

Diseño por simulación de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico para una vaquería en Cuba

Design by simulation of a PV-Wind hybrid system for an isolated dairy farm in Cuba

Antonio Werner-de Dios-Ortega, Michel Errasti-Cabrera

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables. CETER. La Habana. Cuba

Correo electrónico: adedios@mecanica.cujae.edu.cu

Recibido: 19 de julio de 2012

Aceptado: 30 de noviembre de 2012

Resumen

En este artículo se diseñó por simulación un sistema híbrido eólico-fotovoltaico de producción de energía eléctrica, para una vaquería aislada de la red eléctrica en Cuba. Las variables meteorológicas usadas fueron medidas durante un año. Estas son el punto de partida para la simulación usando el software HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable). Como resultado de la simulación HOMER muestra en una tabla de resultados con la combinación de todas las posibles variantes, ordenadas usando el capital inicial (Initial Capital). Combinando criterios técnico-económicos como el costo de la energía y la demanda insatisfecha se seleccionó la variante que mejor se ajusta a las necesidades de la vaquería.

Palabras claves: sistema híbrido eólico-fotovoltaico, simulación, electrificación rural, HOMER.

Abstract

In this article a design by simulation of a wind-photovoltaic hybrid system for an off-grid dairy in Cuba was made. The meteorological variables used were measured during one year. These are the starting point for the simulation using the software HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable). As a result of the simulation HOMER displays a table of results with the combination of all possible variants, sorted using the initial capital (Initial Capital). Combining technical and economic criteria as the cost of energy and the unmet load a variant was selected that best fits to the dairy needs.

Key words: hybrid wind-photovoltaic, simulation, rural electrification, HOMER.

Introducción

Debido a los múltiples beneficios y la disminución de sus costos, la electrificación rural usando FRE (Fuentes Renovables de Energía) se ha convertido en una de las opciones más atractivas para acometer esta tarea [1]. El recurso solar se considera con un gran potencial de explotación en la mayoría de las regiones de nuestro planeta [2]. La energía eólica a pesar de tener características más zonales, según el Consejo Mundial de Energía Eólica (GWEC) en su informe anual de 2011, se mantiene como la de mayor crecimiento a nivel mundial. Por otra parte en muchas áreas de nuestro planeta existen buenas condiciones para explotar recursos solares y eólicos simultáneamente [3]. La combinación de varias FRE (sistemas híbridos) a menudo presenta ventajas ya que atenúa una de las principales desventajas de las mismas, la intermitencia en el suministro de energía. Esto se debe a que la energía viene de dos lugares diferentes; como consecuencia de esto se reduce la capacidad de los bancos de baterías, así como los costos del sistema. Sin embargo la selección correcta del porcentaje de participación de cada una de las fuentes es un problema complejo.

En este contexto, con el objetivo de reducir la dependencia de los combustibles fósiles e impulsar iniciativas locales de desarrollo basadas en FRE se diseña por simulación un sistema híbrido eólico fotovoltaico para una vaquería de producción de leche en una zona aislada de la red eléctrica en Cuba. Hoy en día estas instalaciones debido a sus necesidades energéticas son ubicadas en zonas con acceso a las redes de distribución de energía eléctrica convencionales. En ocasiones buscando la cercanía de dichas redes las instalaciones ocupan terrenos que no son los idóneos para este tipo de actividad. Las que operan en lugares aislados cuentan con generadores diesel que consumen combustible fósil contribuyendo a la degradación de las condiciones ambientales locales.

El diseño de sistemas híbridos basados en FRE depende de varias variables, lo que lo convierte en un problema multifactorial, dentro de estas variables hay un grupo que debido a su nivel de aleatoriedad afectan sensiblemente el diseño de los mismos. En este grupo se encuentran la demanda eléctrica del emplazamiento y las variables de tipo meteorológico como la radiación solar y la velocidad de viento.

Analizando el diseño de sistemas híbridos como un problema multifactorial, el primer paso fue la caracterización de las FRE en el contexto de la electrificación rural por Gee y Zweibel en 1997, [4]. Luego en el mismo año Georgopoulou hace la primera aproximación a la toma de decisiones bajo criterios múltiples analizando variables técnico-económicas y sociales [5]. En su estudio del año 2000 Afgan desarrolla un modelo que incorpora a las variables técnico-económicas y sociales las medioambientales y es capaz de trabajar con energía solar térmica, fotovoltaica, eólica y biomasa [6]. Por otra parte Bala, Siddique y otros en 2009 incluyen en sus modelos los generadores diesel que aunque usaban combustibles fósiles ayudaban a reducir las interrupciones del servicio eléctrico, así como abaratar el costo de la instalación [7].

Entre las principales ventajas de dichos modelos se encuentran:

- Realiza un análisis multicriterio combinado aspectos cuantitativos y cualitativos con una serie de criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales.
- Los criterios económicos toman en cuenta todos los aspectos de la instalación del sistema, lo que permite realizar una valoración al detalle de los mismos.
- Se detallan con suficiente profundidad los criterios ambientales.

Entre las principales deficiencias se pueden señalar:

- Los criterios a evaluar parten de un estudio en regiones de necesidades distintas a las de las comunidades en zonas de países en vías de desarrollo.
- Los criterios técnicos están enfocados a sistemas conectados a red y no a sistemas aislados.
- Utiliza los mismos criterios para evaluar diferentes tipos de tecnologías renovables: eólica, solar, biomasa y térmica.

Y finalmente están los modelos de diseño de sistemas híbridos que emplean técnicas de inteligencia artificial. Dufo y Bernal 2009 desarrollaron un modelo de diseño de sistemas híbridos que usan FRE basado en algoritmos genéticos en el cual la producción energética puede ser corriente alterna, directa o hidrógeno [8].

Después de haber desarrollado un grupo de modelos que facilitan el cálculo de los elementos que componen dichos sistemas, el trabajo se enfocó en la búsqueda de herramientas, generalmente de tipo económicas que permitieran seleccionar el tipo de sistema a partir de distintas configuraciones.

Con el objetivo de facilitar la toma de decisiones bajo diferentes criterios y tomando las experiencias de los modelos anteriores se han desarrollado diferentes tipos de software, dentro de ellos podemos mencionar *RETScreen*, *SURE*, *HOGA* y *HOMER* (*Hybrid Optimization Model for Electric Renewable*). Aunque este tipo

de software facilita los cálculos no existe un criterio unificado a la hora de seleccionar la configuración (porcientos de aporte de cada fuente) que presente mejores indicadores técnico-económicos [9], parámetro que influye directamente en los costos del sistema.

Teniendo en cuenta que la ganadería es una de las principales actividades económicas en las comunidades rurales y que para su desarrollo local tiene necesidades energéticas; el objetivo principal de este trabajo es: diseñar un sistema híbrido eólico-fotovoltaico que suministre energía a una vaquería aislada de la red eléctrica. Usando para la selección de la variante que mejor se ajusta a las necesidades los indicadores económicos costo de la energía (COE \$/kW-h) y demanda insatisfecha (kW-h/año).

Métodos

Principales características de HOMER

El software HOMER es la herramienta seleccionada para diseñar por simulación el sistema híbrido eólico fotovoltaico que suministrará energía a la vaquería. Este es capaz de manejar múltiples variantes de diseño, y ofrecer elementos que permiten establecer comparaciones basadas en criterios técnico-económicos y finalmente generar reportes de resultados. Partiendo de los requerimientos de diseño y de las variables meteorológicas, dicho software determina las posibles variantes de sistema y realiza la simulación de estas en un período de tiempo; esto tiene como finalidad observar el comportamiento simulado de cada variante y así poder efectuar ajustes más finos en el diseño. Otra de las bondades de HOMER son las herramientas económicas que permiten ir desde la selección de la variante hasta el estado financiero que tiene la misma en cada momento de su vida útil.

2. Variables de entrada

2.1 Variables fotovoltaicas

Los recursos energéticos de los cuales se dispone para llevar a cabo la electrificación son la radiación solar y la velocidad de viento. La vaquería que se tomó como caso de estudio está ubicada en la comunidad de Laguna Blanca ubicada en 21° 10' N y los 76° 11' O, al norte de la provincia de Holguín, Cuba. Los datos de radiación solar que se muestran fueron tomados de la base de datos de la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) [10].

Al analizar los datos de radiación solar (Fig. 1), se puede observar que el mes de mayor radiación es abril, con un promedio de 6,5 kW-h/m²día; el de menor radiación es diciembre con 3,4 kW-h/m²día y la radiación promedio en el año es de 5,1 kW-h/m²día, por encima de 3,2 kW-h/m² día se considera que existe un buen potencial para el desarrollo de la energía solar fotovoltaica [11]. Después de realizar los cálculos preliminares se determinó que el proceso de simulación se llevará a cabo con 3 valores de potencia fotovoltaica (PV): 2,1 kWp, 3 kWp y 3,9 kWp.

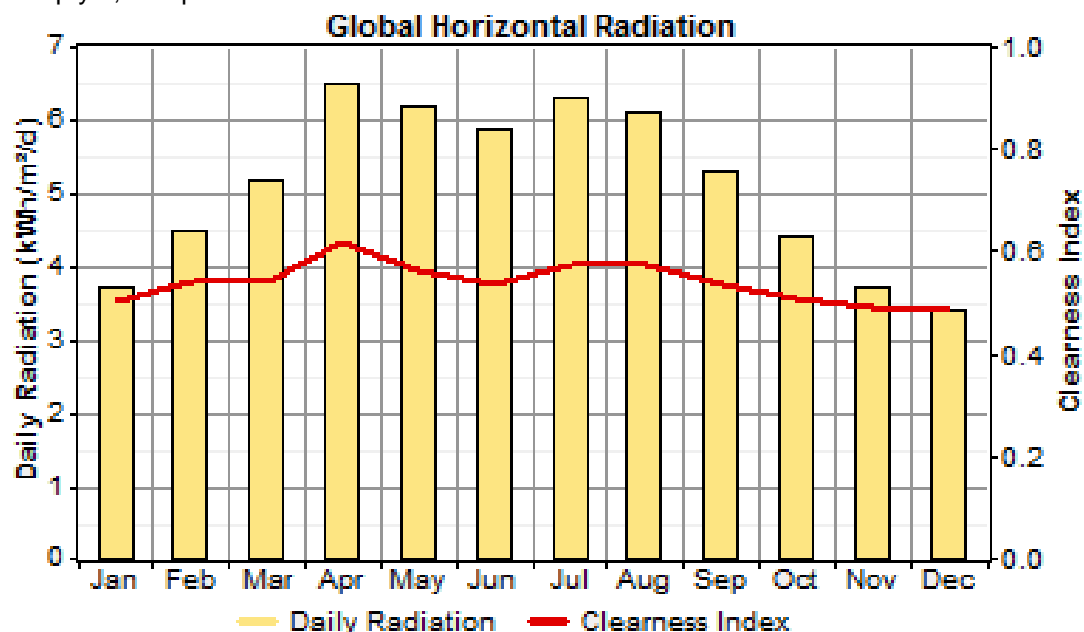


Fig. 1. Radiación solar global anual Holguín. Fuente: [10]

El sistema suministra energía en forma de corriente directa, ya que el equipamiento eléctrico de la vaquería funciona con 110 V de corriente alterna, se hace necesario seleccionar un inversor, cuya función es convertir la corriente directa en 110 V de corriente alterna. Para este diseño se seleccionó un inversor SMC 5000A fabricado por SMA, el cual tiene una eficiencia máxima de un 96,1 %. No obstante se consideró para la simulación una eficiencia promedio de un 90 %, ya que esta va a depender de la carga instantánea que maneje el inversor la cual varía constantemente, por otra parte le da un margen de seguridad al sistema.

2.2 Variables eólicas

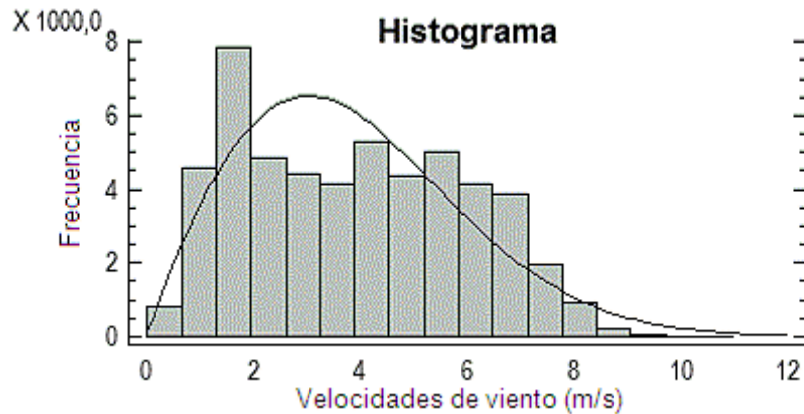


Fig. 2. Histograma de frecuencias y ajuste a una distribución de Weibull

La base de datos de la NASA ofrece los valores de velocidad de viento promedio mensual. Sin embargo con el objetivo de lograr una mayor exactitud en los resultados los datos de velocidad promedio mensual de viento se tomaron de mediciones realizadas por el Grupo de Energía Eólica de INEL. Empresa de Proyectos de la Unión Eléctrica, en una torre anemométrica con *datalogger* a 10m de altura durante un año, en el mismo emplazamiento. Para el procesamiento de estos datos se usó el software *Statgraphics*, se determinó el histograma de frecuencias y se ajustaron los mismos a una distribución de probabilidad de Weibull que es la más empleada para caracterizar la frecuencia de ocurrencia de una velocidad de viento dada según la bibliografía [12]. Como parámetros de dicha distribución se determinaron el factor de forma de 1,9529 y el factor de escala de 4,39336 m/s quedando esta representada gráficamente en la figura 2.

En la figura 3 se muestran las velocidades de viento promedio mensuales, es de señalar la velocidad promedio anual, 3,85 m/s, marzo es el mes de mayor velocidad del viento con un promedio de 5 m/s siendo los meses de mayo y octubre los de menor velocidad promedio, 3,1 m/s.

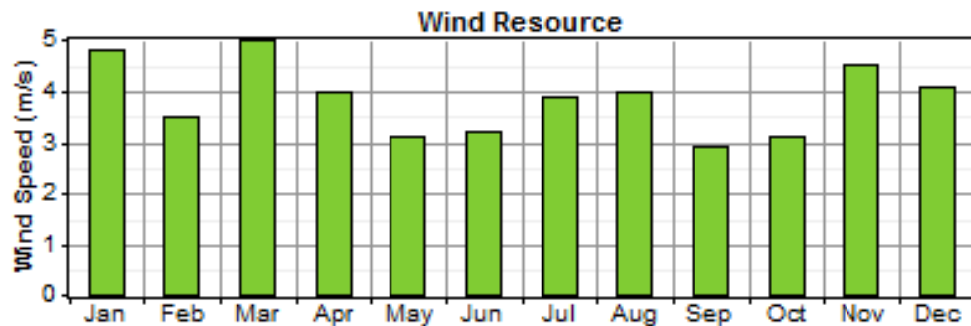


Fig. 3. Velocidades de viento promedio mensuales comunidad Laguna Blanca, Holguín.

Debido a las características de la demanda en el caso de estudio y a la disponibilidad en el mercado se seleccionó el aerogenerador Inclin3000, este no existía en la base de datos de HOMER y se agregó para realizar la simulación. Este aerogenerador tiene una potencia nominal de 3 kW.

2.3 Baterías

En el problema analizado la disponibilidad instantánea de energía tanto eólica como fotovoltaica no coincide con las necesidades energéticas de la vaquería por tanto es necesario almacenar dicha energía. Esta se almacenará en un banco, cuya función además de guardar energía es absorber las fluctuaciones de energía tanto en la demanda como en el proceso de acumulación de esta. Los bancos de baterías generalmente cuentan con un solo tipo de batería que en este caso debido a la disponibilidad en el mercado y

a la calidad se usó la Hoppecke 10 OPzS 1000 de ciclo profundo de plomo-ácido con un voltaje nominal de 2 V y una capacidad de 1000 Ah.

2.4 Demanda eléctrica

La vaquería seleccionada como objeto de estudio cuenta con 60 cabezas de ganado y su propósito es la producción de leche. La misma presenta el equipamiento eléctrico que se muestra en la tabla 1. A continuación se expone brevemente el funcionamiento de la instalación: bomba de vacío, encargada de succionar la leche de la ubre de la vaca y descargarla en un tanque acumulador; el agitador se instalado en dicho tanque, es el encargado de evitar la formación de hielo en la leche y homogenizar la misma ya que este recibe leche de diferentes vacas; el enfriador que le extrae el calor a la leche para evitar el desarrollo de bacterias en la misma; un lazo de control que automatiza todo este proceso y por último la iluminación.

Tabla 1. Elementos que componen la demanda energética

Equipos	Cantidad	Potencia (W)	Tiempo de uso diario (h/día)	Energía diaria (kW-h/día)	Energía anual (kW-h/año)
Lámpara fluorescente compacta	4	15	5	0,30	109,50
Bomba de vacío	1	2200	1	2,20	803,00
Agitador	1	300	2	0,60	219,00
Enfriador	2	1702	4	6,81	2484,92
Control	1	100	3	0,30	109,50
Total:				10,20	3725,92

En la figura 4 se muestra la distribución de la demanda eléctrica; esta comienza a las 9:00 pm y se mantiene con una carga baja (0,015 kW) hasta las 4:00 am. Luego comienza a aumentar hasta las 5:00 am donde se genera un pico eléctrico debido a la intensidad de trabajo de la vaquería a esta hora, y finalmente desciende hasta finalizar a las 10:00 am.

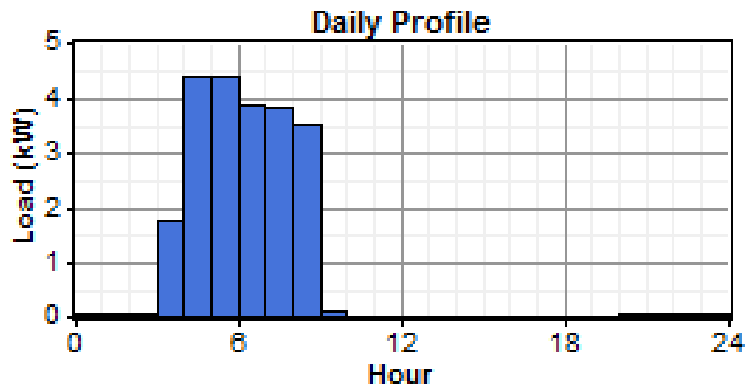


Fig. 4. Demanda eléctrica diaria estimada de la vaquería. Fuente: HOMER

3. Configuración del sistema

El sistema de generación de energía eléctrica se basa en el aprovechamiento de energía, eólica y fotovoltaica. Los sistemas híbridos combinan ambas tecnologías, pero en el caso específico del eólico fotovoltaico en las condiciones cubanas se puede lograr un mayor nivel de complementación. Esto se debe a que en los meses de Marzo a Octubre se registran las mayores velocidades de viento promedio, como se muestra en la figura 3. Y en el período alterno, o sea, de octubre a marzo se registran los mayores valores de radiación solar (figura 1). Por tanto cuando una de estas dos fuentes presenta niveles bajos, la otra presenta niveles altos, complementándose así para disminuir la fluctuación en el suministro.

Los sistemas híbridos pueden tener múltiples configuraciones en función del porcentaje de participación de cada fuente y que todos que logren suplir una demanda como se muestra a modo de ejemplo en la figura 4.; con un nivel de calidad fijado por el usuario que se cuantifica por ejemplo en cantidad de energía en kW-h que se demandó y el sistema no fue capaz de generar. Este parámetro en HOMER se denomina *Unmet electricit*

load (demanda eléctrica insatisfecha). El diseño se realizará a partir de las variables de entrada simulando todas las combinaciones posibles.

Resultados

En la figura 5 se muestra el esquema del sistema híbrido eólico fotovoltaico diseñado para la vaquería así como sus principales componentes. HOMER es capaz de simular muchas posibles variantes de sistemas y hacer un análisis económico de cada una por separado; lo que permite comparar usando criterios como el costo de la energía, demanda insatisfecha, capital inicial y *cash flow* de cada variante, para decidir cuál es la más adecuada para las necesidades de la vaquería.

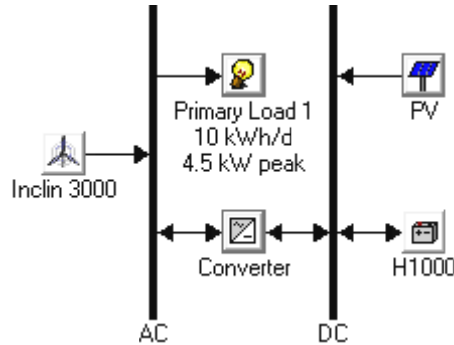


Fig. 5. Elementos del sistema. Fuente: HOMER

Como resultado de la simulación se obtuvieron 12 variantes. En la tabla 2 se muestran todas las posibles combinaciones de sistema híbrido a partir de las variables de entrada, organizadas de forma descendente teniendo como criterio el costo total.

Tabla 2. Resultados de la simulación

				PV (kW)	Inc	H1000	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage
				2.1	1	12	5	\$ 21,483	282	\$ 27,127	0.370	1.00	0.00
				3.0	1	12	5	\$ 23,103	331	\$ 29,724	0.404	1.00	0.00
				3.9	1	12	5	\$ 24,723	380	\$ 32,324	0.439	1.00	0.00
				2.1	2	12	5	\$ 26,809	376	\$ 34,331	0.466	1.00	0.00
				3.0	2	12	5	\$ 28,429	425	\$ 36,934	0.502	1.00	0.00
				2.1	1	24	5	\$ 31,311	300	\$ 37,311	0.507	1.00	0.00
				3.9	2	12	5	\$ 30,049	475	\$ 39,549	0.537	1.00	0.00
				3.0	1	24	5	\$ 32,931	350	\$ 39,931	0.542	1.00	0.00
				3.9	1	24	5	\$ 34,551	400	\$ 42,551	0.578	1.00	0.00
				2.1	2	24	5	\$ 36,637	400	\$ 44,637	0.606	1.00	0.00
				3.0	2	24	5	\$ 38,257	450	\$ 47,257	0.642	1.00	0.00
				3.9	2	24	5	\$ 39,877	500	\$ 49,877	0.677	1.00	0.00

En la tabla 3 se muestran otras características de las variantes que nos permiten realizar un análisis más profundo para la toma de decisiones. En ella podemos encontrar indicadores como la demanda insatisfecha y el exceso de electricidad (*Excess Electricity* kW-h/año), el cual es definido por HOMER como la energía que no se demandó por los consumidores habiendo disponibilidad por parte de las FRE.

Tabla 3. Características de las variantes

#	PV kW	COE \$/kWh	PV Production kWh/yr	Wind Production kWh/yr	Total Electrical Production kWh/yr	AC Primary Load served kWh/yr	Unmet Load kWh/yr	Excess Electricity kWh/yr
1	2,1	0,370	3.237	4.427	7.664	3.669	14	3.080
2	3,0	0,404	4.624	4.427	9.051	3.681	2	4.535
3	3,9	0,439	6.011	4.427	10.438	3.681	2	5.971
4	2,1	0,466	3.237	8.854	12.091	3.682	1	7.700
5	3,0	0,502	4.624	8.854	13.478	3.682	1	9.150
6	2,1	0,507	3.237	4.427	7.664	3.683	0	3.060
7	3,9	0,537	6.011	8.854	14.865	3.682	0	10.574
8	3,0	0,542	4.624	4.427	9.051	3.683	0	4.532
9	3,9	0,578	6.011	4.427	10.438	3.683	0	5.969
10	2,1	0,606	3.237	8.854	12.091	3.683	0	7.698
11	3,0	0,642	4.624	8.854	13.478	3.683	0	9.149
12	3,9	0,677	6.011	8.854	14.865	3.683	0	10.574

Discusión

La calidad de cada variante, en cuanto a fiabilidad del sistema está estrechamente relacionada con la demanda insatisfecha, ya que en la medida que disminuyen las interrupciones del servicio eléctrico se dispone de un sistema más fiable o de mayor calidad. Como se puede apreciar en la tabla 3 la variante de mayor demanda insatisfecha es la No.1 con 14 kW-h/año, a modo de ilustración, teniendo en cuenta la demanda diaria del sistema esto es aproximadamente un día y medio sin electricidad si se concentraran todos los momentos en los que el sistema no pudo suplir la demanda. También hay que señalar que la demanda insatisfecha disminuye de forma descendente en la tabla 3.

Otro indicador que se ve reflejado en la tabla 3 es el costo de la energía, este representa cuánto cuesta producir un kW-h en dependencia de las características de cada sistema. También se puede apreciar que este indicador aumenta en la medida que se desciende en la tabla.

Por tanto habiendo observado que el costo de la energía aumenta en la medida que se desciende en la tabla y la demanda insatisfecha disminuye en la medida que se desciende en la tabla se decidió tomar como la variante que más se ajusta a las necesidades del sistema la que menor diferencia porcentual tenga entre costo de la energía y demanda insatisfecha. Para este fin se usó el método gráfico que ilustra mejor la variante a seleccionar [13]. Sin embargo ambos indicadores tienen diferentes escalas y magnitudes, por lo que no es posible simplemente tomar los valores y graficarlos, hay que llevarlos a escala porcentual (adimensional). Para llevarlos a esta escala, en el caso del costo de la energía, se tomó el mayor valor de la tabla, 14 kW-h/año y se le asignó el 100% y al menor valor, 0 kW-h, 0%. En el caso del costo de la energía se trabajó de la misma manera, el 100% al mayor valor, 0,68 \$/kW-h y el 0% al menor 0,37 \$/kW-h.

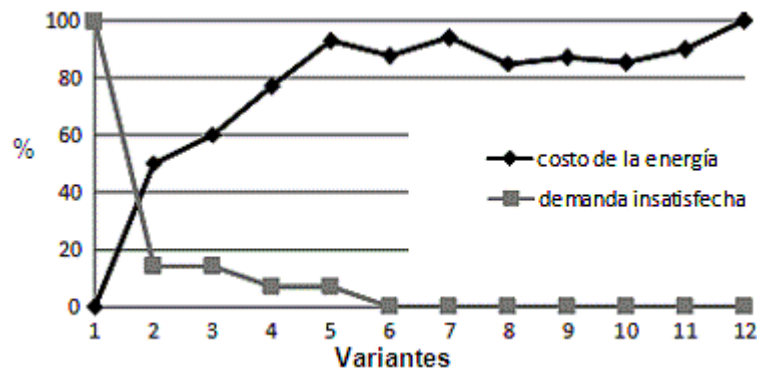


Fig. 6. Escala comparativa de los indicadores costo de la energía y demanda insatisfecha.

En la figura 6 se puede apreciar el comportamiento de las variables demanda insatisfecha y costo de la energía. La demanda insatisfecha se comporta de forma decreciente en la medida que aumenta el número de la variante. Primero ocurre un cambio de pendiente brusco de la variante No.1 a la No.2 ya que desciende de 14 kW-h/año a 2 kW-h/año, sin embargo a partir de la variante No. 2 disminuye de forma más suave hasta llegar a 0. La variable costo de la energía comienza a crecer de la variante No.1 a la Variante No. 5 y de ahí fluctúa entre 0,5 a 0,67 \$/kW-h.

Ambas curvas se cortan entre las variantes No.1 y No.2. Teniendo en cuenta que la variante óptima entre las dos variables está determinada por la menor diferencia porcentual existente entre ellas, entonces se puede seleccionar como la variante que mejor se ajusta a las necesidades de la vaquería a la No.2.

Características de la variante seleccionada

Del total de la producción energética anual el sistema fotovoltaico aporta 51 % mientras que el eólico un 49%.

El sistema seleccionado cuenta 20 módulos fotovoltaicos IS-150/ de 150 Wp, un Inversor SMA SunnyBoy SB-5000TL-20 de 5 kW, un aerogenerador Inclin3000 de 3 kW de potencia nominal y 12 baterías Hoppecke10 OPzS 1000 de 1000 Ah a 2 V.

También se puede observar que para la variante seleccionada el costo de la energía es de 0,40 \$/kW-h, superior al estimado de generación de la Empresa Eléctrica 0,27 \$. Con el objetivo de exponer mejor esta diferencia y teniendo en cuenta que el proyecto pretende electrificar una vaquería que se encuentra en una región aislada de la red eléctrica, usando las herramientas de HOMER, se realizó una comparación entre la instalación del sistema híbrido eólico-fotovoltaico y una supuesta extensión de la red eléctrica llegando a la conclusión que es más económico extender la red hasta 1,5 km, el costo de extensión de la red aumenta significativamente con cada km de incremento [14], de ahí en adelante el sistema híbrido es más competitivo.

Es de señalar que los sistemas híbridos que usan fuentes renovables de energía tienden cada vez a ser más competitivos tanto por el abaratamiento de la tecnología y bajos costos de mantenimiento [15], sin embargo la ventaja principal de estos sistemas es que son amigables con el medio ambiente, por tanto, es una fuente de energía sustentable a largo plazo.

Conclusiones

Habiendo analizado los aspectos referentes al diseño de sistemas híbridos para una vaquería aislada de la red eléctrica se puede concluir que los sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos son capaces de suministrar energía eléctrica a una vaquería aislada de la red eléctrica. Por otra parte el sistema híbrido que mejor se ajusta a las necesidades de la vaquería es el concerniente a la variante No.2. con un 51 % de aporte del sistema fotovoltaico y 49 % el eólico; y cuenta con 20 módulos fotovoltaicos de 150 Wp, 1 aerogenerador de 3 kW, 12 baterías Hoppecke 10 OpzS 1000 y un inversor de 5 kW. Por otra parte el análisis de la relación entre los indicadores costo de la energía y demanda insatisfecha permite seleccionar la variante que mejor se ajuste a las características del sistema.

Referencias

1. Barnes, D. F. "Effective solutions for rural electrification in developing countries: Lessons from successful programs". *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 2011, vol. 3, nº 4, p. 260-264.
[Consultado el: 15 febrero 2012]. Disponible en:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877343511000546>. ISSN 1877-3435.
2. Anthony, F. Dürschner, C. y Remmers, K. H. *Fotovoltaica para profesionales: Diseño, instalación y comercialización de plantas fotovoltaicas*. Sevilla: Censolar, 2007. vol. 1, 319 p.
3. Dorji, T., Urmee, T. y Jennings, P. "Options for off-grid electrification in the Kingdom of Bhutan". *Renewable Energy*. 2012, vol. 45, nº 0, p. 51-58. [Consultado el: 20 abril de 2012].
Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148112001504>. ISSN 0960-1481.
4. Gee, J., Zweibel, K., Mcconnel, B., et al. *Renewable Energy Technology Characterization*. Washington DC: Electric Power Research Institute EPRI, 1997, 183 p.
5. Georgopoulou, E., Lalas, D. y Papagiannakis, L. "A multicriteria decision aid approach for energy planning problems: The case of renewable energy option". *European Journal of Operational Research*. 1997, vol. 103, nº 1, p. 38-54. [Consultado el: 3 de abril de 2012]. Disponible en:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221796002639>. ISSN 0377-2217.

6. Afgan, N. H., Carvalho, M. G. y Hovanov, N. V. "Energy system assessment with sustainability indicators". *Energy Policy*. 2000, vol. 28, nº 9, p. 603-612. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030142150000458..> ISSN 0301-4215.
7. Saheb-Koussa, D., Haddadi, M. y Belhamel, M. "Economic and technical study of a hybrid system (wind– photovoltaic–diesel) for rural electrification in Algeria". *Applied Energy*. 2009, vol. 86, nº 7–8, p. 1024-1030. [Consultado el: 16 de abril de 2012]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626190800264X>. ISSN 0306-2619.
8. Bernal-Agustín, J. L. y Dufo-López, R. "Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009, vol. 13, nº 8, p. 2111-2118. [Consultado el: 20 de abril de 2012]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109000215>. ISSN 1364-0321.
9. Muralikrishna, M. y Lakshminarayana, V. "Hybrid (solar and wind) energy systems for rural electrification". *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2008, vol. 3, nº 5, p. 8. [Consultado el: 3 de mayo de 2012]. Disponible en: http://www.arnjournals.com/jeas/research_papers/rp_2008/jeas_1008_131.pdf. ISSN 1819-6608.
10. Kusterer, J. M. y Stackhouse, P. W. *Atmospheric Science Data center* Langley. Langley, USA: NASA. 2010. [Consultado el: 13 Junio 2011] Disponible en: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>.
11. James, J. *Planning and installing Photovoltaic Systems, a Guide for installers, architects and engineers*. London, UK: James & James, 2006. Vol. 1, 387 p. ISBN 1-84407-131-6.
12. Almenedo, L. R., Díaz, C. B. y Gómez, S. A. *Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica*. Madrid: Editado por: SI, R. 2003. Vol. 1, 461 p. ISBN 84-7207-139-1.
13. Bilal, B. O., Sambou, V., Kébé, C. M. F. *et al.* "Methodology to Size an Optimal Stand-Alone PV/wind/diesel/battery System Minimizing the Levelized cost of Energy and the CO2 Emissions". *Energy Procedia*. 2012, vol. 14, nº 0, p. 1636-1647. [Consultado el: 23 de agosto de 2012]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610211045656>. ISSN 1876-6102.
14. Ávila-Prats, D., Alesanco-García, R. y Véliz-Alonso, J. "Sistemas híbridos con base en las energías renovables para el suministro de energía a plantas desaladoras". *Ingeniería Mecánica*. 2011, vol. 14, nº 1, p. 22-30. [Consultado el: 26 de agosto de 2012]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59442011000100003&lng=es&nrm=iso. ISSN 1815-5944.
15. Shaahid, S. M. y Elhadidy, M. A. "Economic analysis of Hybrid Photovoltaic Diesel Power Systems for Residential Loads in Hot Regions - A step to clean future". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008, vol. 12, nº p. 488-503. ISSN 1364-0321.