

# OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS HÍBRIDOS DE ENERGÍA PARA LA ELECTRIFICACIÓN RURAL DE COMUNIDADES INDÍGENAS DE MÉXICO

## OPTIMIZATION OF HYBRID ENERGY SYSTEM FOR RURAL ELECTRIFICATION OF INDIGENOUS COMMUNITIES IN MEXICO

Rodrigo Pérez-Ramírez<sup>1\*</sup>; Artemio Pérez-López<sup>2</sup>; Juan C. Martínez-Arremilla<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Programa Académico de Energía, Universidad Politécnica de Chiapas, Calle Eduardo J. Selvas s/n, Col. Magisterial, Tuxtla Gutiérrez Chiapas.

<sup>2</sup>Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, Estado de México, C. P. 56230.

<sup>3</sup>Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. 1a. Sur Pte. 1460, Col. Centro, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, C. P. 29039, MÉXICO

Correo-e: rperez@upchiapas.edu.mx (\*Autor para correspondencia)

### RESUMEN

Los sistemas híbridos de energía son una solución excelente para la electrificación de zonas rurales remotas donde la extensión de la red es difícil y cara. Estos sistemas incorporan una combinación de una o varias fuentes de energía renovables como la solar fotovoltaica, energía eólica y mini-hidráulica, y pueden ir acompañados de un generador eléctrico como soporte. Este documento analiza los distintos componentes de un sistema híbrido de energía y desarrolla un modelo general para encontrar una combinación óptima de los componentes para una comunidad rural típica, reduciendo al mínimo el costo de capital, el costo actual neto y el coste de la energía. El estudio de simulación y la optimización del sistema se basan en un programa de computadora llamado HOGA, como la herramienta de simulación. A partir del análisis económico, se determinaron los diferentes tipos de configuración del sistema. El funcionamiento óptimo tiene un costo unitario de 0,23 € kW<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup> con el sistema híbrido seleccionado, siendo el 100 % de la energía proveniente de recursos renovables, eliminando con ello la necesidad de un generador eléctrico alimentado con diesel. Los resultados del estudio serán útiles para ayudar a la toma de decisiones y en la elección del sistema más apropiado para la electrificación de las comunidades aisladas de la red.

**Palabras clave adicionales:** Sistemas híbridos de energía; energías renovables; HOGA; electrificación rural.

### ABSTRACT

Hybrid energy systems are an excellent solution for electrification of remote rural areas where grid extension is not easy and expensive. Such system incorporates a combination of one or several renewable energy sources such as solar photovoltaic, wind energy, micro-hydro and conventional generators for backup. The present paper discusses different system components of hybrid energy system and develops a general model to find an optimal combination of energy components for a typical rural community, minimizing capital cost, net present value and cost of energy. The simulation study and the optimization of hybrid energy system are based on a computer program known as HOGA, as simulation tool. From the economic analysis, the different types of system configuration were established. Optimal operation has a unit cost of 0.23 € kW<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> with the selected hybrid energy system, being 100 % renewable energy contribution, finishing with the need of a conventional diesel generator. Results from the study will be useful to help decision making and to choose the most appropriate system for the communities.

**Additional key words:** Hybrid systems; renewable energy; HOGA, rural electrification.

## INTRODUCCIÓN

Las energías renovables ofrecen grandes oportunidades para aplicaciones en regiones donde las energías convencionales están todavía ausentes o tienen una presencia parcial. Esto es particularmente útil en el sector rural con poblaciones con un alto nivel de pobreza en donde la falta de energía en las comunidades constituye una situación crítica, ya que está asociado con la ausencia de las telecomunicaciones, la educación, los servicios de salud y, en muchos casos, el agua potable (SENER, 2003).

Aunque México tiene una cobertura relativamente alta de suministro de electricidad (durante 2006 el 96.5 % de la población tuvo acceso a electricidad en sus hogares y el consumo anual alcanzó los 42,500 GW-h [SENER, 2006]), ésta es significativamente menor en los estados del sur del país, que tienen un menor nivel de infraestructura, una calidad inferior respecto a los servicios públicos y donde más del 10 % de las viviendas no tiene acceso a la electricidad (SENER, 2003).

Hasta hace poco, las únicas opciones realistas para la electrificación rural en México fueron la extensión de la red y el uso de diesel en minirredes; sin embargo, en el caso del sector rural y algunas zonas marginadas de las ciudades, debido a los altos costos que representa el suministro de la energía, no ha sido posible proveer de electricidad a la totalidad de la población. Esta situación propicia que los habitantes de estos sectores utilicen en forma intensiva la leña como principal combustible para los diversos usos finales (cocción, iluminación y calefacción), con los consecuentes daños que esto ocasiona, tanto a su salud como al medio ambiente (CONUEE, 2007).

Además de esto, las comunidades con falta de suministro de electricidad se encuentran generalmente en regiones montañosas, principalmente en las zonas cercanas a las fronteras entre los estados. El acceso a estos servicios a través de la utilización de la red nacional significa un aumento significativo en el coste. De hecho, según la información de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), la expansión de los sistemas de redes nacionales para cubrir estas áreas cuesta hasta tres veces el costo de la cobertura mediante el uso de un sistema no convencional de suministro de energía alternativa (SENER, 2003).

Teniendo en cuenta lo anterior, y debido a que una importante proporción de la población indígena reside en localidades dispersas o rurales, su atención se ha rezagado frente al resto de la población nacional, en donde la electricidad es el servicio que tiene menor disponibilidad en las viviendas indígenas, ya que aquellas que cuentan con éste son solamente 253 mil, 52 mil y 25 mil en los municipios indígenas, con presencia de población indígena y con población indígena dispersa respectivamente, lo que corresponde al 16.23 % de viviendas en las regiones indígenas (INEGI, 2005). Ante este panorama, los sistemas híbridos de energía renovable son una solución alternativa viable para estas situaciones, comparados con sistemas electrógenos utilizados convencionalmente, además de ser sistemas con una gran movilidad y un periodo largo de vida. En particular, por su enfoque integrado, un sistema híbrido es el más apropiado para las comunidades aisladas (Chun, 2002).

Un sistema híbrido de energía típico consta convencionalmente de un generador eléctrico diesel y sistemas de energía renovable basados en módulos fotovoltaicos (FV) y/o aerogeneradores de baja potencia, baterías y un inversor. Hasta ahora, la investigación sobre sistemas energéticos híbridos se ha concentrado en el análisis técnico y económico (Chun, 2002).

En algunos trabajos se ha demostrado la viabilidad económica de los sistemas híbridos para el suministro de energía eléctrica a núcleos aislados de la red, especialmente en zonas remotas de difícil acceso. Gutiérrez-Vera (1992) estudió y comparó diferentes opciones para electrificar comunidades aisladas de México, considerando tanto los sistemas centralizados como distribuidos, que hacen uso de generadores diesel, fotovoltaicos, eólicos y sistemas híbridos, obteniendo como resultado que los sistemas más apropiados técnica y económicamente, para las comunidades típicas aisladas de México, son los sistemas híbridos Fotovoltaico-Diesel con almacenamiento en baterías, en algunos casos incluyendo aerogeneradores. En otro trabajo (Wichert, 1997) se estudian sistemas híbridos de generación eléctrica basados en fuentes renovables, concluyendo que éstos son una alternativa viable a la red eléctrica convencional y al suministro de energía basado en combustibles fósiles en zonas alejadas de la red eléctrica.

Para el diseño de sistemas híbridos autónomos de energía renovable, el dimensionado correcto es crucial para que el sistema pueda proporcionar energía a un costo óptimo (Markvart, 1996). Asimismo, si los sistemas híbridos se diseñan y controlan de forma óptima, en muchos casos el coste de producción de cada kW-h se reduce respecto de las instalaciones generadoras que sólo hacen uso de una única fuente de energía (Dufo y Bernal, 2005).

Sin embargo, el dimensionado y optimización de sistemas híbridos de energía autónomos es más complejo que los sistemas individuales y no puede lograrse fácilmente usando los métodos clásicos de optimización (Backe *et al.*, 2000), debido a que el problema a resolver tiene un gran número de soluciones posibles (combinaciones de paneles solares, aerogeneradores, baterías, generador de diesel y las variables de estrategia). Esto se debe al alto grado de variabilidad de los recursos renovables (irradiación solar, viento, recursos hidráulicos), además de que algunos componentes del sistema muestran características no lineales, y, en fin, hay un número muy grande de variables que pueden influir sobre el proceso de optimización (Dufo y Bernal, 2005).

Existen varias aplicaciones disponibles, como HYBRID2 (Green y Manwell, 1995), elaborado por National Renewable Energy Laboratory (NREL) y TRNSYS (Fiscal *et al.*, 1995), y desarrollado por la Universidad de Wisconsin en EE.UU. HYBRID2 simula sistemas híbridos realizando cálculos de muy alta precisión, pero no optimiza el sistema. Por su parte, TRNSYS fue inicialmente desarrollado para simular sistemas termales y ha incorporado sistemas fotovoltaicos para simular sistemas híbridos como los que aquí se proponen, pero tampoco optimiza. Por otro lado, NREL (2010) desarrolló el programa HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable),

que optimiza sistemas híbridos, en donde el usuario debe introducir los parámetros para la optimización eligiendo las diferentes combinaciones de módulos fotovoltaicos, la batería y la potencia del inversor. La solución que HOMER genera no proporciona el número de paneles y su tipo; sólo la potencia del generador fotovoltaico a partir de los datos que el usuario introduce. Este método tiene un inconveniente: los tiempos de cálculo pueden aumentar enormemente, si es necesario un número representativo de las posibles soluciones (Dufo y Bernal, 2006).

Por su parte, HOGA (Hybrid Optimization by Genetics Algorithms), el programa utilizado en este artículo y desarrollado por Rodolfo Dufo y José Luis Bernal, optimiza sistemas energéticos híbridos como la fotovoltaica-eólica-mini hidráulica-celda de combustible y generador eléctrico diesel, utilizando algoritmos genéticos (Dufo y Bernal, 2005).

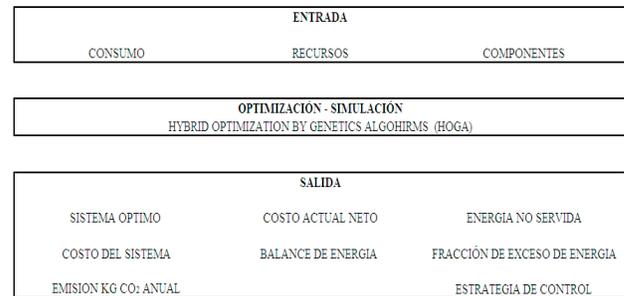
HOGA calcula la configuración óptima del sistema y describe con gran precisión el número y tipo de paneles fotovoltaicos, el número y tipo de baterías, la potencia del inversor, la potencia del generador eléctrico diesel, la estrategia de control óptimo con sus parámetros, el Costo Actual Neto (CAN) del sistema y los diferentes costos, tales como el coste del combustible y, por último, el número de horas de funcionamiento para el generador eléctrico diesel por año. Además, permite la optimización multi-objetivo, donde no sólo se busca la minimización de costes, sino también la minimización de otra variable: las emisiones de CO<sub>2</sub> o la energía no servida, el usuario lo decide. Dado que los dos objetivos mencionados anteriormente son en muchos casos contradictorios, cuando el sistema realiza la optimización multi-objetivo no llega a una única solución, sino que da un amplio abanico de soluciones, unas con mejor comportamiento en cuanto a emisiones o energía no servida, otras con mejor comportamiento en cuanto a costes.

El objetivo del presente estudio está dirigido a investigar una amplia gama de opciones convencionales y renovables para la generación y suministro de energía eléctrica, utilizando herramientas de análisis y optimización para la electrificación de una comunidad indígena aislada de la red eléctrica. Los resultados de este estudio se compararán con el coste de la extensión de la red y conducirán a la planificación y el diseño del sistema final en las comunidades.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para el dimensionado y optimización de sistemas híbridos de energía es necesario establecer, como características principales de entrada, la evaluación preliminar de los componentes del sistema, como paneles fotovoltaicos, aerogeneradores y generador eléctrico diesel, controlador e inversor de carga. También se debe realizar una evaluación y caracterización de los recursos energéticos renovables disponibles y establecer un patrón de consumo energético de la aplicación en análisis (la demanda eléctrica de una comunidad o de un proceso productivo). En la Figura 1 se muestra la arquitectura de optimización y simulación utilizada por HOGA.

Para cada combinación de componentes y variables de



**FIGURA 1. Arquitectura de optimización y simulación de HOGA.**

control se simula el sistema durante un año completo, ya que se considera que todos los años de vida útil del sistema serán iguales. Durante ese año, en intervalos de una hora, se obtienen todas las variables para definir el comportamiento del sistema, partiendo de las características de los elementos que lo componen, de las variables de control, de los datos de demanda energética y de los datos climatológicos. Consideramos el sistema semiestacionario, de forma que en cada intervalo de una hora las distintas variables del sistema permanezcan constantes.

Para cada uno de los componentes del sistema, en cada hora del año deben estimarse las siguientes variables: la corriente generada por las fuentes renovables -que depende de la irradiación solar y la velocidad del viento en esa hora-, la energía eléctrica consumida por las cargas (tanto corriente alterna AC como directa DC) y la cantidad de consumo de diesel, que depende de las cargas previstas para esa hora.

El estudio está basado en la comunidad indígena del Carrizal Paxtlán, del municipio de San Andrés Paxtlán, estado de Oaxaca. Esta comunidad está ubicada a 96° 30' LO 30 y 16° 13' LN, a una distancia de 110 km de la ciudad de Oaxaca y a 25 km de la red de distribución eléctrica más cercana. Se escogió este lugar por la disponibilidad de información, el potencial eólico disponible y porque no existen planes de extensión de la red eléctrica a esa zona debido a su inviabilidad económica.

Como primer paso, se determinó el perfil de carga que sirvió para diseñar y dimensionar el sistema híbrido. Posteriormente se analizaron y estimaron los recursos solar y eólico disponibles en el lugar y los costos del combustible diesel. Con esta información se procedió al dimensionamiento del sistema híbrido óptimo para el perfil de carga propuesto. Finalmente, se establecerán las conclusiones sobre el diseño, simulación, costo y operación del sistema híbrido.

Para el caso del análisis económico de la instalación, una vez calculado el sistema durante todas las horas de un año, HOGA conoce los distintos parámetros que van a determinar el CAN del sistema a lo largo de su vida útil: consumo de combustible, energía ciclada por las baterías, horas de funcionamiento de los distintos componentes y generación de CO<sub>2</sub>, entre otros. Con estos datos se puede saber el coste anual de los combustibles, así como el de operación y mantenimiento, además del coste inicial de ad-

quisición de los elementos. También puede saberse cada cuánto tiempo los elementos necesitarán reemplazarse. Finalmente, actualizando o trasladando todos esos costes al momento inicial de la inversión, se obtiene el CAN del sistema, y se ve por tanto lo adecuada que es esa combinación de elementos y variables de control. Asimismo, el cálculo de la vida estimada de las baterías es muy importante, puesto que influye en los costes de reposición de éstas y por tanto en el costo total del sistema.

### Perfil de consumo

El presente diseño se complica por el desconocimiento del posible perfil de consumo de la comunidad porque nunca antes han tenido electricidad. La experiencia dicta que en estos casos el paso suele producirse en tres escalones de mayor demanda: el primer escalón surge una vez que la electricidad ha sido instalada, el segundo, cuando los habitantes empiezan a emplearla, y el tercer escalón es cuando los usuarios comienzan a instalar más cargas y a emplear cada vez más electricidad. Por eso es importante en el diseño de la instalación prever la posibilidad de realizar futuras ampliaciones, y si no existe un condicionante económico serio, tender a sobrestimar las necesidades de forma que la instalación no se quede obsoleta demasiado rápido. El diseño deberá hacerse bajo un esquema de entendimiento de las prioridades, necesidades y expectativas de los usuarios, a fin de garantizar su aceptación y, por ende, su permanencia.

En la actualidad la mayor aplicación de los sistemas híbridos en lugares aislados se da para potencias menores a los 100 kW (Maskeys y Nestmann, 2002). Adicionalmente, de experiencias en la instalación de sistemas híbridos en lugares aislados del estudio (Manwell y McGowan, 2002) se establece que con potencias promedio por encima de los 15 kW los costos de ciclo de vida de los sistemas híbridos superan a un sistema de generación convencional diesel.

En la comunidad hay cerca de 100 residentes, y el aumento de la población se espera que sea del 5 % anual. Por análisis serios acerca del consumo de electricidad en viviendas indígenas, se supone que la demanda de carga eléctrica es de aproximadamente 4,094 kW-h·d<sup>-1</sup>, la cual está constituida por 40 casas, una escuela, un centro de salud rural y una pequeña tienda de productos básicos.

En este estudio, los aparatos eléctricos en las comunidades se supone que constan de los equipos de carga eléctrica básicos, tales como lámparas fluorescentes de 10 W y 20 W, televisores

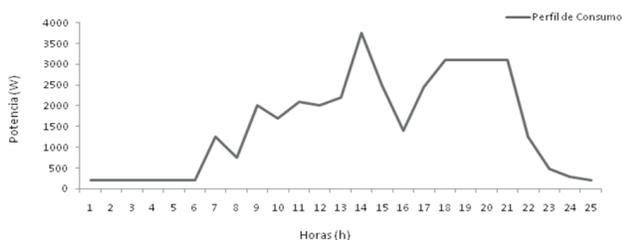


FIGURA 2. Demanda eléctrica anual en El Carrizal Paxtlán.

de 40 W a 200 W, radios de 10 W, frigoríficos de 50 W y ventiladores internos. El perfil de carga durante todo un día se muestra en la Figura 2.

### Recurso solar

La radiación solar es un proceso complejo y variable, ya que en su incidencia influyen factores atmosféricos, meteorológicos y de geometría solar, y la mejor manera de estimar este recurso es mediante una campaña de mediciones, pero este proceso requiere de una inversión económica y tiempo considerables de los que no se dispone actualmente; por ello se analizaron otras alternativas, para su estimación según el alcance del trabajo.

Considerando lo anterior, se captó la radiación sobre una superficie horizontal del sitio de estudio en el programa "Earth Science Enterprise (SSE)" (NASA, 2010). Esta información es el resultado de mediciones y estimación de parámetros meteorológicos y de radiación solar durante un periodo de más de 22 años (1983-2005). La información está organizada en un sistema de cuadrículas (1°x1° latitud-longitud) sobre el globo terráqueo. Los autores aseguran que la precisión de los datos es aceptable para un análisis de prefactibilidad de proyectos de generación eléctrica con energías renovables.

Los datos de entrada para el modelo de radiación son: latitud, 16.13; longitud, - 96.30; altitud, 1,697 m, zona horaria, GTM-6; presión atmosférica promedio, 91.4 KPa; albedo promedio, 0.13. Los resultados de la irradiación solar del caso de estudio se pueden ver en la Figura 3. El nivel de radiación es alto durante los meses de verano (mayo-agosto) en comparación con los otros meses. El valor medio anual de todos los días de la radiación solar es 5.84 kW-h·m<sup>-2</sup>.

A partir de los datos de irradiación solar horaria mensual sobre superficies horizontales se calculan 1,993 datos que serán

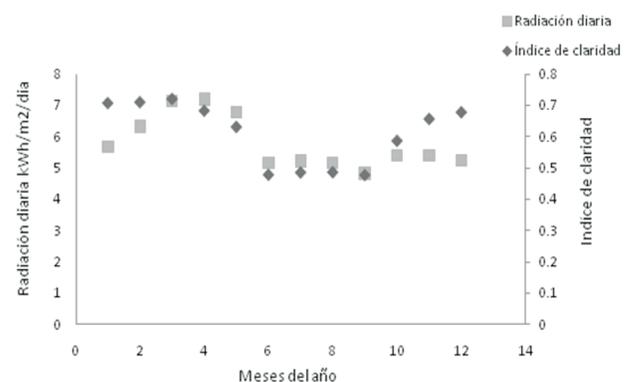


FIGURA 3. Radiación solar anual (kW-h·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>). El Carrizal Paxtlán.

utilizados para las simulaciones siguiendo el modelo Liu y Jordan (1960). La mayor ventaja de esta información es que contiene la variación del clima durante más de 20 años con una incertidumbre promedio del 10 %, en comparación con estaciones meteorológicas locales, y un valor máximo del 17 % para los años en los que se dio el fenómeno del Niño.

## Recurso eólico

Para estimar el recurso eólico se dispone de la velocidad promedio y máxima mensual para el periodo comprendido entre los meses de enero a agosto, obtenidos de mediciones realizadas en campo. Para ello se utilizó un anemómetro digital WindMaster 2, instalado a 6 m de altura en la comunidad del Carrizal Paxtlán. Fueron evaluadas las condiciones energéticas eólicas del lugar con el fin de conocer los parámetros característicos del viento, que son el de forma K y de escala C de la ecuación de Weibull, cuyos valores son: velocidad media  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , desviación estándar 2.97,  $K=1.83$  y  $C=5.85$ . Estos valores se encuentran representados en la Figura 4.

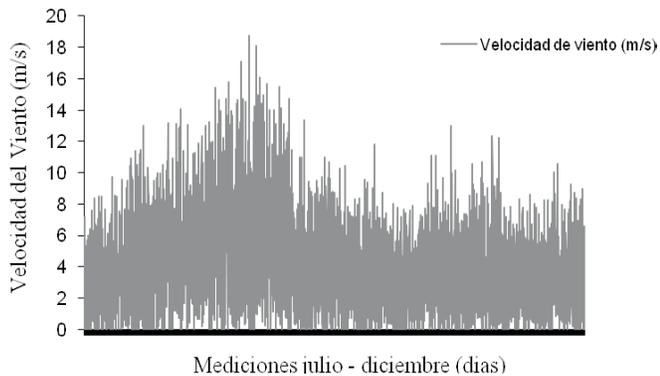


FIGURA 4. Frecuencia de velocidades. El Carrizal, San Andrés Paxtlán (julio-diciembre, 2006).

Como no se tiene información del periodo agosto-diciembre, se realizó una aproximación con la información proporcionada por SSE. En primer lugar, se consideró que el comportamiento del viento en la localidad del Carrizal es igual al presentado por SSE durante todo el año. Para la estimación de la velocidad del viento se hace una extrapolación lineal entre la información de las mediciones y los valores del SSE para los meses que no tienen la velocidad del viento. El resultado final se puede ver en la Figura 5.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se evaluaron un total de 94,104 casos; los parámetros utilizados para las optimizaciones fueron: generaciones del

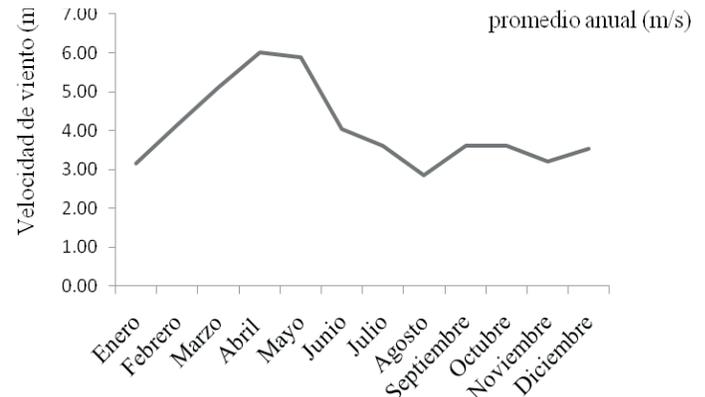


FIGURA 5. Velocidad de viento promedio anual. El Carrizal Paxtlán.

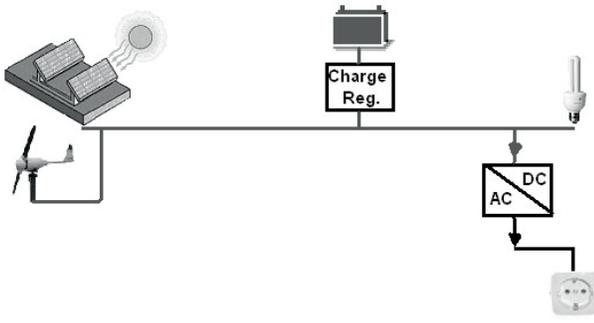
algoritmo principal: 100; población principal del algoritmo: 50; generaciones del algoritmo secundario: 5 con una población de 20. La optimización ha tomado 1 h, 47 min y 35 s; los resultados de la simulación se muestran en el Cuadro 1.

Se han considerado diez combinaciones de sistemas híbridos como óptimos. El primer caso se muestra en la primera fila del Cuadro 1, el cual tiene el menor CAN. Se observa que la combinación fotovoltaica/eólica/batería, en combinación con el inversor, es el enfoque más económico. Esto se ilustra en la primera fila. Según el estudio, el primer caso también muestra una mayor duración y vida útil de las baterías, lo que reduce los costes. Un ejemplo de la configuración óptima de fotovoltaica/eólica/batería/ se muestra en Figura 6.

Dado que los recursos de energías renovables (fotovoltaica y eólica) están cumpliendo con las exigencias de carga, la instalación del generador diesel no es necesaria. Esto lleva a un ahorro sustancial en la adquisición de equipo y su mantenimiento.

CUADRO 1. Resultados de la simulación y optimización de sistemas híbridos de energía.

Generación	Costo Total (CAN) (€)	Costo Inicial (€)	Costo de la Energía (€/kWh)	Emisión	Energía no servida	Potencia FV (W)	N Baterías Paralelo	Capacidad Nominal Baterías (Ah)	Potencia Generador (W)	Potencia Inversor (W)	Potencia Aerogenerador (W)
1	68604	34097	0.38	766	0	125	14	96	4000	2200	6500
2	56355	39992	0.32	0	0	50	13	96	3000	2200	13000
3	48502	35716	0.27	5	0	125	7	96	1900	2200	13000
4	47609	31610	0.27	123	0	50	1	462	5500	2200	13000
5	45624	30595	0.26	83	0	50	1	462	1900	2200	13000
6	45500	30595	0.26	78	0	50	1	462	1900	2200	13000
7	44726	31606	0.25	0	8.3	0	8	96	0	2200	13000
8	44404	32071	0.25	0	33.3	50	1	462	0	2200	13000
9	41384	28913	0.23	0	66.6	50	1	462	0	2200	13000
10	41352	28913	0.23	0	69.1	50	1	462	0	2200	13000



**FIGURA 6. Configuración del sistema híbrido fotovoltaico / eólico / baterías.**

El sistema menos económico es el sistema de generador diesel independiente, con un CAN de 253,000 €, ya que es necesario mantenerlo en funcionamiento todo el tiempo a fin de satisfacer la demanda de carga constante, lo que conlleva a un mayor consumo de combustible. Además, esto genera que la vida útil del sistema sea mucho más corta.

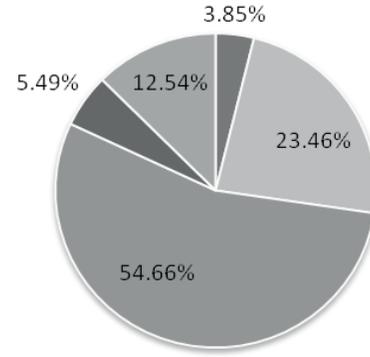
En consecuencia, un sistema Fotovoltaico/Eólico/Batería/Diesel tiene un CAN de 45,500 € generando emisiones de 78 kg CO<sub>2</sub>·año<sup>-1</sup>. El sistema tiene energía suficiente para abastecer la demanda de carga eléctrica de día mediante el uso de energía fotovoltaica-eólica, mientras que en la noche el consumo de carga puede alimentarse por el generador eléctrico diesel y la batería. Podemos ver que los tres recursos de energía abastecen la demanda, por lo que la batería no tiene que suministrar energía elevada durante mucho tiempo, lo que extiende la duración de la batería.

Por otra parte, el sistema de generador diesel independiente es el más costoso de las alternativas, porque tiene un costo alto de reemplazo y de combustible; además, es necesario sustituir el generador una vez cada tres años, mientras que dentro del sistema híbrido el generador necesita sustitución sólo una vez cada seis años.

En la Figura 7 se muestra el costo de los diferentes elementos del sistema optimizado por HOGA. Como comparativo se muestra también el resultado del dimensionamiento a través del método del peor mes, que se utiliza regularmente en el dimensionado de instalaciones fotovoltaicas; asimismo, se realiza un comparativo del costo de la extensión de la red al centro de consumo.

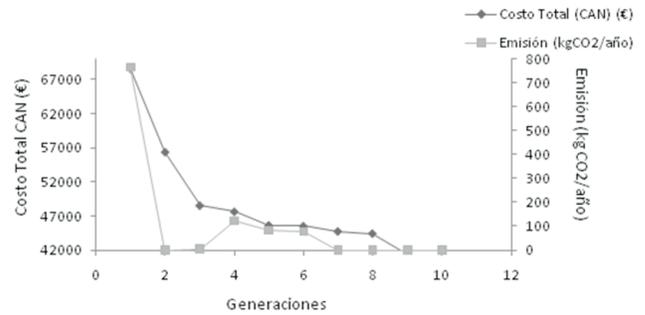
Para estimar los costos de introducir electricidad por extensión de red, se toman como referencia los estimados por Ángeles (2009). Se utilizaron dos clases de datos por parte de la CFE; la primera es el costo de extender la red en un lugar de Chiapas, que es de \$230,000·km<sup>-1</sup>. La segunda es con datos de una tabla de costos de extensión de la red por parte de la CFE en Juchitán, Oaxaca, los cuales son menores. El dato base estimado es de 106,725·km<sup>-1</sup>. Con base en lo anterior, se aprecia que el costo del sistema híbrido hallado es menor que extender la red al centro del consumo, el cual es de 270,588 €, costo superior al sistema diesel independiente.

Paneles FV ■ Batería ■ Aerogenerador ■ Auxiliares ■ Inversor



**FIGURA 7. Costo de los diferentes elementos de la solución óptima, en porcentaje del CAN.**

Los elementos auxiliares (regulador de carga, inversor, carga de la batería y otros) tienen un costo de sólo el 13.4 % del CAN del sistema. En la Figura 8 se muestra la evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> de la mejor combinación encontrada frente al CAN en función de las generaciones del algoritmo principal de optimización (optimización multiobjetivo).



**FIGURA 8. Comparación de emisiones netas de CO<sub>2</sub> versus Costo Actual Neto.**

**CONCLUSIONES**

Los aspectos económicos de la utilización de un sistema de energía híbrido en comunidades aisladas de red han sido analizados y estudiados. Así, sobre la base de optimizar y simular diez tipos de configuración de sistemas híbridos, se encontró que el sistema más económico para satisfacer la demanda de 14.946 kW h·d<sup>-1</sup> es el formado por la configuración Fotovoltaica/Eólica/Baterías/, cuya energía cuesta 0,23 €·kW<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>. Esta configuración tiene el menor costo de capital y el coste de reposición de componentes. Los resultados del ejercicio de simulación serán una herramienta útil para facilitar la toma de decisiones sobre una futura inversión de capital para las comunidades aisladas de México. En cuanto a la herramienta de optimización, HOGA ofrece la mejor solución de todas las combinaciones posibles y sobre todo la precisión de los elementos del sistema: número de paneles fotovoltaicos, su tipo y el número de baterías en paralelo y su tipo; resultados que otros métodos no ofrecen.

## LITERATURA CITADA

- Ángeles O. G. 2009. Conservación Ambiental y Desarrollo Rural al Aplicarse Tecnología Fotovoltaica: Estudio de Caso en Tapanatepec Oaxaca. Instituto Politécnico Nacional. 235 p.
- Bäck T.; Fogel D. B.; Michalewicz Z. 2000. Evolutionary Computation 1: Basic Algorithms and Operators. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing.
- Chun C. F. 2002. A simulation study on the economic aspects of hybrid energy systems for remote islands in Thailand. TENCON '02. Proceedings. IEEE Region 10 Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering 3: 1966-1969.
- CONUEE. 2007. Manual de Capacitadores: Apoyo a Familias de Bajo Recurso para el Uso Eficiente de Energía. Comisión Nacional del Uso Eficiente de la Energía. México. 151 p.
- Dufo L. R.; Bernal A. J. L. 2005. Design and control strategies of PV-Diesel systems using genetic algorithms. Solar Energy 79: 33-46.
- Fiscal A.; Thornton J.; Klein S. A.; Beckman W. A. 1995. Developments to the TRNSYS simulation program. Journal of Solar Energy Engineering 7: 117:123.
- Green H. J.; Manwell J. 1995. HYBRID2 - a versatile model of the performance of hybrid power systems. *In*: Proceedings of WindPower\_95. Washington DC, USA. pp: 27-30.
- Gutiérrez-Vera J. 1992. Options for rural electrification in Mexico. IEEE Transactions on Energy Conversion 7(3): 426-433.
- INEGI. 2005. XI Censo de Población y Vivienda, Base de Datos de Información Estadística. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México.
- Liu B. Y. H.; Jordan R. C. 1960. The interrelationship and characteristics distribution of direct, diffuse, and total solar radiation. Solar Energy 4: 1-19.
- Manwell J. F.; McGowan J. G.; Rogers A. L. 2002. Wind Energy Explained Theory, Design and Application. John Wiley & Sons Ltd. pp: 415.
- Markvart T. 1996. Sizing of hybrid photovoltaic-wind energy systems. Solar Energy 57(4): 277-281.
- Maskeys R. K.; Nestmann F. 2002. Hydro Based Renewable Hybrid Power System for Rural Electrification: A Concept Paper. Institute of Water Resources Management, Hydraulics and Rural Engineering University of Karlsruhe.
- NASA. 2010. Surface meteorology and Solar Energy: Methodology. <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse>.
- NREL. 2010. Hybrid Optimization Model for Electric Renewable (HOMER). National Renewable Laboratory. USA. <http://www.nrel.gov/homer>.
- SENER. 2003. Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable de México. Secretaría de Energía. México. 35 p.
- SENER. 2006. Prospectiva del Sector Eléctrico 2005-2014. Secretaría de Energía. México. 134 p.
- Wichert B. 1997. PV-Diesel energy systems for remote area power generation-a review of current practice and future developments. Renewable and Sustainable Energy Reviews 1(3): 209-228.