utilizado para a obtenção dos nanocompósitos, permite adsorção dos polieletrólitos em sítios com maior densidade eletrônica, levando a uma blindagem eletrostática entre os íons lítio inseridos e os sítios da matriz hospedeira, aumentando a mobilidade iônica e a velocidade difusional dos íons lítio. Assim, altas taxas de eletro-inserção de íons lítio podem ser obtidas nestes nanomateriais, permitindo o seu uso em microbaterias de íons lítio de alta densidade de energia e densidade de corrente. Visando o desenvolvimento das baterias de lítio-ar, resultados sobre a reação de redução de oxigênio sobre eletrodos de platina e materiais nanoparticulados em meio orgânico também serão apresentados. Com base em dados de espectroscopia Raman e espectroscopia de impedância eletroquímica, mecanismos reacionais são propostos, juntamente com a determinação das constantes de velocidade para as etapas elementares. Por fim, serão discutidos resultados sobre baterias de mistura entrópica: a partir da variação de salinidade entre águas marítimas e fluviais, ou tratamento de esgoto e rejeitos industriais, pode-se gerar trabalho elétrico de forma eficiente e renovável, sendo uma promissora alternativa para o crescimento sustentável. Materiais auto-organizados à base de polioxometalatos e polímeros condutores permitiram o armazenamento de energia de 22 kJ/mol, correspondendo a 40% da entalpia do processo de neutralização.

## NANOMATERIALES INORGÁNICOS VÍA MICROEMULSIÓN – CON TIERRAS RARAS, Y SUS POTENCIALES APLICACIONES TECNOLÓGICAS



### **Margarita Sánchez-Domínguez - Andrea Victoria Vela-González**

Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C., Unidad Monterrey, GENES- Group of Embedded Nanomaterials for Energy Scavenging. Parque PIIT, Alianza Norte 202, 66600 Apodaca, Nuevo León, MEXICO.

### **Kelly Pemartin**

Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Instituto de química Avanzada de Cataluña (IQAC), CIBER en Biotecnología, Biomateriales y Nanomedicina (CIBER-BBN), Jordi Girona 18-26, 08034 Barcelona, ESPAÑA

### **Carmen Tiseanu**

National Institute for Laser, Plasma and Radiation Physics, P.O.Box MG-36, RO 76900, Bucarest-Magurele, RUMANIA

### **Vasile Parvulescu**

University of Bucharest, Department of Chemical Technology and Catalysis 4 – 12 Regina Elisabeta Bvd. Bucarest 030016, RUMANIA

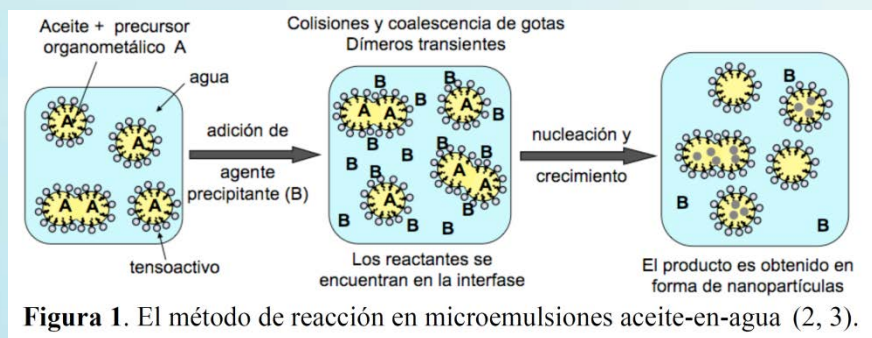
### **Magali Boutonnet and Conxita Solans**

Kungliga Tekniska Högskolan (KTH) School of Chemistry, Div. of Chemical Technology, Teknikringen 42, SE-10044, Estocolmo, SUECIA

***Palabras clave:*** *microemulsión, tierras raras, nanopartículas, óxido de cerio*

Desde que fue reportado por primera vez en 1982 (1), el método de reacción en microemulsiones agua-en-aceite (W/O) ha sido empleado extensivamente para la síntesis de una gran variedad de nanopartículas, por ejemplo metálicas, óxidos metálicos, y otros materiales inorgánicos. Es bien conocido que este método permite la preparación de nanopartículas con una estrecha distribución de tamaños, alta área específica, buena cristalinidad y un desempeño que puede llegar a ser diferenciado y frecuentemente superior al de los materiales sintetizados por otros métodos. Hasta hace poco, la totalidad de las investigaciones era basada en microemulsiones W/O. Sin embargo, el uso de microemulsiones W/O requiere altas cantidades de solvente orgánico, limitando sus aplicaciones a escala industrial. Por tanto, desde un punto de vista práctico, económico y medioambiental, el uso de microemulsiones aceite-en-agua (O/W) podría brindar ciertas ventajas ya que la fase mayoritaria es agua. Este nuevo método consiste en el uso de precursores organometálicos, disueltos en gotas de aceite de tamaño nanométrico, estabilizadas por tensoactivo, y dispersas en la fase continua acuosa (Figura 1). Los agentes precipitantes, los cuales son usualmente solubles en agua, pueden ser añadidos a la microemulsión directamente o como soluciones acuosas, sin comprometer la estabilidad del sistema. Muy probablemente, este proceso involucra un mecanismo interfacial.





**Figura 1.** El método de reacción en microemulsiones aceite-en-agua (2, 3).

Esta estrategia fue reportada por nuestro grupo de investigación como prueba de concepto por primera vez en 2009 (2,3), y ha sido demostrado que mediante este método es posible obtener nanopartículas con una estrecha distribución de tamaño, buena cristalinidad, y una alta superficie específica. En esta contribución, presentamos un resumen de la síntesis de una variedad de nanomateriales sintetizados por este método en los últimos tres años, con un énfasis especial en óxidos de tierras raras. Dentro de ésta familia de compuestos, se han sintetizado principalmente nanopartículas basadas en cerio; óxido de cerio (IV), óxido de cerio (IV) dopado con otras tierras raras y otros óxidos mixtos de cerio.

Las nanopartículas de óxido de cerio tienen un gran potencial en una variedad de aplicaciones, debido su excelente capacidad de almacenamiento de oxígeno, la cual es causada por las vacancias que pueden estar presentes en su estructura cristalina tipo fluorita sin que ésta se vea alterada. Además, el dopar estos materiales con especies como otros lantánidos o metales de transición puede ampliar su campo de aplicación, ya que sus propiedades de óxidoreducción pueden verse modificadas e incluso mejoradas. El introducir Zr en el  $\text{CeO}_2$  resulta en una solución sólida de óxido mixto Ce-Zr, la cual es térmicamente más estable que el  $\text{CeO}_2$ . El dopar con lantánidos tales como Eu, Gd, Sm aporta propiedades luminiscentes interesantes, lo cual podría ser explotado en nanomedicina o diodos emisores de luz. Características como el tamaño de partícula, la forma, textura, y relación de  $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$  dependen fuertemente del método de preparación. El arreglo de los diferentes elementos (una distribución homogénea, en el núcleo de la partícula o enriquecida en la superficie como defectos), depende del método de preparación y de la naturaleza y porcentaje de elementos presentes.

Por tanto, en esta contribución se presentan resultados de varios materiales basados en Cerio, sintetizados por el método de reacción en microemulsions O/W. Se presenta la síntesis y caracterización de óxido de Cerio puro y óxido mixto de Ce/Zr para su aplicación en catálisis heterogénea (oxidación del monóxido de carbono); óxido de cerio y óxido mixto de Ce/Zr dopados con Eu y Sm y estudio de sus propiedades fotoluminiscentes; síntesis de óxido mixto de Ce/Cu para aplicaciones en catálisis heterogénea (reacción de desplazamiento del gas de agua) y fotocatalisis (degradación de contaminantes), así como la síntesis de otros óxidos mixtos como Ce/La, Ce/Y y Ce/Zn. Los resultados obtenidos demuestran la versatilidad del método, y en particular su utilidad para la síntesis de óxidos de tierras raras nanoestructurados.



## Agradecimientos

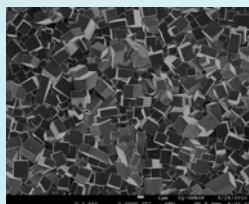
Agradecemos a CONACYT por el apoyo económico (Proyecto de Ciencia Básica con clave CB2011/166649, así como el Proyecto de Redes Temáticas con clave 194451).

## Referencias

- (1) Boutonnet M., Kizzling J., y Stenius P., The preparation of monodisperse colloidal metal particles from micro-emulsions. *Colloids and Surfaces*, 1982, 5(3): 209-225.
- (2) Sánchez-Domínguez M., Boutonnet M., y Solans C., A novel approach to metal and metal oxide nanoparticle synthesis: the oil-in-water microemulsion reaction method, *Journal of Nanoparticle Research*, 2009, 11(7): 1823-1829.
- (3) Sánchez-Domínguez M., Pemartin K., y Boutonnet M., Preparation of inorganic nanoparticles in oil-in-water microemulsions: A soft and versatile approach, *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 2012, 17(5): 297-305.



## NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGY – IONIC CONDUCTORS AND APPLICATIONS



**Rubén A. Vargas**

Departamento de Física, Universidad del Valle, A.A. 25360, Cali, Colombia  
[rvargas@univalle.edu.co](mailto:rvargas@univalle.edu.co)

Nano-scale ionic materials are studied by our research team with the aim of developing proton-exchange membranes (PEMs) for fuel cell applications. Two types of proton conducting nanocomposites materials with disordered structure are investigated, ionic crystals with disordered hydrogen bonds ( $\text{MH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{M} = \text{NH}_4$ ,  $\text{K}$ ,  $\text{Rb}$ ) and solid polymers based on poly (vinyl alcohol) (PVOH), in which nanoparticles of ceramic oxides (e.g.,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , and  $\text{SiO}_2$ ) are thoroughly dispersed.

I will report various approaches for sample preparations. One of them is by using a cross-linking technique, in which cross-linked alkaline PVOH/ $\text{TiO}_2$  polymer nanocomposite membranes using glutaraldehyde ( $\text{CHO}(\text{CH}_2)_3\text{CHO}$ ) for the cross-linking reaction. Moreover, we have establish a preparation route based on electro-spinning techniques that allow us to defined geometry of the active nanophases in the PVA starting membranes (for example nanopores and nanofibers) and the ability to systematically control their surfaces chemistry.

Our findings demonstrate in this nanostructured ionic conductors highly conducting contribution in parallel to the bulk conductivity, due to space charge zones near phase boundaries. On the other hand, much higher defect concentrations in these space charge zones than in the bulk that contributes mostly to the super ion conduction.

It is concluded, that the host phase and composite grains forming the structure lead to strong effect on conductivity enhancement/super conduction. Various thermodynamic considerations/theoretical models concerning ion-ion and ion-lattice or ion-polymer chain interactions are taken up. Our studies reveal that two-phase composite forms humongous medium to cause enhancement and super ion conduction.

It is envisioned that the interfacial regions/phases effect may further explored with the aim of developing good PEMs candidates. Nano-tech. and nano-composite approaches can greatly enhance the interfaces/surfaces between the grains/phases, composite effect and ion conductivity.  $\text{H}^+/\text{O}^{2-}$  conduction through different mechanisms and channels can be integrated to enhance the conductivity. It opens great opportunity for both fundamental and applied research, nano-ionics, and composite ionics.



## NANOMATERIALES Y NANOTECNOLOGÍA PARA SISTEMAS DE REMEDIACIÓN AMBIENTAL



**Juan Rodríguez**

Universidad Nacional de Ingeniería, Av. Tupac Amaru 210, Lima, Perú;

### Resumen

Las profundas implicancias en el bienestar y la salud de las personas que devienen de una adecuada provisión del agua son tomadas muy en cuenta en la actualidad por la sociedad civil, sin embargo, los buenos deseos se detienen por diferentes limitaciones a las que estos se enfrentan, las cuales son características de cada realidad. Por ejemplo, en la actualidad más del 30 % de la población, esencialmente enclavada en zonas rurales de América Latina, no tiene acceso a esta. En este caso, diversas son las limitaciones, por ejemplo: una geografía muy accidentada, una pequeña densidad poblacional, un bajo poder adquisitivo y un limitado acceso a la energía. En este contexto muy lentamente se va avanzando, por ejemplo el Perú no es diferente a esta realidad, el 30% de la población no tiene acceso al agua potable, mientras que el 52 % no tiene acceso al alcantarillado, siendo entonces parte de la componente antropomórfica de la contaminación. En ese contexto, diferentes alternativas se han implementado desde el punto de vista del conocimiento, para allanar este problema. En esta presentación revisaremos nuestra experiencia en el desarrollo de nanomateriales con propiedades fotocatalíticas que tienen estructuras 0D (nanopartículas), 1D (nanorods), 2D (nanotubos y superficies). Asimismo evaluaremos y compararemos sus propiedades físicas y químicas con especial énfasis en aquellas que les permiten degradar contaminantes inmersos en el agua utilizando como fuente de energía la radiación solar. Nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  y  $\text{ZnO}$  han sido sintetizadas y caracterizadas por métodos de la química suave [1-9], asimismo nanorods de  $\text{ZnO}$  [6,7] y  $\text{TiO}_2$  y nanotubos de  $\text{ZnO}$  y  $\text{TiO}_2$ . Como una manera de evitar la necesaria separación de estos fotocatalizadores del agua una vez cumplida su función, se les ha soportado sobre superficies diversas [1-9] utilizando mayormente Spray pirolisis y de spray-gel, las cuales han permitido obtener películas delgadas sobre sustratos rígidos y flexibles. Caracterizaciones físicas y químicas nos han permitido conocer su estructura cristalina (Difracción de rayos X y microscopía electrónica de transmisión), su morfología (microscopía electrónica de barrido), absorción óptica (transmittancia uv-visible); y finalmente la degradación de contaminantes inorgánicos (absorción atómica), o bacterias (método de membrana). Algunos de estos han dado lugar a desarrollos que han permitido evaluar en campo la viabilidad de su implementación a gran escala.



## Referencias

- [1] M. Quintana, E. Ricra, J. Rodríguez and W. Estrada, Spray Pyrolysis deposited zinc oxide film for Photo-electrocatalytic degradation of Methyl Orange: Influence of the pH, , *Catalysis Today* 76 (2002) 141-148
- [2] E. Carpio, P. Zúñiga, S. Ponce, J. Solís, J. Rodríguez and W. Estrada, Photocatalytic degradation of phenol using TiO<sub>2</sub> nanocrystals supported on activated carbon, *J. Molecular catalysis A: Chemical*, 228 (2005) 293-298
- [3] J. Díaz, J. Rodríguez, S. Ponce, J. Solís and W. Estrada Solar photocatalytic decontamination of phenol using pyrolytic TiO<sub>2</sub> films deposited inside glass tubing,. *Solar Journal of Solar Energy Engineering*, 129 (2007) 94-99.
- [4] S. Ponce, E. Carpio, J. Venero, W. Estrada, J. Rodríguez, C. Reche R. candal, Titanium dioxide onto polyethylene for water decontamination, *J. Adv. Oxid. Technol*, 12 (2009) 81-86.
- [5] J. Rodríguez, C. Jorge, P. Zúñiga, J. Palomino, P. Zanabria, J. L. Solís and W. Estrada, Solar water disinfection studies with supported TiO<sub>2</sub> and polymer-supported Ru(II) sensitizers in a compound parabolic collector, *J. Solar Energy Engineering*, 132 (2010) 1-5
- [6] J. Rodríguez F. Paraguay-Delgado, A. López, J. Alarcón and W. Estrada, Synthesis and Characterization of ZnO Nanorods for Photocatalytic Water Disinfection, *Thin Solid Films*, 519 (2010) 729-735
- [7] J. Alarcón, S. Ponce, F. Paraguay-Delgado, J. Rodríguez, Effect of  $\square$ irradiation on the growth of ZnO nanorod films for photocatalytic disinfection of contaminated water, *Journal of Colloid and Interface Science* 364 (2011) 49-55.
- [8] A. Acevedo, E.A. Carpio, J. Rodríguez and M.A. Manzano, Disinfection of Natural Water by Heterogeneous Solar Photo-catalysis with immobilised TiO<sub>2</sub>: Efficacy in eliminating indicated bacteria and operating life of the systemL, *J. Sol. Energy Eng.* 134 (2012) 011008-011017
- [9] J. Rodríguez, L. Sánchez, D. Onna, M. Claudia Marchi, S. Ponce, Roberto Candal, and S. A. Bilmes, The role of seeding in the structure and wettability of ZnO nanorods films, *Applied Surface Science*, Volume 279 (2013) 197-203.



## NANOMATERIALES Y NANOTECNOLOGÍA EN CELDAS DE COMBUSTIBLE DE ÓXIDO SÓLIDO



**Adriana Serquis**

CONICET – Centro Atómico Bariloche, Grupo Caracterización de Materiales. Av. Bustillo 9500, (R8402AGP), S.C. de Bariloche, Argentina

*La necesidad de disminuir costos económicos y ambientales en la generación y uso de energía eléctrica ha llevado a muchos grupos de investigación al estudio de materiales que permitan optimizar su uso en aplicaciones limpias, no contaminantes. En esta charla se describe el trabajo relacionado con el desarrollo de nuevos materiales y la optimización de sus propiedades para ser utilizados en celdas de combustible de óxido sólido (SOFC), que son los dispositivos electroquímicos más eficientes para la conversión de energía química en energía eléctrica.*

*Se realizará una introducción a los principios de funcionamiento de una celda de combustible y los diferentes tipos de celdas. Luego se va a introducir las características más importantes de los tipos de materiales usados en una SOFC: óxidos sólidos conductores iónicos y conductores mixtos y se analizarán ventajas, desventajas y requerimientos de los mismos.*

*Se discute en particular la posibilidad de fabricar celdas SOFC utilizando tecnología de películas delgadas o materiales nanoestructurados, que abre nuevas posibilidades para sistemas compactos de alta eficiencia en la conversión de energía. Uno de los desafíos es la disminución de la temperatura de operación (del rango 700-1000°C a 500°C o menos) sin disminuir la eficiencia.*

*Finalmente se hará una breve reseña de los métodos en los que está trabajando nuestro grupo (en colaboración con otros) para la obtención de diferentes micro/nanoestructuras de materiales para cátodos o electrolitos de estas celdas. La microestructura de estos materiales se analiza por microscopía electrónica de barrido y de transmisión y su comportamiento electroquímico se estudia usando espectroscopia de impedancia. Se destaca que lo más importante es determinar cuál es la correlación entre los aspectos microestructurales (determinados por los parámetros de síntesis) y las propiedades físicas de los materiales obtenidos que son determinantes en la eficiencia de las celdas.*

### Bibliografía

“Fuel Cell Systems Explained” J. Larminie, A. Dicks, John Wiley and Sons 2003.  
 “Physical Ceramics, Principles for Ceramic Science and Engineering” Y. M. Chiang, D. Birnie III, and W. D. Kingery





## MODIFICACIÓN, CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE ARCILLAS PARA SER UTILIZADAS EN LA REMOCIÓN DE METALES Y COMO REFUERZO DE NANOCOMPUESTOS



**Víctor H. Guerrero**

Laboratorio de Nuevos Materiales, Departamento de Materiales, Escuela Politécnica Nacional  
Quito - Ecuador

*En este trabajo se describen los procesos que pueden ser desarrollados para purificar, modificar, caracterizar y evaluar materiales arcillosos, poniendo énfasis en la utilización de estos materiales en aplicaciones medio ambientales y en la fabricación de nanocompuestos de matriz polimérica. Estos nuevos materiales presentan propiedades mejoradas que les permiten tener aplicaciones más específicas y óptimas que las de las arcillas convencionales y los polímeros puros. Para contextualizar la importancia de la obtención de arcillas funcionalizadas y nanocompuestos de matriz polimérica reforzados con nanoarcillas, se presenta una breve descripción de las características, composición, propiedades y aplicaciones tanto de las arcillas como de los polímeros usualmente utilizados como matriz. De esta misma manera, se definen los conceptos más importantes relacionados con los procesos de obtención de materiales funcionalizados y de nanocompuestos.*

*Para que las arcillas puedan ser utilizadas en procesos de remediación medio ambiental requieren de procesos de purificación y activación, en los que se eliminan ciertos componentes no deseados e impurezas. En este tipo de procesos las arcillas son sometidas a procesos de molienda, tamizado, termoactivación y modificación química, alterando de esta manera su estructura interlaminar. Una vez obtenidas las arcillas modificadas se las puede utilizar en la remoción de compuestos aromáticos, metales pesados y colorantes orgánicos, así como la absorción de agua. Estas aplicaciones son de gran interés debido al bajo costo de producción y la facilidad de procesamiento de las arcillas, frente a otro tipo de tratamiento medio ambiental como la utilización de carbón activado. Por otra parte, las nanoarcillas pueden ser incorporadas a diversas matrices poliméricas para obtener nanocompuestos multifuncionales con excelentes propiedades físicas, químicas, eléctricas, magnéticas y ópticas, permitiendo su utilización a nivel mundial por sectores como el automotriz, aeroespacial y de la construcción.*

*Los conceptos, principios y aplicaciones que se presentan en el trabajo se ilustran con los resultados obtenidos por investigadores que forman parte del Laboratorio de Nuevos Materiales (LANUM) de la Escuela Politécnica Nacional. Así por ejemplo, los procesos de purificación de arcillas que se estudian son de naturaleza física, en los que se involucran operaciones unitarias como molienda, tamizado, lavado y secado, entre otras. Además, se describen los procesos termoquímicos para su purificación que permiten eliminar impurezas y sustancias no deseadas. El proceso de activación de la arcilla, consiste en reemplazar los cationes intercambiables*



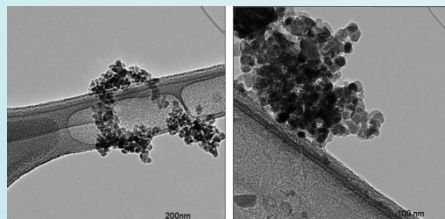
ubicados en los espacios interlaminares de la arcilla natural por otro tipo de cargas como los iones  $\text{Na}^+$ . Esta funcionalización permite mejorar sus propiedades iniciales e incrementar su capacidad de intercambio catiónico. Este intercambio se puede realizar con una sal catiónica o con una sal cuaternaria de amonio. Las arcillas funcionalizadas pueden ser utilizadas para la remoción de metales pesados como níquel (II) y cromo (VI) de aguas sintéticas.

Para el caso de los nanocompuestos poliméricos, se estudia la incorporación de nanoarcillas modificadas químicamente como refuerzo de poliolefinas, permitiendo de esta manera mejorar las propiedades de las matrices y desarrollar aplicaciones más específicas y óptimas que las de los materiales convencionales y de los polímeros puros. Así, se muestra como la inyección de polipropileno homopolímero reforzado con un 5% de arcillas montmorilloníticas en forma de masterbatch en polvo resulta en mejores combinaciones de resistencias máximas, deformaciones y estabilidad térmica.

Una vez obtenidas las nanoarcillas funcionalizadas y los nanocompuestos poliméricos, es necesario realizar su caracterización. En esta presentación se describe la caracterización de los materiales arcillosos mediante técnicas instrumentales específicas como son difracción de rayos X (XRD), microscopía electrónica de barrido (SEM), análisis infrarrojo FTIR y una caracterización termomecánica que implica las técnicas de calorimetría diferencial de barrido (DSC) y termogravimetría (TGA). Además se presentan los criterios que se pueden emplear para evaluar las nanoarcillas que se obtienen y definir su potencial utilidad en la remoción de metales pesados y en la formulación de los nanocompuestos poliméricos. Para los compuestos reforzados con nanoarcillas es necesario evaluar su comportamiento mecánico. Por ello, en esta presentación se describen también los procesos y mecanismos que se pueden emplear para obtener probetas para ensayos de tracción, flexión e impacto utilizando procesos de extrusión – inyección y moldeo en caliente. Así mismo, se describen los elementos esenciales a considerar de las normas ASTM pertinentes. Adicionalmente se definen criterios para evaluar nanocompuestos considerando su comportamiento termo-mecánico y las propiedades de los polímeros usados como matriz.



## NANOMATERIALES MAGNETICOS Y SUS APLICACIONES



**Edgar Mosquera - Mauricio Morel**

Laboratorio de Materiales a Nanoescala, Departamento de Ciencia de los Materiales, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas  
Universidad de Chile, Av. Tupper 2069, Santiago, Chile

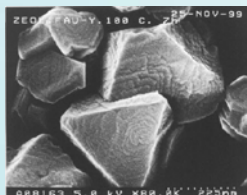
*La nanotecnología ha permitido a científicos, ingenieros, y físicos a trabajar a nivel molecular y celular, llegando a producir mayores avances en la ciencia, la tecnología, y la salud. Las aplicaciones reales de los materiales nanoestructurados están siendo muy comunes en este tiempo. Además, las excelentes propiedades de estos nanomateriales cuando se comparan con su contraparte volumétrico ("Bulk") proveen un futuro prometedor para su uso en éstos campos de investigación.*

*Materiales nanoestructurados (nanomateriales) son materiales que poseen al menos una escala de longitud del orden de una billonésima parte de un metro. Ellos manifiestan fascinantes y funcionales propiedades, las cuales pueden ser explotadas para una variedad de aplicaciones. Las aplicaciones comerciales y tecnológicas de estos nanomateriales abarcan áreas como la química analítica, envío de drogas, bio-encapsulación, y en dispositivos electrónicos, magnéticos, ópticos y mecánicos. Como un resultado del esfuerzo de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i), los materiales nanoestructurados magnéticos en el contexto de sistemas funcionales son brevemente revisados. Varios ejemplos tecnológicos del uso de los nanomateriales magnéticos son presentados. Finalmente, algunas oportunidades y desafíos acerca de la nanominería son discutidos.*





## NANOMATERIALES ZEOLITICOS Y SUS APLICACIONES EN ENERGIA RENOVABLES



**Gema González**

Laboratorio de Materiales, Centro de Ingeniería de Materiales y Nanotecnología, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas

**Palabras clave:** *nanomateriales, nanoporosos, zeolitas, tamices moleculares.*

El término Zeolitas (Literalmente piedras que hierven), fue introducido en 1756 por Axel Cronstedt, un mineralogista sueco, que notó que algunos minerales al calentarlos liberan grandes cantidades de vapor de agua previamente adsorbida. Estos materiales poseen entramados de nanoporos que son capaces de separar una mezcla de diferentes moléculas sobre la base de su forma y tamaño molecular, por esto se les conoce como tamices moleculares. Las zeolitas tienen numerosas aplicaciones industriales como resultado de su estructura regular de canales abiertos a nivel molecular. Estos materiales son de gran interés especialmente para intercambio iónico, adsorción y propiedades catalíticas basadas en selectividad de forma. Sus propiedades de adsorción han sido tratadas de aprovechar para sistemas de almacenamiento de calor y refrigeración [1] especialmente para lugares remotos, también en purificación de aguas mediante adsorción de metales pesados y moléculas contaminantes y en adsorción de monóxido y dióxido de carbono y remoción de NO<sub>x</sub> [2]. Más recientemente también se han propuesto en almacenamiento de hidrógeno [3]. La síntesis de zeolitas, se realiza mediante procesos hidrotermales con o sin moléculas orgánicas que actúan como agentes directores de estructura y ésta depende de un gran número de variables que controlan la estructura obtenida. Mediante el control de las variables de síntesis se pueden diseñar nuevos entramados, con los cuales se puede controlar el tamaño de poros, entre estos están la obtención controlada de intercrecimientos. La fuente indispensable es la sílice (SiO<sub>2</sub>), la cual puede ser obtenida de diferentes orígenes, desde silicato de sodio hasta cascara de arroz, también se ha reportado la síntesis a partir de desechos ácidos de minas de carbón. En el presente trabajo, se presentan métodos de síntesis para la obtención de nuevos entramados a través de formación de intercrecimientos de algunas de las estructuras de zeolitas más utilizadas en la industria: MFI/MEL, FAU/EMT y zeolita beta y una revisión de algunas aplicaciones de zeolitas en energías renovables.

La caracterización estructural constituye una herramienta absolutamente esencial para poder elucidar la estructura de estos materiales, por lo cual se presentan los métodos más convencionales de caracterización: difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido y transmisión, microscopía de fuerza atómica, RMN, área superficial mediante adsorción de nitrógeno y FTIR. La figura 1 y 2 muestra imágenes de microscopía electrónica de barrido de intercrecimientos de FAU/EMT y de MFI/MEL en diferentes proporciones



## REFERENCIAS

[1] Palavras, Bakos, I. G.C., Development of a low-cost dish solar concentrator and its application in zeolite desorption, *Renewable Energy* 31 (2006) 2422–2431 [2] Rodriguez Delgado M., Otero Arian C., carbon monoxide, dinitrogen and carbon dioxide adsorption of zeolite beta: IR spectroscopy and thermodynamic studies, *Energy*,36 (2011) 5286-5291. [3] Kyong-Huang Chung. High-pressure storage on microporous zeolites with varying pore properties, *Energy*,35 (2010) 2235-2241.

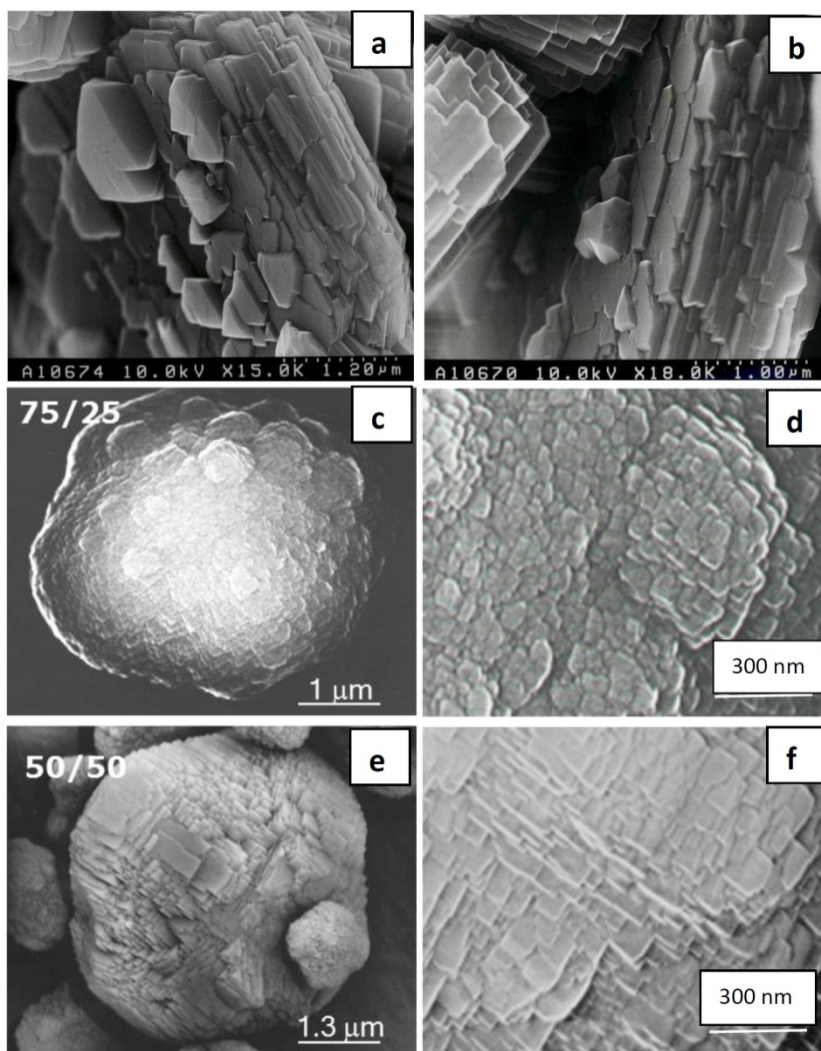


Figure 1. Imágenes de Microscopia Electrónica de Barrido de intercrecimientos de zeolitas: a. FAU/EMT (0.70), b. FAU/EMT (0.30) c. and d. MFI/MEL (75/25); . MFI/MEL (50/50)



## NANOCIENCIA Y NANOTECNOLOGÍA EN MÉXICO



### **Noboru Takeuchi**

Centro de Nanociencias y Nanotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México,  
Ensenada, Baja California, México

Correo electrónico: [takeuchi@cryn.unam.mx](mailto:takeuchi@cryn.unam.mx)

En México no existe una iniciativa nacional de Nanociencia y Nanotecnología para coordinar y fomentar a nivel gubernamental su investigación y desarrollo. Sin embargo, esto no significa que no se haga investigación en éste campo y en un gran número de Universidades y Centros de Investigación se trabaja en temas relacionados con la Nanociencia y la Nanotecnología. En esta charla se intentará hacer un breve resumen del estado actual de la nanociencia y la nanotecnología en México. Resumiremos brevemente las principales instituciones donde se realiza investigaciones en nanociencia y nanotecnología en nuestro país y los temas de investigación. También hablaremos de los programas educativos que se tienen para formar recursos humanos tanto a nivel de pregrado como de posgrado y los programas de difusión y de divulgación que se están llevando a cabo para comunicar la importancia de la Nanociencia y la Nanotecnología a un público más amplio. Se agradece financiamiento económico por parte de DGAPA-UNAM proyecto IN103512-3 y Conacyt proyecto 164485.





## NANOTECNOLOGÍA EN VENEZUELA: SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS



**Anwar Hasmy**

Universidad Simón Bolívar / Red Venezolana de Nanotecnología, Caracas, Venezuela

Email: [anwarhasmy@hotmail.com](mailto:anwarhasmy@hotmail.com)

A través de la manipulación y caracterización de los materiales en la nanoescala, la nanotecnología se ha estado convirtiendo en un conocimiento de gran potencial para el desarrollo económico y social de los países en vías de desarrollo. En Venezuela, desde hace unos años se ha venido trabajando en diversas actividades asociadas al impulso de este nuevo conocimiento. El presente trabajo mostrará algunos índices y variables que permitirán ilustrar el grado de avance de la nanotecnología en Venezuela. Las actividades analizadas incluyen las publicaciones científicas, la organización de cursos, jornadas, escuelas y talleres, los esfuerzos en el diseño de programa de estudios de postgrado en nanotecnología, y otras acciones de interés al desarrollo de la nanociencia y nanotecnología (1,2). Se describirá cómo la creación de la Red Venezolana de Nanotecnología en el año 2010 ha permitido catalizar estas actividades y otros planes que se están diseñando en la actualidad, en colaboración con órganos académicos y del gobierno, con el fin de dar un impulso firme y sostenido al desarrollo científico-tecnológico nacional, maximizando las oportunidades y minimizando los riesgos que ofrece la nanotecnología.

### Referencias

- (1) López M. S., Hasmy A. y Vessuri H., "Nanoscience and Nanotechnology in Venezuela" *Journal of Nanoparticle Research*, 2011, 13: 3101-3106.
- (2) Hasmy A., "Formación y divulgación de la nanotecnología en Venezuela: Situación y perspectiva", *Mundo Nano*, 2011, 4: 72-82.



**FORO INTERNACIONAL: NANOMATERIALES Y NANOTECNOLOGÍA EN AMÉRICA  
LATINA Y EL CARIBE  
ESTADO DE LA SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS  
AVANCES EN EL DESARROLLO DE LAS NANOCIENCIAS Y LA NANOTECNOLOGÍA EN  
ECUADOR**



**César Costa Vera**

César Costa Vera, Mass Spectrometry and Optical Spectroscopy Group (MSOS)  
Departamento de. Física, Escuela Politécnica Nacional, Ladrón de Guevara E11-253, Ed. Ing.  
Civil Piso 1, Quito, Ecuador

**Resumen**

*En 2010 se realizó en Lima un foro para evaluar la situación al momento del avance en el desarrollo de las nanociencias y las nanotecnologías en la región Andina y otros países Latinoamericanos, y discutir las perspectivas y necesidades en las discusiones correspondientes. Un punto fundamental resultante de la reunión fue la creación de la red internacional NanoAndes. En esa misma reunión se presentó una evaluación de la realidad del Ecuador en este contexto, la misma que resaltó las grandes limitaciones y el estado incipiente de desarrollo en C&T del País en especial en las nanociencias y nanotecnologías. También se indicaron perspectivas en función del clima político imperante y de la voluntad explícita de grupos trabajando en esas temáticas en el Ecuador en ese momento.*

*A partir de 2010 el gobierno Ecuatoriano ha realizado un número de acciones que han afectado de manera consecuente el desarrollo en C&T y que marcan el devenir de ese desarrollo. Así mismo esfuerzos de individuos e instituciones públicas y privadas en el País han contribuido a modificar el paisaje y el clima de desarrollo en ciertos sentidos importantes. En particular eventos como la escuela NanoAndes-Quito-2012 han marcado hitos importantes en este proceso.*

*En esta contribución se presentarán algunos de los elementos imperantes en este contexto, y se discutirá un punto de vista respecto al estado actual y las perspectivas del desarrollo futuro de las nanociencias y nanotecnologías en el Ecuador, en el contexto de la región y el mundo. Esta contribución se conceptúa como un aporte a una discusión de nivel amplia regional e internacional.*



**ESCUELA NANOANDES**

---

**POSTERS PRESENTADOS  
ESCUELA NANOANDES  
LA PAZ - 2013**

---





## SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS DE PLATA Y DE ÓXIDO DE ZINC ESTABILIZADOS CON QUITOSANO COMO AGENTES ANTIMICROBIANOS

**Ricardo Alvarado, José Roberto Vega Baudrit**

Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Centro Nacional de Alta Tecnología

### Resumen

Grandes esfuerzos se han centrado en el diseño de nuevos agentes antimicrobianos resultando en nanomateriales altamente promisorios. Dentro de este marco, un método simple y ecoamigable se desarrolló para la síntesis sonoquímica de nanopartículas de plata (AgNP) y las de óxido de zinc (ZnO NP) utilizando quitosano como agente estabilizante. El método base empleado logró AgNP de menos de 20 nm de diámetro y las ZnO NP rondaban los 67 nm, según estimaciones mediante DLS. Evaluación de su actividad antimicrobiana demostró un rango de acción similar al de antibióticos comerciales obteniendo concentraciones mínimas inhibitorias (MIC) de 2.5 y 4  $\mu\text{g mL}^{-1}$  en el caso de AgNP para *S. aureus* y *E. coli* respectivamente mientras que de 36 y 38  $\mu\text{g mL}^{-1}$  de ZnO NP en el mismo orden. Actualmente se ha logrado mejorar considerablemente el proceso de síntesis de AgNP al mejorar tanto su morfología y distribución de tamaño (según su análisis por UV-vis) y se continúan las pruebas en el caso de ZnO NP. Las pruebas antimicrobianas restantes involucran evaluación esporidica (*B. subtilis*) y antibiofilm (*P. aeruginosa*). Otros proyectos en conjunto derivados de este involucra el uso de nanopartículas de plata para la purificación microbiológica de aguas, uso en pinturas y recubrimientos y potenciales usos en el área agrícola.



## SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS DE $\text{CeO}_2$ , $\text{CuO}$ Y $\text{CuO/CeO}_2$ EN MICROEMULSIONES O/W Y SU APLICACIÓN COMO FOTOCATALIZADORES

**Andrea Victoria Vela-Gonzalez<sup>1</sup>, Kelly Pemartin<sup>2</sup>, Conxita Solans<sup>2</sup>, Isaías Juárez-Ramírez<sup>3</sup> y Margarita Sánchez-Domínguez<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV), Unidad Monterrey, GENES-Group of Embedded Nanomaterials for Energy Scavenging, Alianza Norte 202, Parque de Investigación e Innovación Tecnológica, 66600 Apodaca, N.L., México.

<sup>2</sup>Instituto de Química Avanzada de Cataluña, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IQAC-CSIC), CIBER en Biotecnología, Biomateriales y Nanomedicina (CIBER-BBN), Jordi Girona 18-26, 08034 Barcelona, España.

<sup>3</sup>Departamento de Ecomateriales y Energía, Instituto de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León Cd. Universitaria, 66451 San Nicolás de los Garza, N.L. México

**Palabras clave.** *Microemulsión, óxido de cerio, óxido de cobre, nanopartículas*

Al introducir diferentes metales en la red cristalina del óxido de cerio se modifican considerablemente sus propiedades, en particular las vacancias de oxígeno, ya que éstas determinan algunas de las características más importantes para diferentes aplicaciones. Recientemente se desarrolló un método basado en microemulsiones de tipo aceite-en-agua (O/W) como medio de reacción para la preparación de nanopartículas de óxidos metálicos (1, 2). Este método presenta ventajas al utilizar el agua como fase continua y mayoritaria lo que lo hace más amigable con el medio ambiente y menos costoso que el método tradicional de microemulsión agua-en-aceite (W/O) el cual usa solventes orgánicos como fase continua. En este trabajo se exploró la síntesis de nanopartículas de óxido de cerio ( $\text{CeO}_2$ ), óxido de cobre ( $\text{CuO}$ ), óxido de cerio-cobre por el método de reacción en microemulsiones (O/W). Las nanopartículas sintetizadas fueron caracterizadas por Difracción de Rayos X (XRD), Microscopía Electrónica de Transmisión de Alta Resolución (HRTEM), Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), BET, XPS y espectroscopía de reflectancia difusa. La relación molar de Cu/Ce se varió de 5/95 a 30/70, obteniendo nanopartículas de óxido de cerio con el cobre incorporado en la estructura cristalina cúbica tipo fluorita en comparación con relaciones molares mayores de 30/70 se observó una fase predominante de  $\text{CeO}_2$  y una segunda fase de  $\text{CuO}$ . Se determinó la energía de banda prohibida de los diferentes materiales y en función de la concentración de cobre esta disminuye. Se ha reportado previamente la síntesis de óxidos de Ce-Cu por diferentes métodos de síntesis, sin embargo, no se ha reportado la aplicación de estos materiales como fotocatalizadores.

### Agradecimientos

Agradecemos a CONACYT por el apoyo económico (Proyecto de Ciencia Básica con clave CB2011/166649, así como el Proyecto de Redes Temáticas con clave 194451).



- (1) Sánchez-Domínguez M., Boutonnet M., y Solans C., A novel approach to metal and metal oxide nanoparticle synthesis: the oil-in-water microemulsion reaction method, *Journal of Nanoparticle Research*, 2009, 11(7): 1823-1829.
- (2) Sánchez-Domínguez M., Pemartin K., y Boutonnet M., Preparation of inorganic nanoparticles in oil-inwater microemulsions: A soft and versatile approach, *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 2012, 17(5): 297-305.





## CARACTERIZACIÓN TÉRMICA, ELÉCTRICA Y MECÁNICA DE NANOFIBRAS BASADAS EN PVOH, PEG Y QUITOSANO FABRICADAS POR EL MÉTODO DE ELECTROSPINNING

Juan Carlos Ospina Cano<sup>[1]</sup>, Yurieth Marcela Quintero<sup>[1]</sup>, Rubén Antonio Vargas<sup>[1]</sup>

<sup>[1]</sup>Universidad del Valle, Departamento de Física, Laboratorio de Transiciones de Fase en Sistemas no Metálicos

**Palabras clave:** Nanofibras, Polímeros, Electrospinning, Barrido de Calorimetría Diferencial, Análisis Termogavimétrico, Espectroscopía de Impedancias.

Hemos preparado nanofibras de una mezcla de polímeros compuesta por Quitosano, Polivinil alcohol (PVOH) y Polietileno glicol (PEG), cuyo interés se fundamenta en las propiedades físico-químicas que tienen estos polímeros de manera individual y sus aplicaciones en áreas como la ingeniería de tejidos, la biomedicina, el tratamiento de aguas, la industria textil, entre otros (1).

Las nanofibras se fabricaron utilizando la técnica de electrospinning, la cual consiste en cargar eléctricamente el polímero, inicialmente en estado líquido y contenido en una jeringa, aplicando un alto voltaje entre la aguja de la jeringa y una placa colectora. Una vez cargadas eléctricamente las gotas del polímero, salen en forma de hilos los cuales son depositados en la placa. Para tener un control sobre el flujo del polímero, se dispone de un dispositivo que permite manipular la rata de salida del polímero (2).

Si se consideran situaciones físicas tales como que el fluido está en estado cuasi-estático, que el tamaño de la gota es pequeño en comparación con la distancia que existe entre la aguja y la placa colectora, y que el voltaje aplicado  $U_a$  sea superior al voltaje permitido por la muestra  $U_T$  (3), se puede demostrar la ecuación (1) que relaciona algunas propiedades del fluido con el voltaje aplicado, la rata de bombeo del polímero y el radio de deposición:

$$r_e = \left( \frac{dV}{dt} \right)^{2/3} \left( \frac{\rho}{4\pi^2 \gamma \tan\left(\frac{\pi}{2} - \vartheta\right) \left[ \left( \frac{U_a}{U_T} \right)^2 - 1 \right]} \right)^{1/3} \quad (1)$$

En donde la densidad del material  $\rho$  y la tensión superficial  $\gamma$ , además,  $r_e$  es el radio de deposición,  $\frac{dV}{dt}$  es la velocidad de bombeo o flujo, el ángulo  $\vartheta$  tiene un valor de  $49.3^\circ$  (4),  $U_a$  es el voltaje aplicado y  $U_T$  es el voltaje permitido por la muestra.

De la ecuación 1 se colige que, teniendo un control adecuado sobre la rata de bombeo y el voltaje aplicado, pueden obtenerse nanofibras adecuadas en una región determinada.

Con el propósito de caracterizar térmicamente la película, se realizaron medidas de barrido de calorimetría diferencial (DSC) y de análisis termogavimétrico (TGA) para estudiar temperaturas de transición vítrea, de cristalización, de fundición y de oxidación o descomposición, obteniéndose propiedades térmicas mejoradas con respecto al material en bulto.

Para realizar la caracterización eléctrica de la película se efectuaron pruebas de espectroscopía de impedancias a diferentes frecuencias, obteniéndose valores en la conductividad DC



superiores a las del bulto, así como relajaciones en la conductividad AC similares a las de otros electrolitos sólidos.

La caracterización mecánica de la muestra consistió en realizar medidas de la tensión y el esfuerzo mecánico de la película en función de su elongación a temperatura ambiente, observándose altos valores en el módulo de Young comparados con la de los materiales precursores y por último, la morfología de las membranas se caracterizó por microscopía óptica de alta resolución.

Estos estudios se realizaron sobre películas formadas a diferentes concentraciones de los tres polímeros y fueron comparados entre sí, además se confrontaron con otros resultados reportados en diversos artículos, con el objetivo de analizar su viabilidad en la implementación biomédica, ecológica, tecnológica e industrial, haciendo énfasis en aplicaciones energéticas y ambientales tales como en celdas de combustible, por ejemplo en membranas intercambiadoras de protones.

## REFERENCIAS

- (1) Sun K., Li Z.H., Preparations, properties and applications of chitosan based nanofibers fabricated by electrospinning; express polymer letters Vol 5, No. 4, 2010, 342-361.
- (2) Matthew E. H., Kristine N. G., Joseph M. D., Norman J. W., Theory and kinematic measurements of the mechanics of stable electrosupun polymer jets, 2008, Polymer, 49, 2924-2936.
- (3) Matthias S., Matthias M., Electrospray and Taylor-Cone theory, Dole's beam of macromolecules at last? International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes, 1994, 136: 167-180.
- (4) Fernández de la Mora J., Journal of Fluid Mechanics, 1992, 243: 561.



## BIOSÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS DE SEMICONDUCTORES POR MICROORGANISMOS ENCAPSULADOS

**Lic. Maria Paula Vena**

Departamento de Química Inorgánica, Analítica y Química Física  
FCEN, UBA

Los Q-dots de semiconductores presentan un band gap dependiente del tamaño con un corrimiento de la absorción y emisión a mayores energías. Estas propiedades los hacen únicos para la fabricación de dispositivos ópticos, conversión de energía solar o señalización de procesos in-vivo. Su síntesis suele implicar el uso de reactivos de alta toxicidad: cationes contaminantes (eg.  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ), solventes orgánicos y moléculas protectoras que controlan el crecimiento e impiden la agregación. El objetivo central de este proyecto es desarrollar vías biosintéticas para obtener nanopartículas (NPs) de calcogenuros de Cd, Zn, Pb, Cu, incluyendo mixtas tipo  $\text{Cd}_{1-x}\text{MexS}$ , con alta emisión en el visible utilizando microorganismos (MOs) encapsulados en matrices de óxidos minerales. En una primera etapa se seleccionarán especies (algas, bacterias, levaduras, hongos) que puedan sintetizar NPs en base a su capacidad de generar  $\text{H}_2\text{S}$  o  $\text{S}^{2-}$  por enzimas como sulfato reductasa o tioles reducidos como glutatión y que sean tolerantes a cationes pesados. Se explorará también la obtención de MeSe incubándolas en medios ricos en selenatos o selenitos solubles. Se hará énfasis en los mecanismos y localización (intra o extracelular) de los procesos de nucleación y crecimiento y en la relación entre confinamiento y tamaño de partícula. Para la nucleación intracelular, se determinará el rol de complejantes en el uptake del catión. Para las NPs excretadas, interesará reconocer las biomoléculas que actuarían como protectores frente a la agregación, o dirigiendo el crecimiento preferencial de una dirección del cristal. En una segunda etapa, se buscará encapsular los MOs en matrices minerales basadas en  $\text{SiO}_2$ . Esta aproximación biomimética se centrará en la distribución de poros que posibilite un transporte efectivo de nutrientes y a su vez evite la migración de NPs fuera de la matriz. La idea subyacente es sintonizar el tamaño y la carga superficial del poro en función de la carga de las moléculas adsorbidas sobre la NP tal que ésta no pueda ser fácilmente transportada al medio externo. En síntesis, combinando la capacidad de ciertos MOs para producir NPs con la encapsulación de colonias celulares en matrices minerales, se espera sentar las bases para producir Q-dots con alta emisión en visible, mantenerlas confinadas para evitar su dispersión al ambiente y contribuir a la remoción de cationes pesados.





## ESTUDIO DE PROPIEDADES TERMICAS, ELECTRICAS Y MORFOLOGICAS DE MEMBRANAS NANOESTRUCTURADAS DE PVOH, QUITOSANO Y NANOPARTICULAS DE TiO<sub>2</sub>

Juan Manuel Masso<sup>[1]</sup>, Yurieth Marcela Quintero<sup>[1]</sup>, Rubén Antonio Vargas<sup>[1]</sup>

<sup>[1]</sup>Universidad del Valle, Departamento de Física, Laboratorio de Transiciones de Fase en Sistemas no Metálicos

**Palabras clave:** Membranas poliméricas, Nanoestructuras, Nanofibras, DSC. TGA. Espectroscopia de impedancias, SEM

Informamos de la preparación de membranas poliméricas intercambiadoras de protones (PEMs) basadas en poli alcohol de vinilo (PVOH). Quitosano (CS) y nanopartículas de TiO<sub>2</sub>. Las membranas fueron preparadas por electrospinning bajo condiciones de humedad relativa, viscosidad de la solución y voltaje de condensación de las nanofibras en un sustrato de aluminio.

Las nanofibras exhiben espesores con promedio de 500nm y las nanopartículas dispersas en una concentración de 3% (W/W) con dimensiones de 21nm, se caracterizan por ser transparentes y estables mecánicamente.

Las membranas se caracterizaron térmicamente utilizando medidas de calorimetría diferencial de barrido (DSC) y de análisis termogravimétrico (TGA) para estudiar procesos de descomposición, transición vítrea, cristalización y deshidratación, obteniéndose propiedades térmicas mejoradas con respecto al material en bulto.

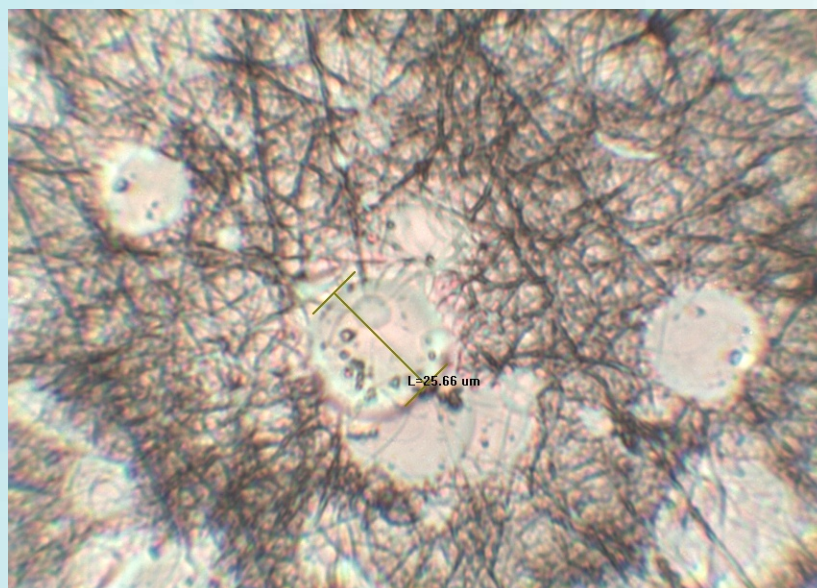
Las muestras fueron sometidas a caracterización eléctrica mediante medidas de espectroscopia de impedancias a diferentes frecuencias y temperaturas, obteniéndose activación térmica en la conductividad DC, las cuales fueron superiores a las del bulto. Las medidas como función de la frecuencia exhiben relajación eléctrica de tipo exponencial similares a las de otros electrolitos sólidos.

La caracterización mecánica de la muestra consistió en realizar medidas esfuerzo-formación usando una máquina universal **Com-Ten Industries** controlada por computador y usando una plataforma LabView®. El módulo de Young medido muestra valores superiores a la de los materiales precursores.

Micrografías obtenidas por microscopia óptica de alta resolución y por microscopia de barrido electrónico (SEM) muestran el carácter nanoestructurado en forma de fibras entrelazadas para el material polimérico conformado por PVOH y Cs en las cuales se ven dispersas las nanopartículas de TiO<sub>2</sub> de 21nm.



**Figura 1:** Imagen en microscopia óptica de fibras de PVOH y Nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  de 25.6nm



## REFERENCIAS

- [1] D.R. Paul, L.M. Robeson, Polymer nanotechnology: Nanocomposites". Polymer **49**, 3187–3204 (2008).
- [2] Xianfeng Wang, Bin Ding and Bingyun Li, Biomimetic electrospun nanofibrous structures for tissue engineering, Materialstoday 16(6) 229-242, (2013)
- [3]. Maher Z. Elesabee, Hala F. Naguib, Rania Elerayed Morsi. "Chitosan based nanofibers review", Materials Science and Engineering C, **32** 1711-1726, (2012)
- [4] Nandana Bhardwaj, Subhas C. Kandu. "Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique". Biotechnology Advances. **28**, 325-347, (2010).
- [5] K. Paipitaka, T. Pornprach, P. Mongkontalang, W. Techitdheera, W. Pecharapa. "Characterization of PVA-Chitosan Nanofibers Prepared by Electrospinning", Procedia Engineering **8**, 101–105, (2011)
- [6] Parastoo Ahmadpoor, Ali Shams Nateri, Vahid Motaghitalab. "The Optical Properties of PVA/ $\text{TiO}_2$  Composite Nanofibers", Journal of Applied Polymer science. **130**, 78-85, (2013).
- [7] Matthias S. Wilm, Matthias Mann. "Electrospray and Taylor-Cone theory, Dole's beam of macromolecules at last", International Journal of Mass Spectrometry and Ion processes **136**, 167-180 (1994)
- [8] Juan Mendoza, Ruben Duran, Joan Genesca, "Espectroscopia de impedancia electroquímica en corrosión". Notas, Instituto Mexicano de Petróleo, Universidad Nacional Autónoma de México



## PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LA PINTURA DOPADA CON NANOPARTÍCULAS DE VERMICULITA

**Ingrith Paola Cuellar Berrio**

Grupo de materiales Magnéticos y Nanoestructuras, Universidad de Quindío – Colombia

### Resumen

En este trabajo se reporta la influencia de nanopartículas (NP) de vermiculita en sus propiedades como aislante térmico-eléctrico al mezclarse con pintura para exteriores. Se realizaron medidas de espectroscopia de impedancia compleja (EIC), obteniendo variaciones en la resistividad de la pintura, la cual cambia de acuerdo a la relación NP's Vs Pintura. El rango de trabajo en el que se estudió el material vario desde 303 a 473K;. Las medidas obtenidas fueron ajustadas mediante funciones de relajación asimétricas del tipo:  $\phi(t) = \text{Exp}^{-(t/\tau)^\beta}$ , donde  $0 < \beta < 1$  y  $\tau$  representa un tiempo de relajación característico y llamada función de Kohlrausch-Williams-Watts (KWW), además de ser tratados mediante modelación circuital, dando indicios de cambios en la conductividad del material, para nuestro caso pintura, de tal manera que se logró establecer una margen de concentración ideal para lograr que la pintura llegue hasta más altas temperaturas, sin que inicie su proceso de degradación .





## DESARROLLO DE MATERIALES RECUBIERTOS CON ÓXIDOS PARA CÁTODOS DE BATERÍAS DE LITIO

**Lisbeth A. Benavides Castillo, Dr. Diego J. Cuscueta, Dra. Ada Ghilarducci**  
Grupo “Física de Metales” –Gerencia de Física –CNEA, Centro Atómico Bariloche.

Los esfuerzos realizados por descubrir nuevos materiales que sirvan como fuentes de energía económicamente sustentables han conducido al desarrollo de celdas electroquímicas que han evolucionado desde las baterías de Ni-Cd y Ni-MH hasta las recientes baterías de Li-ión, que contribuyen con el buen desempeño electroquímico, la protección del medio ambiente y la reducción de costos de producción [1]. Algunos de los materiales utilizados en cátodos de baterías de Li-ion son  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiNiO}_2$  y  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ .

El  $\text{LiCoO}_2$  es el material más usado en el mercado como cátodo de baterías de Li-ión debido a la estabilidad de su estructura en capas [2-4]. Sin embargo, la cantidad reversible de litio ( $x$  en  $\text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2$ ) en el ciclado debe ser menor a 0,5, ya que una sobre deslitiación puede provocarla desintegración de partículas y el deterioro del rendimiento electroquímico [5]. Otro material atractivo es el  $\text{LiNiO}_2$  [6-9], que además de ser más económico tiene una capacidad reversible mayor que la del  $\text{LiCoO}_2$ ; sin embargo, su mayor inconveniente es que no es fácil de preparar a gran escala, además de presentar un comportamiento similar al  $\text{LiCoO}_2$  con el excesivo deslitiado, resultando en microfisuras y una marcada disminución de la capacidad. Un tercer material para estudiar es el  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  debido también a su reducido costo, con abundantes recursos y sin contaminación ambiental [10-12]; sin embargo su estructura en espinela y el efecto Jahn-Teller provocan que la capacidad caiga muy rápido durante el ciclado, además del deterioro de las propiedades a altas temperaturas provocado por la disolución de Mn en el electrolito.

Hay evidencia que tal degradación está relacionada con los defectos de superficie de los materiales. Recientes estudios han demostrado que las superficies recubiertas son un enfoque eficaz para estabilizar la estructura de los materiales y mejorar sus rendimientos electroquímicos. Los recubrimientos con óxidos tales como  $\text{MgO}$  [13-16],  $\text{SnO}_2$  [17-20],  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [21-24] y  $\text{ZrO}_2$  [25-26] son algunos de los más efectivos para proteger el núcleo del material evitando reacciones indeseadas en la superficie y mejorando la estabilidad estructural, ya que previenen el contacto directo con la solución del electrolito y suprimen la disolución de iones, eliminan las transiciones de fase, disminuyen el desorden de cationes en los sitios del cristal y elevan la conductividad.

El propósito de la investigación es contribuir a la mejora de los cátodos de baterías de Li-ión, estudiando el recubrimiento de compuestos químicos como  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiNiO}_2$  y  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  con óxidos, para mejorar las propiedades electroquímicas. Se está estudiando sistemáticamente la síntesis y la modificación de la superficie de estos materiales con óxidos, para eliminar problemas como la desintegración de las partículas debido a la sobre deslitiación, mejorando la estabilidad en la estructura, evitando reacciones indeseadas en la superficie y protegiendo el núcleo del material.



El proceso de síntesis química de los materiales activos base ( $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiNiO}_2$  y  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ) y con recubrimiento de éstos con óxidos se están estudiando mediante la utilización de técnicas como XRD, XPS, TEM, SEM, TGA y mediante caracterización electroquímica del material sintetizado mediante voltametría cíclica, estabilidad cíclica de carga-descarga, desempeño en función de corriente de descarga y espectroscopía de impedancia electroquímica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Y. Tian, X. Kang, L. Liu, C. Xu, T. Qu. Research on cathode material of Li-ion battery by yttrium doping, *Journal of rare earths* 26-2 (2008) 279-283
2. S.P. Sheu, C.Y. Yao, J.M. Chen, Y.C. Chiou. Influence of the  $\text{LiCoO}_2$  particle size on the performance of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources* 68-2 (1997) 533-535.
3. R. Yazami, N. Lebrun, M. Bonneau, M. Molteni. High performance  $\text{LiCoO}_2$  positive electrode material. *Journal of Power Sources* 54-2 (1995) 389-392
4. C.Y. Yao, T.H. Kao, C.H. Cheng J.M. Chen W. M. Hurng. Studies of electrochemical properties of lithium cobalt oxide. *Journal of Power Sources* 54-2 (1995) 491-493
5. A. Basch, J.H. Albering. Preparation and characterization of core-shell battery materials for Li-ion batteries manufactured by substrate induced coagulation. *Journal of Power Sources* 196 (2011) 3290-3295.
6. K. Kubo, M. Fujiwara, S. Yamada, S. Arai, M. Kanda. Synthesis and electrochemical properties for  $\text{LiNiO}_2$  substituted by other elements. *Journal of Power Sources* 68-2 (1997) 553-557.
7. R.V. Moshtev, P. Zlatilova, V. Manev, Atsushi Sato. The  $\text{LiNiO}_2$  solid solution as a cathode material for rechargeable lithium batteries. *Journal of Power Sources* 54-2 (1995) 329-333.
8. A. Rougier, C. Delmas, A.V. Chadwick. Non-cooperative Jahn-Teller effect in  $\text{LiNiO}_2$ . An EXAFS study. *Solid State Communications* 94-2 (1995) 123-127.
9. P. Kalyani, N. Kalaiselvi. Various aspects of  $\text{LiNiO}_2$  chemistry: A review. *Science and Technology of Advanced Materials* 6-6 (2005) 689-703.
10. G. Pistoia, R. Rosati. Synthesis of an efficient  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  for lithium-ion cells. *Journal of Power Sources* 58-2 (1996) 135-138.
11. P. Kalyani, N. Kalaiselvi, N. Muniyandi. A new solution combustion route to synthesize  $\text{LiCoO}_2$  and  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ . *Journal of Power Sources* 111-2 (2002) 232-238.
12. Z-M Yu, L-C Zhao. Structure and electrochemical properties of  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ . *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 17-3 (2007) 659-664.
13. L.J. Fu, H. Liu, C. Li, Y.P. Wu, E. Rahm, R. Holze, H.Q. Wu. Surface modifications of electrode materials for lithium ion batteries. *Solid State Sciences* 8-2 (2006) 113-128.
14. J.S. Gnanaraj, V.G. Pol, A. Gedanken, D. Aurbach. Improving the high-temperature performance of  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  spinel electrodes by coating the active mass with  $\text{MgO}$  via a sonochemical method. *Electrochemistry Communications* 5-11 (2003) 940-945.
15. W-S Yoon, K-W Nam, D. Jang, K.Y. Chung, J. Hanson, J-M Chen, X-Q Yang. Structural study of the coating effect on the thermal stability of charged  $\text{MgO}$ -coated  $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$  cathodes investigated by in situ XRD. *Journal of Power Sources*, In Press (2012)
16. E. Zhecheva, R. Stoyanova, G. Tyuliev, K. Tenchev, M. Mladenov, S. Vassilev. Surface interaction of  $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$  cathodes with  $\text{MgO}$ . *Solid State Sciences* 5-5 (2003) 711-720.



17. J. Cho, C.S. Kim, S. Yoo. Improvement of structural stability of  $\text{LiCoO}_2$  cathode during electrochemical cycling by Sol-Gel coating of  $\text{SnO}_2$ . *Electrochem. Solid-State Lett.* 3 (2000) 362-365.
18. J. Xiao, H-L Zhu, Z-Y Chen, Z-D Peng, G-Rong Hu. Preparation and property of spinel  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  material by co-doping anti-electricity ions. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 16-2 (2006) 467-472.
19. S. Nam, S. Kim, S. Wi, H. Choi, S. Byun, S-M Choi, S-I Yoo, K. T. Lee, B. Park. The role of carbon incorporation in  $\text{SnO}_2$  nanoparticles for Li rechargeable batteries. *Journal of Power Sources* 211 (2012) 154-160.
20. J.P. Maranchi, A.F. Hepp, P.N. Kumta.  $\text{LiCoO}_2$  and  $\text{SnO}_2$  thin film electrodes for lithium-ion battery applications. *Materials Science and Engineering: B* 116-3 (2005) 327-340
21. J. Cho, Y.J. Kim, B. Park. Novel  $\text{LiCoO}_2$  Cathode Material with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coating for a Li Ion cell. *Chem. Mater.* 12 (2000) 3788-3791.
22. Y. Huang, J. Chen, F. Cheng, W. Wan, W. Liu, H. Zhou, X. Zhang. A modified  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coating process to enhance the electrochemical performance of  $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$  and its comparison with traditional  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coating process *Journal of Power Sources* 195-24 (2010) 8267-8274.
23. H. Wang, Z. Deng, M. Chen. Effects of  $\text{SrO}/\text{Li}_2\text{O}/\text{La}_2\text{O}_3/\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ -coating on electrochemical performance of  $\text{LiCoO}_2$  *Journal of Rare Earths* 27-2 (2009) 234-239.
24. Y. Kim, H.S. Kim, S.W. Martin. Synthesis and electrochemical characteristics of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -coated  $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$  cathode materials for lithium ion batteries. *Electrochimica Acta*, 52-3 (2006) 1316-1322.
25. J. Cho, Y.J. Kim, T.J. Kim, B. Park, Zero-Strain Intercalation Cathode for Rechargeable Li-Ion Cell. *Angew. Chem. Int. Ed.* 40-18 (2001) 3367-3369
26. Y. Huang, J. Chen, J. Ni, H. Zhou, X. Zhang. A modified  $\text{ZrO}_2$ -coating process to improve electrochemical perfo





## ESTUDIO DE PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LA MORFOLOGÍA DE NANOPARTÍCULAS DE PLATAS SINTETIZADAS POR UN MÉTODO DE REDUCCIÓN QUÍMICA

**Galo Jaime Páez Fajardo<sup>1</sup>, Francisco Argüello<sup>2</sup> y César Costa Vera<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Física, Escuela Politécnica Nacional, Ladrón de Guevara E11-256, Apartado 17-12-866, Quito.

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería Química, Escuela Politécnica Nacional, Ladrón de Guevara E11-256, Apartado 17-12-866, Quito.

[jaime.paez@est.epn.edu.ec](mailto:jaime.paez@est.epn.edu.ec)

[jaime.paez2@gmail.com](mailto:jaime.paez2@gmail.com)

### Resumen

La modificación de parámetros químicos y físicos durante el proceso de síntesis de nanopartículas puede determinar cambios significativos en la morfología y tamaño de las mismas, además estas modificaciones rigen el comportamiento químico y físico del material.

Se sintetizará NPs de plata a partir de la reducción de nitrato de plata bajo diferentes condiciones en la composición de los agentes reductores y parámetros físicos de formación. La investigación se centra en la variación del agente reductor, las cantidades relativas y las concentraciones de reactivos, la temperatura y la duración de la reacción. Verificando en primera instancia la presencia de nanopartículas en el producto de la reacción química, se comparan y organizan las muestras en función de sus propiedades espectrales de absorción, apariencia óptica, y tamaño. Esto último se determinará mediante dispersión dinámica de luz.



## OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE COMPUESTOS DE POLIPROPILENO REFORZADO CON NANOARCILLAS MEDIANTE EXTRUSIÓN E INYECCIÓN

**Jonathan Fernando Castro Revelo**

En este trabajo se obtuvieron nanocompuestos de polipropileno reforzado con nanoarcillas mediante procesos de extrusión e inyección. Se formularon nanocompuestos con diferentes composiciones para su posterior caracterización física, mecánica y termomecánica. Se utilizó polipropileno homopolímero como matriz y como refuerzo se experimentó con dos tipos de arcillas. Por una parte se emplearon arcillas montmorilloníticas en forma de masterbatch con un contenido de arcilla del 50%, un contenido de polipropileno del 25% y un contenido de polipropileno maleizado (PP-g-MA) de 25%. Por otro lado se utilizaron arcillas montmorilloníticas en polvo con un contenido de arcilla del 100% y polipropileno maleizado como agente compatibilizante. Se llevaron a cabo ensayos preliminares para definir los parámetros de procesamiento y posteriormente se obtuvieron materiales compuestos con 3, 5 y 7 wt% de nanoarcillas, y 1.5, 2.5 y 3.5 wt% de polipropileno maleizado (PP-g-MA). Los materiales se procesaron en una extrusora de doble tornillo y fueron inyectados para la obtención de probetas para ensayos de tracción, flexión e impacto bajo las normas ASTM D638, ASTM D7264 y ASTM D256, respectivamente. La evaluación mecánica del material se realizó en una máquina universal de ensayos y la caracterización termo-mecánica en un equipo de análisis termogravimétrico (TGA). Además se efectuaron ensayos de dureza y densidad de los compuestos.

El material que presentó mejores propiedades fue el reforzado con 5% de arcillas en polvo y con una relación de PP-g-MA/arcilla igual a 1:2. Este material presentó mejoras del 3% y del 45% en la resistencia a la tracción y módulo de elasticidad, respectivamente. Sin embargo, estos nanocompuestos mostraron deformaciones ligeramente menores a la de la matriz. Estos materiales exhibieron mejoras en cuanto a la resistencia a la flexión en el orden del 40%. Para el caso del módulo de elasticidad tangencial a la flexión también se observaron mejores propiedades en los nanocompuestos obtenidos correspondientes al 57%. En lo que se refiere a las deformaciones no se observaron variaciones significativas. Las propiedades de impacto se vieron disminuidas alrededor del 50%. Finalmente, con lo que respecta al análisis termogravimétrico se observan ciertas mejoras en la estabilidad térmica.



## SÍNTESIS CATALÍTICA DE NANOPARTÍCULAS DE HEMATITA Y SU APLICACIÓN EN LA REMOCIÓN DE CROMO (VI)

**Salomé Galeas Hurtado**

Laboratorio de Nuevos Materiales, Escuela Politécnica Nacional, Quito – Ecuador

En el presente trabajo se estudia el efecto que ejerce la concentración del catalizador  $\text{Fe}^{+2}$  en un rango de pH comprendido entre 4 y 6.5 sobre el tiempo de transformación del  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  a nano hematita, mediante el método de precipitación controlada (MPC). La cantidad de catalizador  $[\text{Fe}^{+2}]/[\text{Fe}^{+3}]$  utilizada en los ensayos fue 0.2, 0.5 y 0.7, respectivamente. El producto de la síntesis se caracterizó mediante DRX, SEM y DLS. Los resultados obtenidos mostraron que la adición del ión  $\text{Fe}^{+2}$  a  $\text{pH} = 5$ , favoreció el mecanismo de disolución/reprecipitación y redujo el tiempo de transformación de fase de 12 a 4 horas. Cabe indicar que el pH inicial de la reacción fue determinante en el tiempo de transformación de fase ya que al disminuir su valor, la solubilidad del  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  aumentó, las reacciones de disolución se aceleraron y la velocidad de recuperación del ion  $\text{Fe}^{+2}$  se incrementó. Finalmente, se evaluó la capacidad de las nanopartículas de hematita sintetizadas para remover  $\text{Cr(VI)}$  de soluciones sintéticas. Para ello, se utilizó una relación en masa de  $[\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Cr}^{+6}]$  entre 150 y 250 a valores de pH comprendidos entre 2 y 6. El porcentaje de  $\text{Cr(VI)}$  removido se determinó mediante espectroscopía de absorción atómica. La mayor cantidad de  $\text{Cr(VI)}$  removido fue del 84.5%, la cual se alcanzó utilizando una carga  $[\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Cr}^{+6}]$  igual a 250 y un pH de 2.





## ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MAGNÉTICAS Y ELECTRÓNICAS DE NANO-ESCAMAS DE GRAFITO DOPADAS CON NANOPARTÍCULAS DE OXIDO DE FE.

**A. Bazan Aguilar†, J. E. Rivero Cervantes†, Maria Quintana C.† y Ana Champi ‡**

† Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería, P.O. Box 31-139, Av. Túpac Amaru 210, Lima, Perú

‡ Centro de Ciências Naturais e Humanas, Universidade Federal do ABC, 09210-170, Santo André, SP, Brazil.

### Resumen

Actualmente, las aplicaciones más comunes del grafito se encuentran en la industria siderúrgica, metal-mecánica, eléctrica, entre otras. En ciertos procesos puede llegar a formar parte del material residual de dichos procesos industriales.

La propuesta del presente estudio es el proveer de un valor agregado a este material, con la incorporación de nano-compuestos tales como las Nanopartículas (NPs) de Oxido de Fe, sobre las Nano-escamas de Grafito (NEG) obtenidas mecánicamente al soportarlas sobre un sustrato de vidrio o de Si/SiO<sub>2</sub>.

Estas nanopartículas semiconductoras son sintetizadas tras la incidencia de la radiación laser sobre una placa pura de Fe inmersa en un medio acuoso, a esta técnica fisicoquímica de síntesis se denomina Ablacion LASER y contrario a otras técnicas permite la obtención de nanoestructuras sin presencia de impurezas o subproductos propios de la síntesis. Luego, estas nanoestructuras son incorporadas térmicamente sobre las NEG previamente obtenidas por la Técnica de Exfoliación Mecánica o Scotch Tape y soportadas sobre un sustrato de Si/SiO<sub>2</sub>.

Por lo tanto, en busca de determinar los cambios en sus propiedades electrónicas, magnéticas y morfológicas en las películas de NEG/FexOy se caracterizaron a través de la Espectroscopia Óptica UV-visible, Dispersión de Luz Dinámica (DLS), Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) y Resonancia Paramagnética Electrónica (EPR).

Conforme a esto, podemos estimar que las películas de NEG/FexOy a base de grafito industrial de bajo costo modificado fisicoquímicamente, puede ser aprovechado tras la manipulación de sus propiedades electrónicas y magnéticas como películas semiconductoras y que en un futuro puedan sustituir en uso a las películas comerciales transparentes de SnO<sub>2</sub>: F (FTO) o In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: SnO<sub>2</sub> (ITO), como sustratos en aplicaciones fotovoltaicas.

**Palabras clave:** Nano-escamas de Grafito (NEG), Técnica de Exfoliación Mecánica, Nanopartículas de Oxido de Fe, Ablacion LASER, Dispersión de Luz Dinámica (DLS), Resonancia Paramagnética Electrónica (EPR), aplicaciones fotovoltaicas.



## SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE NANOESTRUCTURAS MESOPOROSAS 1-D DE $\text{TiO}_2$ : EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD FOTOCATALÍTICA

Julietta Cabrera<sup>1</sup>, Hugo Alarcón<sup>1</sup>, Alcides López<sup>1</sup>, Roberto Candal<sup>2,3</sup>, Dwight Acosta<sup>4</sup>,  
Juan Rodríguez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>) Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú; <sup>2</sup>) INQUIMAE, DQIAQF-INQUIMAE, FCEyN-  
Universidad de Buenos Aires, Ciudad Universitaria, Pab. II, 1428 Buenos Aires, Argentina;

<sup>3</sup>) ECyT, 3iA, Universidad Nacional de San Martín, Martín de Irigoyen No 3100 (1650), San  
Martín, Pcia de Buenos Aires, Argentina; <sup>4</sup>) Instituto de Física,  
Universidad Autónoma de México, México D.F.

**Palabras clave:** nanoestructuras de  $\text{TiO}_2$  mesoporoso, degradación fotocatalítica.

### Resumen

En los últimos años las nanoestructuras unidimensionales (1-D) tales como nanotubos, nanovarillas, nanohilos y nanocintas de materiales inorgánicos han atraído gran atención debido a que podrían ofrecer una mayor área superficial en comparación a las nanopartículas [1]. En tal sentido, las nanoestructuras 1-D de  $\text{TiO}_2$  están siendo ampliamente investigadas debido a sus potenciales aplicaciones en fotocatálisis, celdas solares, desnaturalización del agua, como ánodo para baterías de Ión-Litio, purificación de aguas entre otros [2-5]. Pero tal vez el uso más ampliamente difundido para los nanomateriales de  $\text{TiO}_2$  es como material fotocatalítico; especialmente en tratamientos de descontaminación de aguas, esto debido a que el  $\text{TiO}_2$  posee un ancho de banda relativamente pequeño (3.2 eV). Así mismo, posee un elevado poder de oxidación, además de ser biológica y químicamente inerte y poseer buena estabilidad frente a la corrosión óptica y química; por ello es ampliamente estudiado para combatir problemas de contaminación ambiental [2,6].

En este trabajo hemos sintetizado nanoestructuras 1-D de  $\text{TiO}_2$ : nanotubos y nanorods ( $\text{TiO}_2$  NT y  $\text{TiO}_2$  NR, respectivamente) por el método hidrotermal con NaOH usando como material semilla, nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  comercial P25 (P25  $\text{TiO}_2$  NP) y  $\text{TiO}_2$  sintetizado en nuestro laboratorio por el método Sol Gel (SG  $\text{TiO}_2$  NP). Ambos fueron hidrotérmicamente tratados por 18 y 24 horas, posteriormente tratados con una solución ácida de HCl para promover el intercambio iónico entre  $\text{Na}^+$  y  $\text{H}^+$ . Finalmente las muestras fueron calcinadas a 400 °C, para obtener la fase de  $\text{TiO}_2$  fotocatalíticamente más favorable como es la fase anatasa. El efecto del tiempo de tratamiento hidrotermal y del material semilla en la morfología, estructura cristalina y estabilidad térmica fueron estudiados por Microscopía Electrónica de Barrido por Emisión de Campo, Microscopía Electrónica de Transmisión de Alta Resolución (sus siglas en inglés FE-SEM, HRTEM, respectivamente) y Difracción de Rayos X (DRX). Así mismo, el área superficial fue estudiada por el método Brunauer-Emmett-Teller (BET). La eficiencia fotocatalítica de las nanoestructuras sintetizadas se evaluó midiendo la degradación de un colorante orgánico como es la Rodamina B (RhB) con la ayuda de un equipo de espectroscopía UV-visible. La disminución en la concentración de RhB fue determinada en función del tiempo de irradiación y medida para el cambio de absorbancia a 564 nm. La eficiencia de las nanoestructuras 1-D fue comparada con sus respectivos materiales semilla.

Las imágenes obtenidas por FE-SEM mostraron que las nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  obtenidas por el método Sol-Gel (SG  $\text{TiO}_2$  NP) fueron de forma esférica de tamaños menores de 20 nm.



Posterior al tratamiento hidrotérmico tanto las semillas de  $\text{TiO}_2$  comercial como aquellas obtenidas por el método Sol Gel se tornaron en estructuras 1-D (área superficial  $\sim 280 \text{ m}^2/\text{g}$ ). Análisis HRTEM confirmaron que éstos correspondían a formas tipo tubo. De igual forma, después del tratamiento de intercambio iónico con solución ácida en ambos casos las muestras conservaron su forma tipo tubo. Sin embargo, solo las muestras obtenidas a partir de P25  $\text{TiO}_2$  NP conservaron un porcentaje de su estructura tipo tubo después del tratamiento de calcinación; mientras que aquellas obtenidas a partir de SG  $\text{TiO}_2$  NP se tornaron en formas tipo varillas. El cambio de estructura fue también confirmado a través de la disminución en el área superficial BET ( $97 \text{ m}^2/\text{g}$ ). Por su parte los análisis por DRX mostraron que las SG  $\text{TiO}_2$  NP consisten de  $\text{TiO}_2$  en fase anatasa con una cantidad muy pequeña de rutilo; mientras que, las estructuras finales consisten de  $\text{TiO}_2$  de fase anatasa independientemente del material semilla empleado. Finalmente, en relación a la eficiencia fotocatalítica, se ha observado que a pesar que las estructuras 1-D poseen una elevada área superficial, la eficiencia en la degradación fotocatalítica no ha sido mejorada en relación a las nanopartículas de P25. Sin embargo los tiempo de degradación son relativamente cortos (entre 75 y 120 min) comparado con lo reportado por otros autores incluso para estructuras de  $\text{TiO}_2$  dopadas a fin de mejorar su eficiencia fotocatalítica [6,8].

## REFERENCIAS

- [1] Y. Yamin et al.,  $\text{WO}_3$ -modified  $\text{TiO}_2$  nanotubes for photocatalytic elimination of methylethylketone under UVA and solar light irradiation, *J.Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 245 (2012) 43– 57
- [2] D.F. Ollis, E. Pelizzetti, N. Serpone, Photocatalyzed destruction of water contaminants, *Environmental Science and Technology*, 25 (1991), p. 1522
- [3] J.Yan ,F. Zhou,  $\text{TiO}_2$  nanotubes: Structure optimization for solar cells, *J. Mater. Chem.*, 2011, 21, 9406
- [4] Cowan et.al., A. Mechanism of Water Splitting by  $\text{TiO}_2$  *J. Phys. Chem. C*, Vol. 114, No. 9, 2010
- [5] Y. Ren et.al., Nanoparticulate  $\text{TiO}_2(\text{B})$ : Anode for Lithium-Ion Batteries, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2012, 51.
- [6] Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea, Cyted, Edited by M. A. Blesa, Mar del Plata, Argentina, <http://www.cnea.gov.ar/cyted/default.htm>, 2001, 2<sup>nd</sup> Edition, Ed. CIEMAT, España, 2004
- [7] S. Thennarasu et al., Hydrothermal temperature as a morphological control factor: Preparation, characterization and photocatalytic activity of titanate nanotubes and nanoribbons, *Journal of Molecular Structure* 1049 (2013) 446–457
- [8] D. Zhao et.al, Synthesis of Highly Stable and Crystalline Mesoporous Anatase by Using a Simple Surfactant Sulfuric Acid Carbonization Method, *Chem. Eur. J.* 2010, 16.





**CONGRESO BOLIVIANO DE ENERGÍAS  
RENOVABLES  
LA PAZ - 2013**

---



## **5. PRIMER CONGRESO BOLIVIANO DE ENERGÍAS RENOVABLES**

### **5.1 ANTECEDENTES**

En Bolivia, el Viceministerio de Ciencia y Tecnología (VCT) del Ministerio de Educación ha estructurado Redes Nacionales de Investigación Científica y tecnológica, con el objeto de apoyar la consolidación del Sistema Boliviano de Ciencia y Tecnología, como respuesta del sector generador de conocimientos a las demandas de desarrollo existentes en diferentes sectores del país, entre ellas la Red de Energías Renovables, fue establecida en el 2011, cuyo objetivo principal es: “Promover el desarrollo e implementación de programas de investigación científica tecnológica e innovación en el campo de las energías renovables, contribuyendo a mejorar la calidad de vida de los distintos sectores sociales y a la transferencia tecnológica a los sectores productivos, a través de la articulación interinstitucional”. A raíz de esto, la Red ha desarrollado diferentes actividades, como seminarios, reuniones, congresos, y otros, a partir de los cuales ha identificado líneas específicas de investigación y desarrollo centradas en: Energía e Hidrocarburos, y Energía y Minería, las cuales se están constituyendo en plataformas que permitirán responder a demandas concretas de estos sectores.

### **5.2 OBJETIVO**

Reunir a investigadores y científicos, industriales, representantes de empresas, docentes universitarios, estudiantes investigadores, instituciones estatales, y público en general, para identificar el Estado de Arte de la Ciencia y Tecnología de los Nanomateriales y de la Nanotecnología relativas a los sectores de Energía y Minería, generando un espacio para promover un debate Nacional e Internacional (Latinoamérica y el Caribe) que permita identificar sinergias entre los países participantes para contribuir al desarrollo del sector desde la ciencia, tecnología e innovación



**RESÚMENES PRESENTACIONES  
PRIMER CONGRESO BOLIVIANO DE ENERGÍAS RENOVABLES  
LA PAZ - 2013**

---





## EL PERFIL VERTICAL DE LOS VIENTOS A NIVEL DE SUPERFICIE EN PATACAMAYA



**René Torrez - Edgar Ricaldi - Andrés Burgoa**

Laboratorio de Meteorología y Energías Alternativas, IIF, UMSA

División de Geofísica y Geomagnetismo, IIF, UMSA

Carrera de Física-Proyecto Evapotranspiración, IIF, UMSA

### **Resumen**

*En el presente trabajo se presenta un análisis preliminar de los resultados observados para la velocidad de viento a distintos niveles registrados en la torre meteorológica de Patacamaya. La base de datos que se está estableciendo permite realizar investigaciones específicas o estudios generales sobre las características meteorológicas de la región. En el presente caso se ha iniciado estudios para comprender la forma del flujo superficial en áreas típicas de esta zona, de manera de establecer su comportamiento extendido a toda la región altiplánica. Este análisis por si mismo es extenso y complejo dado los múltiples parámetros que intervienen en el fenómeno, no obstante el desarrollo alcanzado en el conocimiento de este campo a nivel mundial, efectuado por lo general a nivel de la superficie del mar. Sin embargo las típicas condiciones de nuestro altiplano, como la densidad del aire, la humedad, la temperatura, la presión atmosférica, etc. determinan variaciones importantes en el comportamiento conocido. En ese contexto, presentamos en este trabajo solo un aspecto del flujo superficial, como es la forma del perfil vertical de las velocidades del viento, que pueden ser útiles para fines de aplicación demandados por la comunidad.*

**Palabras clave:** Perfil vertical, Flujo superficial, Patacamaya, Torre Meteorológica.



## PEQUEÑOS APROVECHAMIENTOS HIDROENERGÉTICOS EN BOLIVIA: SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS FUTURAS



**Msc. Ing. Álvaro Christian Montaña Saavedra - Boris Álvaro Calderón Villanueva**  
Universidad Mayor de San Andrés

**Palabras clave:** *Hidrogenación, microcentral, turbina hidráulica, regulador de velocidad,*

### 1. INTRODUCCIÓN

A principios de los años 90, en el Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH) se creó el Programa Hidroenergético con el fin de coadyuvar en el desarrollo de la hidrogenación en pequeña escala en el país; planteando el desarrollo de un enfoque adecuado en la concepción, diseño y construcción de pequeños proyectos de hidrogenación, acorde a su tamaño, con el fin de reducir los costos de pre inversión y construcción.

Los pequeños proyectos hidroenergéticos tienen como objetivo coadyuvar en el desarrollo de la hidroenergía en pequeña escala en el país y aplicaciones productivas de la misma, desarrollando turbinas hidráulicas tipo Pelton, Michell Banki y reguladores de velocidad electrónicos, dando un enfoque adecuado para la concepción, diseño, construcción, operación y mantenimiento(1).

### 2. DESARROLLO DE TURBINAS HIDRÁULICAS TIPO PELTON, MICHELL BANKI Y REGULADORES DE VELOCIDAD DE ELECTRÓNICOS

Las primeras turbinas tipo Pelton que se fabricaron contaban con rotores de diferentes materiales: aluminio, bronce e incluso poliuretano rígido (2). El inyector tipo caracol, permitía la incorporación de cuatro toberas roscadas intercambiables de diferente diámetro, posteriormente se incorporaron al anterior inyector agujas de regulación de caudal de accionamiento externo, que permiten la regulación de la entrada de flujo al rotor sin desarmar la turbina. El último modelo de la turbina tipo Michell Banki desarrollada en el IHH, reemplaza la válvula de cierre tipo mariposa tradicional por una compuerta plana de diseño propio, que se desliza en la pared inferior del inyector, regulando el caudal por estrangulamiento del arco de admisión.

El regulador de velocidad electrónico es un controlador diseñado con generadores monofásicos o trifásicos en conexión estrella, con disipadores blindados y sumergibles a 220 V, tipo resistencias de calefón y potencia de control hasta 150 kW (3). El microcomputador integrado consiste en un solo chip que contiene un software de desarrollo propio; el mismo ha demostrado su confiabilidad en las más variadas situaciones de operación del equipo electromecánico.



Figuras 1, 2 y 3 Turbina Pelton (izquierda), Turbina Banki (centro), Equipo completo (derecha) . Fuente: Prog. Hidroenergetico, IHH – UMSA

### **3. APLICACIONES PRODUCTIVAS**

Hasta el año 2012, el Programa Hidroenergético ha ejecutado más 50 Proyectos Hidroenergéticos en Bolivia, la mayoría de ellos bajo la modalidad de “autoconstrucción”. Dado que la población campesina generalmente no permanece en sus domicilios durante el día, en consecuencia, el factor de planta de las microcentrales es reducida; entonces, con el fin de incrementar el consumo en las horas de reducido consumo, durante el día, el Programa Hidroenergético propuso asociar actividades productivas como la instalación de plantas deshidratadoras de frutas, prebeneficiadoras de café, centros de computación y otras actividades de consumo doméstico.

### **4. ASPECTOS LEGALES Y NORMATIVA VIGENTE, LEY N° 1604**

La presente ley 1604 del 21 de diciembre de 1994, la “Ley de Electricidad” vigente actualmente en Bolivia, en los artículos 5, 30, 15, 61 y 62 donde se hace referencia al Aprovechamiento de Recursos Naturales, División y Limitación de la Propiedad y Electrificación Rural, no es muy clara en lo que se refiere al aprovechamiento de los recursos naturales y a la conservación del medio ambiente en la industria de generación eléctrica; sólo se limita a decir que, para la ejecución de este tipo de proyectos se debe hacer referencia a las leyes de medio ambiente aplicables al sector, sabiendo que éstas tampoco son muy claras ni son cumplidas en su totalidad.

Debido a esta situación en varias comunidades de Bolivia existen conflictos en los sistemas mixtos donde se presentan la Red de Energía Eléctrica del SIN y la Microcentral Hidroeléctrica intentando subsistir de manera conjunta.

### **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

La metodología desarrollada para la construcción de microcentrales hidroeléctricas por “autoconstrucción” permite costos muchos más reducidos que las metodologías convencionales, en promedio de 2000 a 2500 \$us/kW instalado.

Se deben tener normas claras y concretas con respecto al problema que se presenta cuando la extensión de la línea eléctrica llega a poblaciones rurales que ya cuentan con microcentrales hidroeléctricas.

Finalmente, se propone la creación regional de una asociación de microcentrales hidroeléctricas, con el fin de intercambiar experiencias e inquietudes sobre los distintos proyectos.





## REFERENCIAS

- (1) Hueso Gonzales Andrés, (2007) “Estudio sobre el impacto social, económico y ambiental de microcentrales hidroeléctricas implantadas en comunidades rurales aisladas de Bolivia”, Proyecto de Grado inédito, Carrera de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad Mayor de San Andrés, Universidad Politécnica de Valencia, La Paz, Bolivia.
- (2) Coz Federico, et al. (1995) “Manual de mini y microcentrales hidroeléctricas”, Editores Programa de Energía de ITDG Perú, Intermediate Technology Development Group.
- (3) Montaña Gonzales Emiliano (2011), “Investigación y desarrollo de reguladores de velocidad para turbina – generador, por control de carga electrónico”, Informe de proyecto inédito, Instituto de Hidráulica e Hidrología, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.



## HYDRO ECO-ALTERNATIVAS PRODUCTIVAS PARA EL AREA RURAL DE BOLIVIA

**PhD. Andrés Calizaya Terceros, Ing. Willy Gutiérrez López**  
PRODENER, Centro Integral para las Energías Alternativas y Productivas

**Palabras claves:** *Picocentrales hidroeléctricas, Microcentrales hidroeléctricas*

### **Resumen**

Bolivia es el país más pobre de la región andina cuya desigualdad ha generado una exclusión social y económica de las comunidades campesinas rurales aisladas de centros energizados, aún cuando el país cuenta con un importante potencial hidroenergético, que recién en la última década se pretende impulsar su aprovechamiento, por cuanto el crecimiento de la demanda, el año 2010, ha superado la oferta de energía. A ello se suma la baja densidad poblacional del área rural que no cuenta con los medios adecuados para desarrollar su economía local subsistiendo y empeorando su calidad de vida por la falta de servicios básicos, en particular por la falta de energía eléctrica. La baja cobertura de energía eléctrica en el área rural, ha promovido la urgente necesidad de encarar con alternativas tecnológicas el suministro de energía eléctrica con fuentes renovables. No obstante que la cobertura del servicio eléctrico del Sistema Interconectado Nacional (SIN) se ha incrementado, este servicio limitado no llega a las pequeñas poblaciones y/o caseríos del área rural que se encuentran al pie de los glaciares de la cordillera real. Ante esta situación el proyecto HYDRO ECO-ALTERNATIVAS PRODUCTIVAS viene implementando pequeños aprovechamientos hidroenergéticos sostenibles, productivos y de amplia replicabilidad, en base a Microcentrales Hidroeléctricas, pero principalmente en base a PicoCentrales Hidroeléctricas que van desde los 200Watta hasta los 8 kW, beneficiando directamente a mas de 200 familias que se encuentran por debajo de la línea de pobreza, en base a un modelo de implementación por auto-construcción y auto-administración, es decir construido por los propios beneficiarios como parte de un proceso de empoderamiento con toda la asistencia y la experiencia necesaria de la ONG PRODENER para lograr los objetivos, promoviendo la activa participación de la mujer y reduciendo los riesgos en la población vulnerable por el uso de combustibles fósiles para atender sus requerimientos energéticos hoy en día. Las poblaciones beneficiarias se ubican en las faldas de la cordillera real con presencia de glaciares en sus cuencas de aporte, en el departamento de La Paz, mientras que la comunidad de Cotacajes se ubica en los valles de Cochabamba a una distancia de 480 km desde la ciudad de La Paz (15 horas en vehículo). El proyecto no solo pretende mejorar la calidad de vida de los actores, sino también consolidar la organización de base, promover el uso productivo de la energía eléctrica, en acciones concretas que realizan precariamente como el procesamiento de truchas, la producción de miel, energía para los Albergues Turísticos de Pampalarama, Tuni, Condoriri, Maria Lloko, Ajwani y Potrera, mejorando los servicios para los turistas nacionales y mayormente extranjeros que ascienden a los nevados, para los talleres de carpintería, mecánica, llanterías, riego por bombeo, energía para las postas sanitarias y escuelas, etc., que son de gran necesidad en las poblaciones beneficiarias.

El retroceso glaciar, debido al cambio climático, genera mayor disponibilidad de recursos hídricos en la zona andina que es propicio para la generación hidroeléctrica y sus aplicaciones productivas, que desarrollan los beneficiarios en la actualidad de manera muy precaria y artesanal sin mucho valor agregado. En el área del proyecto, la falta de energía perjudica: la educación, uso de PC; la salud; y la carpintería, llantería que son realizadas artesanalmente



con mucho tiempo de inversión al igual que la mujer en la cocción de los alimentos, en particular durante las horas nocturnas. La población infantil de las comunidades usan mecheros, velas o lámparas a gas que ocasionan accidentes frecuentes y daños a la vista. Los Albergues Turísticos (Ecolodges) brindan un servicio muy limitado, por la falta de energía, a los turistas nacionales y mayormente extranjeros que ascienden a los nevados, reduciendo sus ingresos por el uso de generadores a gasolina.

Por lo expuesto, el objetivo del proyecto es consolidar la auto-generación hidroeléctrica para mejorar las condiciones de vida de las familias que viven en el área rural y por debajo de línea de pobreza, energizando las actividades productivas para lograr mayores ingresos a su economía con amplia participación social donde la mujer es parte activa de la toma de decisiones, ambientalmente amigables y formando centros demostrativos y replicables en regiones de igual potencial.

La respuesta tecnológica, al desafío de llevar energía a dicho sector, proviene del desarrollo propio de la ong PRODENER a través de varios proyectos similares ejecutados, con picoturbinas tipo Pelton, Turgo, Hélice y Crossflow cuyos rangos de potencias van desde los 200 watts hasta los 8000watts en las picoturbinas y hasta los 35 kW en las microturbinas, que son acopladas a generadores de imán permanente (PGM) y alternadores síncronos respectivamente. Dichas turbinas portátiles y estacionarias, son fabricadas en el taller de PRODENER, y la capacitación para la sostenibilidad en operación, mantenimiento y administración de los proyectos es desarrollada a través de talleres de amplia participación de los beneficiarios.

El proyecto contribuye al desarrollo de la región y pretende compartir sus objetivos y resultados con la sociedad civil en general.



## COCINAS ECOLOGICAS PARA EL BUEN VIVIR BOLIVIA- PARAGUAY



**David Whitfield**  
CEDESOL

Este proyecto consiste en un estudio conjunto liderado por la Fundación CEDESOL Bolivia y MyClimate junto a un equipo multidisciplinario de investigadores que incluye producción local, promoción, educación, distribución, instalación y mantenimiento de las cocinas ecológicas. Nuestro programa ecológico de cocinas eficientes se enfoca en los problemas de deforestación, contaminación dentro de los hogares, calentamiento global y en el lento desarrollo económico en las regiones rurales de Bolivia y Paraguay.

Debido a las prácticas tradicionales y al gran número de hogares, instituciones y negocios que utilizan tecnologías ineficientes (casi todas las cocinas que actualmente están en funcionamiento en Bolivia y Paraguay son altamente ineficientes) la escala de cambio es significativa. El programa reemplaza las cocinas tradicionales en las áreas rurales y urbanas, con diseños eficientes, que han probado poder reducir el consumo de leña hasta en un 70%.

La realización del estudio será multifacética y se aplicarán, entre otras herramientas metodológicas, encuestas, entrevistas y talleres para abordar ocho objetivos específicos. Los mismos están relacionados con (i) mejorar el sustento de las familias, (ii) mejorar los hábitos alimenticios de las familias, (iii) mejorar la salud de las familias, (iv) mejorar el uso de tiempo de la gente, (v) mejorar el ambiente, (vi) mejorar la preservación de los bosques y ecosistemas, (vii) sostenibilidad y expansión del programa a otras áreas de Bolivia y Paraguay y (viii) mejorar la capacidad humana en las comunidades.

Se implementó en las comunidades Bolivianas un programa de educación y empoderamiento a las mujeres y sus resultados están siendo alentadores. CEDESOL se basa en sus años de experiencia para aseverar que la *educación* es un componente clave en el proceso de adopción durante la implementación, elemento que no ha sido plenamente aprovechado. El Programa Modular de Educación Ambiental (PMCA) trabaja sobre cuatro ejes temáticos transversales: 1) Salud e Higiene, 2) Reciclaje y Medio Ambiente, 3) Energía Alternativa y Economía Familiar y 4) Nutrición y Seguridad Alimentaria. El Programa consiste en la formación de *Brigadas de Bienestar Ambiental* para cada comunidad, dentro las cuales se elige a una líder representante o *Líder Innovadora (LI)*. Estas *LI's* tienen la responsabilidad de compartir los conocimientos adquiridos con sus *Brigadas*, además de encargarse de lo que son los asuntos relacionados con el mantenimiento de las cocinas, la gestión y promoción de canales de distribución innovadores en sus comunidades. Es así como las mujeres gradualmente se van transformando en emprendedoras, contribuyendo a la cadena de valor como activos valiosos y *agentes de cambio* entre sus iguales y para sus comunidades. El PMCA se propone acercarse lo más



posible a la realidad de las beneficiarias involucradas para así causar el impacto especulado, por esa razón se hace uso de términos tales como *Brigadas* y *Líderes Innovadoras*. A través del Componente educacional, desarrollado por el Programa Modular de Capacitación Ambiental (PMCA).

La educación ambiental y social es un componente integral del programa. Todas las actividades incluyen un programa exhaustivo de educación y monitoreo en el que todos los beneficiarios reciben entrenamiento en el uso y beneficios de las nuevas tecnologías, así como también información sobre salud y medio ambiente.

En conclusión, este programa contribuye al Desarrollo Sostenible en amplio sentido ya que:

- Se evita la deforestación, por lo tanto se reduce la erosión y la pérdida de suelo fértil
- Se reducen las emisiones debido a la combustión de leña
- Se transfiere la tecnología solar a diferentes regiones de Bolivia y Paraguay.
- Se proveen nuevos trabajos para la producción y disseminación de las cocinas
- Se realiza una producción local de la tecnología
- Se reduce de forma significativa el tiempo utilizado para la recolección intensiva de leña.
- Se reducen los malestares y muertes debido a las enfermedades relacionadas con partículas respirables por combustión incompleta y por beber agua que no es pasteurizada.
- Se reducen las lesiones por quemaduras, especialmente en niños.

Es así que el Programa mejorará la calidad de vida y el medio ambiente de las poblaciones rurales y periurbanas en Bolivia y Paraguay, al introducir más de 50,000 cocinas ecológicas en hogares instituciones y comercios que usan leña como combustible principal, reduciendo de esta forma alrededor de medio millón de toneladas de CO<sub>2</sub>.

## DESHIDRATACIÓN SOLAR DE PAPAS EN EL ALTIPLANO DE BOLIVIA



**Reinhard Mayer Falk**

Gerente de Ecoenergía Falk SRL.

**Adriel Rabel Flores Calle**

Técnico de Ecoenergía Falk SRL.

ECOENERGIA FALK S.R.L. – PROYECTOS INTEGRADOS DE DESARROLLO (PID)

**Palabras claves:** *Deshidratación solar/papa/post-cosecha/secador solar tipo invernadero*

### 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los derivados más importantes de la papa es el “chuño”, que se prepara al exponer las papas al sol y al frío, o “tunta” dejar las papas sumergidas al agua para el secado posterior al sol. Ambos procesos necesitan una congelación de la papa. Son procesos que incluyen el secado solar tradicional, o sea el producto está expuesto directamente al sol lo que implica que hay también contaminación por polvo lo que significa un proceso con deficiencias respecto a la higiene. Al mismo tiempo se ha visto en invierno del año 2013 problemas en los procesos tradicionales por efectos del cambio climático.

La deshidratación técnica solar de papa es una alternativa a los procesos tradicionales que no necesita la congelación de los productos, pero también aprovecha la energía solar para la deshidratación de los productos que no son expuestos a la contaminación por estar ubicados dentro de un espacio protegido. La deshidratación solar implica una pre cocción del producto para obtener papas deshidratada de alta calidad. La elaboración de papa seca con equipos adecuados, técnicas de procesos mejorados y tomando las etapas de la cadena: producción – proceso – comercialización en manos de los mismos campesinos, permitirá con este tipo de plantas hacer una industria rentable, superando las prácticas artesanales con altos costos, bajo rendimiento y mala calidad.

El proyecto con financiamiento del PNUD se realizó en la comunidad de Conchamarca del Municipio de Sica – Sica ubicado en el Altiplano del Departamento de La Paz.

### 2. PROCESAMIENTO DE LA PAPA

La deshidratación solar de la papa incluye un lavado, pelado, cortado y escaldado antes del proceso de secado. Los mejores resultados se han obtenido cortando la papa en palitos de 1 cm x 1 cm o 0,5 cm x 0,5 cm. Después de sumergir los palitos en agua hirviendo para evitar el oscurecimiento del producto, se ha colocado el producto durante 2 a 3 días a un secador solar.





Las temperaturas máximas de secado están en el rango de 50 °C. Hay una relación entre peso del producto fresco (con cáscara) y deshidratado de 5:1.

### **3. TECNOLOGÍA DEL SECADOR SOLAR**

Se trata de un secador solar tipo invernadero de estructura metálica con una cubierta transparente de policarbonato. Este provisto de bandejas móviles (marco de perfiles metálicos forrado con malla milimétrica de plástico). De esta manera, es más fácil de limpiar el secador. No se necesitan ventiladores para mover el aire de secado. Aire fresco entra por orificios en la parte inferior del secador y sale después, saturado con la humedad de los productos a secar, por aberturas en la parte superior del secador solar.

El equipo se prefabricó en un taller metálico en la ciudad de La Paz para ser montado después sobre una plataforma de cemento.

No fue necesaria una calefacción auxiliar por el clima seco del Altiplano. Se ha visto que el secador funciona también bajo condiciones no tan favorables como por ej. nubosidad. Se aprovecha los intervalos de buena radiación solar para poder avanzar con el proceso de secado solar.

El equipo cuenta con 3 niveles de bandejas con una superficie total de aprox. 11 m<sup>2</sup>. La carga con producto fresco es de aprox. 50 kg tomando en cuenta una carga de 4,5 kg de papa fresca por metro cuadrado de bandeja. No obstante, las pruebas han mostrado un potencial para una capacidad superior en el rango de 100 kg de papas que se pueden secar dentro de 3 días.

### **4. RESULTADOS**

Se hizo experimentar con la papa deshidratada. Los palitos se remojan en agua y después se utiliza para preparar papas fritas. Las personas que han consumido papa frita del producto deshidratado no han tomado cuenta del origen. También es posible elaborar un puré de papa.

### **5. CONCLUSIONES**

Para que sea posible un trabajo eficiente, se ha visto necesario trabajar con cortadores de papas como se utilizan en los restaurantes. Es indispensable de contar con agua potable para garantizar la higiene del producto final. El punto más importante es una buena organización de la comunidad campesina para evitar fracasos de un proyecto de deshidratación solar.

### **6. AGRADECIMIENTO**

El proyecto fue posible a través del financiamiento del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo – Proyecto PC - PNUD: BOL 70779/6/2011 ejecutado por PROYECTOS INTEGRADOS DE DESARROLLO – PID (Director: Luis Piñera), una ONG con sede en la ciudad de La Paz.

**Edwin Víctor Lamas Sivila, Edgar Romero Torrez**

Universidad Técnica de Oruro, Facultad Nacional de Ingeniería, Ingeniería Mecánica-Electromecánica

**Palabras Claves:** Eficiencia energética, Simulación en Edificios, Demanda Térmica, Bajo carbono.

### Resumen

La ingeniería y estudios dedicados a la climatización tienen los desafíos permanentes de mejorar las condiciones y estándares de vida de las personas, más aún, en lugares donde se tiene condiciones climatológicas desfavorables durante gran periodo del año.

En el altiplano boliviano la temperatura seca exterior promedio mensual es de 9 a 12°C y la humedad relativa está entre el 20 al 40 %, en esas condiciones los valores térmicos de las viviendas se encontraran por debajo de las recomendaciones realizadas por normas internacionales, ASHARE 2007.

Existen formas y maneras de aprovechar de forma eficiente los recursos naturales. La radiación solar es un recurso útil y beneficioso para emplearlo en calefacción, puede ser utilizado de forma directa ubicando correctamente las ventanas en los edificios, y/o aprovechar la mayor cantidad de energía por radiación solar directa y difusa a través de las soluciones constructivas. De forma indirecta, utilizando captadores fototérmicos elemento intermediario para calentar agua, y finalmente consumirlo en los sistemas de calefacción (ejemplos: suelo radiante, fan heat, o sistema de radiadores).

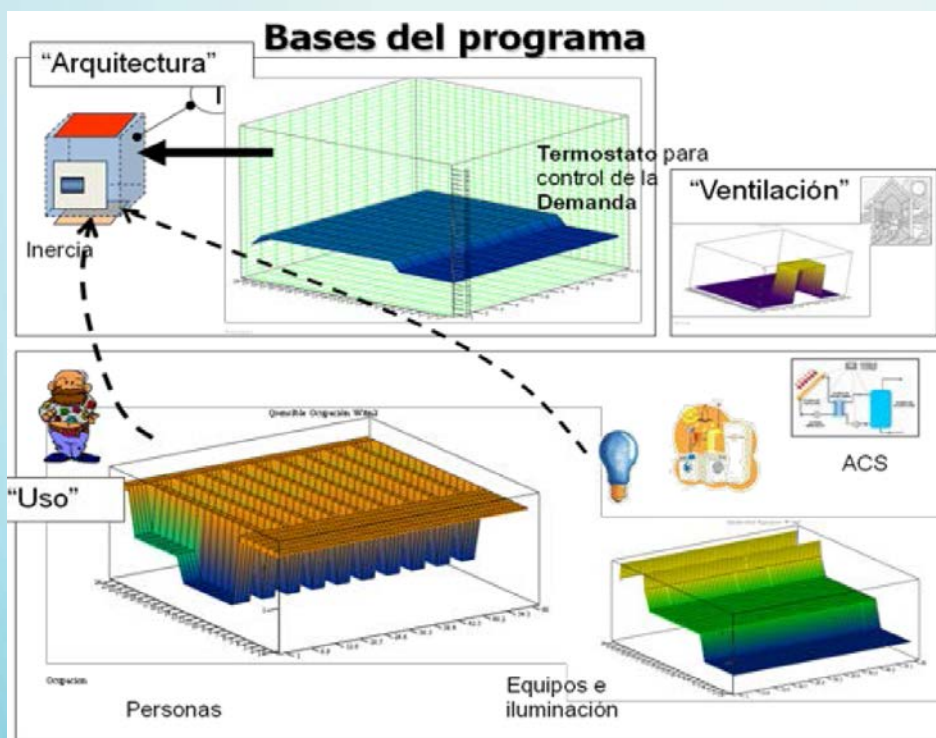
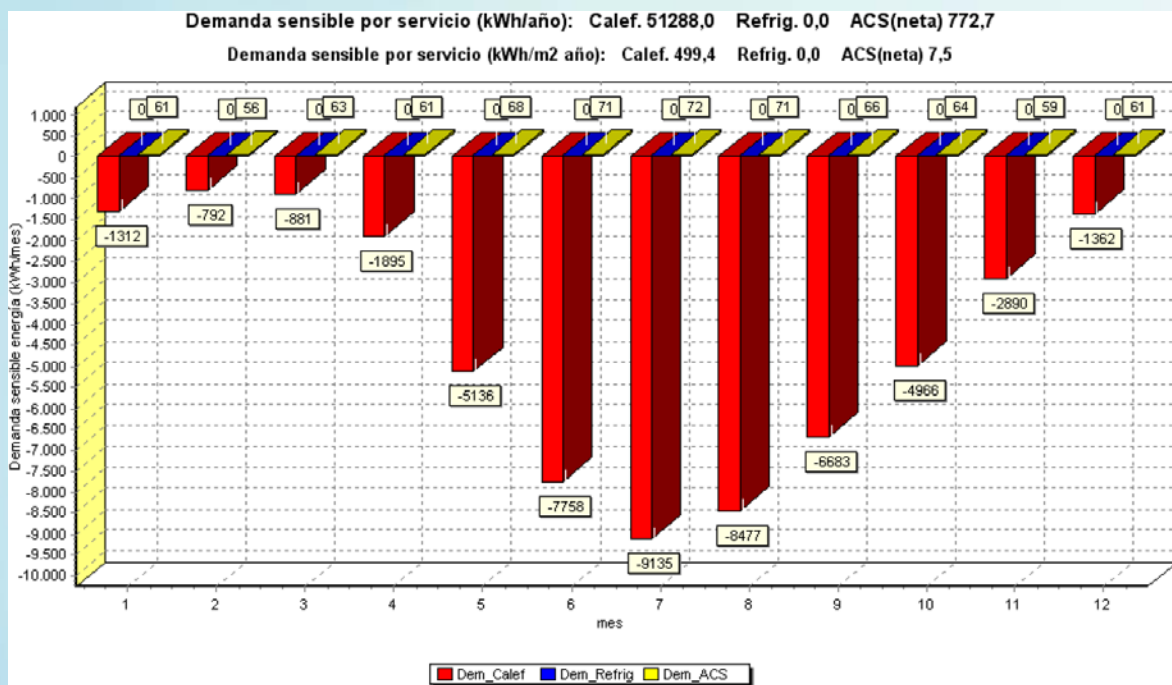


Fig. N° 1 Consideraciones generales y bases del programa SITER vs 2.



En el presente trabajo se pone a consideración una herramienta de simulación térmica de edificio del tipo residencial y en bloque, software que utiliza un modelo de cálculo dinámico del edificio (Radiant Time series ref.1), considerando: la climatología de las ciudades, datos meteorológicos de las ciudades La Paz y Oruro, conteniendo, la temperatura seca, temperatura húmeda, radiación total, directa y difusa; inercia térmica de las soluciones constructivas de la arquitectura (paredes, techos, suelos y ventanas), cargas internas, equipos e iluminación, uso del edificio, ventilación (número de renovaciones hora) figura 1, por otro lado las características técnicas del sistema de calefacción (curvas de funcionamiento), y como resultados del programa evalúa el consumo de energía del edificio realizando la simulación durante un año hora a hora las 8760 hrs , producto de la simulación registra la demanda de energía mes a mes, todo ello sí el termostato en la zona térmica se encuentra a 18°C ver figuras siguientes 2.

**Figura 2.** Demanda mensual de energía del Edificio kWh/m<sup>2</sup>



ventanas), cargas internas, equipos e iluminación, uso del edificio, ventilación (número de renovaciones hora) figura 1, por otro lado las características técnicas del sistema de calefacción (curvas de funcionamiento), y como resultados del programa evalúa el consumo de energía del edificio realizando la simulación durante un año hora a hora las 8760 hrs , producto de la simulación registra la demanda de energía mes a mes, todo ello sí el termostato en la zona térmica se encuentra a 18°C ver figuras siguientes 2.

Desde el punto de vista de eficiencia energética la utilización de la herramienta posibilita mejorar la proyección de la vivienda (orientación), ubicar de manera recomendable las ventanas, considerar la utilización de aislante en los cerramientos y ventas, y la elección del tipo de sistema de calefacción económico y productivo a utilizar.

Finalmente la implementación del programa inculcara al usuario en el ahorro energético en las viviendas, la reducción de CO2 por el inadecuado consumo de la energía primaria y energía





final de los sistemas de calefacción. Sentar bases técnicas para la generación de la Normativa Boliviana de construcción en el altiplano boliviano. Criterios técnicos en la proyección arquitectónica, principalmente en la adecuada selección de las soluciones constructivas.

### **Referencias**

- (1) Bereket A. Nigusse, Improvements to the Radiant Time Series Method Cooling Load Calculation Procedure, Oklahoma State University, December (2007)
- (2) Centro Meteorológico de la Carrera de Ingeniería Mecánica Facultad Nacional de Ingeniería.
- (3) Edwin V. Lamas, V. M. Soto E.J. Sarabia, Air conditioning production by a single effect absorption cooling machine directly coupled to a solar collector field. application to Spanish climates. Solar Energy 85 (2108-2121), 2011.
- (4) Edwin Víctor Lamas Sivila. Análisis y Propuesta de un Nuevo Método de Simulación Abreviado para la Certificación Energética en Edificios Residenciales, PhD. Thesis, Universitat Politècnica de València., Mayo 2011.
- (5) Ip Seng Lu, Experimental Validation of the Radiant Time Series Method Cooling Load Calculation Procedure, Oklahoma State University, December (2007)
- (6) Pinazo Ojer J,M, Manual de Climatización, Tomo II: SPUPV, Valencia 1996.



## PROGRAMA DE TRANSFERENCIA EN CIENCIA E INGENIERÍA PARA EL FORTALECIMIENTO INSTITUCIONAL DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA ACADÉMICA UNIVERSITARIA Y EL IMPULSO A LA PROMOCIÓN DE EMPRENDIMIENTOS DE BASE TECNOLÓGICA



**Julio, Gumiel Galarza, Yatsen Maldonado, Roy Piérola Bajarano**

<sup>1</sup> Universidad Autónoma Gabriel Rene Moreno, Facultad Politécnica

**Palabras clave:** Proyecto, programa, socios cooperantes, transferencia de tecnología, ciencias e ingeniería, emprendimientos de empresa.

### Resumen

**1. Características generales y propósito** El proyecto “programa de transferencia en ciencia e ingeniería para el fortalecimiento institucional de la investigación científica académica universitaria y el impulso a la promoción de emprendimientos de base tecnológica”, está dirigido a dinamizar los procesos de investigación científica tecnológica universitaria, ligados al entorno social, tendiendo a la conformación de grupos de investigación (profesionales, investigadores y docentes), así como al impulso a los emprendimientos de empresa de base tecnológica, siendo el marco de acción la transferencia de conocimientos y experiencias de las universidades de mayor desarrollo relativo tales como la Universidad Federal del Espíritu Santo (UFES), Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMX), y el Tecnológico de Costa Rica a la universidad receptora y coordinadora del proyecto, la Universidad Autónoma Gabriel Rene Moreno (UAGRM)-sede Facultad Politécnica.

**2. Factores que inciden en el desarrollo de la ciencia y la tecnología, contexto AL y el C, Bolivia** Los países que alcanzaron niveles de desarrollo relativo altos (Europa, USA, Japón), dos elementos aparecen como prioritarios y que inciden sustantivamente, “la mejora continua de la competitividad de su estructura productiva y el desarrollo de la ciencia y la tecnología en constante interacción con la sociedad”<sup>1</sup> interponiéndose en ello una fuerte vocación de acrecentar el conocimiento y realizar su transferencia al medio.

En el ámbito de lo expuesto, es conveniente para nuestros países de América Latina y El Caribe, y en el caso Bolivia, el internalizar los avances de la ciencia y la tecnología que acontecen en otros países, por ende tomar modelos que coadyuven al logro de soluciones mejor estudiadas y pensadas, en este caso aprovechar de esos contextos lo valioso para el desarrollo local.



**3. Aspectos metodológicos inmersos en el proyecto programa** El proyecto programa contiene en su desarrollo, los siguientes pasos:

- Instalación del proyecto OEA-FEMCIDI en la UAGRM-Facultad Politécnica y demás universidades socias cooperantes.
- Selección con los países participantes, de los modelos de intercambio (Emprendimiento de empresa de base tecnológica, formación de emprendedores, transferencia de tecnología en I+D+i).
- Elaboración y desarrollo de los diferentes instrumentos de transferencia de tecnología al entorno social.
- Ejecución de lo instrumentado en el Plan de Ejecución del Proyecto (capacitación de formadores y capacitación a beneficiarios directos, procesos de incubación e innovación tecnológica resultantes de trabajos de investigación aplicada, otros procesos).
- Evaluación y elaboración de memorias e informes pertinentes.

**4. Temas de análisis y aplicaciones futuras posibles** En el tiempo de vida del proyecto programa, de tres años, se espera la transferencia de conocimientos en actividades de capacitación dirigidas a docentes o investigadores (instructores formadores), para los tres temas centrales:

- Formación de emprendedores básicamente jóvenes (estudiantes universitarios) en habilidades gerenciales, ingeniería e innovación, plan de negocio, plan de vida<sup>2</sup>.
- Capacitación en procesos de incubación de empresas de base tecnológica en administración y finanzas, asuntos jurídicos, mercadotecnia, procesos productivos<sup>3</sup>.
- Intercambio para desarrollos en ciencias e ingeniería con aplicaciones en energías alternativas, medio ambiente, materiales de construcción, tecnología e innovación en las PYMES e incubación de empresas de base tecnológica a elección, según se tenga un estudio prospectivo de empresas existentes en el medio de Santa Cruz.

La prospectiva podría centrarse en los nanomateriales y las nanotecnologías, que conlleven el estudio científico técnico de las materias primas, y su posible transformación industrial, para dotarlas de un valor agregado con las ventajas económicas que ello supone.

### **5. Resultados esperados**

- La generación de patentes, basada en el desarrollo de una ciencia local sobre bases científico tecnológicas.
- La transferencia de tecnología y resultados que justifiquen nuevos emprendimientos que no solo tengan valor intelectual sino valor comercial.
- Se cumple mayormente el ciclo de la investigación gestado en la universidad con jóvenes emprendedores competentes, que terminan con la incorporación de una nueva vida empresarial en el medio social con un alto porcentaje de supervivencia.
- Desde el punto de vista de valor para los docentes y estudiantes universitarios se dan las bondades de la formación profesional de los emprendedores y las experiencias ganadas, para conformar una plataforma amplia de consultores de alto nivel.
- Se dinamizan los emprendimientos con la concreción de acuerdos y vínculos del programa entre las instituciones nacionales y locales y los países involucrados (Bolivia, México, Costa Rica y Brasil).





- Investigaciones científicas de impactos tecnológicos, económicas sociales, y ambientales, superando por ende los bajos indicadores de costo/beneficio actuales. La difusión de resultados y productos al alcance de los beneficiarios, en los ámbitos del proyecto programa (revistas científicas indexadas, pagina web, escritos científicos y otros medios).

- (1) La Vinculación Tecnológica en Instituciones de I+D en España, Análisis del Sistema OTRI, febrero 2013:2.
- (2) Manuales de procedimientos de POLLIEMPRENDE, programa de cooperación México-Bolivia. Curso Modelo de Transferencia de Tecnología del IPN de los Estados Unidos de México, mayo 2011.
- (3) Modelo de articulación para la innovación en Bolivia programa de cooperación México-Bolivia. Curso Modelo de Transferencia de Tecnología del IPN de los Estados Unidos de México, mayo 2011.

## HIDROGENO COMO COMBUSTIBLE



**Marlene Beatriz Simons Sánchez**

UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MISAEL SARACHO<sup>1</sup>

El modelo energético de Bolivia se basa en la combustión de combustibles fósiles, y presenta serios problemas de sostenibilidad, YPFB ha informado con cifras oficiales, que si no se exploran mas campos de gas y petróleo en los diferentes Departamentos de Bolivia, las reservas existentes se terminaran el año 2023; el uso del petróleo ha dejado un impacto negativo en nuestro medio ambiente, en el que además de las contaminaciones locales que se han producido, su combustión ha implicado un incremento exponencial de los gases de efecto invernadero que hoy día amenazan al medio ambiente y producen el cambio climático y quemarlos hace que se destruya una materia prima no renovable extremadamente valiosa para la fabricación de materiales sintéticos. Por ello resulta evidente la necesidad de buscar nuevas alternativas energéticas siendo una de ellas: el hidrógeno, elemento que se considera el vector energético del futuro, que permitirá mantener la capacidad de energía y transporte requerida por nuestra sociedad.

El  $H_2$ , es un elemento que permite la transformación de un tipo de energía en otro esta conversión se realiza en las pilas de combustible, las mismas que son capaces de convertir por medios electroquímicos la energía química del hidrógeno en energía eléctrica, alcanzando elevados rendimientos energéticos. La energía eléctrica producida puede emplearse para consumidores domésticos, industriales y para servicios o como con fines de transporte, mediante el uso en vehículos eléctricos.

El hidrogeno puede ser producido, partiendo de compuestos tan elementales y abundantes como el agua o el metano. Los métodos que se desarrollan para producirlo de manera segura, abundante y barata no están actualmente definidos de manera clara, pero entre ellos figura el uso de energía nuclear que permitiría proporcionar energía suficiente para descomponer las moléculas de agua y metano; separando el  $H_2$  del oxígeno y del carbono que lo tienen prisionero en dichos compuestos, por otro lado muchos de los métodos de síntesis no producen emisión de  $CO_2$ , durante su producción solo se libera vapor de agua, por lo que se tiene una ventaja adicional para el uso del  $H_2$  con fines energéticos.

Es fundamental hacer notar que casi todo el hidrógeno se obtiene por procesos químicos (fundamentalmente reformado) a partir de combustibles fósiles sin embargo existe un abanico de posibilidades para producir hidrógeno como los procedimientos de disociación del agua por: calor, electricidad o luz, fermentación, etc. Dichos procedimientos pueden ser implementados desde diferentes recursos energéticos: combustibles fósiles, energía nuclear y energías



renovables, pudiendo muchas veces recurrir a más de una fuente – como por ejemplo la termólisis o la electrólisis a alta temperatura – procesos que se pueden lograr tanto desde la energía nuclear como desde la solar de alta temperatura.

Por otro lado, con la finalidad satisfacer la demanda nacional de poliolefinas y dejar de ser un país importador de resinas plásticas YPFB contempla la construcción de las siguientes plantas: Planta de Etileno, Planta de Propileno, Planta de Polietileno y la Planta de Polipropileno, para producir 600.000 Toneladas Métricas de Polietilenos y 200.000 Toneladas Métricas de Polipropileno, estos proyectos se encuentran en la etapa de Ingeniería conceptual y su puesta en marcha esta proyectada para el año 2018, ellas generaran hidrogeno como subproducto, siendo necesario por tanto implementar estudios que permitan el aprovechamiento del mismo. En la evolución hacia el uso futuro del hidrógeno, es necesario indicar que seguirán utilizándose los hidrocarburos o la energía nuclear, sin embargo, por primera vez en la historia se abrirá paso al establecimiento de un sistema de energía basado en recursos naturales renovables e inagotables que tienen una distribución mas igualitaria en todos los territorios que contribuirá a evitar el desequilibrio geopolítico que se establece por la concentración de las reservas de recursos fósiles en muy pocas zonas de la tierra.

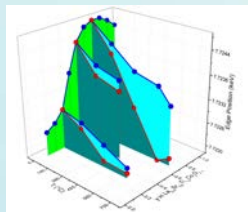
Es fundamental considerar que las propiedades físicas del hidrógeno hacen que su almacenamiento sea complejo, pues se trata de un gas muy ligero. En este sentido hoy día el hidrógeno gaseoso presurizado es el método más aceptable para almacenarlo. El elevado consumo de energía que se utiliza en el proceso de licuefacción, que representa el 30 % de la energía almacenada en el hidrogeno y las condiciones criogénicas del hidrogeno liquido dificultan su manejo. La tecnología de hidruros metálicos está muy desarrollada, pero presenta el inconveniente del elevado peso. Finalmente, otras técnicas como nanotubos de carbono y clatratos se prevén para lograr su almacenamiento a más largo plazo.

La transición de una economía basada en el petróleo a una basada en el hidrogeno puede ser viable en una o dos décadas mas, según como evolucionen los precios de los combustibles fósiles y los progresos tecnológicos que se logren en los procesos de producción del hidrogeno y de las celdas de combustible. Cuando ese momento llegue, Bolivia deberá estar preparada para insertarse entre los países que dominen dicha tecnología, ello se lograra con la formación de planteles científico-técnicos, sostenidos en el tiempo, para ello considero vital insertar a Bolivia en el reducido grupo de países que actualmente estudian y desarrollan la tecnología del hidrogeno, para dominar el mercado energético del futuro.

Se hace por tanto necesario difundir en el país las potencialidades del hidrógeno, construir y desarrollar conocimientos científicos y tecnológicos necesarios para que nuestros jóvenes, puedan abordar con éxito estos retos del futuro y puedan plantear proyectos que analicen: la producción, y purificación del hidrogeno, su sistema de almacenamiento óptimo y las celdas de combustible para la conversión de la energía; procesos que deberían estar inmersos en las políticas de desarrollo energéticos gubernamentales, porque es necesario crear espacios de investigación sumando esfuerzos multidisciplinarios e interinstitucionales, debido a que investigaciones aisladas no tienen efectos de impacto en el desarrollo del país.



## CARACTERIZACIÓN ELECTRÓNICA DEL ELECTRODO SIMÉTRICO $\text{La}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{Ti}_x\text{Co}_{1-x}\text{O}_{3-\delta}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) EN CONDICIONES DE OPERACIÓN



**Analía L. Soldati, Federico Napolitano, Jochen Geck, Diego Lamas, Adriana Serquis**  
CONICET – Centro Atómico Bariloche, Grupo Caracterización de Materiales. Av. Bustillo 9500,  
(R8402AGP), S.C. de Bariloche, Argentina<sup>1</sup>

Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, Argentina<sup>2</sup>

<sup>3</sup> Institut für Theoretische Physik, Technische Universität Dresden, Alemania

Mucho se ha investigado sobre las propiedades de las perovskitas de tierras raras para su uso como electrodos en celdas de combustible de óxido sólido (SOFC). En particular, los titanatos del tipo  $\text{La}_y\text{Sr}_{1-y}\text{TiO}_3$  han demostrado excelentes propiedades como ánodos, mientras que las cobaltitas del tipo  $\text{La}_y\text{Sr}_{1-y}\text{CoO}_3$  han sido ampliamente estudiadas como cátodos. En el afán de lograr un material que pueda ser usado como ánodo y cátodo a la vez, surgió recientemente la idea de combinar ambos cerámicos, dopando el sitio B del titanato con algún porcentaje de cobalto [1], dando origen a estudios como los de la familia LSTC ( $\text{La}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{Ti}_x\text{Co}_{1-x}\text{O}_{3-\delta}$  con  $0 \leq x \leq 1$ ). Sin embargo, al sustituir el Ti (que se encuentra en el estado de oxidación 4+) por el Co (que puede tomar fácilmente valencias entre 2+ y 4+) es posible generar distintos mecanismos de compensación de carga, que modifiquen las propiedades estructurales y electroquímicas del material. De hecho, ya hemos comprobado experimentalmente que existen cambios en la estructura electrónica y cristalina a temperatura ambiente, por el sólo hecho de sustituir una parte Ti por Co [2, 3]. Por esta razón, y teniendo en cuenta la aplicación tecnológica propuesta para este material, se vuelve necesario estudiar en detalle el comportamiento estructural y electrónico del LSTC en condiciones de funcionamiento lo más parecida a las reales, es decir a temperaturas que rondan los 700°C y en ambientes tanto reductores como oxidantes. En este trabajo, mediante técnicas de absorción de rayos X con fuente de luz sincrotrón (XANES y EXAFS), presentamos un estudio sistemático de los cambios observados en la estructura electrónica de los metales de transición en función del contenido de Co, simulando condiciones de operación como ánodo y cátodo. Los resultados obtenidos muestran que el Co se encuentra ubicado en el sitio B de la perovskita, compartiendo el lugar del Ti. Sin embargo, para una concentración de Co dada, el dopante tiende a variar su valencia hacia valores más reducidos a medida que aumenta la temperatura, ya sea en condiciones oxidantes o reductoras, mientras que el Ti se mantiene en valores cercanos a 4+, sin variación aparente. Las implicancias de estos resultados se discutirán respecto de la utilización de este material como electrodo simétrico.

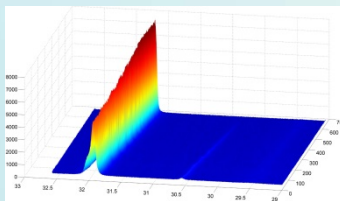
[1] Ruiz-Morales, J.C. et al., Nature, 439, 568-571 (2006).

[2] Napolitano, F.R. et al., International Journal of Hydrogen Energy, 37 (23), 18302-18309 (2012).

[3] Napolitano, F.R. et al., International Journal of Hydrogen Energy, 38 (21), 8965-8973 (2013)



## CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE PEROVSKITAS DE TITANIO-COBALTO BAJO CONDICIONES DE OPERACIÓN DE CELDAS DE COMBUSTIBLE DE ÓXIDO SÓLIDO



**Analía Soldati, Federico Napolitano, Diego G. Lamas, Jochen Geck, Adriana Serquis**  
 CONICET – Centro Atómico Bariloche, Grupo Caracterización de Materiales. Av. Bustillo 9500,  
 (R8402AGP), S.C. de Bariloche, Argentina <sup>1</sup>  
 Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, Argentina <sup>2</sup>  
 Institut für Theoretische Physik, Technische Universität Dresden, Alemania <sup>3</sup>

En este trabajo se presenta la síntesis (utilizando una ruta química de baja temperatura) y la caracterización estructural y electrónica de titanatos de lantano-estroncio dopados con cobalto. Estos materiales con una estructura cristalina tipo perovskita ( $ABO_3$ ) son buenos candidatos para funcionar como electrodos de celdas de combustible simétricas. La estructura cristalina de los óxidos de composición  $La_{0.4}Sr_{0.6}Ti_{1-y}Co_yO_{3+\delta}$  con  $0 \leq y \leq 1$  se estudió con el método de difracción de rayos X de polvos con radiación sincrotrón (XPD). Todas las muestras con  $y > 0$  presentan a temperatura ambiente una estructura romboédrica (R-3c) que no había sido reportada previamente en la literatura y una transición a una fase cúbica (Pm-3m) a alta temperatura. Se encontró que la temperatura de transición depende del grado de distorsión inicial de las muestras. Los parámetros estructurales obtenidos por refinamiento Rietveld de datos de difracción de rayos X permitieron identificar que la creación de sitios de vacancias en el sitio A es el mecanismo de compensación de carga dominante para bajos contenidos de Co. Para  $y \geq 0.3$  el contenido de Sr (y consecuentemente las vacancias del sitio A) se estabiliza, y se encontró una correlación entre la concentración de vacancias del sitio A y la evolución del parámetro de red como función del contenido de Co.

Se discuten además la estabilidad de las fases encontradas en condiciones de operación de la celda con temperaturas hasta 750 °C en atmósferas de aire sintético y 5% $H_2$ /95%He simulando las condiciones de operación de cátodo y ánodo, respectivamente.

Estos datos se correlacionan con los resultados de la caracterización electrónica en la serie LSTC caracterizado por medio de la espectroscopía de absorción de rayos X cerca del borde de absorción (XANES), complementado con cálculos teóricos de densidad electrónica obtenidos por teoría de funcional densidad (DFT) y el entorno cristalográfico local de los TM obtenido por espectroscopia de absorción de rayos X de estructura fina extendida (EXAFS). En este sentido, un enfoque más cualitativo nos permite identificar el estado de valencia del Co como +3 en todo el rango composicional. Estos resultados permiten explicar la disminución de las vacancias catiónicas con el aumento del contenido de Co en la estructura.



## BATERÍAS ION LITIO Y SU PERSPECTIVA DE APLICACIÓN EN SISTEMAS DE FOTOVOLTAICOS DEL ÁREA RURAL DE BOLIVIA



Fabián Benavente<sup>1</sup>, Max Vargas<sup>1</sup>, Vanessa Aliaga<sup>1</sup>, María Estela Ticona<sup>1</sup>, Mery Laura<sup>1</sup>, Karen Palabral<sup>1</sup>, Luz Pozadas<sup>1</sup>, Edgar Cardenas<sup>1</sup>, Manuel Ortega<sup>1</sup>, José Luis Flores, Jaime Villca<sup>1</sup>, Naviana Leiva<sup>1</sup>, Saúl Cabrera<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones Químicas – UMSA

### Resumen

En Bolivia las energías alternativas como la solar (SFV) se hallan lejos de sustituir a las tradicionales, pero tienen un alto impacto en beneficiarios aislados del Sistema Interconectado Nacional (SIN), es decir, fundamentalmente en el área rural. Para poder garantizar la eficiencia del SFV (su funcionamiento óptimo, tiempo de vida prolongada, costo factible, y otros) se plantea el uso de sistemas de almacenamiento basados en baterías ION-Li cuyo desarrollo en nuestro país tiene gran potencial.

Actualmente existen dos grandes problemas relacionados a la generación de energía eléctrica a nivel mundial, por un lado esta los elevados costos relacionados a la producción de energía eléctrica y por otro el daño al medio ambiente que se está causando debido a la generación de Gases de Efecto de Invernadero (GEI) (1). Bolivia no es la excepción debido su fuerte dependencia del gas y del diesel para producir aproximadamente el 59% de su energía eléctrica (termoeléctricas). Sin embargo, está proyectado un cambio significativo de la matriz energética dentro el plan de expansión del Sistema Interconectado Nacional (SIN), viabilizando el desarrollo sostenible del sector. Este cambio en la matriz energética busca reducir la dependencia de las termoeléctricas, de un 59 % actual a un 40% para el 2022, potenciando la generación de electricidad a través de centrales hidroeléctrica (2).

Bolivia cuenta con una amplia experiencia en la implementación de Sistemas Fotovoltaicos (SFV) para electrificación rural. Existe un plan iniciado en 1979 para que la energía eléctrica llegue a todos sus habitantes, existiendo instalaciones de SFV mediante proyectos privados y estatales, como CRE (5600 SFV), FIS (847 SFV) y PNUD (600 SFV), hasta el 2003, a partir de este año se han promocionado nuevos programas de instalación de SFV, fortaleciéndose los mismos desde el 2006 por el Programa Electricidad para Vivir con Dignidad (PEVD), que pretende lograr el Acceso Universal hasta el 2025. Del 2003 a la fecha se instalaron aproximadamente 30.000 SFV, quedando aun 420.000 hogares rurales por electrificar, dado que el 97% del territorio nacional tiene una alta factibilidad para la utilización de SFV, según las proyecciones, con el propósito de alcanzar la universalización de la energía en Bolivia, se instalara aprox. 90.000 nuevos SFV (3).





Actualmente, debido a falta de mantenimiento y otros motivos, aproximadamente entre el 35 al 45 % de estos sistemas instalados están en desuso (3). Uno de los principales motivos para ello, parece ser que la mayoría estos SFV al utilizar sistema de almacenamiento de Baterías tipo PbA, estas necesitan un alto cuidado (reposición de la solución electrolítica, uso del controlador de descarga y carga, la disposición final de la misma que debe ser manejada responsablemente por tratarse de baterías que contienen compuestos nocivos al medio ambiente, elevado peso y tamaño, tiempo de vida corto y baja capacidad comparada con otro tipo de baterías) (Tabla N°1), pero adicionalmente, es importante notar que un factor relevante es su tiempo de vida relativamente corto (2.5 a 5.5 años), comparado al panel solar (20 a 30 años), lo que implica la necesaria sustitución de la misma, por varias veces, durante la utilización de un SFV, pero esto en muchos casos no es posible, por las condiciones precarias de los beneficiarios del área rural, que son los beneficiarios principales en nuestro país, generando la inhabilitación del SFV.

Tabla N°1. Parámetros característicos de diferentes tipos de baterías (4)

Batería	Ciclos	Tiempo de vida (años)	Densidad energética Wh/kg	Costo (US\$/kWh)
Li-ION	5000 – 7000	14 – 16	200 – 370	1200
PbA	500 – 1000	2.5 – 5.5	30 – 50	300 – 600
NiCd	2000 – 2500	13 – 16	50 – 75	1000
NaS	2500	14 – 16	150 – 240	350

Las baterías tipo ION Litio se están empezando a usar ampliamente como sistemas de almacenamiento de energía alrededor del mundo. Se analiza los procesos de obtención de electrodos catódicos ( $\text{Li}(\text{MnNi})_2\text{O}_4$ ) y del ( $\text{LiFePO}_4$ ), a partir de potenciales precursores existentes en Bolivia, concretándose en la síntesis y caracterización de ambos materiales catódicos, por procesos de reacción en estado sólido, y proceso hidrotermal respectivamente, adicionalmente se evalúa la obtención de otro materiales catódico( $\text{LiCoO}_2$ ) comparando sus principales características electroquímicas (Tabla N° 2), y de un material anódico ( $\text{LiTi}_4\text{O}_5$ ), finalmente se comenta su potencial para la aplicación como sistema de almacenamiento de energía de un sistema fotovoltaico (5).

Tabla N° 2. Comparación de materiales catódicos típicos. (Haisheng et. al, 2011)

	$\text{LiCoO}_2$	$\text{LiMn}_2\text{O}_4$	$\text{LiFePO}_4$
Capacidad específica	145	148	170
Densidad	2.6 – 3.0	1.8 – 2.4	0.8 – 1.4
Voltaje de descarga	3.6	3.7	3.3
Numero de Ciclos	500 – 800	1000 – 1500	> 3000
Temperatura de trabajo	-20 – 55	-20 – 50	-20 – 60

## Bibliografía

1. **BP Energy Outlook 2030.** *Energy Outlook 2030.* 2011.
2. **Mnisterio de Hidrocarburos y Energia.** *Estrategia Boliviana de Hidrocarburos.* 2008.
3. **W. Canedo, A. Gamarra de Guardia, N. Hackenberg.** *Desarrollo y situación del uso de sistemas solares fotovoltaicos en Bolivia.* s.l. : Made in Germany, 2010.
4. *The use of Lithium Ion batteries for off-grid Renewable Energy applications.* **Richmond, Randy.** 2012, The Energy Fair.



5. *DESARROLLO DE MATERIALES PARA BATERIAS DE ION LITIO COMO SISTEMAS DE ACUMULACION DE ENERGIA EN EL CAMPO DE ENERGIAS RENOVABLES.* **S. Cabrera, F. Benavente, M. Vaegas, J. L. Flores, M. Ortega, J. Villca, R. Mamani, N. Leiva, M. Luna, W. Yapu, P. Crespo, M. Blanco, E. Palenque, R. Balanza.** La Paz : Revista Boliviana de Quimica, 2012, Vol. II.



## **ADSORCIÓN DE ESTAÑO EN OXIDO DE GRAFENO PARA ANODOS DE BATERIAS DE ION-LITIO**



**Ebbe Luz Yapu Tapia<sup>1</sup>, Mario Blanco Cazas<sup>2</sup> y Waldo Yapu Machicado<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Carrera de Ciencias Químicas, <sup>2</sup> Instituto de Geología y Materiales

<sup>2</sup> Universidad Mayor de San Andrés

**Palabras Clave:** *Oxido de Grafito, Adsorción, Grafeno, Nanocompuestos*

### **Resumen**

Bolivia es un país que posee materias primas muy importantes, se debe recordar su aporte en la época colonial con minerales de plata del cerro Rico de Potosí, también fue el segundo exportador mundial más importante de minerales de Estaño, en el siglo XX; actualmente se explotan yacimientos de gas natural, cuyos excedentes se exportan a los países vecinos; también tiene mucha capacidad de generar energía eléctrica a partir de las cascadas de sus ríos, por sus altos gradientes y caídas naturales. Sin embargo, lo que llama la atención a nivel mundial, son las reservas de Li en la región de Uyuni, por su posibilidad de aplicarse en el campo de las baterías de Ion – Litio, Bolivia cuenta con más del 50 % a nivel mundial de estas reservas. Por esta razón, es muy importante para nuestro país, realizar todos los esfuerzos necesarios para aprovechar este elemento que en este momento constituye un beneficio, no sólo para nuestro país, sino para todo el mundo, por su aporte en cuanto a preservación del medio ambiente con esta nueva fuente para acumular energía más limpia. Este trabajo constituye un aporte a este esfuerzo global, con la finalidad de mejorar la conductividad eléctrica, la ciclabilidad y la intercalación de los iones litio en el ánodo expandido. Para este fin, se transforma la estructura del grafito expandiendo su distancia interlamina, para facilitar la intercalación del litio retardando su envejecimiento temprano.

En este trabajo se obtiene un material compuesto de estaño adsorbido en óxido de grafeno a partir de grafito oxidado. El material de partida es el carbón grafito que se oxida por métodos convencionales. El carbón grafito es el alótropo más estable del carbón en condiciones normales de presión y temperatura, está compuesto por láminas planas bidimensionales, estas láminas tienen una estructura hexagonal formada por átomos de carbono con hibridación  $sp^2$ , las láminas en la dirección transversal están unidas entre sí mediante enlaces de van der Waals, cuya distancia entre planos es de 0,34 nm, formando una red cristalina tridimensional. Por ello, el grafito posee un alto grado de anisotropía, de modo que sus propiedades eléctricas, térmicas y mecánicas varían notablemente con la dirección en la que se realice la medición. Las láminas bidimensionales individuales del grafito, separadas de su estructura original, constituyen el grafeno. El grafeno en láminas actualmente es un material muy estudiado por sus características especiales para obtener diferentes materiales para usos tan diversos, como ser en este caso, dirigido hacia la preparación de materiales de ánodos para baterías de Ión – Litio.





Los nanomateriales de grafeno pueden estar conformados por una o varias capas de grafeno, con tamaños menores a 100 nm.

El grafito al oxidarse para formar óxido de grafito aumenta su distancia interlaminar desde 0.34 nm hasta 1.23 nm, lo cual es muy deseable desde el punto de vista de su uso como material para intercalar iones como  $\text{Li}^+$ , pensando en su futura aplicación como ánodo de las baterías de Ión-Litio. Sin embargo, para otros fines, como para obtener nanotubos de grafeno, se requiere una buena dispersión de las láminas. La exfoliación del óxido de grafito es un buen método para obtener grafeno funcionalizado como nanomaterial de carbono en dos dimensiones.

Se espera que la inserción del estaño en la estructura del óxido de grafito mejore su calidad en cuanto a su uso como ánodo de baterías de Ión-Litio, especialmente en cuanto a su conductividad eléctrica<sup>1,2,3</sup>.

El óxido de grafito se obtiene por oxidación del grafito mediante un oxidante fuerte, cuya estructura contiene diferentes grupos funcionales como cetonas, aldehídos, hidroxilos, éteres, grupos carboxílicos, lactonas, etc.

El óxido de grafito se obtuvo oxidando grafito siguiendo el método propuesto por la referencia 2, modificado. En un balón de tres bocas se vierten 46 ml de ácido sulfúrico concentrado inmerso en un baño de hielo. Cuando la temperatura del ácido sulfúrico llega a 0°C se agregan 2 g de grafito en polvo. La suspensión se mantiene en agitación y en baño de hielo adicionando gradualmente 6 g de permanganato de potasio, controlando que la temperatura no pase los 20°C. Posteriormente, la mezcla se retira del baño de hielo y se agita por 2 h a 35°C. En seguida, se adicionan 92 ml de agua destilada provocando un aumento de temperatura hasta 87 °C. La agitación se mantuvo durante 15 minutos. Después, la mezcla se vacía en un vaso de precipitados conteniendo 280 ml de agua destilada y 6 ml de una solución al 50% de peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), con el fin de destruir el  $\text{KMnO}_4$  en exceso. El óxido de grafito se aísla mediante centrifugación y lavado, primero, con una solución de ácido clorhídrico en agua (1:10 v/v) y, posteriormente, con agua desionizada hasta alcanzar un pH cercano a la neutralidad. El polvo de óxido de grafito se seca a 75°C durante 24 h.

El óxido de grafito obtenido se muele en un mortero de ágata hasta obtener un polvo muy fino. Este polvo se vierte en un recipiente de vidrio que contiene agua desionizada y se somete a ultrasonido por 3 horas, luego se filtra, se seca el filtrado y se recupera el polvo obtenido. A este producto se adsorbe la solución de cloruro de estaño y se lleva a reducción térmica.

Los diferentes productos obtenidos se caracterizan mediante difracción de rayos X, SEM y BET. La difracción de rayos-X (RDX) permite determinar el espaciado entre láminas gráficas y el tamaño de partícula.

## Referencias

- (1) G. Martínez, H. Salavagione, Nanocompuestos Polimericos de Grafeno: Preparación y Propiedades, *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 2011 Volumen 12(1)
- (2) Claramaría Rodríguez González, Obtención de hojas de óxido de grafeno para el desarrollo de nanocompositos poliméricos.
- (3) Zhi An, Sourangsu Sarkar, Owen C. Compton, Son Binh T. Nguyen, Functionalized Graphene and Graphene Oxide: Materials Synthesis and Electronic Applications, *Northwestern University*



## DESARROLLO DE MATERIALES RECUBIERTOS CON ÓXIDOS PARA CÁTODOS DE BATERÍAS DE LITIO

**Lisbeth A. Benavides Castillo, Dr. Diego J. Cuscueta, Dra. Ada Ghilarducci**  
CNEA, Centro Atómico Bariloche

Los esfuerzos realizados por descubrir nuevos materiales que sirvan como fuentes de energía económicamente sustentables han conducido al desarrollo de celdas electroquímicas que han evolucionado desde las baterías de Ni-Cd y Ni-MH hasta las recientes baterías de Li-ión, que contribuyen con el buen desempeño electroquímico, la protección del medio ambiente y la reducción de costos de producción [1]. Algunos de los materiales utilizados en cátodos de baterías de Li-ion son  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiNiO}_2$  y  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ .

El  $\text{LiCoO}_2$  es el material más usado en el mercado como cátodo de baterías de Li-ión debido a la estabilidad de su estructura en capas [2-4]. Sin embargo, la cantidad reversible de litio ( $x$  en  $\text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2$ ) en el ciclado debe ser menor a 0,5, ya que una sobre deslitiación puede provocar la desintegración de partículas y el deterioro del rendimiento electroquímico [5]. Otro material atractivo es el  $\text{LiNiO}_2$  [6-9], que además de ser más económico tiene una capacidad reversible mayor que la del  $\text{LiCoO}_2$ ; sin embargo, su mayor inconveniente es que no es fácil de preparar a gran escala, además de presentar un comportamiento similar al  $\text{LiCoO}_2$  con el excesivo deslitiado, resultando en microfisuras y una marcada disminución de la capacidad. Un tercer material para estudiar es el  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  debido también a su reducido costo, con abundantes recursos y sin contaminación ambiental [10-12]; sin embargo su estructura en espinela y el efecto Jahn-Teller provocan que la capacidad caiga muy rápido durante el ciclado, además del deterioro de las propiedades a altas temperaturas provocado por la disolución de Mn en el electrolito.

Hay evidencia que tal degradación está relacionada con los defectos de superficie de los materiales. Recientes estudios han demostrado que las superficies recubiertas son un enfoque eficaz para estabilizar la estructura de los materiales y mejorar sus rendimientos electroquímicos. Los recubrimientos con óxidos tales como  $\text{MgO}$  [13-16],  $\text{SnO}_2$  [17-20],  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [21-24] y  $\text{ZrO}_2$  [25-26] son algunos de los más efectivos para proteger el núcleo del material evitando reacciones indeseadas en la superficie y mejorando la estabilidad estructural, ya que previenen el contacto directo con la solución del electrolito y suprimen la disolución de iones, eliminan las transiciones de fase, disminuyen el desorden de cationes en los sitios del cristal y elevan la conductividad.

El propósito de la investigación es contribuir a la mejora de los cátodos de baterías de Li-ión, estudiando el recubrimiento de compuestos químicos como  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiNiO}_2$  y  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  con óxidos, para mejorar las propiedades electroquímicas. Se está estudiando sistemáticamente la síntesis y la modificación de la superficie de estos materiales con óxidos, para eliminar problemas como la desintegración de las partículas debido a la sobre deslitiación, mejorando la estabilidad en la estructura, evitando reacciones indeseadas en la superficie y protegiendo el núcleo del material.

El proceso de síntesis química de los materiales activos base ( $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiNiO}_2$  y  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ) y con recubrimiento de éstos con óxidos se está estudiando mediante la utilización de técnicas como XRD, XPS, TEM, SEM, TGA y mediante caracterización electroquímica del material.



sintetizado mediante voltametría cíclica, estabilidad cíclica de carga-descarga, desempeño en función de corriente de descargayespectroscopía de impedancia electroquímica.

## REFERENCIAS BIBLOGRÁFICAS

1. Y. Tian, X. Kang, L. Liu, C. Xu, T. Qu. Research on cathode material of Li-ion battery by yttrium doping. *Journal of rare earths* 26-2 (2008) 279-283.
2. S.P. Sheu, C.Y. Yao, J.M. Chen, Y.C. Chiou. Influence of the LiCoO<sub>2</sub> particle size on the performance of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources* 68-2 (1997) 533-535.
3. R. Yazami, N. Lebrun, M. Bonneau, M. Molteni. High performance LiCoO<sub>2</sub> positive electrode material. *Journal of Power Sources* 54-2 (1995) 389-392.
4. C.Y. Yao, T.H. Kao, C.H. Cheng, J.M. Chen, W.-M. Hurng. Studies of electrochemical properties of lithium cobalt oxide. *Journal of Power Sources* 54-2 (1995) 491-493.
5. A. Basch, J.H. Albering. Preparation and characterization of core-shell battery materials for Li-ion batteries manufactured by substrate induced coagulation. *Journal of Power Sources* 196 (2011) 3290-3295.
6. K. Kubo, M. Fujiwara, S. Yamada, S. Arai, M. Kanda. Synthesis and electrochemical properties for LiNiO<sub>2</sub> substituted by other elements. *Journal of Power Sources* 68-2 (1997) 553-557.
7. R.V. Moshtev, P. Zlatilova, V. Manev, Atsushi Sato. The LiNiO<sub>2</sub> solid solution as a cathode material for rechargeable lithium batteries. *Journal of Power Sources* 54-2 (1995) 329-333.
8. A. Rougier, C. Delmas, A.V. Chadwick. Non-cooperative Jahn-Teller effect in LiNiO<sub>2</sub>. An EXAFS study *Solid State Communications* 94-2 (1995) 123-127.
9. P. Kalyani, N. Kalaiselvi. Various aspects of LiNiO<sub>2</sub> chemistry: A review. *Science and Technology of Advanced Materials* 6-6 (2005) 689-703.
10. G. Pistoia, R. Rosati. Synthesis of an efficient LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> for lithium-ion cells. *Journal of Power Sources* 58-2 (1996) 135-138.
11. P. Kalyani, N. Kalaiselvi, N. Muniyandi. A new solution combustion route to synthesize LiCoO<sub>2</sub> and LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. *Journal of Power Sources* 111-2 (2002) 232-238.
12. Z-M Yu, L-C Zhao. Structure and electrochemical properties of LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 17-3 (2007) 659-664.
13. L.J. Fu, H. Liu, C. Li, Y.P. Wu, E. Rahm, R. Holze, H.Q. Wu. Surface modifications of electrode materials for lithium ion batteries. *Solid State Sciences* 8-2 (2006) 113-128.
14. J.S. Gnanaraj, V.G. Pol, A. Gedanken, D. Aurbach. Improving the high-temperature performance of LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinel electrodes by coating the active mass with MgO via a sonochemical method. *Electrochemistry Communications* 5-11 (2003) 940-945.
15. W-S Yoon, K-W Nam, D. Jang, K.Y. Chung, J. Hanson, J-M Chen, X-Q Yang. Structural study of the coating effect on the thermal stability of charged MgO-coated LiNi<sub>0.8</sub>Co<sub>0.2</sub>O<sub>2</sub> cathodes investigated by in situ XRD. *Journal of Power Sources*, In Press (2012).
16. E. Zhecheva, R. Stoyanova, G. Tyuliev, K. Tenchev, M. Mladenov, S. Vassilev. Surface interaction of LiNi<sub>0.8</sub>Co<sub>0.2</sub>O<sub>2</sub> cathodes with MgO. *Solid State Sciences* 5-5 (2003) 711-720.
17. J. Cho, C.S. Kim, S. Yoo. Improvement of structural stability of LiCoO<sub>2</sub> cathode during electrochemical cycling by Sol-Gel coating of SnO<sub>2</sub>. *Electrochem. Solid-State Lett.* 3 (2000) 362-365.
18. J. Xiao, H-L Zhu, Z-Y Chen, Z-D Peng, G-Rong Hu. Preparation and property of spinel LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> material by co-doping anti-electricity ions. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 16-2 (2006) 467-472.

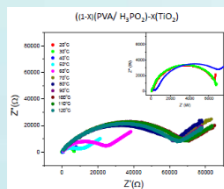




19. S. Nam, S. Kim, S. Wi, H. Choi, S. Byun, S-M Choi, S-I Yoo, K. T. Lee, B. Park. The role of carbon incorporation in SnO<sub>2</sub> nanoparticles for Li rechargeable batteries. *Journal of Power Sources* 211 (2012) 154-160.
20. J.P. Maranchi, A.F. Hepp, P.N. Kumta. LiCoO<sub>2</sub> and SnO<sub>2</sub> thin film electrodes for lithium-ion battery applications. *Materials Science and Engineering: B* 116-3 (2005) 327-340
21. J. Cho, Y.J. Kim, B. Park. Novel LiCoO<sub>2</sub> Cathode Material with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating for a Li Ion cell. *Chem. Mater.* 12 (2000) 3788-3791.
22. Y. Huang, J. Chen, F. Cheng, W. Wan, W. Liu, H. Zhou, X. Zhang. A modified Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating process to enhance the electrochemical performance of Li(Ni<sub>1/3</sub>Co<sub>1/3</sub>Mn<sub>1/3</sub>)O<sub>2</sub> and its comparison with traditional Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating process *Journal of Power Sources* 195-24 (2010) 8267-8274.
23. H. Wang, Z. Deng, M. Chen. Effects of SrO/Li<sub>2</sub>O/La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub>-coating on electrochemical performance of LiCoO<sub>2</sub> *Journal of Rare Earths* 27-2 (2009) 234-239.
24. Y. Kim, H.S. Kim, S.W. Martin. Synthesis and electrochemical characteristics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-coated LiNi<sub>1/3</sub>Co<sub>1/3</sub>Mn<sub>1/3</sub>O<sub>2</sub> cathode materials for lithium ion batteries. *Electrochimica Acta*, 52-3 (2006) 1316-1322.
25. J. Cho, Y.J. Kim, T.J. Kim, B. Park, Zero-Strain Intercalation Cathode for Rechargeable Li-Ion Cell. *Angew. Chem. Int. Ed.* 40-18 (2001) 3367-3369
26. Y. Huang, J. Chen, J. Ni, H. Zhou, X. Zhang. A modified ZrO<sub>2</sub>-coating process to improve electrochemical performance of Li(Ni<sub>1/3</sub>Co<sub>1/3</sub>Mn<sub>1/3</sub>)O<sub>2</sub> *Journal of Power Sources* 188-2 (2009) 538-545.



## THERMAL AND DC-IONIC CONDUCTIVITY PROPERTIES OF THE POLYMER ELECTROLYTE BASED ON PVA+H<sub>3</sub>PO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>



Maria E. Fernández<sup>1</sup>, Pablo R. Bueno<sup>2</sup>, Elsa Materon<sup>2</sup>, Rubén A. Vargas<sup>1</sup> and Jesús E. Diosa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Transiciones de Fase en Sistemas no Metálicos, Universidad del Valle, Departamento de Física, A.A. 25360, Cali-Colombia

Universidade Estadual Paulista. Instituto de Química, UNESP-Araraquara, Brasil<sup>2</sup>

### Abstract

In this work we used impedance spectroscopy (IS), differential scanning calorimetry (DSC) and infrared spectroscopy (IR) techniques to study the polymer electrolyte membranes based on poly(vinyl alcohol) (PVA) and hypophosphorous acid (H<sub>3</sub>PO<sub>2</sub>) with different titanium oxide nanoparticles (TiO<sub>2</sub>) concentrations. The polymer systems were prepared using solution casting method. The impedance spectroscopy studies were obtained from 100 Hz to 5 MHz over the temperature range of 20 to 120 °C. The results show dielectric and conductivity relaxations as well as a change in dc ionic conductivity with the TiO<sub>2</sub> content. The order of the ionic conductivity is between 10<sup>-5</sup> to 10<sup>-3</sup> Scm<sup>-1</sup> at room temperature, being about 5x10<sup>-3</sup> Scm<sup>-1</sup> for 5.0% of TiO<sub>2</sub>. FTIR spectra show changes in the profiles of the absorption bands with the addition of different concentrations of titanium oxide nanoparticles.

### 1. INTRODUCTION

The development of solid polymer electrolytes has been of great research interest in several applications, such as in ion-exchange membranes for fuel cells, due to the fact that these cells can be used for generating clean energy (1). One of the most commonly used proton conductor is the Nafion (2) which presents optimal properties for use in both fuel cells and other types of ionic devices. As an alternative for obtaining polymeric solid conductors, a combination of Poly (vinyl-alcohol) and hypophosphoric acid was proposed in 1985 (3). This combination allowed the fabrication of a new low-cost proton conducting membrane, encouraging the fabrication of different kind of membranes which have been synthesized by using different mixtures of polymers with salts and acids (4).



## 2. RESULTS

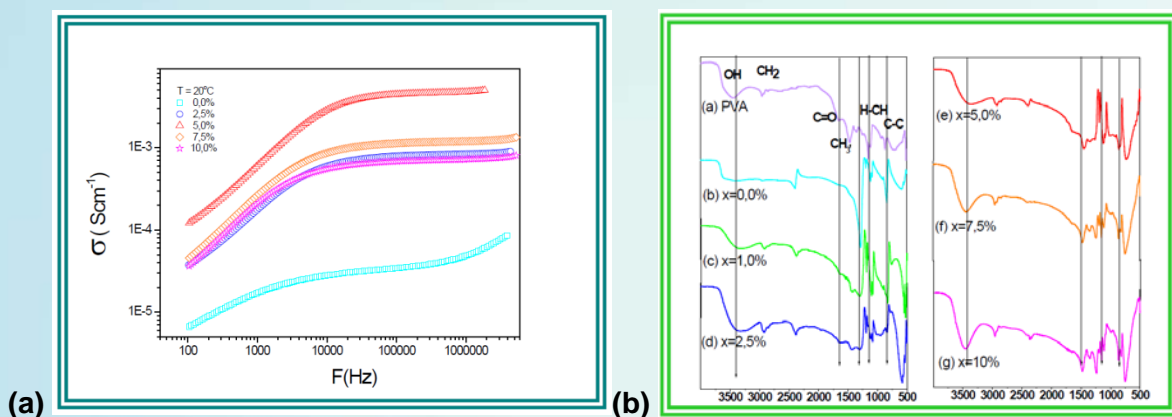
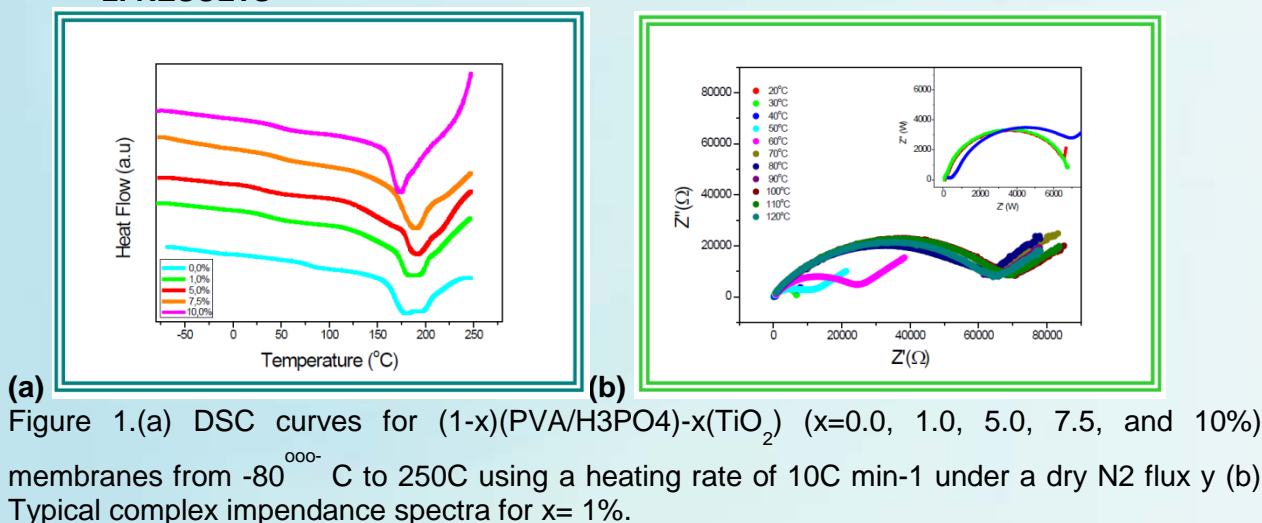


Figure 2.(a) Variation of a. c. conductivity with frequency at room temperature for (1-x)(PVA/H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>)-x(TiO<sub>2</sub>) membranes. (b) FT-IR spectra of PVA and (1-X)(PVA/H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>)-x(TiO<sub>2</sub>) for x = 0.0, 1.0, 2.5, 5.0, 7.5, and 10%.

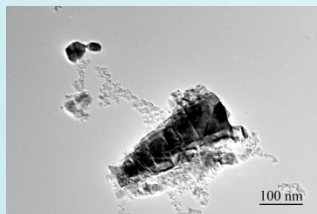
## REFERENCES

- (1) Smitha B., Sridhar S., Khan A.A., Journal of membrane science, 2005, 259: 10-26
- (2) Colomban P., 1992, Preface, Proton Conductors – Solids, Membranes and Gels-Materials and Applications, p. xxi, Cambridge University Press, Cambridge, England
- (3) Gong K – C., Materials Research Society Symposium Proceedings, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 1989, 135: 377
- [4] Vargas M.A., Vargas R.A., Mellander B-E., Electrochimica Acta, 2000, 45: 1399–1403





## ESTUDIO CON MICROSCOPIOS ELECTRÓNICOS DE LA INSERCIÓN ELECTROQUÍMICA DEL SODIO EN SULFURO DE MOLIBDENO



**Juan Pablo Hurtado Padilla** [jphp81@umd.edu](mailto:jphp81@umd.edu) - **Chunsheng Wang**

Dept. de Ingeniería Química, Universidad de Maryland, College Park, MD 20742 USA

**Wen-An Chiou**

NISP Lab, Nanocenter, University of Maryland, College Park, MD 20742-2831 USA

El Sulfuro de Molibdeno ha mostrado prometedores resultados como material anódico para baterías debido a su bajo costo y alto desempeño [1]. Las baterías de Sodio son una alternativa interesante a las baterías de litio para su uso en almacenaje de energía estático para fuentes de energía renovable. [2]. Este artículo presenta el estudio con microscopios electrónicos de MoS<sub>2</sub> antes y después de la inserción de Sodio con el objetivo de usar sus resultados para mejorar el diseño de la partícula como material anódico en las baterías de Sodio.

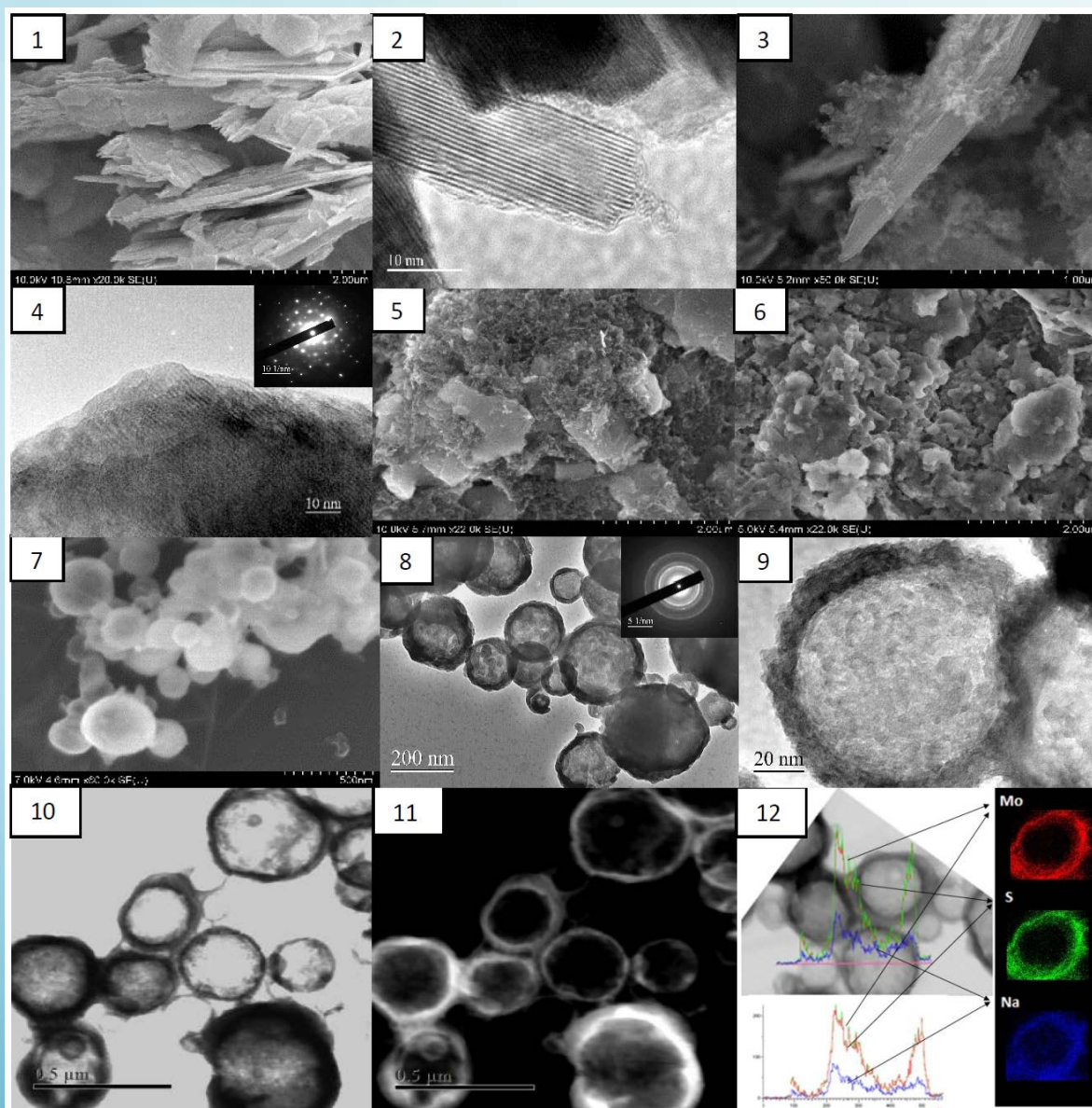
MoS<sub>2</sub> disponible comercialmente (Sigma-Aldrich, > 2 μm) fue pulverizado usando un molino planetario de bolas de alta energía (High Energy Ball Mill) con carbón negro en una proporción 70:30 por 6 horas para reducir el tamaño de partícula y obtener una distribución uniforme del carbón, posteriormente fue recocido a 800 °C por 2 horas para obtener una estructura cristalina 2H [3]. Este material fue usado como ánodo en las baterías de prueba con láminas de cobre como colectores de corriente, sodio metálico como cátodo y NaPF<sub>6</sub> como electrolito. El material fue probado electroquímicamente a 100 mAh en un analizador de baterías (Arbin Instruments) durante una descarga. La mitad del material aun encima de la lámina de cobre fue guardada para estudios morfológicos (Hitachi SU-70 SEM), la otra mitad fue retirada de la lámina de cobre y dispersada en etanol. Una gota de las partículas suspendidas fue pipeteada a una rejilla con lámina de carbono para su investigación en microscopio de transmisión de electrones. JEOL 2100 FEG TEM/STEM).

Ambas imágenes de barrido (SEM) y de transmisión (TEM) de los materiales originales (Figs. 1 and 2) y después del molido (Figs. 3 and 4) muestran la característica estructura hexagonal del MoS<sub>2</sub>. El patrón de difracción (Fig. 4 Recuadro) revela la estructura cristalina del material. El material encima del colector de corriente antes de la inserción conserva la estructura plana de capas (Fig. 5). Sin embargo un notable cambio morfológico se puede observar después de la inserción de Sodio. El material pasa de capas planas a una inesperada mezcla entre capas y partículas esféricas con una diferente estructura entre coraza y núcleo (Fig. 6 a la 10) identificadas como policristalinas por el patrón de difracción (Fig. 8 recuadro). Análisis micro químico, perfil lineal y mapeo, de estas partículas esféricas con STEM revela que la coraza exterior era compuesta mayormente por Mo y S y una pequeña parte de Na. La distribución de Na en la partícula es relativamente constante entre coraza y núcleo a diferencia del MoS<sub>2</sub> que cae pronunciadamente en el núcleo, esto sugiere que la composición de Na en el núcleo es mayor en el núcleo que en la coraza con relación al MoS<sub>2</sub>. Estos resultados indican que Na no



solo se inserta entre las capas de MoS<sub>2</sub> como era de esperarse de estudios previos [5], pero también se difunde al núcleo de las partículas formadas. Estos resultados podrían explicar la muy alta capacidad de almacenaje del MoS<sub>2</sub> encontrada en nuestros estudios preliminares en baterías de MoS<sub>2</sub>-Na (800 mAh/gr vs. 180 mAh/gr teórico). Mas estudios en la formación de estas partículas esféricas, el mecanismo de inserción y su impacto en la capacidad de almacenamiento esta en progreso.

- [1] Chang et al., J. Mater. Chem., 21:6251 (2011).
- [2] Dunn et al., Science, 334:928 (2011).
- [3] Dungey et al., Chem. Mater. 10:2152:2161 (1998).
- [4] Li et al., J. Am. Chem. Soc., 130:48 (2008).
- [5] Buenavente et al., Coord. Chem. Rev. 224:87-109 (2002).
- [6] Este estudio fue realizado en el laboratorio NISP y fue parcialmente financiado por NSF-MRSEC DMR 05-20471, Shared Experimental Facility) y la Universidad de Maryland.



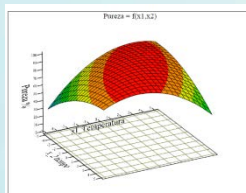


- Fig. 1. Microfotografía SEM del MoS<sub>2</sub> comercial mostrando su morfología hexagonal característica.
- Fig. 2. Microfotografía TEM del MoS<sub>2</sub> comercial mostrando su morfología hexagonal.
- Fig. 3. Imagen SEM de MoS<sub>2</sub> y C 70:30 pulverizados muestra el C junto al MoS<sub>2</sub>
- Fig. 4. Imagen TEM del MoS<sub>2</sub> pulverizado y recocido. Recuadro: Patrón de Difracción.
- Fig. 5. Imagen SEM muestra al MoS<sub>2</sub> y C (70:30) encima del colector de corriente antes de la inserción de Na. Fig. 6. Imagen SEM después de inserción de Na encima del colector de corriente muestra cambio morfológico
- Fig. 7. SEM de alta magnificación muestra las partículas esféricas después de la inserción de Na.
- Fig. 8. Imagen TEM del material resultante mostrando las esferas formadas.
- Fig. 9. TEM de alta magnificación muestra la diferencia entre coraza y núcleo.
- Figs. 10 and 11. TEM de campo brillante y oscuro mostrando la diferencia entre coraza y núcleo.
- Fig. 12. Imagen EDS de perfil lineal y mapeo muestra la distribución de Na, Mo y S después de Inserción.





## UN ESTUDIO BÁSICO AL PROCESO DE OBTENCIÓN DEL ÓXIDO DE MANGANESO LITIO COMO CÁTODO PARA LAS BATERÍAS DE IÓN LITIO



**José Luis Flores - Saúl Cabrera**

Laboratorio de Energías Alternativas, Instituto de Investigaciones Químicas, UMSA

**Mario Blanco**

Laboratorio de Caracterización Estructural de Minerales, Instituto de Investigaciones Geológicas y del Medio Ambiente, UMSA

**Eduardo Palenque**

Laboratorio de Materia Condensada, Instituto de Investigaciones Físicas, UMSA

**Palabras clave:** Síntesis, Cátodo, Electrodo, Baterías de Ión Litio, Óxido de Manganeso Litio, Energía.

A partir de la alta demanda energética mundial en las últimas décadas y las reservas limitadas de combustibles fósiles en nuestro país, el plan del gobierno instituye el desarrollo de una industria productiva de valor agregado a partir de la industrialización del Salar de Uyuni alineada a la producción de Carbonato de Litio y derivados, el cual debe ser transformado para llegar a la producción de Baterías de Litio. El cátodo, ánodo y electrolito son los componentes principales de la batería siendo el material catódico el de mayor controversia. Uno de los más comerciales y más demandados en el mercado es la espinela de óxido de manganeso litio ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  o LMO) por sus propiedades que ofrece, además de ser barato y no contaminante.

Este material catódico puede ser obtenido en Bolivia a partir de la producción de carbonato de litio y dióxido de manganeso, una industria ausente que se vería motivada a desarrollarse debido a la existencia de un mercado activo y creciente. Este proyecto es el resultado de un esfuerzo para definir el proceso de obtención de este material catódico y definir algunos aspectos económicos del proceso de producción propuesto.

Se ha determinado los parámetros cinéticos de la expresión de la velocidad de descomposición de los precursores de litio y manganeso ( $\text{Li}_2\text{CO}_3\text{-MnO}_2$ ) como la energía de activación y el factor de frecuencia por modelos cinéticos teóricos: Coast-Redfern y Kissinger. La energía de activación aparente determinada por el método de Coast-Redfern está cerca de 128,05 kJ/mol, el orden de reacción 2,03 y el factor de frecuencia  $3,84 \times 10^{10} \text{ min}^{-1}$  y en consecuencia la expresión de velocidad adopta la siguiente forma:  $\ln(-\ln(1-\alpha)) = 3,84 \times 10^{10} (1-\alpha)^{2,03} \cdot e^{-128050/RT}$ .

Para determinar la temperatura y tiempo óptimo de síntesis, se diseñó una estrategia de síntesis correspondiente a la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR), donde se evaluó como señal respuesta la pureza del material sintetizado. La estrategia de primer orden no ajusta al fenómeno estudiado evidenciando la existencia de curvatura, en consecuencia la estrategia de segundo orden ha permitido obtener una ecuación representativa del fenómeno gracias a un diseño central compuesto (cuadrado + estrella):



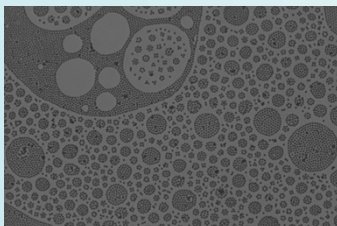
$Prz = -964,663 + 2,618T + 6,284t - 7,44 \cdot 10^{-3}T \cdot t - 1,613 \cdot 10^{-3}T^2 - 0,0182t^2$ . Al graficar se observa que este tiene la forma de un paraboloide, donde el área curva de este corresponde a la superficie de respuesta que obedece a los experimentos realizados. Las coordenadas de este punto crítico (máximo) se determinaron con la ayuda de gráficos de contorno:  $T = 782^\circ\text{C}$ ;  $t = 12,8$  horas;  $Prz = 99,07\%$ . El análisis canónico a esta superficie se usó para caracterizar la superficie de respuesta buscando respuestas por encima del 99,07% encontrado. La forma canónica del modelo ajustado es:  $Y = 99,07 + 0,1507w_1 - 1,6147w_2$  cuya gráfica tiene la forma de una “silla” que indica la variedad de combinaciones de temperatura y tiempo para trabajar con una pureza alta. En el caso hipotético de querer obtener  $Prz = 100$ , el modelo canónico se resuelve para  $T = 725^\circ\text{C}$  y para  $t = 21,4$  horas. Para corroborar el modelo ajustado, también se ha hecho uso de un software de computadora llamado *Design-Expert*, cuyos resultados son consistentes con los obtenidos manualmente.

La obtención de óxido de manganeso litio por tratamiento térmico en condiciones optimizadas de sus variables y la caracterización de los sólidos obtenidos, han sido realizados en este trabajo. Los resultados por difracción de rayos X muestran que el óxido preparado cristaliza en la fase espinela, grupo espacial  $F3dm$  y son comparadas con las fichas técnicas normadas A.S.T.M. 18-736. Tampoco se han identificado señales de desplazamiento ni señales correspondientes a otras fases extrañas. Por análisis SEM se ha determinado que las partículas tienen un tamaño de 5 a 7  $\mu\text{m}$  y un área superficial de  $1,015 \text{ m}^2/\text{g}$ . Mediante la técnica de Wenner de las cuatro puntas, se ha determinado que el óxido tiene una conductancia de 0,16 S/m y 0,5 S/m sin y con grafito respectivamente. La capacidad específica del material es de 116 mA-h/g determinado con pruebas de carga-descarga y voltamperometría cíclica.

Para calcular los costos de capital, se diseñó un proceso de producción de este óxido de manera preliminar. Puesto que los parámetros económicos dependen de la dimensión de los equipos, se ha hecho un estimado de las dimensiones de los equipos más relevantes. En consecuencia, se obtuvo un capital básico de 1.703.541 \$, un capital de trabajo de 255.531 \$, por lo tanto un capital total de 1.959.073 \$ para el proceso que se ha propuesto. Se ha estimado el precio unitario del producto para una tasa de retorno del 50% en aproximadamente \$6,734/kg. Produciendo 2500 t/año de este óxido y vendiéndolo a ese precio unitario, las ganancias netas descontando los impuestos serían 808.840 \$ por año. El tiempo de recuperación del capital (asumiendo que estas cantidades se mantienen constantes en el tiempo) para una tasa de retorno del 50% es de 2,4 años. El punto de equilibrio representa el 16,4% de la capacidad total de la planta, es decir se debería vender 418 toneladas anuales para que este proyecto genere utilidades.



## DIFERENCIAS EN LAS INTERACCIONES FÍSICO - QUÍMICAS EN DOS Y TRES DIMENSIONES EN NANOCIENCIA



**Flavio Ghezzi**

Carrera de Física, UMSA, Bolivia

*Celdas fotovoltaicas, películas delgadas, ecuación de Maxwell- Boltzmann*

Se discuten las diferentes interacciones físico-químicas para sistemas en dos dimensiones y se comparan a los fenómenos encontrados en tres dimensiones. También analizamos los comportamientos utilizando mecánica estadística. Finalmente estudiamos las celdas de Gratzel, como ejemplo de sistemas fotovoltaicos.





## OXIDOS CONDUCTORES TRANSPARENTES COMO MATERIALES DE ENERGIA SOLAR Y PARA AHORRO DE ENERGIA



**Dwight Roberto Acosta Najarro** [dacosta@fisica.unam.mx](mailto:dacosta@fisica.unam.mx)  
Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México  
AP. 20-364 01000 México D.F., MEXICO

Los óxidos conductores transparentes, (OCT) tienen un alto número de aplicaciones relacionadas con el uso de la energía solar y con el ahorro de energía en edificaciones diversas. Las más notables en términos de área útil tienen que ver con que los OCT, tienen baja emitancia en el infrarrojo y por ello pueden ser usados en dispositivos como las ventanas inteligentes. En relación a la energía solar, dependiendo de si los OCT son reflectores o no en el infrarrojo cercano, pueden ser usados en “control solar” o ventanas de baja emitancia. Otras aplicaciones, tiene que ver con la conductividad eléctrica de los OCT, la cual los hace útiles como recolectores de corriente en las celdas solares y en los procesos de inyección y/o extracción de cargas en las ventanas inteligentes las cuales en su utilidad combinan , la eficiencia energética y la confortabilidad de en el interior de las edificaciones.

Los óxidos conductores y transparentes como el : ITO ( $\text{In}_2\text{O}_3\text{Sn}$ ) y el FTO( $\text{F: Sn O}_2$ ) presentan interesantes propiedades ópticas y eléctricas gracias a las cuales tienen una gran gama de aplicaciones tecnológicas en ventanas electrocrómicas, displays digitales, sensores de gases, contactos transparentes en celdas solares y conversores fototérmicos entre otros. Los TCO son estudiados para aplicaciones como films selectivos, esto es, presentan la propiedad de ser muy transparentes a la luz visible y altamente reflectantes a las longitudes de onda del infrarrojo. Esta cualidad hace que tanto el ITO como el FTO sean utilizables como “espejos de calor” tanto para la elaboración de conversores fototérmicos como contactos eléctricos y filtros térmicos en las celdas solares. El ITO es una solución sólida de óxido de indio y óxido de estaño, típicamente 90%  $\text{In}_2\text{O}_3$ , 10% en peso de  $\text{SnO}_2$  y en configuración de películas delgada es usado ampliamente como conductor eléctrico y filtro térmico en las celdas solares. Debido al alto costo y la oferta limitada de indio, la fragilidad y falta de flexibilidad de las capas de ITO, y la deposición de capas costoso que exige vacío, se están buscando alternativas competitivas y de menor precio.

En este trabajo se presenta la síntesis y caracterizaciones estructurales, ópticas eléctricas y espectroscópicas de un novedoso conductor transparente el Oxido de Indio  $\text{In}_2\text{O}_3$  dopado con tungsteno y que se ha dado a conocer como IWO. Los óxidos de indio dopados con tungsteno han recibido la atención de los laboratorios que producen Oxidos Conductores Transparentes por su potencial uso como una alternativa al ITO en las celdas solares: en este trabajo reportamos la síntesis de películas delgadas de  $\text{In}_2\text{O}_3$  dopado con tungsteno preparadas por la técnica de rociado químico neumático. Los elementos que conforman los TCO cumplen con las



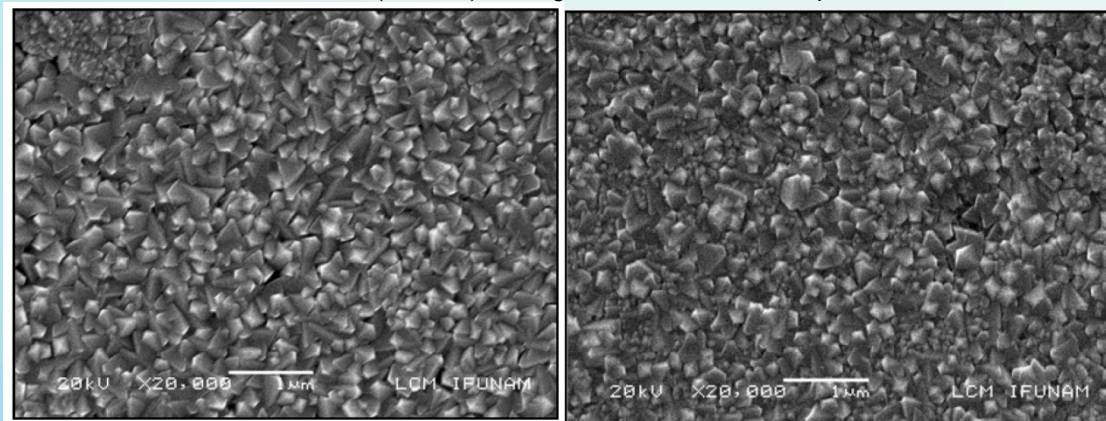
características específicas para que estos materiales en configuración de películas delgadas, posean una alta transparencia en los visibles y altos niveles de conductividad. Los mejores OCT son compuestos formados con cationes metálicos que tiene su orbital d lleno y una estructura electrónica de la forma  $nd_{10}^{10}n_{sp0}$  además de la configuración electrónica apropiada, los cationes sustitucionales en la red del OCT, deben de tener un radio iónico menor y un estado de oxidación más alto que los cationes de OCT. Los cationes de  $W^{6+}$  cumplen con los requisitos para ser considerados una impureza donadora buena en el  $In_2O_3$ . Además la sustitución de átomos de indio, con elementos de estados de valencia más altos, que el del Sn (para el caso del ITO) tiene la ventaja de cuando hay conducción del tipo n, dado que al menos tres electrones libres pueden ser creados en la banda de conducción.

Las películas delgadas de IWO se depositaron a partir de un aerosol por rocío pirolítico neumático pulsado para diferentes concentraciones de tungsteno (2,4,6,8 y 10%at.) usando  $(NH_4)_{10}W_{12}O_{41}$  y  $InCl_3$  disuelto en etanol como compuestos en la solución de partida y manteniendo el substrato a 525 °C.

Las muestras fueron estudiadas por difracción de rayos X, microscopías electrónicas de transmisión y de barrido así como de fuerza atómica; las propiedades ópticas se estudiaron por espectroscopía UV y Visible. La propiedades eléctricas se estudiaron por usando el método de cuatro puntas en configuración de van der Pauw. Se usaron asimismo las técnicas de XPS , EDS y de ELLS para el análisis espectroscópico de las muestras.

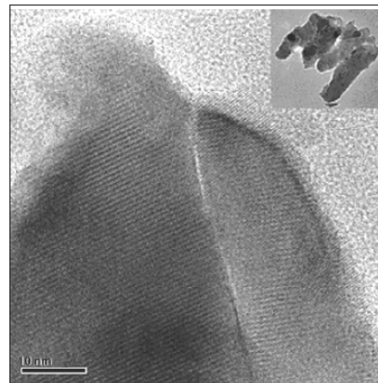
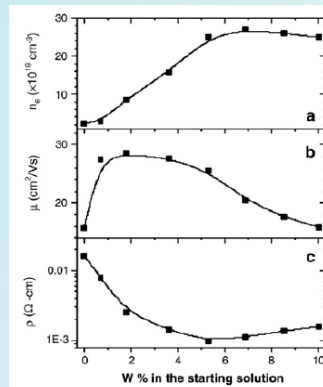
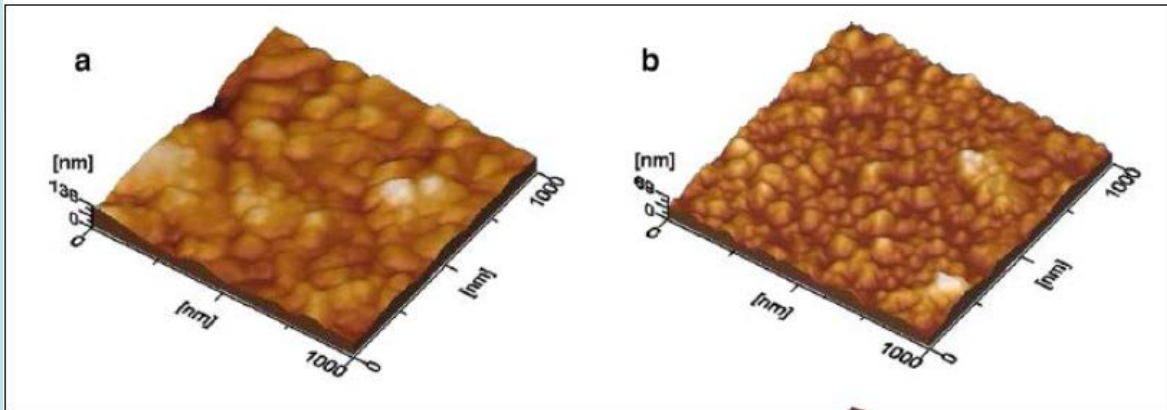
En todos los casos se buscó correlacionar las propiedades físicas con los parámetros de depósito y las características estructurales de los materiales obtenidos y obtener información sobre la aplicación potencial de las mismas como componentes de las celdas solares.

**Figura 1.** Micrográficas de microscopía electrónica de barrido de películas de IWO con baja (Izquierda) y alta concentración (derecha) de tungsteno en la solución de partida.





**Figura 2.** Micrografías de fuerza atómica de bajo (2.6 %at.) y alto (8.0 %at) de dopaje con tungsteno. Se aprecia las variaciones en la rugosidad de las películas y en el tamaño de los granos.

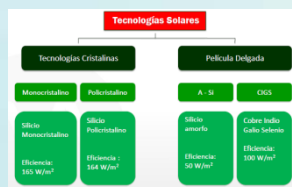


**Figura 3.** Comportamiento eléctrico del IWO : variaciones del número de portadores de carga, la movilidad y resistividad con el dopaje (% atómico)

**Figura 4.** Microscopía electrónica de transmisión de alta resolución y de campo claro, en el recuadro, de los granos del IWO que conforman la películas.



## EVALUACION DE CELDAS SOLARES CON INDIO COMO ALTERNATIVA PARA LA GENERACION FOTOVOLTAICA EN BOLIVIA



**Karen Ximena Palabral Velarde, Vanessa Grace Aliaga Condori, Mery Graciela Laura Saniz, Luz Jimena Pozadas Zambrana, María Estela Ticona Cruz, Saul Orlando Cabrera Medina**

Laboratorio de Energías Alternativas, Instituto de Investigaciones Químicas, UMSA

**Palabras Clave:** Celda Fotovoltaica, Energía Renovable.

Al ser la energía solar, un recurso renovable y una energía limpia que contribuye a la protección del medio ambiente, es que se desarrolla la investigación sobre la elaboración de paneles solares, hecho que es muy importante especialmente para el desarrollo y producción de nuestro país.

Varios países están apostando por nuevas formas de generación de energías limpias, la demanda mundial de módulos solares fotovoltaicos ha ido incrementando en estos últimos años pero el estancamiento de la oferta de células de silicio limita las posibilidades de dicho crecimiento debido a que la depuración y cristalización del silicio de grado semiconductor, está en manos de seis empresas a nivel mundial, todas ellas fuera de nuestro país. [1]

El potencial solar en Bolivia para la generación de electricidad con sistemas fotovoltaicos es altamente ventajoso, por los altos niveles de radiación solar. Una instalación en La Paz es mucho más productiva que en otras partes del mundo, inclusive una planta fotovoltaica en el oriente boliviano, tendría un rendimiento similar a una planta en Sevilla – España, catalogada como una de las regiones con mayor potencial solar en Europa [2]

Los tipos de paneles solares existentes son los de silicio cristalino y los de película delgada que son los de más interés. La tecnología de silicio cristalino se espera continúe siendo la dominante en el mercado en los próximos años, y la tecnología de película delgada sea cada vez menos cara en el mediano y largo plazo.

Dentro de los materiales semiconductores, un gran número de materiales fotovoltaicos han sido investigados e implementados en módulos solares, sin embargo en la actualidad solo tres tipos de materiales fotovoltaicos han pasado del desarrollo a nivel de laboratorio a la producción a nivel industrial, estos son: silicio amorfo (A-Si), telurio de cadmio (CdTe) y compuestos tipo calcopirita de  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$ , (CIGS,Se) y CIS. [3]

Los paneles basados en  $\text{CuInSe}_2$  llegaron a una eficiencia mayor a 5 % a mediados de la década de los 70. El record mundial en eficiencia obtenidos con celdas solares fabricadas con tecnología de película delgada es del 19,9 % y fue logrado con celdas solares de juntura simple fabricadas usando el compuesto  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  como capa absorbente. [3]



Para la obtención de una celda fotovoltaica de segunda generación se debe tomar en cuenta las diferentes capas: Un óxido conductor transparente, como el óxido de titanio (semiconductor) con un ancho de banda grande (mayor a 3 eV) cuya función principal es facilitar que la mayor radiación llegue hasta la capa absorbente de tal manera que se favorezca la generación de un campo eléctrico intenso. [4]; una capa buffer que se encuentra en medio de la capa p y la capa n, es decir, en medio del óxido transparente y de la capa absorbente, y se caracterizan por ser de escala manométrica (50 -100nm) [5][6], su función es evitar que ambas capas reaccionen entre si y existan perdidas de fotocorriente [7]; y una capa absorbente que consta CIGS y CIS que tienen constantes de red y brecha de energía prohibida  $E_g$  que se pueden modificar[8].

Bolivia se ha caracterizado por tener grandes yacimientos mineros y que en ellos se encuentran las materias primas necesarias para la elaboración de celdas de segunda generación, por tanto existe el interés de promover la utilización de las materias primas de nuestro país para este tipo de síntesis.

En la tabla 1 se resume los principales yacimientos de materia prima como Indio, Azufre, Estaño y cobre que se encuentran en Bolivia.

Tabla1. Yacimientos de materias primas de interés para SFVs Localizados en Bolivia

Yacimiento	Departamento	Localidad	Mina
Indio	Potosí	Mallku khota	Mallku khota, Porco
	Oruro		Bolivar, Colquiri
Azufre [9][10]	Oruro	Provincia Sajama	Capurata
Estaño [11][12]	La Paz		Viloco, Caracoles
	Oruro		San Jose, Llallagua, Huanuni, Avicaya, Totoral
Cobre [13]	Oruro	Coro Coro	Coro Coro, Chacarilla

Hasta la fecha Bolivia es uno de los países que no tiene desarrollo a nivel investigación ni tecnológico en la generación fotovoltaica teniendo un gran potencial y disponibilidad de recursos naturales para ser utilizados como materia prima, por tanto este trabajo desea hacer un aporte al desarrollo energético fotovoltaico en Bolivia utilizando en gran medida recursos naturales con los que disponemos.

## Referencias

- [1] Ecologistas en acción, La Demanda de Paneles Solares Fotovoltaicos Supera a la Oferta, Febrero, 2005
- [2] Miguel Fernadez, UMSS- Miguel Morales USP, Costos de Generacion de Electricidad Fotovoltaica en Bolivia y Barreras para su Expansión. Energética, Octubre 2012
- [3] Revista Elementos, Estado Actual de la Celdas Solares Basadas en Capas Absorbentes de Bajo Costo, Universidad Nacional de Colombia, 2012
- [4] XIII congreso Venezolano de Microscopia y Microanálisis, Oxidos Conductores transparentes, sus aplicaciones y su Caracterizacion por diversas técnicas de microscopia, Noviembre 2012. Dwight R. Acosta Najarro
- [5] (Lincotetal 1995)].



- [6] conversión fotovoltaica de la energía solar por Gerardo gordillo G. Rev Acad. Colomb. Cienc. 22 (83): 203-211,1998
- [7] Revista Elementos, Síntesis de Capas Buffer para Celdas Solares de Película Delgada, William A. Vallejo Lozada, Volumen 2012
- [8] Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias, Departamento de Química - Laboratorio de Investigaciones Básicas Bogotá D.C., Colombia 2011)
- [9] [Maria Beatriz Ponce y Martin Torrez Duggan, tema: yeso]
- [10] experiencias de Bolivia sobre la industrialización de los recursos naturalesr, Benjamin Grossman, la Paz - Bolivia
- [11] <http://www.opinion.com.bo/opinion/articulos/2013/0419/noticias.php?id=92295>
- [12] <http://www.bolivia.com/geografiadebolivia/cap21.htm>
- [13] Minería del Cobre del Altiplano Boliviano Salomón Rivas, 2011 (204 paginas





## GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD PRODUCIDA POR EL CRECIMIENTO CELULAR DE LA BACTERIA *H. BOLIVIANENSIS* EN PILAS COMBUSTIBLES MICROBIANAS



**Milka M. Torrico T, Iván Ruiz Ucumari, Rober Mamani Camacho,  
Jorge Quillaguamán Leytón**

Departamento de Física, Centro de Biotecnología, Planta Piloto de Bioprocesos, Laboratorio de automatización y control, Facultad de Ciencias y Tecnología  
Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba

**Palabras clave:** Pilas combustibles, *Halomonas boliviensis*, bioelectricidad.

### Resumen

Las pilas combustibles microbianas están siendo usadas en plantas piloto de generación de energía eléctrica en países como: Japón. En estas pilas el microorganismo se encuentra en el ánodo y el oxígeno puede ser empleado como el agente oxidante en el cátodo. En nuestros estudios de investigación, se usó la bacteria *H. boliviensis* como fuente de electrones en el ánodo constituyéndose en los primeros estudios realizados en Bolivia sobre la producción de bioelectricidad. De acuerdo a estudios preliminares en esta área; usando diferentes electrodos y diferentes cantidades de grafito en polvo en el ánodo nos condujeron a una conclusión: que el uso de acero inoxidable (304) como electrodo con una cantidad de 0.2% (masa/volumen) de grafito en polvo en el ánodo y un electrodo de grafito sólido en el cátodo proveen las mejores condiciones para el transporte de la electricidad, entre otros ensayos. Bajo estas condiciones se obtuvo una intensidad de corriente de 36.7  $\mu\text{A}$  por litro del medio de cultivo para la bacteria. La adición de grafito en el cátodo produjo una disminución en la corriente a 25.5  $\mu\text{A/l}$ . Estos resultados demuestran la factibilidad de la generación de electrones usando microorganismos aislados de Bolivia. Estudios científicos adicionales están siendo desarrollados en nuestros laboratorios para optimizar el bioproceso.

### Referencias

- Quillaguamán J., Mattiasson B., Hatti-Kaul R., Alvarez MT., Delgado O. (2004) *Halomonas boliviensis* sp. nov., an alkalitolerant, moderate halophile isolated from soil around a Bolivian hypersaline lake. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* Vol. 54, pp. 721-725.
- Quillaguamán J., Delgado O., Mattiasson B., Hatti-Kaul R. (2006) Poly( $\beta$ -hydroxybutyrate) production by a moderate halophile, *Halomonas boliviensis* LC1. *Enzyme and Microbial Technology*, Vol. 38, pp. 148-154
- Quillaguamán J., Van-Thuoc D., Guzmán H., Guzmán D., Martín J., Akaraonye E., Hatti-Kaul R. (2008) Poly(3-hydroxybutyrate) production by *Halomonas boliviensis* in fed-batch culture. *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol. 78, pp. 227-232



## FLUJO ENERGÉTICO ENTRE BACTERIAS HALÓFILAS AISLADAS CULTIVADAS EN BIORREACTORES INTERCONECTADOS POR UNA MEMBRANA CATÓNICA



**Rober Mamani Camacho, Iván Ruiz Ucumari, Jorge Quillaguamán Leytón**

Planta Piloto de Bioprocesos, Centro de Biotecnología, Facultad de Ciencias y Tecnología,  
Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba

**Palabras clave:** Bacterias Halófilas, Bioreactor, Bioplásticos, ectoina,

### Resumen

Los microorganismos que requieren sal (NaCl) para crecer son denominados halófilos. Nosotros aislamos microorganismos halófilos de la Laguna colorada, uno de ellos fue llamado *Halomonas boliviensis* y recientemente aislamos dos cepas del Salar de Uyuni, estas cepas fueron llamadas BU-1 y BU-2 y una nueva especie aislada de Tarija llamada *Marinococcus tarijensis*. Las cepas fueron identificadas por métodos moleculares, utilizando la secuencia del ADN denominada 16S. En nuestros estudios encontramos que la cepa BU-2 es una bacteria llamada *Salinococcus roseus*, pero encontramos también que la cepa BU-1 corresponde a un nuevo género que todavía no fue descrito en el mundo. Inicialmente se determinó el efecto del crecimiento de *H. boliviensis* y *M. tarijensis*, en dos biorreactores separados por una membrana catiónica. *H. boliviensis* creció en un medio de cultivo que le induce a producir bioplásticos en el biorreactor 1 y *M. tarijensis* creció en un medio de cultivo complejo llamado TSB, y además se usó agua destilada en el biorreactor 2 como blanco para nuestros experimentos. Observamos que el peso seco de *H. boliviensis*, 5.4 g/L, aumentó ligeramente respecto al blanco, 5.1 g/L cuando *M. tarijensis* creció en medio de cultivo TSB, estos resultados sugieren que *H. boliviensis* puede usar toda la energía celular para crecer y producir el bioplástico. Además observamos que *M. tarijensis* duplicó su peso seco respecto a su crecimiento en el medio complejo TSB sin el efecto de del crecimiento paralelo de *H. boliviensis* en el reactor 1; esto es en el reactor 1 se usó solo el medio de producción de PHB y no se incluyó la bacteria *H. boliviensis*. Estos resultados implican que *H. boliviensis* también puede generar un exceso de energía que es capaz de migrar al reactor 2, a través de la membrana cationica e inducir el crecimiento de *M. tarijensis*. Es importante manejar el flujo energético entre estas dos bacterias porque la primera, *H. boliviensis*, genera bioplásticos; mientras la segunda genera osmolitos, como la ectoina que es conocida como un humectante natural. Tanto bioplásticos como la ectoina son productos de interés comercial. En nuestro trabajo, nosotros demostramos que ambos compuestos pueden ser generados por el mismo proceso, manipulando el flujo energético entre bacterias de diferentes especies. Estudios adicionales están siendo realizados con las bacterias aisladas del Salar de Uyuni.

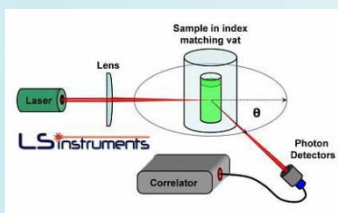


## REFERENCIAS

- Quillaguamán J., Mattiasson B., Hatti-Kaul R., Alvarez MT., Delgado O. (2004) *Halomonas boliviensis* sp. nov., an alkalitolerant, moderate halophile isolated from soil around a Bolivian hypersaline lake. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* Vol. 54, pp. 721-725.
- Quillaguamán J., Delgado O., Mattiasson B., Hatti-Kaul R. (2006) Poly( $\beta$ -hydroxybutyrate) production by a moderate halophile, *Halomonas boliviensis* LC1. *Enzyme and Microbial Technology*, Vol. 38, pp. 148-154
- Balderrama-Subieta A., Guzmán D., Minegishi H., Echigo A., Shimane Y., Hatada Y., Quillaguamán J. (2013) *Marinococcus tarijensis* sp. nov., a moderately halophilic bacterium isolated from a salt mine. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* Vol. 63, pp. 3319–3323



## MÉTODOS ÓPTICOS DE ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE NANOPARTÍCULAS



**Eduardo R. Palenque**

Instituto de Investigaciones Físicas (IIF)  
Universidad Mayor de San Andrés (UMSA)

**Palabras clave:** *Nanopartículas, caracterización óptica*

La promesa de la nueva tecnología basada en las propiedades cuánticas de los materiales que se manifiestan cuando una de las dimensiones de la muestra es del orden del nanómetro, es uno de los temas con mayor interés para la ciencia del siglo XXI. La gran ventaja de esta nueva tecnología sobre la tradicional es que, al tratar con propiedades manifiestamente cuánticas, presentan efectos que normalmente no son observados a escala macroscópica. La mayor parte de las propiedades y características físicas de los materiales industriales son del tipo clásico y macroscópico, ya sea que se trate de efectos mecánicos, eléctricos u ópticos; aprovechando las estructuras atómicas o moleculares promediadas entre una gran cantidad de unidades; por lo cual se aplican las técnicas de la mecánica estadística.

Desde hace varias décadas se están desarrollando técnicas para conseguir manejar materiales que tienen por lo menos una dimensión que está en el orden de los nanómetros. Por ejemplo, las microfibras metálicas que crecen sobre superficies desestabilizadas y, comúnmente denominadas “wiskers”; son monocristales, es decir forman una sola entidad cristalina, con todos los átomos completamente ordenados. Una de las mayores diferencias con los metales comunes, que son policristalinos, está en sus propiedades mecánicas, ya que el módulo elástico o de Young, es casi mil veces mayor en los wiskers que en los alambres comunes hechos con el mismo metal. Los estudios del universo de la nanociencia están transformándose en una nanotecnología, con aplicaciones a pequeña y gran escala. Actualmente se encuentran ya comercializadas varias pinturas que han incorporado nanopartículas a la fórmula, que mejoran tanto la intensidad de los colores como de la reflectividad de los acabados; ya que modifican el índice de refracción de la mezcla, que es una propiedad óptica. También existen aplicaciones de las nanopartículas en la industria farmacéutica, ya que se han desarrollado métodos que permiten contener alguna molécula activa dentro de una estructura de otras moléculas que encapsulan a las primeras, dejando una miscela de tamaño equivalente a las propias moléculas, del orden de la centena de nanómetros. Aquí domina el carácter molecular de la cápsula, con extremos hidrofílicos o hidrofóbicos, que se define por las propiedades electrostáticas de las miscelas. En los casos nombrados, como en muchos otros, el parámetro fundamental es el tamaño de la nanopartícula, sea el verdadero un “diámetro equivalente”; que generalmente se determina por métodos aerodinámicos.

La teoría para determinar el tamaño de las partículas en una suspensión se basa en los conceptos del “movimiento Browniano”, descubierto por Robert Brown en 1827, y explicado por



Albert Einstein, en 1905 (1); con el resultado que el movimiento de las partículas suspendidas depende de una serie de parámetros, según la ecuación 1

$$D = \frac{k_B T}{\gamma} = \frac{k_B T}{3\pi\eta d} \quad [1]$$

Donde D es el coeficiente de difusión,  $k_B$  es la constante de Boltzmann, T es la temperatura de la suspensión,  $\eta$  es la viscosidad del medio, d es el diámetro dinámico de la partícula; es decir es el diámetro efectivo que tienen las partículas si se las considera como esferas. Este diámetro depende de la temperatura, la viscosidad y el coeficiente de difusión. El último es una característica del material de las partículas, mientras que las dos primeras, son propiedades del medio de la suspensión. Cuando un haz de luz incidente sobre estas partículas produce un patrón aleatorio de puntos de diferente tamaño, forma e intensidad. Ese patrón es resultado de la interferencia de las ondas dispersadas que salen de las partículas en toda dirección. Como las partículas no están fijas, y se mueven en forma aleatoria, se tiene una variación fluctuante de la intensidad de la luz dispersada, que puede calcularse con la ecuación 2:

$$\Gamma = 2q^2 D = \frac{32\pi n^2 k_B T}{3\eta \lambda^2} \frac{\sin^2(\theta/2)}{d} \quad [2]$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz incidente,  $\theta$  es el ángulo de dispersión respecto de la dirección del haz incidente, q es el vector de dispersión y n es el índice de refracción del medio. (2). Al medir la cantidad  $\Gamma$  para distintos ángulos, longitudes de onda y temperaturas; se puede encontrar el factor de autocorrelación que disminuye exponencialmente con el tiempo; lo que significa que a tiempos muy grandes, la correlación desaparece, y se tiene el caso estadístico aleatorio.

## REFERENCIAS

- 1) Einstein, Albert “Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen”, Ann. Phys. 1905, 17: 549 – 560.
- 2) Valdés, C.P. et al. “Observación y estudio del movimiento browniano utilizando la dispersión de luz laser”, Revista Colombiana de Física, 2003, 35: 144 – 147.

## ANÁLISIS DE LA INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS RENOVABLES EN EL SISTEMA ELÉCTRICO BOLIVIANO



**Joseph Adhemar Araoz Ramos**  
 Royal Institute of Technology  
 Universidad Mayor de San Simón

**Palabras clave:** LEAP, Integración, Energía renovables, Análisis de Escenarios

El sistema eléctrico Boliviano presenta el desafío de garantizar la seguridad Energética, con una cobertura tanto en las zonas urbanas y rurales del país. Actualmente se tiene una cobertura eléctrica del 77.1 % , con una alta asimetría que representa una cobertura del 90% en el área urbana y 50% en el área rural [1]. En este escenario el Ministerio de Hidrocarburos de Bolivia presenta los planes : Plan de Universalización de Bolivia con Energía [1], y el Plan Optimo de Expansión del Sistema Interconectado Nacional (SIN), 2012 – 2022 [2] con el objetivo de garantizar el derecho al acceso universal eléctrico y sustentar el desarrollo económico del país. El sistema Eléctrico Boliviano está actualmente conformado por el Sistema Interconectado Nacional (SIN), y los Sistemas Aislados (SA). La potencia total instalada a nivel nacional a Diciembre 2009 fue de 1529 MW, correspondiendo un 92% de la generación al SIN [1]. La capacidad de generación instalada en el SIN, a octubre 2011, corresponde a 1.221 MW de los cuales 475.7 MW (34,6%) corresponden a centrales hidroeléctricas y 745.3 (64.4%) a centrales termoeléctricas. La capacidad de Generación total ascendió a 6263 GW-h.

Como se puede apreciar el SIN, esta principalmente basado en el uso intensivo de gas natural para las termoeléctricas, situación que se pretende modificar con la propuesta del plan óptimo de expansión donde la generación eléctrica propuesta pretende alcanzar una estructura donde la participación hidroeléctrica alcance el 53%, Termoeléctricas 30%, Ciclo combinado 10 %, Geotérmica y biomasa 7% hasta el año 2050.

Analizando el plan de expansión, se identifica la necesidad de considerar escenarios adicionales que incluyan la posibilidad de integración de tecnologías alternativas, eólica, solar, biomasa y geotérmica a mayor escala de la propuesta en el SIN. Es en este sentido que el presente trabajo, asume la viabilidad técnica de estas alternativas y estudia la posible integración de estas en el Sistema Eléctrico Boliviano. Con este objetivo, se consideran 3 posibles escenarios de expansión hasta el año 2050. El primer escenario representa al plan de expansión del SIN con la matriz energética descrita anteriormente, denominado escenario BAU (Business as usual). El segundo escenario presenta la inclusión moderada de tecnologías alternativas, escenario MOD. Finalmente el tercer escenario presenta la inclusión extensiva de tecnologías alternativas, escenario EXT. El siguiente cuadro resume las principales características de las alternativas tecnológicas consideradas en los 3 escenarios, para complementar a los proyectos considerados en el SIN.





**Tabla 1: Alternativas Tecnológicas para la expansión del sistema Eléctrico**

Tecnología	Capacidad (MW)	Eficiencia		Factor de Capacidad <sup>1</sup> (%)	Capacity Credit <sup>2</sup> (%)	Costo Inversión (US Dollars/kW)		Costos O.M. <sup>3</sup> (%)	Vida Útil (años)
		2011	2050			2011	2050		
Biomasa L. fluidizado	100	40	40	80	100	1975	1760	5	40
Biomasa IGCC <sup>4</sup>	400	42	50	80	100	4320	3211	6	40
Eólica	2	--	--	30	20	1200	783	3	20
Solar Fotovoltaico	50	--	--	25.5	10	3705	693	1	30
Solar CSP <sup>5</sup>	100-150	---	---	56	50	3872	1478	4	30
Planta Geotérmica	50	---	---	80	100	1685	1203	2	40

<sup>1</sup> El factor de capacidad o máxima disponibilidad es el cociente entre la energía actual producida y la potencial a producir si el sistema funcionara al 100% de capacidad durante un periodo.

<sup>2</sup> El factor capacity credit es la fracción de la capacidad del sistema que contribuirá con energía firme para mantener un margen de reserva determinado. Tecnologías intermitentes como la eólica tienen bajos valores

<sup>3</sup> O.M. Costos de operación y mantenimiento como porcentaje del costo de inversión total.

<sup>4</sup> IGCC. Integrated Gasification Combined Cycle (Ciclo combinado con casificador integrado).

<sup>5</sup> CSP. Concentrated Solar Power Plant (Plantas de Concentradores Solares).

Los costos de instalación, operación y las eficiencias fueron estimadas siguiendo la metodología de curvas de experiencia, que asume un incremento de la penetración de las tecnologías renovables en el mercado mundial y por tanto una disminución de los costos de instalación y operación [4]. Para la simulación de los escenarios mencionados se utilizó el Software LEAP (Long Range Energy Alternative Planning System) [5]. Mediante este software se analizaron los escenarios descritos, limitando la simulación a los sistemas de generación, sin considerar los costos de la expansión de líneas de transmisión como parte de este estudio. La simulación considera también, una proyección del perfil de la demanda eléctrica anual durante los años 2011- 2050, dividiendo la demanda en Carga Base (Base Load), Carga normal (Normal Load), Carga Pico (Peak Load). Es de acuerdo a este perfil que se distribuye el portafolio de tecnologías para mantener un margen de reserva determinado. Se consideran que los sistemas hidráulicos tienen una mejor capacidad para cubrir demandas base (base load), y otras tecnologías tienen factores de capacidad más adecuados para cubrir demandas pico (peak load). También se considera la intermitencia en la generación con el factor “capacity credit”, descrito en la tabla 1.

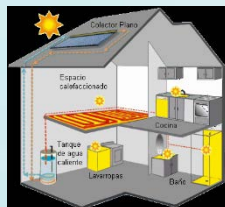
Los resultados de la simulación confirman, el gran potencial de los sistemas hidráulicos dentro el portafolio tecnológico, la participación de esta tecnología aumenta desde 31 % en 2011, hasta alrededor 51 % en 2050 en todos los escenarios. Esto se puede atribuir a la alta capacidad para cubrir las demandas base de estos sistemas. El portafolio se diversifica con el ingreso de la energía eólica que también representa un gran potencial, llegando a ser posible su participación hasta en un 10 % , para el 2050 en el escenario de uso extensivo de renovables. Esta tecnología alcanza precios competitivos antes que las demás alternativas, pero la intermitencia en generación limita su potencial. Por otro lado los elevados costos de las plantas basadas en biomasa limitan el ingreso de estos sistemas, necesitando de políticas de incentivo que permitan su integración, de la misma forma los sistemas solares presentan costos muy elevados y una alta intermitencia en los sistemas fotovoltaicos. El presente trabajo será complementado con un análisis de las emisiones en los 3 escenarios y con un estudio de optimización para determinar el escenario menos costoso y con menos emisiones, mediante el uso de OSEMOYS integrado al estudio en LEAP.



## REFERENCIAS

- 1] Viceministro de Electricidad y Energías Alternativas, “Plan de Universalización Bolivia con Energía,” 2010.
- [2] Ministerio de Hidrocarburos y Energía, “Plan Óptimo de Expansión del Sistema Interconectado Nacional 2010 - 2022,” 2012.
- [3] Ministerio de Hidrocarburos y Energía, “Plan de Desarrollo Energético Análisis de Escenarios : 2008-2027,” 2009.
- [4] European Commission, “New Energy Externalities Developments for Sustainability. Cost development – An analysis based on experience curves,” 2006.
- [5] SEI Stockholm Environment Institute, “Long-range energy alternatives planning system LEAP user guide.” 2006.

## EFICIENCIA ENERGÉTICA EN SISTEMAS DE CALEFACCIÓN EN BASE AL MÉTODO DE BALANCE TÉRMICO DE FÁNGER



**Miguel A. Ruiz Orellana** - [miguelruiz@utonet.edu.bo](mailto:miguelruiz@utonet.edu.bo)

Ingeniero Mecánico, Facultad Nacional de Ingeniería,  
Universidad Técnica de Oruro, Carrera de Ingeniería Mecánica, Ciudadela Universitaria,  
Zona sud, Oruro-Bolivia.

**Carlos A. Flores Castillo** [cafcastillo@hotmail.com](mailto:cafcastillo@hotmail.com)

Ingeniero Mecánico, Facultad Nacional de Ingeniería Universidad Técnica de Oruro,  
Carrera de Ingeniería Mecánica, Ciudadela Universitaria, Zona sud, Oruro-Bolivia.

**Palabras Claves:** Eficiencia energética, Fanger, Confort, Térmico, ISO 7730:2006

### Resumen

El presente estudio se ha realizado en el departamento de Oruro, ubicado en el occidente de Bolivia, a 3605 m.s.n.m. se encuentra en la zona altiplánica del país. La temperatura externa promedio es de 10 °C; sin embargo en los meses de invierno este promedio baja a temperaturas inferiores a los 5 °C (desde -10 °C por las mañanas hasta 15 °C por las tardes). Realizando un estudio comparativo del comportamiento de la temperatura al interior de un aula respecto de la temperatura exterior, se ha encontrado que mientras la temperatura externa máxima era de 17 °C, la temperatura interna fue de 12 °C; y a la vez mientras la temperatura externa mínima registraba -3.8 °C, la interior era de 8.5 °C [1]. Este rango de temperatura ambiente interior expresa condiciones adversas a la sensación de confort, sobre todo para salas de estudio.

A la vez se ha observado el comportamiento y vestimenta de los estudiantes de la universidad local, encontrando de forma general que estos en la temporada de invierno mantienen puesto la chamarra en el transcurso del día, vale decir que cerca de 17 °C no sintiendo incomodidad por la ropa. Esta apreciación abrió paso a postular unas condiciones de confort particulares, en la cual la temperatura de confort térmico iría por los 17 °C (esto considerando el tipo de vestimenta que llevan) variando de la temperatura estipulada en la norma ISO 7730: 2006 [2], con un valor de confort térmico entre 18 °C y 22 °C.

La implicación de estos parámetros repercutiría directamente en la cantidad de energía requerida para conseguir el salto térmico entre la temperatura inicial del ambiente 8.5 °C y la temperatura final, en un caso 17 °C ( $\Delta T=8.5$  °C) y en el otro 22 °C ( $\Delta T=13.5$  °C).

Para realizar el estudio se ha tomado como base el Método de Fanger [3] para la valoración de la sensación térmica global. Según esta ecuación deben cumplirse tres condiciones básicas: Equilibrio térmico entre el cuerpo y el ambiente; tasa de sudoración dentro de los límites de confort; temperatura media de la piel dentro de los límites de confort. El modelo matemático de Fanger conduce a una expresión que estima el PPD (porcentaje de personas insatisfechas)





obtenido a través del cálculo del PMV (Voto Medio Estimado). A la vez se ha determinado por medio de encuestas [1] que existía una sensación de insatisfacción térmica localizada en la zona de los pies [2], por lo cual se considerado implementar un sistema de calefacción por losa radiante.

En el experimento se ha trabajado con un valor de metabolismo  $MET=1.2$  obtenido conforme norma ISO 8996 [4] y determinado un valor medio de aislamiento de ropa  $CLO=1.18$  conforme ISO 9920 [5]. Con una temperatura promedio de  $16^{\circ}C$ , se obtuvo un  $PMV = -0.458$  y un  $PPD = 9.375\%$ , valor que es aceptable. La misma prueba en las aulas a las 8:30 de la mañana cuando la temperatura estaba alrededor de  $6^{\circ}C$  obteniendo un  $PMV = -1.87$  y un  $PPD = 61.17\%$  valor de evidente insatisfacción.

Realizando el cálculo de la potencia requerida para obtener los saltos térmicos mencionados anteriormente en un ambiente de  $10m*5m*3.2m$ , se obtiene en un primer caso  $P=1.4$  kW ( $\Delta T=8.5^{\circ}C$ ), mientras para el segundo  $P=3.1$  kW ( $\Delta T=13.5^{\circ}C$ ), obteniéndose una diferencia de consumo energético de 45%.

La presente propuesta, basada en considerar una temperatura de confort inferior a la sugerida por ASHRAE [6], sustentada por el hábito en el uso de la vestimenta, representa una referencia y consideración importante a momento de dimensionar los sistemas de calefacción aplicados a aulas de enseñanza.

## REFERENCIAS

1. Ruiz M., F.C., *Sistema de Calefacción Asistido por Energía Solar*. Vol. 1. 2008: U.T.O.
2. Asociación Española de Normalización y, C., *UNE-EN ISO 7730:2006. Ergonomía del ambiente térmico*. 2006, Madrid: Aenor. 58.
3. Arquitectónica, D.d.C.y. *Método de Fanger*. 2008 [cited 2008; Available from: <http://editorial.dca.ulpgc.es/>.
4. International Standard, O., *ISO 8996:Documentation. Determinación de la tasa metabólica*.1982, Genève: Iso.
5. International Standard, O., *ISO 9920:Documentation. Estimacion del aislante térmico y la resistencia a la evaporación de un conjunto de ropa.*, Genève: Iso.
6. ASHRAE, *Fundamentals Handbook*2001, New York: Ashrae.



## RECUPERACION DE INDIO EN BOLIVIA



**Fausto Alfredo Balderrama Flores**

### Resumen

El indio es un metal blanco plateado, maleable y dúctil. Tiene propiedades altamente plásticas aun a temperaturas bajo cero. Tiene un punto de fusión bajo ( $153^{\circ}\text{C}$ ) y no se oxida a temperaturas ambientales. En la naturaleza, no se presenta al estado nativo, sino como compuesto, y siempre en cantidades muy pequeñas (trazas), típicamente entre 10 a 20 ppm, acompañando a minerales como la esfalerita, galena, sulfuros de cobre, estanina, casiterita, wolframita y otros. Excepcionalmente se han encontrado menas que contenían hasta 1% (10000 ppm) de indio.

El indio se utiliza principalmente como óxido de indio y estaño (ITO, indium-tin oxide) que sirve para la fabricación de pantallas planas utilizadas en dispositivos electrónicos (teléfonos móviles, ordenadores portátiles, monitores, televisores, cámaras digitales, etc.). Más del 80% del consumo del indio se debe a la producción de pantallas planas. Otros usos del indio son en soldaduras, aleaciones, componentes eléctricos, semiconductores y compuestos intermetálicos. El indio se utiliza también y cada vez más en la fabricación de celdas solares (celdas solares que utilizan seleniuro de cobre e indio, telurio de cadmio y silicio amorfo como materia prima). Debido al incremento en la demanda del indio, por su utilidad en las aplicaciones mencionadas, su precio se ha incrementado y actualmente está en alrededor de 500 \$us/kg.

El contenido bajo de indio en menas y concentrados (alrededor de 70 a 200 ppm en concentrados), no permite su obtención directa, si no que para que sea rentable debe obtenerse como subproducto de una planta metalúrgica de zinc, plomo, cobre o estaño. Actualmente alrededor del 95 % del indio es producido como subproducto en plantas metalúrgicas de zinc a partir de minerales de sulfuro de zinc. La tecnología para la recuperación de indio en estas plantas son combinaciones de procesos metalúrgicos conocidos como lixiviación, extracción solvente, precipitación iónica, electrodeposición, etc.

Bolivia produce minerales de zinc, plomo, estaño, cobre, wólfam y los exporta como concentrados sin cobrar su contenido de indio, que en algunos casos es importante. Algunas minas bolivianas en las cuales se ha detectado la presencia de indio en sus minerales son, Colquiri, San Luis, Colquechaca, Huari Huari, San Vicente y Pulacayo. El depósito de Mallku Khota, que contiene In, Ag y Ga, aunque de baja ley, debido a su extensión, es uno de los más grandes del mundo.

Para recuperar indio en Bolivia se hace necesaria la instalación de plantas metalúrgicas de metales, en particular una planta metalúrgica de zinc en base minerales sulfurosos de zinc con contenidos de indio, que permita, además de recuperar zinc metálico, recuperar el indio como valioso subproducto.



## TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN DE PASTA DE COLAS DE PROCESAMIENTO DE MINERALES

**Dip. Ing. Jorge Lema Patino**  
Presidente Mineral Processing

### Resumen

El problema del manejo ambiental de las colas convencionales que se producen en el procesamiento de minerales, se refleja en el excesivo consumo (perdida) de agua y en el alto riesgo de deposición de este tipo de colas, por la elevada producción del DAR y otros imponderables que afectan las zonas de influencia agrícola; afectación a las corrientes hídricas subterráneas; desastres que ocurren ante eventuales movimientos sísmicos y por la inestabilidad de este tipo de deposición de colas. En efecto, han ocurrido desastres ambientales con este tipo de deposición de colas convencionales tanto en Bolivia como en otros países.

La tendencia actual es producir colas con alta densidad, elevado contenido de sólidos aplicando tecnologías de filtración de elevado costo, y/o la producción de colas en pasta, mediante espesadores de alta tecnología, previa caracterización del material, antes de su deposición final incluyendo el cierre del depósito.

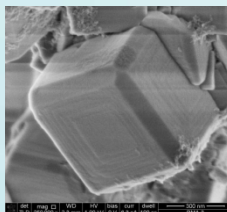
La formación de colas pasta, implica el conocimiento de la reología del material que incluye varios criterios mineralógicos y técnicos que están aún en etapa de investigación y conocimiento a nivel Mundial.

En Bolivia, Mineral Processing ha investigado la aplicación de esta tecnología, realizando estudios mineralógicos, reológicos y otros que determinan las condiciones para la producción de colas pasta de un caso específico que se presenta en la disertación.





## SINTESIS DE ZEOLITA Y A PARTIR DE DIATOMITA BOLIVIANA CON POTENCIAL APLICACIÓN EN CRAQUEO E HIDROCRAQUEO CATALITICO



**Edgar V. Cardenas 1, Valeria Rodríguez 1, Gustavo García 1,3, Saúl Cabrera 1,2**

1: Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), Instituto de Gas Natural (IGN), Campus Universitario, Calle 27 Cota Cota. La Paz, BOLIVIA.

2: Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), Instituto de Investigaciones Químicas (IIQ), Campus Universitario, Calle 27 Cota Cota. La Paz, BOLIVIA

3: Luleå University of Technology. Sustainable Process Engineering Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, SE-971 87 Luleå, SWEDEN.

**Palabras clave:** Aluminosilicatos, Zeolita Y, FCC

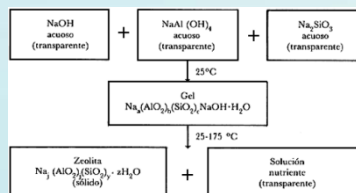
El uso de materiales naturales con bajo costo y alta presencia de Aluminosilicatos en la producción de zeolitas sintéticas ha llamado la atención de varios investigadores; el procedimiento más conocido para la preparación de zeolitas es mediante el uso de reactivos químicos de alta pureza, lo cual involucra un gasto elevado de producción de estos materiales; motivo por el cual el uso de reactivos naturales reducirá drásticamente el costo de la producción de zeolitas. Como es de conocimiento público Bolivia posee recursos minerales no metálicos en gran escala y prácticamente con baja utilización. Se está realizando un estudio acerca de la potencialidad de las aplicaciones de estos recursos para la obtención de Zeolitas.

Las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos con propiedades porosas especiales únicas; estos compuestos poseen una estructura tridimensional compuesta por silicio ( $\text{SiO}_4$ ) y aluminio tetraedral ( $\text{AlO}_4^-$ ) enlazados por átomos de oxígeno y cationes compensadores de carga; estas estructuras forman un entramado tridimensional los cuales están en el rango de microporos (~2 -10 nm). El amplio rango de aplicaciones de zeolitas va desde intercambio iónico, mallas moleculares para la remoción de solventes, separación de gases, catálisis y últimamente para remediación ambiental. Muchas de estas zeolitas son utilizadas comercialmente y son sintéticamente producidas utilizando reactivos químicos y hoy por hoy materiales de partida naturales (1) (2).

Una de estas zeolitas de interés particular es la zeolita Y (FAU), la cual posee una relación  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  entre 4-20, esta zeolita es utilizada ampliamente en la catálisis para la conversión de hidrocarburos, debido a su gran apertura porosa; a lo que se suma la alta concentración de sitios ácidos activos, su alta selectividad de tamaños (tamaño de poro de 7,4 Å) y su estabilidad termal (se descompone a 793 °C). Es comercialmente utilizada como catalizador en refinación de petróleo.



La producción de la zeolita Y a nivel industrial utiliza la técnica sol – gel para su síntesis, partiendo de reactivos muy costosos, en el cuadro siguiente se muestra un poco de ésta síntesis (3).



La zeolita comercial Y que se utiliza para craqueo catalítico tiene un precio que oscila entre 14 – 18 \$us por kilogramo.

En los catalizadores utilizados para procesos de craqueo, la cantidad de zeolita representa entre el 10 – 30% en peso y mejora la actividad de las matrices de alúmina utilizados para este propósito en más de 10 veces (4), (5). La relación alimentación/ catalizador es aproximadamente 9:1 y el catalizador tiene actividad de acuerdo a la continuidad en su uso y la cantidad de carga tratada, su tiempo de vida útil oscila entre 50 – 100 días cuando tiene un uso continuo en las unidades de FCC.

El FCC es uno de los procesos más significativos en el refinamiento de petróleo, actualmente las ventas de catalizador de FCC alcanzan los 1000 Millones de Dólares Americanos por año, representando el uso de Catalizadores basados en zeolitas alrededor de 500.000 toneladas métricas por año, lo que resulta en la producción de 20.000 toneladas métricas de Zeolita Y (6). En el presente trabajo se utilizó una diatomita natural Boliviana proveniente del Altiplano, de la localidad de Llica (Potosí), aquí denominada Murmuntani (7). Mediante un tratamiento previo de la diatomita, se realizó la síntesis de zeolita Y (además de otras zeolitas) bajo condiciones alcalinas y tratamiento hidrotermal controlado. Varios parámetros de síntesis fueron estudiados, y se encontró que el tiempo de tratamiento hidrotermal, así como la cantidad de sodio (expresada como Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub>) tienen un gran efecto en la relación de SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de la zeolita Y final. Se propone la utilización del producto de zeolita Y con la más alta cristalinidad y más alta relación de SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> como componente para catalizadores de FCC e Hidrocraqueo, debido a que este factor tiene un factor influyente en la estabilidad térmica del catalizador en general.

## REFERENCIAS

- (1) Breck, D.W. 1974. Zeolite Molecular Sieves. 1974. pág. 771.
- (2) Giannetto P., G. 1990. *Zeolitas. Características, propiedades y aplicaciones industriales*. Caracas : Editorial Innovacion Tecnologica, 1990.
- (3) Isaac schifter, Pedro Bosch. La zeolita una piedra que hierve. Segunda edición. 1997. Mexico.
- (4) Niccum, Phillip K. y Santner, Chris R. 2006. KBR FLUID CATALYTIC CRACKING PROCESSES. [aut. libro] Robert A. Meyers. *Handbook of Petroleum Refining Processes* s.l.: Mc Graw - Hill, 2006
- (5) Wu-Cheng Cheng, E. Thomas Habib Jr.\*, Kuppuswamy Rajagopalan, Terry G. Roberie, Richard F. Wormsbecher, and Michael S. Ziebarth. 2008. Fluid Catalytic Cracking. [aut. libro] Helmut Knözinger, Ferdi Schüth, Jens Weitkamp Gerhard Ertl. *Handbook of Heterogeneous Catalysis Vol. 1*. Weinheim: Wiley-VCH, 2008, págs. 2741-2778



- (6) Thomas F. Degnan, Applications of Zeolites in Petroleum Refining, Topics in Catalysis 13 (2000) 349–356.
- (7) Acarapi, Wilber. 2012. ESTUDIO Y APLICACIÓN DE LOS RECURSOS DIATOMACEOS DE LAS LOCALIDADES CHARAÑA Y BELLA VISTA, DEPARTAMENTOS DE LA PAZ Y POTOSI. [Tesis de Licenciatura]. La Paz: s.n., 2012.





## DIAGNOSTICO DE LA SITUACION AMBIENTAL MINERA EN BOLIVIA



**María Eugenia García** - [maugegarcia@hotmail.com](mailto:maugegarcia@hotmail.com)

Instituto de Investigaciones Químicas, Universidad Mayor de San Andrés,  
Cota Cota – Campus Universitario,  
P.Box 10201 La Paz – Bolivia

Bolivia es un país que cuenta con importantes recursos minerales y tiene además una larga tradición minera que data desde culturas precolombinas. Sin embargo, esta importante actividad ha sido manejada en forma ambientalmente irresponsable y es la causa de la producción de drenajes ácidos, de la acumulación y transporte de metales tóxicos y de la acumulación de restos de minerales, causando riesgos a la población, la flora, la fauna y principalmente de la degradación de los recursos hídricos.

Este estudio muestra la distribución y niveles de arsénico y metales pesados en Bolivia y particularmente en la región minera del Altiplano Central Boliviano donde existe la mayor actividad minera.

Para el presente estudio se analizaron parámetros de campo, aniones y cationes mayoritarios y principalmente arsénico, plomo, hierro, cadmio y zinc en muestras de aguas superficiales, agua subterránea y sedimentos, donde se determinó además mercurio.

Para los análisis se utilizaron las técnicas de Fluorescencia de Rayos X y Espectrofotometría de Absorción Atómica con Horno de Grafito, además de cromatografía de iones para el análisis de aniones. Los resultados muestran bajos valores de pH como el caso del río Sora Sora y Pazña ( $2.2 \leq \text{pH} \leq 4.0$ ), pero también valores elevados de pH como el caso del río Poopó ( $8.3 \leq \text{pH} \leq 9.6$ ), el cual recibe alrededor del 28% de aguas termales, razón por la cual tiene un valor elevado de pH. Debido a las diferentes actividades mineras, estos ríos tienen concentraciones bastante significativas de metales pesados, valores como 0.6 mg l<sup>-1</sup> de Cd, 0.27 mg l<sup>-1</sup> de Pb, 2.07 mg l<sup>-1</sup> de As, 4.8 mg l<sup>-1</sup> de Fe y 7.5 mg l<sup>-1</sup> de Zn.

En algunos sitios se puede ver la influencia de la actividad minera en las aguas subterráneas, cuya importancia crece mas con el paso del tiempo por tener un mayor uso, sin embargo, en la mayoría de los puntos de muestreo las muestras tienen una elevada salinidad debido a la geología de la región.

Se pudieron determinar además sitios donde se encuentran valores muy altos de arsénico y metales pesados en sedimentos, donde se encontraron valores mayores a los 424 mg/kg en As, 5276 mg/kg de Pb, 35 ppm de Hg, cuyos valores varían según su acumulación o disolución dependiendo del período seco o lluvioso.



Con ello se ha evidenciado una fuerte contaminación de origen natural en el altiplano sur, principalmente por arsénico y donde existen depósitos de minerales polimetálicos de acuerdo a los mapas geológicos de la región. Así mismo, en la región de la Amazonía, ha incrementado en los últimos años la actividad de extracción aurífera.

La contaminación por mercurio en esta región afecta al norte de La Paz y a los Departamentos de Beni y Pando particularmente, llegando incluso a aguas de curso internacional.

Diversos estudios muestran concentraciones elevadas de este elemento en las aguas superficiales, incluso, investigaciones realizadas en varias universidades mostraron que se establece que 78 por ciento de los habitantes adultos de regiones amazónicas presentan niveles de mercurio superiores a los límites permisibles de referencia internacional para la salud humana. El nivel de mercurio detectado fue de un promedio de 2,7 PPM, casi tres veces el valor de referencia internacional del mercurio en el cabello humano (1 PPM).



## ARCILLAS NATURALES COMO MEDIO FLOCULANTE Y DE SEDIMENTACION EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES”

**Myrian Alicia Barrero Ortega†**  
Universidad Autonoma Juan Misael Saracho

### 1. INTRODUCCIÓN

“La creciente escasez de los recursos hídricos libres de contaminación, el deterioro de los manantiales, la falta de recursos financieros que no permiten a las pequeñas y medianas industrias y plantas en producción la implementación de medidas productivas tendientes a reducir la contaminación, así como el incremento de descargas de efluentes sin tratamiento tanto de origen doméstico como industrial **están contaminando progresivamente uno de los principales recursos hídricos el Rio Guadalquivir de la ciudad de Tarija**. Si bien, ya se cuenta con un estudio a diseño final de una nueva planta de tratamiento de aguas residuales anaeróbica con lodos activos que permitirá un manejo más eficiente de las aguas residuales cuyo volumen de generación estimado a la fecha es de un total es de **13064806 m<sup>3</sup> UTEPTAR – GIRH 2013**). Considerando que luego del tratamiento se tendrá un volumen de agua tratada similar, es de prioridad desarrollar estudios relacionados con el **rehúso del agua para fines agrícolas” /año con un DQO de 7483200 Kg/año**.

La reutilización de aguas residuales tiene una práctica histórica basada en la evacuación y aplicación del agua al terreno, con mayor expectativa en regiones áridas y semiáridas, convirtiéndose el **agua no potable** en una práctica habitual en los planes de reutilización de aguas residuales municipales para el riego de parques, áreas verdes y con menos frecuencia para cultivos debido a razones de seguridad y salud pública, siendo otra limitante para este uso la deposición y acumulación en el suelo de las sales del agua aplicada, que pueden afectar las propiedades físicas y mecánicas del suelo ( grado de dispersión de las partículas, estabilidad de los agregados, permeabilidad, etc) .

Las arcillas que son parte de la estructura geológica del suelo en el Valle Central de Tarija que actualmente son explotadas como materia prima para la fabricación de cerámica, ofrecen una alternativa interesante de análisis, pues actúan como medio floculante y de sedimentación, arrastrando partículas en suspensión de origen orgánico principalmente así como sales disueltas, lo cual permite mejorar la calidad del agua residual. **Estudiar la influencia de las arcillas naturales en el proceso de sedimentación, para su posible incorporación como floculante en el tratamiento de aguas residuales contaminadas con residuos orgánicos** es el objetivo principal del presente estudio.

### 2. TÉCNICA: FLOCULACIÓN Y SEDIMENTACIÓN DE LAS ARCILLAS NATURALES

Considerando que los afluentes principales del rio Guadalquivir que están afectados por las aguas residuales domesticas e industriales son las quebradas: **Torrecillas** ( descarga planta de tratamiento COSSALT- Tipo C), Cabeza de Toro (descarga de aguas residuales, curtiembres y matadero municipal- Tipo B), fueron consideradas como muestras para el estudio, la tercera muestra (Tipo A) corresponde agua proveniente de deshielo de pescado cuyas características son aptas para el estudio por su alta concentración de sangre, grasa, y material orgánico.





Se caracterizó la arcilla natural objeto del estudio: Textura (Arcilla 50%, Limo 37.5 %, Arena 12.5%), arcillosa tipo (Y), conductividad 0.1493 mS/cm , Ph 7.03, densidad aparente 1.39 g/cm<sup>3</sup>, porosidad 47.5 % y se determino sus propiedades como medio floculante y de sedimentación, que permitió establecer los parámetros físico-químicos de control adecuados (pH, conductividad, TDS, OD y DQO) para las aguas residuales y aguas DETERMINACIÓN DEL PLATEAU PARA EL DETECTOR GM 3 tratadas por floculación y sedimentación, de forma que se pueda finalmente recomendar su aplicación y el alcance que puede tener el tratamiento.

### 3. RESULTADOS OBTENIDOS

La caracterización de las aguas objeto de estudio se encuentra a detalle en el cuadro a continuación:

Nº muestra	pH	Conductividad	TDS	OD	DQO
		mS	mg/L	mg/L	mg O <sub>2</sub> /L
A	6,7	2,516	1290	4,01	4360
B	7,5	2,607	123	6,05	635
C	7,6	5,905	283	6,49	41

Fuente: Elaboración propia (medios técnicos empleados propios y Laboratorio Facultad Ciencias y Tecnología U.A.J.M.S.-Tarija.)

#### Muestra tipo A:

**TDS** - contenidos superiores al límite del matadero (1195 mg/L) y planta depuradora (850 mg/L) indicado como contaminación fuerte. **DQO**- Valor dentro del rango muy cercano al límite inferior de la curtiembre (4000 mg O<sub>2</sub>/L). Valor superior al de una planta depuradora (300 mg O<sub>2</sub>/L). Valor inferior al de un matadero (6400 mg O<sub>2</sub>/L)

#### Tratamiento aplicado: Floculación y sedimentación con arcilla

Nº muestra	pH	Conductividad mS	TDS mg/L	OD mg O <sub>2</sub> /L	DQO mg O <sub>2</sub> /L	% VARIACION			
						mS	TDS	OD	DQO
A	6,7	2,516	1290	4,01	4360				
B	7,5	2,607	123	6,05	635				
C	7,6	5,9056	283	6,49	41				
AD*	11,4	2,038	961	6,02	875	-19,0	-25,5	50,1	-79,9
BF*	7,6	0,953	439	6,72	36	-63,4	256,9	11,1	-94,3
CF*	7,5	0,566	313	6,35	40	-90,4	10,6	-2,2	-2,4

AD\* Agua con materia orgánica y sangre/ arcilla 95%, cal 5%

BF\* Agua residual matadero-curtiembre/ arcilla 99,5%, alumbre 0,1%, cal 0,4%

CF\* Agua residual planta tratamiento COSSALT/ arcilla 99,5%, alumbre 0,1%, cal 0,4%

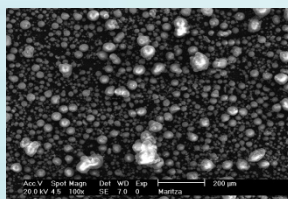


## CONCLUSIONES

Las arcillas naturales permiten que las agua residuales tratadas se vean favorecidas, pues: Disminuyen su turbidez, mejora su color y **reducen el contenido de sales disueltas** determinado por su **conductividad**. En relación al  $O_2$  disuelto se incrementa en aguas con mayor carga orgánica (TIPO A), al igual que el DQO que va asociado con esta recuperación, disminuyendo DQO en las muestras tratadas en un 79.9%.



## NANOMATERIALES PARA CATÁLISIS AMBIENTAL EN LA CIUDAD DE LA PAZ



**Maritza Mercado Callisaya, Saúl Cabrera Medina, Gustavo García Mendoza, María Eugenia García Moreno**

Instituto de Investigaciones Químicas, Carrera de Ciencias Químicas, Facultad Ciencias Puras y Naturales, Universidad Mayor de San Andrés

### Resumen

Los convertidores catalíticos habitualmente se elaboran considerando las condiciones normales a nivel del mar, catalizadores como el de tres vías oxida hidrocarburos no quemados y monóxido de carbono, y reduce óxidos de nitrógeno; pero a la altura de la ciudad de La Paz, al cambiar las condiciones ambientales, existe la necesidad de desarrollar nuevos materiales catalíticos apropiados para sus características distintivas, catalizadores específicos que reduzcan las emisiones vehiculares nocivas de acuerdo al tipo de combustible, tecnología del automotor y poluciones generadas (1, 2, 3 y 4).

La alúmina debido a la excelente estabilidad termal y mecánica, y su riqueza química, es el soporte más ampliamente usado en convertidores catalíticos, empleados para mitigar las poluciones vehiculares. La  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  ofrece alta área superficial (50-300  $\text{m}^2/\text{g}$ ), categorizada mesoporosa entre 5 y 15 nm, volumen de poro de alrededor de 0,6  $\text{cm}^3/\text{g}$ , alta estabilidad termal (5). García J.G., sintetizó y caracterizó  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  por la ruta de los atranos, obtuvo las mejores propiedades estructurales con la relación agua/alumatrano 26/1. El tratamiento hidrotermal tuvo una influencia en la variación del poro y área superficial; cristalinidad y material final. Área superficial 252,15  $\text{m}^2/\text{g}$  y diámetro de poro medio 6,9nm (6).

El platino como fase activa, tiene la mayor actividad relativa para la oxidación de hidrocarburos no quemados a comparación de otros metales nobles y metales básicos (1 y 7).

Se prepara, caracteriza y evalúa los catalizadores de platino soportados en alúmina (comercial y sintetizada) ( $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CeO}_2$ ) con diferentes cantidades de ceria impregnadas con precursor nitrato de cerio acuoso (1, 3, 5 y 10% en peso), como promotor de la actividad catalítica en la reacción de oxidación total del propano, debido a su comportamiento como almacenador de oxígeno (8).

El propano es uno de los principales componentes emitidos por los tubos de escape como polución vehicular de automóviles (VII handbook) que combustionan gasolina en la ciudad de La Paz (9 y 10).

La síntesis de los soportes alúmina se llevó a cabo por la ruta de los atranos con tratamiento hidrotermal, empleando alcóxido de aluminio como precursores (6)(gus II).





A los soportes se les impregnó platino con las soluciones acuosas de ácido hexacloroplatínico correspondientes para obtener 0,5% de Pt respecto al soporte y nuevamente se calcinaron estos para obtener ahora los catalizadores propuestos (11, 12 y 13).

Los soportes con diferentes cantidades de óxido de cerio se caracterizan por las técnicas: Análisis Térmico Diferencial (DTA) y Análisis Térmico Gravimétrico (TGA) con el fin de determinar las condiciones del tratamiento térmico posterior (calcinación).

Una vez calcinados los soportes, se procede a determinar las características estructurales (fases cristalinas) por medio de la técnica de difracción de rayos X. El análisis textural determina su área específica superficial, diámetro, volumen y distribución de poro.

La técnica EDAX permite determinar las cantidades de los metales en los catalizadores.

La reducción a temperatura programada se realizó a los soportes primero Alúmina y Alúmina-cera, y posteriormente a los catalizadores de platino, esto con el fin de obtener el perfil de reducción de las especies de óxidos en función de la temperatura, así como, el efecto del soporte sobre la reducibilidad de los metales (efecto de la interacción metal soporte). Se realizan pruebas de actividad en un reactor de cuarzo, operando en régimen diferencial (con 50mg de catalizador), con espacio velocidad fue de 52,000hr<sup>-1</sup> y la temperatura de 500°C y concentración estequiométrica y no, del oxígeno en la combustión del propano.

Posteriormente, se llevaron a cabo pruebas de oxidación del propano, con 50mg de muestra y espacio velocidad de 52,000hr<sup>-1</sup> en un intervalo de temperatura de 400 a 600°C, para todos los catalizadores de platino (13 y 14). Los resultados obtenidos de los análisis DTA, TGA, Rayos-X, TPR y actividad, la técnica de preparación del soporte y luego del catalizador contribuyen a mejorar el comportamiento de estos en la oxidación completa del propano a baja temperatura.

**Palabras clave:** Alúmina, ceria, platino, conversión catalítica en La Paz.

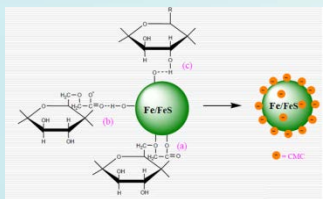
## REFERENCIAS

- (1) Toledo I., 2001, "Composición de Gases de Escape de Automóviles", Tesis de Grado Licenciatura N° 128 Ciencias Químicas – F.C.P.N. – U.M.S.A.
- (2) García M., 1995, "Estudio de la Contaminación por Hidrocarburos y Oxidantes Fotoquímicos en la Atmósfera de la Ciudad de La Paz", Tesis de Grado Licenciatura N° 92 Ciencias Químicas – F.C.P.N. – U.M.S.A.
- (3) Spiess N., Inventario de Emisiones del Municipio de La Paz 2007, Swizzcontact y apoyo de Universidad Mayor de San Andrés (UMSA, IIDEPROG), Gobierno Municipal de La Paz (DCA), 76p.
- (4) Arteaga M., et al., 2009, "Desarrollo de una metodología para la evaluación mecánica, energética y ambiental de vehículos que operan a gran altitud mediante pruebas de carretera", Revista IDEAS, Instituto de Investigaciones Mecánicas, Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Mayor de San Andrés, Vol. 1 N°1, 39 p.
- (5) Chorkendorff, J.W. Niemantsverdriet, 2007, Concepts of Modern Catalysis and Kinetics, Wiley-VCH 2nd, Revised and Enlarged Edition edition (October 1, 2007), 447 p.
- (6) García J. G., 2008, Óxidos de aluminio obtenidos por la ruta de los atranos para su evaluación preliminar como matriz de craqueo catalítico, Tesis para optar al grado de Licenciatura en Ciencias Químicas, Facultad de Ciencias Puras y Naturales, Universidad Mayor de San Andrés.
- (7) G. Ertl, H. Knözinger, F. Schüth, J. Weitkamp, 2008, "Handbook of Heterogeneous Catalysis", Volume 1, Second, Completely Revised and Enlarged Edition, Wiley-VCH



- (8) Fryxell, Glen E. & Cao Guozhong, 2007 Environmental Applications of Nanomaterials Synthesis, Sorbents and Sensors, Imperial College Press ICP, London, 520p.
- (9) GAMLP, 2011, Compendio de Estadísticas Ambientales del Municipio de La Paz, 2000 - 2010, Gobierno Autónomo Municipal de La Paz - Bolivia, Oficialía Mayor de Planificación para el Desarrollo del GAMLP, SPC Impresores 162 p.
- (10) Swisscontact-Proyecto Aire Limpio, 2007, Informe técnico Semanas de Aire Limpio para La Paz 09 al 13 de julio de 2007, Fundación Suiza de Cooperación para el Desarrollo Técnico-Swisscontact, Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación COSUDE, 15 p.
- (11) Garetto T., Rincón E. y Apesteguía C., Combustión catalítica de alcanos utilizando catalizadores de Pt en diferentes soportes, GICIC (Grupo de Investigación en Catálisis e Ingeniería Catalítica. INCAPE. Facultad de Ingeniería Química. (UNL-CONICET) Santiago del Estero 2654. 3000. Santa Fe. ARGENTINA e-mail: tgaretto@fiquis.unl.edu.ar
- (12) Nagai Y, et al, 2006, Sintering inhibition mechanism of platinum supported on ceria based oxide and Pt-oxide-support interaction, Journal of catalysis 242 (2006) 103-109
- (13) Ramírez Román, Preparación caracterización y evaluación catalítica de catalizadores de Pt y Pd soportados en  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CeO}_2$  para la oxidación total del metano, Tesis para obtener el grado de Doctor en ciencias, Ingeniería química, Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Ixtapalapa, División de ciencias básicas e ingeniería, 151.
- (14) Gallardo S., Takashi A. and Hirro N., 1998, "Improvement of the oxidation activity of alumina"; Korean J. Chem. Eng., 15(5), 480-485 (1998)

## REMEDIACIÓN DE METALES PESADOS DISUELTOS EN RELAVES DE MINERÍA USANDO NANOPARTÍCULAS MULTICOMPONENTE (NPFE/FES)



**Gustavo Rosero<sup>2</sup>, Luis Cumbal<sup>1</sup>, Daniel Delgado<sup>1</sup>, Julia Cunalata<sup>2</sup>, Erika Sánchez<sup>2</sup> y Carla Bastidas<sup>3,1</sup>**

Centro de Nanociencia y Nanotecnología, Universidad de las Fuerzas Armadas, Quito, Ecuador.

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Investigación Geológico, Minero, Metalúrgico del Ecuador-INIGEMM

<sup>3</sup> Departamento de Ciencias de la Vida, Carrera de Ing. en Biotecnología, Universidad de las Fuerzas Armadas, Quito, Ecuador.

**Palabras clave:** metales pesados, relaves, remediación, nanopartículas multicomponente

### 1. INTRODUCCIÓN

Altos niveles de contaminación se han registrado en el sistema fluvial del sur del Ecuador como consecuencia de la extracción de oro. Existen más de 250.000 toneladas de relaves, colas y arenas en la zona de Portovelo-Zaruma y cantidades no determinadas en Bella Rica, en las riberas de los ríos Zamora, Nangaritza y Cumbaratza, y en San Gerardo [1]. Aunque los impactos ambientales de la minería están relacionados con los procedimientos mineros y tamaño de las operaciones, condiciones hidrológicas, clima, tipos de roca, topografía, entre otros; los procedimientos mineros artesanales generan relaves que son descargados directa o indirectamente en los ríos y constituyen una de las fuentes más importantes de contaminación [2]. En varios países, incluido el Ecuador, el tratamiento de relaves se realiza mediante la biolixiviación de los metales mediada por microorganismos [3]. El tratamiento sin embargo de ser efectivo tiene una pobre percepción de la comunidad y los entes gubernamentales. En general, las técnicas para remover metales pesados contenidos en relaves son selectivas para cada metal y exhiben diferentes eficiencias y algunas son bastante lentas, por lo que se requiere de una técnica que remueva simultáneamente la mayor parte de metales pesados desde estos residuales líquidos. En este contexto, el objetivo de este estudio fue evaluar la aplicación de nanopartículas metálicas para remover metales pesados presentes en los relaves de minería.

### 2. METODOLOGÍA

#### 2.1 Procedimiento de preparación de las nanopartículas multicomponente

Las NPFe/FeS fueron sintetizadas utilizando un método combinado entre aquellos desarrollados por Kim *et al.*, (2011)[4] y Yuvakkumar *et al.*, (2011)[5]. Como reactivos se utilizaron cloruro férrico hexahidratado ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), borohidruro de sodio ( $\text{NaBH}_4$ ), carboximetil celulosa de sodio (NaCMC) y ditionita de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ) de grado ACS (Sigma





Aldrich). La preparación de las NPFe/FeS se inicia con la adición de 50mg de ditionita de sodio de 2,87mM en 100mL de solución 0,1M NaBH<sub>4</sub>. La solución resultante fue colocada en una bureta y el contenido se dejó caer gota a gota en un matraz con 30mL de solución 66mM FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O + 75 mM NaCMC agitado a 140 rpm y manteniéndose vacío con una bomba BUCHI Labortechnik. La preparación de las soluciones madre fue realizada con agua desmineralizada y nitrogenada.

## 2.2 Caracterización de las nanopartículas

La distribución del tamaño de las nanopartículas estabilizadas con carboximetil celulosa de sodio fue realizada con un dispersor dinámico de luz (DLS: siglas en inglés) Horiba LB-550 a una longitud de onda 633 nm. Las microfotografías de las nanopartículas de Fe/FeS se obtuvieron utilizando un microscopio de transmisión de electrones TEM (FEI. Tecnai Spirit Twin) operado a 80 kV. Empleando las microfotografías se estimó el tamaño promedio y morfología de las nanopartículas. El área superficial específica fue estimada con una isoterma de Brunner-Emmett-Teller (BET) y para medir la viscosidad de la muestra de nanopartículas se aplicó el método ASTM D88-07 Standard Test Method for Saybolt Viscosity (ASTM, 2012).

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1A se observa que las nanopartículas preparadas con agente estabilizante (CMC) se encuentran dispersas en la fase líquida mientras que las que no tienen estabilizante forman agregados por la acción de fuerzas electromagnéticas y de Van der Waals (Fig.1B). Además, las nanopartículas con estabilizante exhiben un tamaño entre 9,5 a 15 nm y su forma es esférica (Fig.1A).

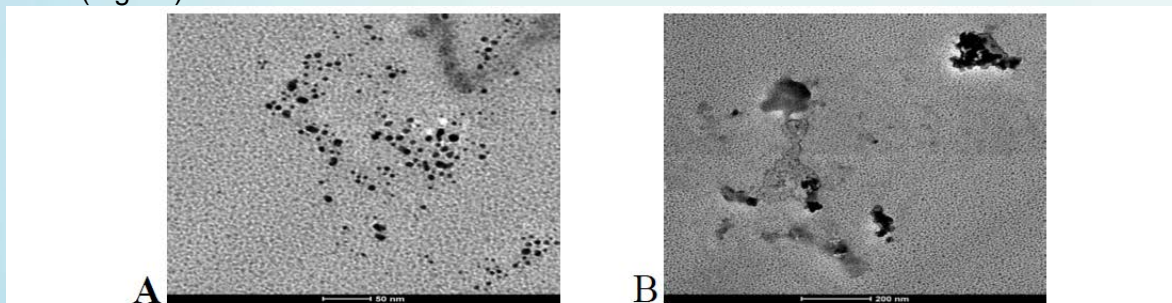
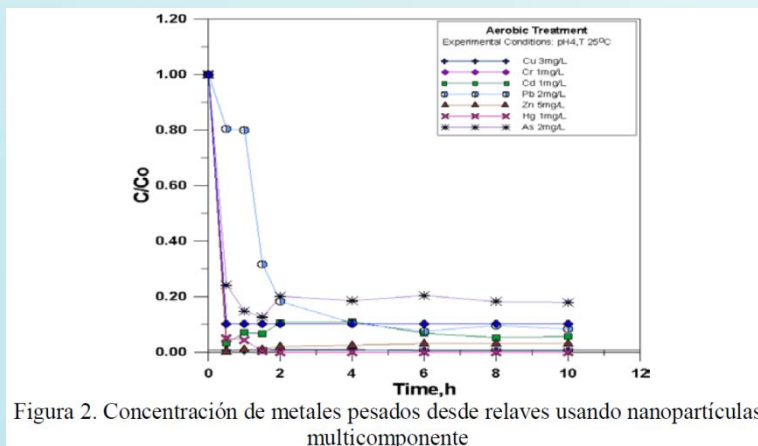


Figura 1. Microfotografías TEM de NPFe/FeS preparadas A) con y B) sin CMC

Las nanopartículas de Fe/FeS recién sintetizadas se contactaron con muestras de relave preparados en el laboratorio. La Figura 2 indica una rápida caída de la concentración de Cu, Cr, Cd, Pb, Zn, Hg y As en la fase líquida. Además es notorio ver que la excelente remoción de los metales pesados fue obtenida luego de solamente 4 horas de tratamiento (promedio 90%). De manera que las NPFe/FeS presentan una capacidad de descontaminación rápida y eficiente para los metales pesados; sin embargo, el mecanismo de captura de los iones metálicos por parte de las nanopartículas necesita ser examinado. Con este objetivo, se van a conducir ensayos para determinar si adsorción con los grupos superficiales de las nanopartículas, substitución de iones o precipitación superficial son los mecanismos que remueven los metales pesados de la fase acuosa.



## REFERENCIAS

- (1) Ministerio de Energía y Minas. 2001. Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental (PRODEMINCA): Medidas Ambientales Emergentes y el Establecimiento de un Plan Maestro Ambiental en el Distrito Minero Portovelo-Zaruma y la Cuenca del Río Puyango. Evaluación de Impactos.
- (2) López D. La minería metálica y sus impactos. Comunicación personal, Junio 2009.
- (3) Gordillo F. Manejo y recuperación de minerales de baja ley de los desechos mineros mediante lixiviación biológica "Heap". Portovelo, Ecuador, 2006 - 89 dispositivas.
- (4) Kim E., Kim J., Azad A. Chang Y. Facile synthesis and characterization of Fe/FeS nanoparticles for environmental applications. Applied Materials & Interfaces - American Chemical Society. 2011, 3: 1457-1462
- (5) Yuvakkumar R., Viswanathan E., Rajendran V., Kannan N. S. & Prabu P. Influence of Nanosilica Powder on the Growth of Maize Crop (*Zea Mays* L.) International Journal of Green Nanotechnology 2011, 3(3): 180-190.

## EMPLEO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, DATOS DE SENSORAMIENTO REMOTO Y FUENTES DE ACCESO LIBRE GLOBAL COMO HERRAMIENTA PARA MODELAR AGUA, ENERGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO EN BOLIVIA



**Fernando Arturo Ledezma Perizza** -[fernandoledezma.p@gmail.com](mailto:fernandoledezma.p@gmail.com)

Docente Investigador Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón

**Palabras Clave:** *Potencial Hidro-energético, Cambio Climático, Sistemas de Información, Geográfica, Datos de Acceso Global, Sensores Remotos*

### Resumen

Los modelos de evaluación hídrica generalmente empleados, requieren de bastante información, la que se encuentra en estaciones meteorológicas puntuales que difícilmente representan las condiciones ambientales de la diversa geografía espacial.

El objetivo de este trabajo es dar a conocer los resultados obtenidos de la modelación hidrológica a nivel nacional, con escenarios proyectados al 2050, así como transponer las barreras de la escasa información con la que cuenta actualmente Bolivia en su red meteorológica y mala distribución espacial aplicándolo al estudio de determinación del potencial hidroeléctrico regional, mediante el empleo de Sistemas de Información Geográfica, productos que son entregados por el sensoramiento remoto de los satélites y fuentes libres de acceso de datos global, los cuales pueden contribuir para realizar una estimación y determinación de sitios con potencial hidroeléctrico, así como asistir al tomador de decisiones en el proceso de planificación y adaptación al cambio climático.





## DESAFÍOS PARA LA SOSTENIBILIDAD EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS



**Reinhard Helmut Mayer Falk<sup>1</sup>, Fabiana Isabel Belmonte Rada<sup>1</sup>**  
Ecoenergía Falk S.R.L.<sup>1</sup>

**Palabras clave:** *Desafíos para Sostenibilidad Sistemas Fotovoltaicos*

### 1. INTRODUCCIÓN

En Bolivia, por falta de suministro de energía eléctrica, se realizaron varios programas de electrificación mediante paneles fotovoltaicos. A pesar de resultados interesantes al inicio de la instalación, en muchos casos faltan datos sobre el funcionamiento de los sistemas solares después de varios años. Los autores han visto que varios sistemas están en desuso o cuentan con deficiencias en el aprovechamiento de la energía solar.

### 2. TECNOLOGÍAS INVESTIGADAS

Durante el trabajo que viene realizando ECOENERGIA FALK S.R.L. en distintas regiones del país, se observó que las escuelas rurales, cuentan en muchos casos, con dos tipos de sistemas de electrificación fotovoltaica.

Los sistemas fueron promovidos por dos programas: el programa “Sistemas Fotovoltaicos para el Mejoramiento de la Infraestructura Social de Salud y Educación” y el programa “Yo, si puedo” de alfabetización.

Los “Sistemas Fotovoltaicos para el Mejoramiento de la Infraestructura Social de Salud y Educación” cuentan con los siguientes equipos: dos paneles fotovoltaicos de 54 Vatios cada uno, un regulador de carga de 8 Amperios de Capacidad, una batería solar de 200 Amperios – horas de capacidad, iluminación de 4 focos y radio de 8 pilas. No hay una caja de distribución.

El sistema del programa “yo, si puedo” cuenta con los siguientes equipos: Un panel fotovoltaico de 150 Vatios, un regulador de carga de 20 Amperios de capacidad, una batería solar de 200 Amperios – horas de capacidad, un inversor de 400 Vatios de potencia, iluminación y los accesorios audiovisuales correspondientes: Televisor y equipo de video. Hay una caja de distribución donde se instalaron los termofusibles, el regulador de carga y el inversor.

### 3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Se utilizó un cuestionario que incluye varios puntos: tipo de panel, montaje adecuado, tipo de batería, estado de la batería, medidas de seguridad y conocimientos de los instaladores y usuarios.



#### 4. PROBLEMAS EN LAS INSTALACIONES

Los programas fueron realizados hace aprox. 5 años, en el momento de la instalación las comunidades beneficiadas no contaban con energía eléctrica y en muchos casos tampoco con acceso mediante carretera. Hoy en día la mayoría ya cuenta con electricidad de la red y sus sistemas fotovoltaicos han quedado en el olvido, puestos en depósitos o a la merced de accidentes y robos.

En las comunidades que están prontas a la electrificación, no ha habido mantenimiento y también se han encontrado sistemas desmantelados y en depósitos.

El mayor problema de los sistemas fotovoltaicos es la vida útil de la batería, una batería solar tiene una vida útil de máximo 4 años que puede acortarse a 2 años por falta de mantenimiento. En las comunidades con una electrificación programada, en muchos casos, la gente prefiere esperar la electricidad a comprar una nueva batería.

En la mayoría de las comunidades donde no hay electricidad, los sistemas fotovoltaicos se encuentran funcionando. Las baterías, por lo general, son remplazadas, la comunidad a no ver próxima la electrificación, se encarga de buscar financiamiento para una nueva batería y se preocupan de realizar el respectivo mantenimiento.

En forma general, en los sistemas de alfabetización se constató que la instalación ha sido precaria por falta de personal bien capacitado. Entre las deficiencias se encuentran: Paneles sin caballetes y mal orientados, la caja de distribución no está asegurada en la pared, deficiencias en el cableado, etc.

Los “Sistemas Fotovoltaicos para el Mejoramiento de la Infraestructura Social de Salud y Educación” fueron instalados por personal capacitado, sin embargo, finalmente el mantenimiento se dejó en manos de las comunidades que pocas veces cuentan con el conocimiento necesario.

Todo esto tiene como consecuencia que la mayoría de los sistemas ya no funciona o tiene un bajo rendimiento.

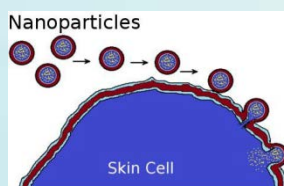
#### 5. PROPUESTA

Frente a este tipo de problemas se sugiere las siguientes soluciones.

- Realizar un diagnóstico de los sistemas fotovoltaicos instalados en el país para conocer mejor los problemas de su funcionamiento y manejo.
- Rehabilitar los sistemas que sean útiles a las comunidades.
- Redestinar los sistemas fuera de uso de comunidades con electrificación a comunidades sin electricidad.
- Generar nuevas formas de dotación de electricidad a pequeñas poblaciones de forma sustentable como por ejemplo parques solares o sistemas fotovoltaicos PICO.
- Empoderar a jóvenes en las comunidades que sean capaces de resolver problemas sencillos de los sistemas fotovoltaicos.
- Buscar nuevas tecnologías que permitan un mejor aprovechamiento del recurso renovable como por ejemplo lámparas LED con mayor rendimiento para la iluminación y baterías de litio con mayor vida útil.



## EXPOSICIÓN Y RIESGOS DE LAS NANOTECNOLOGÍAS



### Roberto Del Barco

Docente Investigador de la Facultad Nacional de Ingeniería, unidad Ingeniería Industrial, perteneciente a la Universidad Técnica de Oruro, miembro de la Red Latinoamericana de Nanotecnología y Sociedad (Relans)

### Guillermo Foladori

Profesor Investigador del Doctorado en Estudios del Desarrollo, Unidad de Estudios del Desarrollo, Universidad Autónoma de Zacatecas, México, coordinador de la Red Latinoamericana de Nanotecnología y Sociedad (Relans), miembro del Sistema Nacional de Investigadores (nivel III)

**Palabras clave:** nanotecnología, riesgos

### Resumen

Las nanotecnologías constituyen la revolución tecnológica en curso, dirigida a imponerse a mediano plazo. El rápido desarrollo de las NT ha dado lugar a la aparición de un gran número de productos de consumo que contienen nanopartículas, dada la mejora en las propiedades del producto final que supone su utilización<sup>1</sup>. Como toda nueva tecnología habrá resultados no buscados y, tal vez, negativos. Aunque muchos son imposibles de prever, en los países desarrollados la preocupación pública busca adelantarse a los resultados imprevistos. Existen indicios sobre los posibles efectos de las nanopartículas en la salud, el medio ambiente y el poderío militar, así como sus consecuencias en los países menos desarrollados o aquellos que aún no se incorporan a la carrera de lo diminuto. Ciertamente, un número cada vez mayor de trabajadores está expuesto a nuevos materiales de características toxicológicas poco conocidas. No es pues de extrañar que las nanopartículas estén consideradas como uno de los riesgos emergentes más importantes por el World Economic Forum. Sin embargo, la mayor parte de los documentos sobre nanotecnología destaca que las consecuencias serán menores frente a las enormes ventajas para la sociedad en términos de manipulación y control de los seres vivos (incluidos los humanos mismos), aumento de la productividad industrial y agropecuaria, descontaminación barata y rápida del aire y el agua, utilización de energías renovables limpias, etcétera.

<sup>1</sup> Para octubre de 2013 la base de datos del Woodrow Wilson Center daba 1631 productos con nanopartículas o nanoestructuras.

Este trabajo analiza la discusión sobre los riesgos de las nanopartículas manufacturadas, contextualizando esta discusión con un panorama del desarrollo de las nanotecnologías en la región y de las evidencias científicas disponibles sobre riesgos de las nanotecnologías. Esto último, sobre el argumento de que en la actual coyuntura mundial, los tiempos de los negocios siguen dictando las reglas de la ciencia y de las aplicaciones tecnológicas; ni la nanociencia ni





la nanotecnología escapan a esta lógica. Finalmente se presentan algunas condiciones necesarias para incentivar un desarrollo responsable de las nanotecnologías trayendo a la discusión los ocho puntos relevados por el colectivo de organizaciones ambientalistas y de trabajadores acerca de la supervisión de las nanotecnologías y los nanomateriales.



## PLANTA PILOTO DE BATERÍAS DE LITIO EN BOLIVIA



**Juana Luisa Olivares Berdeja**  
Gerencia Nacional de Recursos Evaporíticos

**Palabras clave:** Baterías, industrialización, planta piloto, elaboración de celdas y ensamblaje de baterías

### Resumen

El proyecto de implementación de una planta piloto de Baterías de Litio corresponde a la fase III del proyecto de industrialización de los recursos de evaporíticos de Bolivia, a cargo de la Gerencia Nacional de Recursos Evaporíticos – COMIBOL.

La puesta en marcha y posterior operación de una planta industrial de baterías de Litio, supone necesariamente el conocimiento previo de dos aspectos claramente diferenciados: en primer lugar, el dominio de la tecnología ligada a la electroquímica de baterías de litio y en segundo, el conocimiento y ratificación a nivel piloto de las técnicas de producción.

Para poder comprender la parte científico-técnica asociada a los derivados de Litio con alto valor añadido no basta con realizar investigaciones en el ámbito de la electroquímica de baterías; sino que, adicionalmente, es necesario profundizar en los campos afines a esta tecnología; esto es, la síntesis de sales de Litio, la síntesis y caracterización de los materiales, el análisis químico de electrodos y electrolitos, etc.

A fin de poder llevar a cabo investigaciones en las diversas disciplinas ligadas a los derivados de Litio con alto valor añadido, será necesaria la puesta en marcha de varios laboratorio y una Planta Piloto de producción de celdas.

El 14 de marzo de 2011, el Ministerio de Minería y Metalurgia emite la Resolución Ministerial 055, según la cual se aprueba el proyecto “Implementación de Planta Piloto de Baterías de Litio en Bolivia” por un monto de Bs. 35.350.000 (Treinta y Cinco Millones Trescientos Cincuenta Mil 00/100 Bolivianos), a ser financiados por el Banco Central de Bolivia. Por otro lado, la RM 055, aprueba el Estudio de pre factibilidad “Sales derivadas del Carbonato de Litio con Alto Valor Añadido y Baterías de Litio”, confirmando la viabilidad técnica y económica del proyecto industrial, comprometido por el Presidente del Estado y por un monto de \$US 400.000.000 (Cuatrocientos millones 00/100 dólares americanos).

Con esta preinversión, correspondiente a la primera etapa de la fase III, se adquirirán los ambientes requeridos para la instalación de los laboratorio, se compró los equipos



especializado y el “*know how*” necesario para la puesta en marcha de todos los laboratorios y la Planta Piloto.

El proyecto de Planta Piloto para la fabricación de baterías considera una adquisición tipo llave en mano, que incluye la importación de todos los equipos e insumos necesarios para operar la planta, así como la instalación, calibrado y puesta en marcha de equipos y la formación – capacitación del personal en técnicas de producción y evaluación de tecnologías.

## **1. PLANTA PILOTO DE BATERÍAS DE IÓN-LITIO**

El contrato con la empresa china LINYI DAKE TRADE CO. LTD. se firmó en fecha 21 de mayo de 2012. Los plazos de entrega detallados en el documento inician con la notificación del Banco de China a la empresa, las operaciones de protocolización y apertura de carta de crédito demoraron hasta el 3 de septiembre de 2012, fecha en la que comienza formalmente el proyecto, según lo estipulado en el contrato CTTO.COMIBOL.GNRE.INT-011/2012.

Esta planta será instalada en el complejo industrial de La Palca – Potosí, luego el anuncio oficial por parte del Excmo. Señor Presidente Evo Morales y otras autoridades, en acto público desde el mismo lugar en fecha 9 de noviembre de 2012, para lo cual se requiere una superficie aproximada de 1600 m<sup>2</sup>, que incluye ambientes de Planta Piloto, línea de ensamblado de baterías, laboratorio y oficinas. El acopio de equipos e insumos se realizó hasta diciembre de 2012, el transporte hasta febrero de 2013 y se prevé la instalación hasta fines del 2013.

## **2. OBJETIVOS DE LA PLANTA PILOTO DE BATERÍAS Y LABORATORIOS**

La implementación de estos laboratorios y Planta Piloto permitirá la comprensión de la tecnología de los derivados de litio con alto valor añadido; esto es, las baterías de Litio, materiales catódicos, sales de electrolito y otras sales de Litio.

De modo paralelo, es necesario tener dominio de las técnicas de producción, ya que la producción industrial implica el uso de equipos y tecnologías complejas que no pueden ser probadas directamente en la planta industrial. Algunos objetivos de esta fase experimental son:

- Familiarizarse con las distintas técnicas de experimentación en electroquímica.
- Familiarizarse con las distintas técnicas de síntesis de materiales.
- Caracterización de materiales de electrodo.
- Comprensión de la electroquímica de baterías de Litio.
- Establecimiento de condiciones óptimas de operación de baterías.
- Selección de la tecnología más apropiada para ser producida en Bolivia (desde el punto de vista técnico).
- Tecnología de membranas, propiedades fisicoquímicas y caracterización.
- Conocimiento y evaluación de las técnicas de producción de baterías.

Si bien en los laboratorios exclusivamente se llevarán a cabo las tareas de investigación y desarrollo, en la Planta Piloto, dado que el objetivo es la evaluación de las técnicas de producción, habrá un cierto volumen de producción de celdas ión-Litio, con dos líneas de producción. La Planta Piloto tendrá una capacidad de elaboración de aproximadamente 1200Ah/día (al 100% de capacidad). Esta capacidad se encontrará distribuida en sus dos líneas:





- Celdas pequeñas de 0.8 Ah (celular): 1000 celdas/día.
- Celdas grandes 10Ah (vehículos eléctricos): 40 celdas/día.

El objetivo de esta Planta Piloto es alcanzar los estándares de calidad requeridos en la producción industrial, de modo que en un principio, estas celdas no irán destinadas a la venta. Una vez conseguida una calidad y reproducibilidad en las celdas, se iniciará las fases preliminares de ingeniería comercial.

## MODELO PARA LA CREACIÓN DE CENTROS DE INVESTIGACIONES EN LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMÓN

### CASO: PROYECTO DE CREACIÓN DEL CENTRO UNIVERSITARIO DE INVESTIGACIONES EN ENERGÍAS (CUIE-UMSS)



**Félix Rustan Roca Subirana<sup>1</sup>**

1 Investigador del Instituto de Investigación de la Facultad de Ciencias y Tecnología (FCyT) de la UMSS.

Coordinador del Programa de Energía, Sostenibilidad y Eficiencia Energética de la FCyT.

2 Administración Central, Dirección de Investigación Científica y Tecnológica (DICyT) o, el de las facultades participantes del proyecto

1: Universidad Mayor de San Simón

## Resumen

### 1. ANTECEDENTES

El proyecto de la “Creación del Centro Universitario de Investigaciones en Energías (CUIE-UMSS)” ha sido concebido en base a la propuesta del proyecto de la “Implementación del Centro de Investigación Multidisciplinario en Energía y Desarrollo (CIMED)”, que a su vez ha tenido como base el proyecto “Programa de Doctorado en Energía y Desarrollo (PDED)”. Se espera su implementación por componente entre este año y el siguiente.

El PDED con un solo componente de formación, contemplaba materias, tutores y equipamiento para tesis de 20 Doctorandos de diversas facultades de la UMSS. Funcionó con recursos propios del Postgrado de la Facultad de Ciencias y Tecnología pero careció para su culminación de un compromiso de financiamiento con fuentes provenientes de los impuestos a los hidrocarburos (IDH)<sup>2</sup>.

El proyecto CIMED incluyó la culminación del PDED y propuso cuatro componentes: infraestructura, equipamiento, formación e investigación, que se mantienen en el proyecto CUIE-UMSS. Este es el proyecto que cuenta finalmente con una carta de intenciones que fue firmada el 06 de julio del 2012 en cual se compromete el financiamiento de la DICyT y de la FCyT.

Después de varios intentos de estructurar el proyecto con insumos propios, se decidió contratar una consultoría para contar con un documento que contenga un modelo conceptual como base referencial para elaborar términos de referencia, los mismos que servirían para solicitar servicios de los insumos necesarios que requerían los componentes del proyecto para poderlos ejecutar con fondos IDH.



## **2. CONSULTORÍA DEL MARCO CONCEPTUAL**

El documento presenta un modelo conceptual como enfoque único en todos los componentes del proyecto, un diagnóstico que lo respalda en el tema energético y una propuesta de solución para el funcionamiento del Centro. El consultor entregó la versión final del documento después de haber realizado las correcciones de la comisión del proyecto CUIE-UMSS. La validación oficial del documento fue realizada por el PESEE mediante el “Informe Técnico de Aceptación del Documento de la Consultoría”.

## **3. CONFORMACIÓN DE LOS PROYECTOS**

El Departamento de Organización y Métodos (OyM) de la UMSS se encargará de estructurar en base al documento en cuestión con un mismo enfoque dos o más proyectos para financiarlos con fondos IDH y ejecutarlos en paralelo.

La DICyT de la UMSS se está encargando del componente investigativo mediante la convocatoria de proyectos de investigaciones en energías, mientras que el Posgrado de la FCyT se encargará del componente de formación en un régimen continuo y seguirá trabajando con los Doctorandos del PDED para la defensa de sus tesis y de otros investigadores más que quieran realizar su Doctorado en energía.

El Departamento de Infraestructura de la UMSS será el encargado del componente que le es afín, más aquel componente de equipamiento que complementa la construcción del ambiente del Centro.

La ejecución de cada componente del proyecto permitirá en su conjunto la creación del CUIE-UMSS.

## **4. MODELO DE RÉPLICA**

Ante un volumen cada vez mayor de demanda de personal de grado Doctoral en nuestra superior casa de estudios, se espera que este modelo facilite a todas las facultades, programas y proyectos la creación de centros de investigaciones en cualquier campo financiados con recursos propios o externos, a fin de asegurar una mejor formación académica e incentivar el espíritu investigativo.





**PROGRAMA DE TRANSFERENCIA EN CIENCIA E INGENIERÍA PARA EL FORTALECIMIENTO INSTITUCIONAL DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA ACADÉMICA UNIVERSITARIA Y EL IMPULSO A LA PROMOCIÓN DE EMPRENDIMIENTOS DE BASE TECNOLÓGICA**

**Julio, Gumiel Galarza<sup>1</sup>**

**Yatsen Maldonado<sup>1</sup>**

**Roy Piérola Bajarano<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Universidad Autónoma Gabriel Rene Moreno, Facultad Politécnica

**Palabras clave:** Proyecto, programa, socios cooperantes, transferencia de tecnología, ciencias e ingeniería, emprendimientos de empresa.

**Resumen**

- 1. Características generales y propósito** El proyecto “programa de transferencia en ciencia e ingeniería para el fortalecimiento institucional de la investigación científica académica universitaria y el impulso a la promoción de emprendimientos de base tecnológica”, está dirigido a dinamizar los procesos de investigación científica tecnológica universitaria, ligados al entorno social, tendiendo a la conformación de grupos de investigación (profesionales, investigadores y docentes), así como al impulso a los emprendimientos de empresa de base tecnológica, siendo el marco de acción la transferencia de conocimientos y experiencias de las universidades de mayor desarrollo relativo tales como la Universidad Federal del Espíritu Santo (UFES), Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMX), y el Tecnológico de Costa Rica a la universidad receptora y coordinadora del proyecto, la Universidad Autónoma Gabriel Rene Moreno (UAGRM)-sede Facultad Politécnica.
- 2. Factores que inciden en el desarrollo de la ciencia y la tecnología, contexto AL y el C, Bolivia** Los países que alcanzaron niveles de desarrollo relativo altos (Europa, USA, Japón), dos elementos aparecen como prioritarios y que inciden sustantivamente, “la mejora continua de la competitividad de su estructura productiva y el desarrollo de la ciencia y la tecnología en constante interacción con la sociedad”<sup>1</sup> interponiéndose en ello una fuerte vocación de acrecentar el conocimiento y realizar su transferencia al medio.

En el ámbito de lo expuesto, es conveniente para nuestros países de América Latina y El Caribe, y en el caso Bolivia, el internalizar los avances de la ciencia y la tecnología que acontecen en otros países, por ende tomar modelos que coadyuven al logro de soluciones mejor estudiadas y pensadas, en este caso aprovechar de esos contextos lo valioso para el desarrollo local.

- 3. Aspectos metodológicos inmersos en el proyecto programa** El proyecto programa contiene en su desarrollo, los siguientes pasos:



- Instalación del proyecto OEA-FEMCIDI en la UAGRM-Facultad Politécnica y demás universidades socias cooperantes.
- Selección con los países participantes, de los modelos de intercambio (Emprendimiento de empresa de base tecnológica, formación de emprendedores, transferencia de tecnología en I+D+i).
- Elaboración y desarrollo de los diferentes instrumentos de transferencia de tecnología al entorno social.
- Ejecución de lo instrumentado en el Plan de Ejecución del Proyecto (capacitación de formadores y capacitación a beneficiarios directos, procesos de incubación e innovación tecnológica resultantes de trabajos de investigación aplicada, otros procesos).
- Evaluación y elaboración de memorias e informes pertinentes.

**4. Temas de análisis y aplicaciones futuras posibles** En el tiempo de vida del proyecto programa, de tres años, se espera la transferencia de conocimientos en actividades de capacitación dirigidas a docentes o investigadores (instructores formadores), para los tres temas centrales:

- Formación de emprendedores básicamente jóvenes (estudiantes universitarios) en habilidades gerenciales, ingeniería e innovación, plan de negocio, plan de vida<sup>2</sup>.
- Capacitación en procesos de incubación de empresas de base tecnológica en administración y finanzas, asuntos jurídicos, mercadotecnia, procesos productivos<sup>3</sup>.
- Intercambio para desarrollos en ciencias e ingeniería con aplicaciones en energías alternativas, medio ambiente, materiales de construcción, tecnología e innovación en las PYMES e incubación de empresas de base tecnológica a elección, según se tenga un estudio prospectivo de empresas existentes en el medio de Santa Cruz.

2 Manuales de procedimientos de POLLIEMPRENDE, programa de cooperación México-Bolivia. Curso Modelo de Transferencia de Tecnología del IPN de los Estados Unidos de México, mayo 2011.

3 Modelo de articulación para la innovación en Bolivia programa de cooperación México-Bolivia. Curso Modelo de Transferencia de Tecnología del IPN de los Estados Unidos de México, mayo 2011.

La prospectiva podría centrarse en los nanomateriales y las nanotecnologías, que conlleven el estudio científico técnico de las materias primas, y su posible transformación industrial, para dotarlas de un valor agregado con las ventajas económicas que ello supone.

**5. Resultados esperados**

- La generación de patentes, basada en el desarrollo de una ciencia local sobre bases científico tecnológicas.
- La transferencia de tecnología y resultados que justifiquen nuevos emprendimientos que no solo tengan valor intelectual sino valor comercial.
- Se cumple mayormente el ciclo de la investigación gestado en la universidad con jóvenes emprendedores competentes, que terminan con la incorporación de una nueva vida empresarial en el medio social con un alto porcentaje de supervivencia.



- Desde el punto de vista de valor para los docentes y estudiantes universitarios se dan las bondades de la formación profesional de los emprendedores y las experiencias ganadas, para conformar una plataforma amplia de consultores de alto nivel.
- Se dinamizan los emprendimientos con la concreción de acuerdos y vínculos del programa entre las instituciones nacionales y locales y los países involucrados (Bolivia, México, Costa Rica y Brasil).
- Investigaciones científicas de impactos tecnológicos, económicas sociales, y ambientales, superando por ende los bajos indicadores de costo/beneficio actuales.
- La difusión de resultados y productos al alcance de los beneficiarios, en los ámbitos del proyecto programa (revistas científicas indexadas, pagina web, escritos científicos y otros medios).

1 La Vinculación Tecnológica en Instituciones de I+D en España, Análisis del Sistema OTRI, febrero 2013:2.

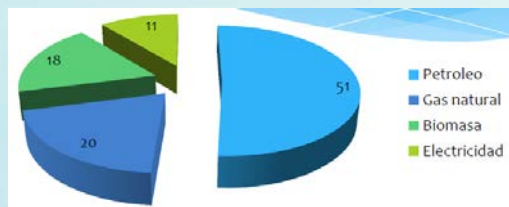
2 Manuales de procedimientos de POLLIEMPRENDE, programa de cooperación México-Bolivia. Curso Modelo de Transferencia de Tecnología del IPN de los Estados Unidos de México, mayo 2011.

3 Modelo de articulación para la innovación en Bolivia programa de cooperación México-Bolivia. Curso Modelo de Transferencia de Tecnología del IPN de los Estados Unidos de México, mayo 2011.





## INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE HIDROCARBUROS - TARIJA IIDH-TARIJA



**Ignacio Edwin Velásquez Soza**  
Universidad Autónoma Juan Misael Saracho

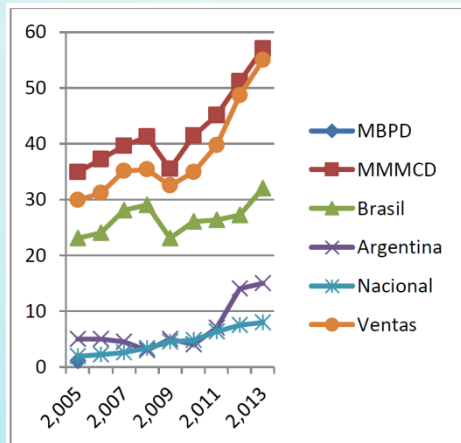
**Palabras claves:** Instituto Petróleo, Petroquímica, Control calidad

### IMPORTANCIA DE LOS HIDROCARBUROS EN BOLIVIA

Punto de partida reservas actuales		
Año	TCF	
2005	26,70	Certificadas
2009	9,94	Certificadas
2012	11,20	Cuantificadas

Soberanía Hidrocarbúrfera al 2025 Encuentro Nacional Tarija 29 y 30 octubre de 2013. Como se puede observar Bolivia cuenta con reservas cuantificadas de 11,2 TCF que le permite cubrir las demandas actuales del energético tanto para la exportación y el mercado interno.

### Producción de Gas Natural Bolivia



Evaluación del Consumo de Gas Natural. Anuario Estadístico 2012. Ministerio de Hidrocarburos y Energía



Hasta fin de año, la producción de gas natural llegará a 69 millones de metros cúbicos día (MMmcd), lo que permitirá generar un excedente de 10 MMmcd que, por el momento, no tiene un mercado seguro.

Desde 2014 hasta 2025, YPFB y las empresas petroleras que operan en el país invertirán unos \$us 17.500 millones en actividades de exploración hidrocarburífera, para reponer y mantener las reservas actuales en hidrocarburos en 51 áreas disponibles de desarrollo *hidrocarburifero*.

Lic. Carlos Villegas Soberanía Hidrocarburífera al 2025

### **Ciencia y Tecnología**

En Bolivia las políticas de formación científica y tecnológica han sido insuficientes, en este contexto, el rol que deben desempeñar el Estado, las instituciones educativas públicas y privadas de nivel superior y técnico de manera integral y en una relación de sinergia es fundamental para la construcción de una plataforma tecnológica y de recursos humanos dedicada al desarrollo y potenciamiento del sector hidrocarburos en Bolivia.

Soberanía Hidrocarburífera al 2025 Encuentro Nacional Tarija 29 y 30 Octubre de 2013 El **Instituto de Investigación y Desarrollo de Hidrocarburos - Tarija** IIDH-Tarija es un Organismo Descentralizado de la Administración Pública de carácter preponderantemente técnico educativo y cultural, con personalidad jurídica y patrimonios propios. Responde a las directrices de la plataforma de investigación en hidrocarburos y energía El domicilio legal del Instituto estará ubicado en la ciudad Tarija.

El instituto tiene por objeto la investigación y el desarrollo tecnológico requeridos por las industrias petrolera, petroquímica y química, la prestación de servicios técnicos a las mismas, la comercialización de productos y servicios resultantes de la investigación, así como la formación de recursos humanos altamente especializados en las áreas de su actividad, mediante:

### **Infraestructura y Equipamiento Laboratorios Facultad de Ciencias y Tecnología**

#### **Objetivo General**

Contribuir al logro de una formación profesional de los estudiantes de la Facultad de Ciencias y Tecnología, con calidad, pertinencia, e integralidad, a través de la implementación de infraestructura y equipamiento tecnológico de enseñanza y mejoramiento académico, investigación y extensión acorde a los avances científicos y los estándares de acreditación.

#### **Objetivos Específicos**

Equipar los laboratorios de Química, Física, Operaciones Unitarias y Servicios Petroleros e Industriales pertenecientes a la Facultad de Ciencias y Tecnología.



Nómina General de Ensayos

ID	TESTS	NORMA ASTM/AASH TO	Crudo	Fuel Residual	Fuel Oil	Diesel/ Gas Oil	Gasolina	Asfalto	LPG y Otros Gases	Gas Natural
1	Contenido Agua	D95/ T55, T59	X	X	X	X		X		
2	Contenido Agua y Sedimentos (Centrifuga)	D1796	X	X	X	X				
3	Contenido Cenizas	D482		X	X	X				
4	Contenido Sedimentos (Por extracción)	D473	X	X	X	X				
5	Cromatografía Gaseosa								X	X
6	Densidad/Densidad API	D1298/D287/ D70	X	X	X	X	X	X		
7	Destilación ATM	D86		X	X	X	X			
8	Viscosidad Cinematica	D445	X	X	X	X	X			
9	Sulfuro de Hidrogeno	D2420							X	
10	Contenido de Azufre	D4294	X	X	X	X	X			
11	Corrosión de Cobre	D130			X	X	X			
12	Corrosión de Cobre	D1838							X	
13	Punto Inflamación	D93			X	X	X			
14	Punto Enturbiamiento/ Punto Escurrimiento	D97/D2500	X	X	X	X				
15	Contenido de Agua (Karl Fisher)	D6304					X			X
16	Residuo Carbonoso									
17	Conanson	D189			X	X	X			
18	Contenido Sales	D3230	X		X					
19	Doctor Test	D4952					X			
20	Presión de Vapor	D5191/D6378					X			
21	Residuos volátiles y no volátiles	D402						X		
22	Humedad	D1461/T110						X		
23	Breaking Point FRASS									
24	Method	D6521/R28						X		
25	Analisis Destilación	D20/D2569						X		
26	Contenido de Ceras y Parafinas	IP459-1						X		
27	Ensayo Oliensis	T102						X		
28	Solubilidad en triclوروetileno	D2042						X		
29	Carga de partículas	D244/T59						X		
30	Ensayo Película delgada	D2872						X		