

# *Estudio Técnico-Económico de Sistemas Híbridos Basados en Hidrógeno para una Población Aislada de la Patagonia Argentina*

Abdelbassat Abdelbaki<sup>1</sup>; Héctor Lorenzetti<sup>1</sup>; Ezequiel Leiva<sup>2</sup>, Carlos Rodríguez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Energías Renovables (LER) - Unidad Académica Caleta Olivia - Universidad Nacional de la Patagonia Austral

<sup>2</sup>INFIQC, Departamento de Matemática y Física, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Nacional de Córdoba, Haya de la Torre s/n, (5010) Córdoba, Argentina.

<sup>3</sup>Departamento de Matemática, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 299, (5010) Córdoba, Argentina, ramiro246@gmail.com

**Resumen** - El propósito del presente estudio es el diseño de sistemas energéticos híbridos eólico-hidrógeno para su comparación con un sistema basado en el uso de combustible fósil solamente. Dicho estudio se aplicó a la localidad "Tres lagos", provincia de Santa Cruz, Argentina. La herramienta utilizada para el análisis y diseño del sistema es el programa de uso libre HOMER® el cual optimiza el funcionamiento de un sistema microenergético particular para cada hora del año utilizando datos de equipos seleccionados por el modelador y considerando parámetros de energías renovables como la velocidad y distribución de velocidades de viento.

**Palabras claves:** Sistema híbrido, hidrógeno, costo de la energía, HOMER, Patagonia

**Abstract** - The purpose of the present study is to design a hybrid renewable-hydrogen energy system to be employed in a typical remote population of southern Patagonia in Argentina, a region with typical class 7 winds. The data employed for the present simulations correspond to "Tres Lagos" town, province of Santa Cruz, Argentina, with ca 200 inhabitants.

The analysis was carried out through Homer free software, which models the operation of a particular micropower system for every hour of year using manufacturer data from equipment selected by the modeler, and takes into account local parameters like wind speed and wind speed probability distribution. It also determines whether the system meets required loads and calculates life-cycle costs.

**Keywords:** Stand-alone hybrid system, Hydrogen-based power, Cost of energy, HOMER, southern Patagonia

## INTRODUCCION

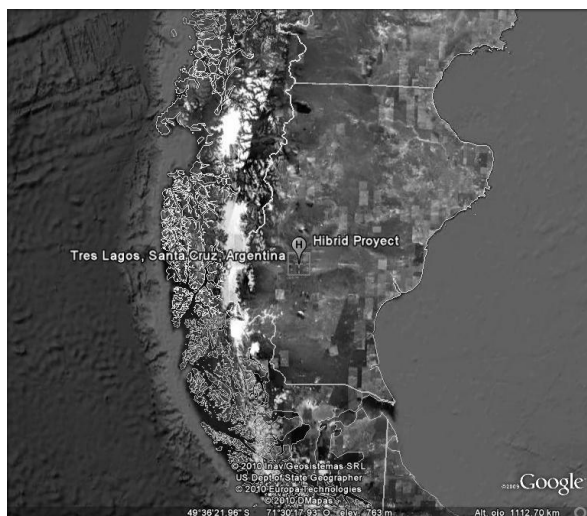
La principal red de transporte de energía eléctrica de Argentina es el SADI (Sistema Argentino de Interconexión) el cual colecta y distribuye la potencia eléctrica generada en la mayor parte del país. El mercado eléctrico en el área SADI está manejado por el MEM (Mercado Eléctrico Mayorista) donde a fines del año 2012 la potencia total instalada as-

cedía a 31 GW (<http://www.cammesa.com/>, 2011).

El SIP (Sistema Interconectado Patagónico) era una red eléctrica independiente hasta que el Plan Energético Nacional puso en marcha la ejecución del vínculo SADI-SIP. Sin embargo características geográficas y demográficas de algunas localidades hacen que el suministro de energía eléctrica por medio de líneas convencionales presente un alto costo dada su baja densidad de utilización, lo que motiva

que aún se encuentren aisladas de la red.

Éste es el caso de la localidad Tres Lagos sobre la que se realiza el presente estudio, ubicada en la región de la Patagonia, Departamento Lago Argentino, Provincia de Santa Cruz, con coordenadas geográficas: S 49° 35.826', W 71° 26.211' a 257 metros snm. La imagen satelital del área bajo estudio, tomada de Google Earth, se muestra en la Fig. 1. Su población, según el censo INDEC 2001, ascendía a 186 habitantes.



**Figura 1** - Área bajo estudio, ubicación de Tres Lagos en la provincia de Santa Cruz

Típicamente las comunidades aisladas necesitan sólo de una pequeña cantidad de energía para satisfacer sus necesidades básicas. En la actualidad, para obtener luz, algunas usan pequeñas lámparas de querosene, queman madera o usan gas licuado de petróleo a un costo subsidiado por el Estado. El consumo de energía a satisfacer en Tres Lagos, proporcionado por SPSE (Servicios Públicos Sociedad del Estado) es de 1.589 kWh/d con un pico de demanda medio de 94 kW. En el caso bajo estudio el consumo mensual promedio es de 48.512 kWh (41.600 kWh en enero y 55.424 kWh en junio). Suponiendo que habitan 50 familias, la potencia necesaria media por familia es de 1,5 kW. De esta manera el sistema a diseñar deberá considerar una potencia de 100 kW (74.400 kWh/mes) para satisfacer holgadamente la demanda de energía y el pico de potencia.

Esta situación es ideal para plantear un modelado de sistema en isla (o fuera de red), el cual es el mayor sector micro-red en todo el mundo (Estado de la Industria Eólica en Argentina, 2009). Esto se debe tanto a los atractivos retornos financieros de la reducción del consumo de combustible diesel como a los avances en energía solar, eólica, almacenamiento de energía y los controles que permiten a los sistemas funcionar principalmente con energías renovables. Por otra parte la campaña para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y la necesidad de alcanzar la seguridad e independencia energética también están impulsando el crecimiento de los sistemas en isla a nivel mundial (<http://www.cammesa.com/>, 2011).

En Argentina existe un alto potencial de fuentes energéticas renovables y es posible establecer escenarios tecnológica y económicamente factibles con grandes ventajas ambientales. Como ejemplo de ello, en la región austral del país, las condiciones de viento son tales que ubican a la Patagonia Argentina entre las zonas más aptas del planeta para la producción y aprovechamiento de la energía eólica. Esta información se desprende de los altos valores del FC (Factor de Capacidad: energía generada por unidad de potencia nominal) (Estado de la Industria Eólica en Argentina, 2009) que indican que los mismos podrían duplicar los promedios mundiales. De este modo se presume que un proyecto basado en el uso de esta energía debería ser viable en esa zona.

La situación descrita motiva el análisis de pre-factibilidad de aplicación de sistemas híbridos basados en energías limpias renovables y alguna convencional de apoyo.

En este trabajo se diseñaron distintos esquemas para sistemas energéticos entre los cuales se considera la producción de electricidad mediante el uso de generadores diesel convencionales y la combinación de sistemas híbridos eólico-diesel y eólico-diesel-hidrógeno mediante un generador eólico que prevé la producción de hidrógeno electrolítico con el objetivo de almacenar el exceso de esta electricidad intermitente, a la vez que este combustible alimentará un generador eléctrico constituido por un motor a combustión interna. Adicionalmente se considera la presencia de un generador diesel que servirá de complemento y respaldo para la configuración energética planteada.

La herramienta utilizada para el análisis y diseño del sistema es el programa de uso libre HOMER® (<http://homerenergy.com/>) el cual optimiza el funcionamiento de un sistema microenergético particular para cada hora del año utilizando datos de equipos seleccionados por el modelador y considerando parámetros de energías renovables (como la velocidad y distribución de velocidades de viento). El programa determina si el sistema cumple con las cargas requeridas y calcula los costos del ciclo de vida incorporando diferentes elementos adecuados para el aprovechamiento de las energías renovables y tradicionales (Casarotto et al., 2011; Barragán y Fasoli, 2009; Mohd Zamri Ibrahim et al., 2010; Vallega et al. 2007; Padilla et al., 2007).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Demanda de Energía y Recursos

**Carga eléctrica primaria:** la demanda eléctrica, es decir la tasa a la cual la energía eléctrica es requerida para satisfacer una carga dada debido al uso de los diversos aparatos que consumen electricidad, se muestra en la Fig. 2. El perfil muestra la evolución de la carga a lo largo del año siendo los meses más demandantes junio, julio y agosto.

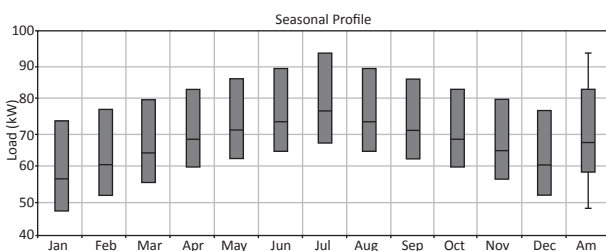


Figura 2 - Carga eléctrica primaria

**Recursos naturales:** el relevamiento de los datos de viento durante el año 1999 fue realizado mediante un convenio celebrado entre la UNPA (Universidad Nacional de la Patagonia Austral) y SPSE.

Los promedios mensuales de velocidad de viento medidos a 18 m de altura y 257 msn se muestran en la Fig. 3, exhibiendo una velocidad prome-

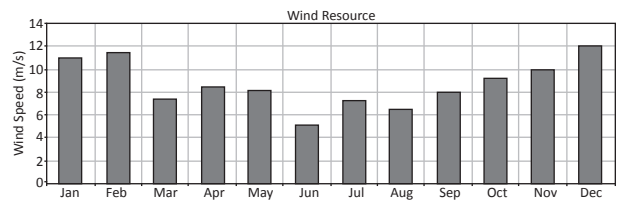


Figura 3 - Perfiles de velocidad mensual promedio

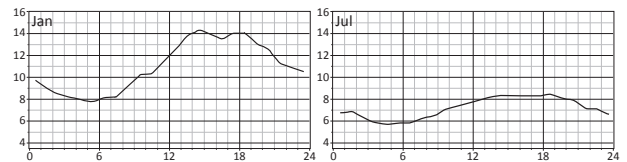


Figura 4 - Perfiles de viento, enero (izq.) y julio (der.)

dio anual de 8,70 m/s e indicando que durante ocho meses al año la velocidad media supera los 8 m/s. Asimismo los perfiles de viento de los meses que presentan valores más extremos se muestran en la Fig. 4.

La velocidad media de viento no da información de cuán aprovechable es el recurso sino simplemente del valor esperado de su distribución de probabilidad que, en el mejor de los casos, aproxima pero carece de contenido para entender verdaderamente el recurso en el campo. De este modo los datos de viento se analizaron usando la distribución de Weibull, debido principalmente a la gran diversidad de formas que el modelo puede tomar, según los valores de los parámetros distintos. La misma se muestra en la Fig. 5 con valores obtenidos mediante el análisis estadístico propio (UNPA\_SP) de los datos. Los parámetros de esta distribución son  $k=1,987$  y  $c=9,808$ .

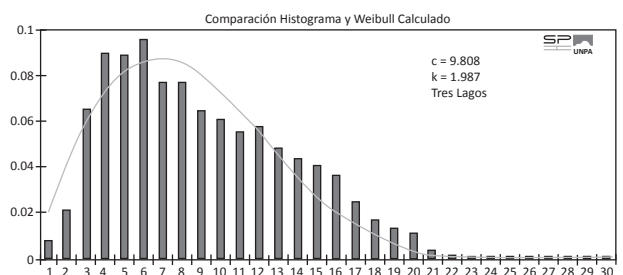


Figura 5 - Distribución de probabilidad de las velocidades de viento obtenida por UNPA-SPSE

A su vez se utilizaron los datos de radiación solar de la región para poder estudiar la posibilidad de aprovechamiento de la energía fotovoltaica. Este perfil de radiación se muestra en la Fig. 6.

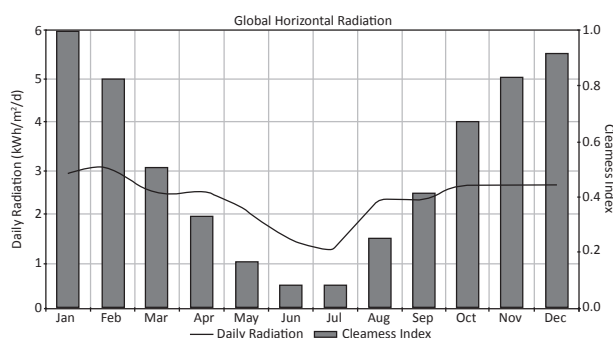


Figura 6 - Perfil de radiación solar de la zona en estudio

La Tabla 1 muestra los costos en dólares (U\$S) y la performance de los diversos componentes utilizados en las propuestas esquemáticas de constitución de los sistemas aislados de la red eléctrica tomados del trabajo de Ibrahim et al., (2010) y las referencias allí citadas.

**Sistemas analizados**

Se consideraron 47 combinaciones de diferentes sistemas y los de menor CoE (Costo de la Energía) obtenidos se muestran en la Tabla 2. Con

el objetivo de sintetizar presentamos tres sistemas representativos:

**Sistema 1. 100% renovable (solar y eólico),** Fig. 7.

**Sistema 2 (híbrido). Eólico, solar, hidrógeno,** Fig. 8.

**Sistema 3 (híbrido). Eólico, solar, hidrógeno, diesel,** Fig. 9.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Se utilizó la herramienta de análisis HOMER® con la cual se plantearon diferentes configuraciones de sistemas de energía compatibles con la satisfacción de demanda del sitio estudiado. Se analizaron 47 configuraciones que contemplan distintas categorías: sistemas con fuentes primarias renovables puras tales como eólica y solar y sistemas híbridos que combinan las anteriores y diesel como respaldo. En estos sistemas de Generación Distribuida, considerada como aquella que se produce cerca del consumidor (Vinci & Micheloud, 2012), es necesaria la complementariedad de sistemas de almacenamiento energético para acumular los excedentes de energía eólica o solar. Se consideraron para este efecto la producción de hidrógeno producido con un electrolizador con eficiencia 75%, un banco de baterías plomo-ácido marca Hoppecke de 2 [V], 3000 [A/h] y un volante de inercia (Flywheel) que almacena la

Componente	Unidad	Costo (Co) \$	Costo de replazo \$	O & M	Ciclo	Eficiencia %
Electrolizador	kW	1500 \$/ kW	80% Co	30 \$/año	7 años	75
Tanque H <sub>2</sub>	kg H <sub>2</sub>	1300 \$/kg	1200 \$/kg	15 \$/ año	25	
Generador diesel	kW	350 \$/kW	80% Co	0.8 \$/ kWh	15000 horas	30
Aerogenerador	kW	2000 \$/kW	80% Co	2 % Co/ año	25 años	
Generador H <sub>2</sub>	kW	500 \$/kW	80% Co	0.02 \$/kWh	15000 horas	30
Celdas fotovoltaicas	kW	1800\$/kW	1800\$/kW	30\$/año	20 años	~12%
Convertidor	kW	750\$/kW	750\$/kW	0	15 años	90%
Baterías	kWh	250\$/kWh	250\$/kWh	0	4 años	-
Volante inercia	kW	1500 \$/ kW	1500 \$/kW	1000\$/ año	15 años	-

Tabla 1 - Costos y performance de los equipos considerados

Sistema de Energía	Eólico [kW]	Solar [kW]	Diesel [kW]	H <sub>2</sub> [kW]	Electrol [kW]	Baterías	Volante [kW]	Capital inicial [US\$]	NPC [US\$]	CoE [US\$/kWh]	Frac renov	Exceso Elect [%]	.CO <sub>2</sub> [kg/año]
Eólico	400					900		2.300.000	2.482.373	0.788	1	69.6	0
Solar		3500				1200		8.250.000	8.460.487	2.693	1	82.1	0
Eólico-solar-baterías	400	300				600		2.315.000	2.493.716	0.793	1	74.1	0
Eólico-diesel	100		100			40	100	467.500	1.250.728	0.394	0.64	14.7	216.000
Eólico-solar-diesel-baterías	100	100	100			40		497.500	1.339.484	0.422	0.73	24.6	224.378
Solar-diesel		200	100					470.000	2.033.744	0.641	0.23	10.9	460.951
Eólico-diesel-hidrógeno	100		100	30	100	40	100	636.500	1.426.424	0.45	0.68	0.48	205.503
Eólico-solar-diesel-baterías-hidrógeno	100	100	100	30	100	40	100	816.500	1.505.730	0.475	0.73	2.81	173.387

Tabla 2 - Sistemas principales de menor CoE

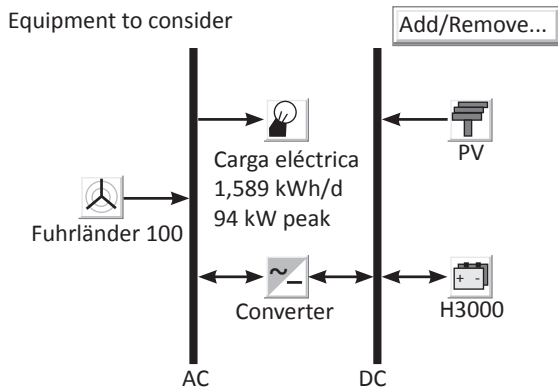


Figura 7 - Sistema 1

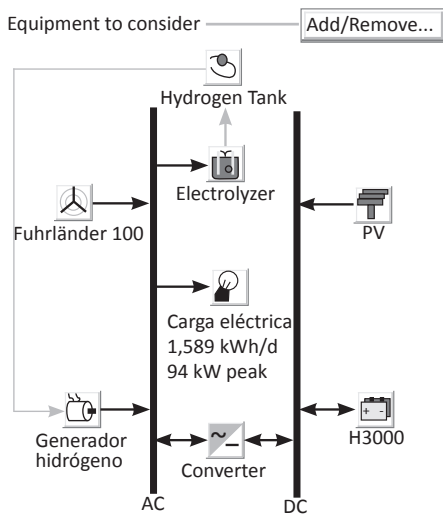


Figura 8 - Sistema 2

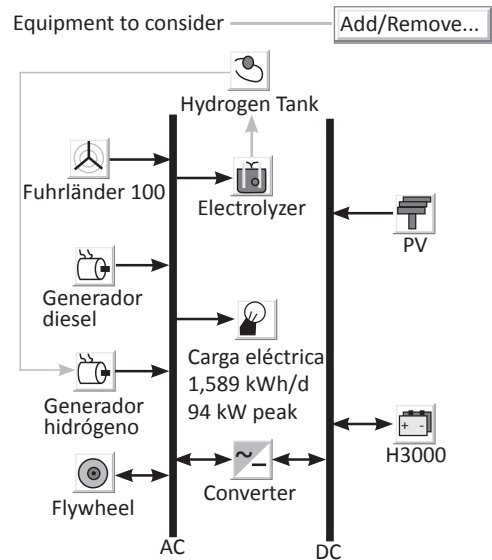


Figura 9 - Sistema 3

electricidad como energía cinética. Todos estos almacenadores entregan la energía acumulada como corriente continua por lo que es necesario adicionar un inversor (converter) para convertirla en alterna.

Las salidas del programa que se consideraron relevantes son: el Capital Inicial en [US\$], el Valor Presente Neto del proyecto (NPC en [US\$]), el Costo de la Energía (CoE en [US\$/kWh]), la fracción de utilización de renovables, el exceso de energía (en %) y las emisiones de CO<sub>2</sub> en [kg/año].

Del total de configuraciones se seleccionaron

aquellas con menor (CoE) correspondientes a cada categoría analizada, haciendo un total de 8 sistemas cuyos valores se muestran en la Tabla 2.

La valoración acerca del sistema a seleccionar como el más apto para una aplicación particular contempla un análisis detallado sobre las 6 últimas columnas. Se debe adoptar un criterio de ponderación de estos valores ya que algunos son de carácter financiero y otros técnicos o ambientales. En el orden financiero el NPC es importante para la valoración de inversiones en activos fijos. De este modo la alternativa que maximiza el NPC suele ser la mejor. Este criterio, sin embargo, no considera los factores técnicos y ambientales que, en alguna alternativa, aunque podrían involucrar un NPC menor, resultan más estratégicos. Debe tomarse en cuenta que el NPC considera que la energía se vende en su totalidad, en cada caso, al CoE correspondiente y con la inversión inicial necesaria. Esto es, en el caso del sistema solar puro, aunque presenta el NPC más alto, se observa que el CoE y la inversión inicial están entre -3 y 8 y 4 y 17 veces - superiores a los demás sistemas, respectivamente. En el otro extremo la configuración que presenta el menor CoE (0,394 [US\$/kWh]), es el sistema eólico-diesel que emite 216.000 [kg/año] de CO<sub>2</sub>.

La variabilidad de la fuente primaria renovable, de predictibilidad reducida, conduce a considerar la mayor diversificación energética con el consiguiente aprovechamiento de los distintos recursos naturales disponibles como el tipo de sistema que reporta mayor confiabilidad y estabilidad a la red.

Esta situación se evidencia cuando se contrasta la demanda anual de carga eléctrica con la producción de fuentes renovables. Se observa que hay meses en los que hay excedentes de energía y otros en los cuales la producción es inferior a la demanda. Esto se debe a que mientras mayor es la carga eléctrica en los meses invernales, del mes 5 al 9, menor es la oferta de recursos renovables (Fig. 10).

A la hora de diseñar la configuración de un sistema, éste debe ser capaz de satisfacer a la demanda pico, de modo que es difícil (o imposible) el balance nulo de energía neta mensual.

En el período de déficit energético (ca. de 3000 kWh) es imprescindible contar con un sistema de respaldo energético provisto tanto por fuentes no renovables como el diesel como por el almacenamiento de los

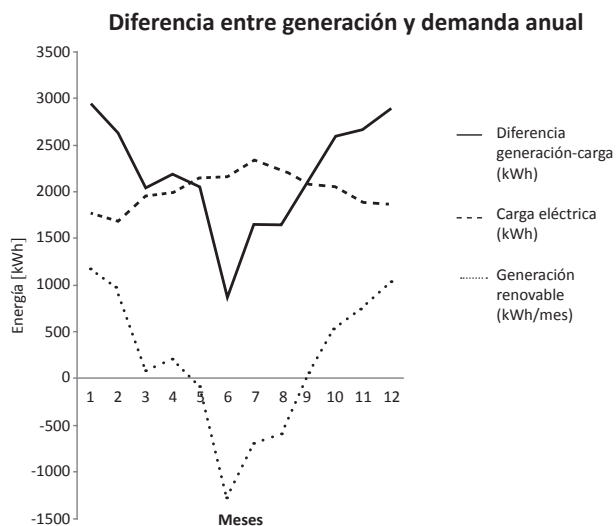


Figura 10 - Diferencia entre generación y demanda anual

excedentes energéticos producido por renovables en los meses no comprendidos entre mayo y septiembre. Esta situación enfatiza la importancia de contar con múltiples sistemas de almacenamiento.

Todas estas consideraciones están mejor contempladas y resueltas por el sistema 3 (Fig. 9).

## CONCLUSIONES

Se presentó una evaluación técnica, económica y ambiental sobre la satisfacción de la demanda de energía en una población aislada de la red eléctrica de la Patagonia Austral. Se propusieron una cantidad de sistemas de energía con diversas configuraciones de fuentes primarias conformando un conjunto de sistemas puros o híbridos, todos capaces de satisfacer la demanda energética.

Se modelaron todos los sistemas en isla (o fuera de red) mediante el programa de uso libre HOMER® con el cual se propone al sistema eólico, solar, hidrógeno, diesel más banco de baterías como aquel capaz de considerar la mayor diversificación energética y aprovechamiento de los distintos recursos naturales disponibles. Se concluye que este sistema reporta mayor confiabilidad y estabilidad a la red ya que los excedentes de energía eólica o solar, acumulados en los sistemas de almacenamiento, se pueden utilizar para cubrir huecos de tensión o micro-cortes (Matriz de recursos energéticos de la

provincia de Córdoba, 2013).

### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Unidad Académica Caleta Olivia de la Universidad Nacional de la Patagonia Austral y a la empresa Servicios Públicos Sociedad del estado por la provisión de los datos de viento. Agradecemos también a los ingenieros R. Oliva y J. Lescano por el aporte de datos de la zona.

### REFERENCIAS

<http://www.cammesa.com/>, 2011  
*Estado de la Industria Eólica en Argentina. Cámara Argentina de Energías Renovables*, (2009).  
<http://homerenergy.com/>  
Casarotto, Romano y Collihuin, “Evaluación de sistemas híbridos para electrificación de zonas remotas mediante HOMER”. *Actas de HYFUSEN, trabajo 18-037*, (2011).  
Barragán y Fasoli, “Simulador de sistema híbrido eólico-solar de baja potencia”, *Actas del III Congreso Argentino y II Iberoamericano “Hidrógeno y Fuentes*

*Sustentables de Energía”*, *Actas de HYFUSEN, Trabajo 10-172*, (2009).

Barragán, Sagardoy, Cristófalo, Somoza, Orbez, D’Atri, Gill y Fasoli, “Proyecto HACHE. Parte III: Diseño de un generador eléctrico para sistemas eólicos de baja potencia”, *Actas del III Congreso Argentino y II Iberoamericano “Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía” Actas de HYFUSEN, Trabajo 10-112*, (2009).

Mohd Zamri Ibrahim, Roziah Zailan, Marzuki Ismail and Abdul Majeed Muzathik, «Pre-Feasibility Study of Hybrid Hydrogen Based Energy Systems for Coastal Residential Applications». *Energy Research Journal 1 (1): 12-21*, (2010).

Vallega, Orfali Fabre, De Lorenzo, Lavorante y Fasoli, “Proyecto HACHE”. I: *Energía para volver a la tierra. Actas de HYFUSEN, Trabajo 16.7. A*, (2007).

Padilla, Barragán, Sagardoy, Cristófalo, Mouras, Somoza, Domínguez y Fasoli, “Proyecto HACHE. II: Aerogeneradores de baja potencia para pobladores aislados de la Patagonia”. *Actas de HYFUSEN. Trabajo 7.8*, (2007).

Vinci & Micheloud, “Smart Grid: Fundamentos, tecnologías y aplicaciones”. *CENGAGE LEARNING*, (2012).

“Matriz de recursos energéticos de la provincia de Córdoba”. *Copiar*, 65-66, (2013).