

## Diseño de un sistema Híbrido eólico solar para suministro de energía eléctrica a zona rural en el estado de Chihuahua

Carlos Ponce Corral<sup>1</sup>, Luz Angélica GarcíaVillalba<sup>1</sup>, Raúl Ñeco Caberta<sup>1</sup>, Rene Alberto Valenzuela<sup>1</sup>

### Resumen

En este artículo se lleva a cabo el desarrollo y simulación de un sistema de energía eólica-solar para el suministro de energía eléctrica a una zona rural donde no se cuenta con la red de distribución de energía eléctrica. El sistema que se propone es un sistema híbrido integrado por módulos fotovoltaicos, aerogeneradores y generadores diésel. En el pasado se utilizaban solo generadores diésel, que, en la modalidad operativa de baja carga, muestran una eficiencia reducida en el funcionamiento, altos costos de mantenimiento y un breve tiempo de vida de la instalación. La ventaja de los sistemas híbridos es que permiten reducir esos problemas y aprovechar los recursos renovables existentes sobre el territorio de la futura instalación, constituyendo una opción viable y favorable tanto ambiental como socialmente. La energía es una llave para el crecimiento, es un requisito esencial para el desarrollo económico y social de una nación, el incremento en el acceso a la electricidad facilita el desarrollo y mejora la calidad de vida de las personas. Las energías renovables son una alternativa muy importante para la generación de energía eléctrica, son limpias al no producir gases de efecto invernadero, permiten la descentralización de los sistemas de generación de potencia. Para países en vías de desarrollo, como México, esta tecnología no está al alcance de todos, debido a los elevados costos de instalación, pero con un marco legal estable, claro y bien difundido por parte del gobierno, el uso de esta tecnología puede llegar a alcanzar importancia el desarrollo del país.

**Palabras clave:** Sistema Híbrido, optimización, sistema de almacenamiento, sistema eólico, sistema solar fotovoltaico.

### Introducción

Durante la historia reciente, la disponibilidad de la energía eléctrica y térmica para cualquier ha sido fundamental, ya los combustibles fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural han dominado el mercado de energía y todavía en el 2009 contribuyeron con un 81% a la demanda energética mundial (IEA, 2011). Sin embargo, el uso de estos combustibles presenta una serie complicaciones; por un lado la reproducción de los combustibles fósiles no tiene lugar a una velocidad significativa y, en consecuencia, pueden ser

considerados como recursos finitos, con repercusiones que con lleva en el precio y el posible peligro de agotamiento de las reservas, además, el impacto ambiental derivado del uso de los combustibles fósiles, tanto a escala local como global, ya no es posible no considerarlo como un factor importante en un contexto de sustentabilidad. Estos factores han contribuido al rápido crecimiento en las últimas décadas de las energías renovables, que aparecen como una solución importante para el futuro.

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

Las energías renovables ofrecen la posibilidad de generar electricidad y calor prácticamente sin emisiones, a bajos precios operación y de manera sustentable, en conjunto con esto, cada país tiene un lógico interés aprovechar sus recursos renovables locales; en el caso de Noruega y de Brasil, debido a su topografía favorable, suministraron respectivamente el 96 y el 84% de la demanda doméstica con energía hidráulica en el 2009, mientras que España ha evolucionado como uno de los países líderes en las áreas de energía solar y eólica (IEA, 2011; Deshmukha y Deshmukhb, 2008).

El suministro de energía eléctrica en México ha aumentado bastante desde 1960, cuando su capacidad instalada de generación era de 3,021 MW. Desde entonces se interconectó a la red eléctrica nacional y se aumentó la tensión de transmisión hasta 400 kV y 230 kV, además de unificarse la frecuencia a 60 Hz. Se inició también con la construcción de plantas de energía a base de combustibles fósiles, grandes proyectos hidro y termoeléctricos, junto con el uso de energía geotérmica, nuclear y eólica a tal punto, que al 31 de diciembre del 2009, la capacidad efectiva en México era de 51,686 MW. Además, para el 2009 también se contaba con 812,282 km de líneas de transmisión y distribución (Comisión Federal de Electricidad, 2012).

En la actualidad, cerca de una cuarta parte de la población mundial carece de acceso la energía, realidad que afecta principalmente a comunidades rurales de países en desarrollo. La estrategia convencional para dar acceso a la electricidad consiste en extender la red eléctrica, pero esta solución se ve limitada cuando se trata de llegar a comunidades rurales dispersas y en zonas de difícil acceso. Los sistemas de electrificación

basados en fuentes de energía renovables han demostrado ser adecuados para proveer de energía a comunidades aisladas de forma autónoma. En concreto, las tecnologías eólica y solar son una de las opciones técnicas posibles. La energía es una parte fundamental de cualquier actividad productiva; su ausencia socava la posibilidad de un desarrollo sustentable. Así mismo, la generación, transporte, uso y consumo de esta, tienen un fuerte impacto sobre el medio ambiente y la calidad de vida de la población.

El sector energético de México representa entre el 4% y el 7% del PIB, genera cerca del 40% de los ingresos del sector público y produce cerca del 8% de las exportaciones. En el contexto Mexicano, el crecimiento de la energía rural descentralizada está basada en la productividad, a diferencia del paradigma convencional basado en pobreza, donde el servicio eléctrico se caracteriza por la cultura del no pago y la creencia de que la electricidad es un deber del Estado. Al igual que en muchos países, en México, las líneas de transmisión de alta tensión cruzan regiones donde la gente no tiene electricidad.

Las energías renovables ofrecen importantes oportunidades para aplicaciones en entornos donde la energía convencional no llega, o llega solo de manera parcial; esto es particularmente útil en el entorno rural, entre poblaciones con altos niveles de marginación. La falta de energía en comunidades rurales aisladas constituye una situación crítica, ya que suele estar asociada con la ausencia de telecomunicaciones, educación, servicios de salud, y frecuentemente, agua potable. Las instancias federales de política social juegan un papel crucial con los programas de apoyo, y en particular las políticas de lucha contra la

pobreza, que consideran la provisión de infraestructura básica como componente central. La estrategia de micro regiones, que incluye un fuerte componente de participación comunitaria, busca crear polos comunitarios de desarrollo para mejorar el acceso a agua, electricidad, educación, telecomunicaciones y servicios de salud.

Mientras tanto las comunidades rurales sin acceso a la electricidad satisfacen sus necesidades de iluminación y comunicaciones sociales con fuentes alternativas: velas de parafina, gas LP, gasolina, diésel y en algunos casos, baterías de automóvil.

Según un estudio de NREL (Nacional Renewable Energy Laboratory), el potencial estimado de México en cuanto a energía eólica es superior a los 50,000 MW. Para confirmar la factibilidad de áreas para establecer un parque o central eólica en México, se han realizado prospecciones del recurso eólico México a un nivel exploratorio y de reconocimiento punta (Institute of the Americas, 2012). Existen varios parques eólicos en México, de los cuales la mayoría se encuentran en Oaxaca, Baja California y Baja California Sur. De entre los que tienen mayor producción de energía se encuentran el de Piedra Larga, que cuenta con una potencia nominal total de 228 MW y tiene una producción anual estimada de 568 GWh, también está el parque eólico La Venta III, que cuenta con una potencia nominal total de 103 MW y una producción anual estimada de 257 GWh. Sin embargo, uno de los logros más notables es el parque eólico Eurus, el cual es el más grande de toda América Latina. Este parque es también el segundo en reducir emisiones de CO<sup>2</sup> por año, al lograr disminuir 600,000 toneladas, además de generar suficiente energía para abastecer el consumo de una población de 500,000

habitantes. Dicho parque cuenta con 200 aerogeneradores y tiene una potencia nominal total de 250 MW y una producción anual estimada de 626 GWh.

La energía solar se debe a la continua reacción termonuclear que se lleva a cabo en el interior del sol. La reacción básica en el interior del sol es la fisión nuclear en la cual cuatro protones de hidrogeno se combinan para formar un átomo de helio, dando como sobrante una masa que se convierte en energía en forma de radiación electromagnética. La energía que llega a la atmosfera de la tierra es aproximadamente de 1353 W/m<sup>2</sup> al ser medida sobre una superficie perpendicular a la dirección de su propagación. A este valor se le denomina Constante Solar y se reduce a 1000 W/m<sup>2</sup> al llegar a la corteza terrestre debido a los gases atmosféricos, el vapor de agua o el polvo (Alcor, 2008). Las celdas fotoeléctricas son dispositivos que aprovechan la acción de radiaciones luminosas sobre ciertas superficies metálicas. Existen tres tipos de radiaciones y se dividen por el efecto que producen:

1. Efecto fotoemisivo, provoca un arranque de electrones con liberación de los mismos en el metal.
2. Efecto fotoconductor, modifica la conductividad eléctrica del metal.
3. Efecto fotovoltaico, crea una fuerza electromotriz en el metal, este efecto hace posible que las celdas fotovoltaicas que generan el paso de la corriente de manera proporcional al flujo luminoso recibido.

El poblado Cerro Prieto, en el municipio de Balleza, se localiza aproximadamente a 200 km al sur de la ciudad de Chihuahua está compuesto por 175 habitantes, y cuenta con 50 viviendas

que carecen del servicio de energía y se encuentran alejadas de la red eléctrica. Esto se traduce en desventajas en materia de seguridad y rezago social y económico, lo cual disminuye el nivel de calidad de vida de estas personas. La problemática radica en el costo de construcción de la línea de distribución, ya que el costo aproximado de una línea de distribución es superior a los 150,000 pesos por kilómetro, y la demanda básica de 50 viviendas es de alrededor de 4

MWh al mes, la extensión de la red hasta el poblado no es un proyecto económicamente viable (Rocha, 2003). Esta investigación se enfocará en el diseño un sistema de generación de electricidad mediante energía solar y eólica que se autoabastezca y que pueda ser utilizado para satisfacer las necesidades básicas energéticas del poblado de Cerro Prieto, así como la de cualquier comunidad rural con una situación similar.

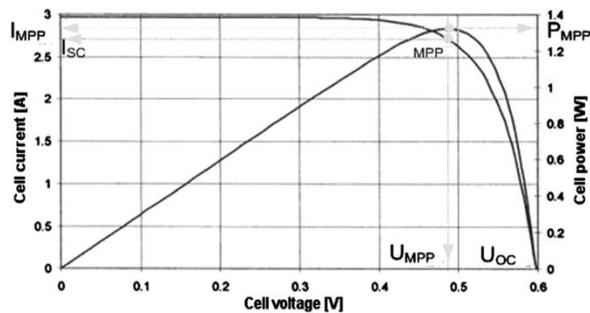
## Metodología

Los HRES (Sistemas de Energía Híbridos Renovables, por sus siglas en inglés) integran dos o más generadores de energía, y en la mayoría de los casos se utilizan generalmente fuera de la red eléctrica. Generalmente se utiliza un generador convencional alimentado con diésel, junto con un generador asociado a una fuente de energía renovable, como por ejemplo: la solar, eólica, o incluso solar-eólica. El costo inicial en los sistemas a base de energía solar o eólica son mayores que un generador a base de diésel, sin embargo, los costos en mantenimiento y operación, se reducen drásticamente para los sistemas de energías renovables. Los sistemas híbridos deben de llenar el criterio de modularidad, robustez y simplicidad, además de requerir bajo mantenimiento. Estos combinan los sistemas de fuentes alternativas junto con baterías para almacenamiento de energía, que se utilizan para almacenaje de energía, y equipo de acondicionamiento de potencia, que se utilizan para mantener la calidad de la potencia de energía (Yamegueu et al., 2011). Una de las condiciones para el uso de los HRES, es que deben aprovecharse las condiciones existentes en los lugares donde se planea instalar este tipo de sistemas. La mayoría de los países en desarrollo cuentan con regiones en las que se pueden aprovechar recursos eólicos, hidráulicos,

solar y biomasa. La ventaja de un suministro de energía a largo plazo, el cual puede ayudar a reducir la dependencia de la importación de energéticos, que los HRES permiten integrar las fortalezas, tanto las energías convencionales como las renovables, los investigadores han logrado diseñar en la última década, alternativas en producción de electricidad. Los elementos que maneja el análisis de este proyecto se limitan a un sistema fotovoltaico, eólico y de baterías, sin embargo, el término HRES puede involucrar el uso de otros sistemas de generación.

**Generador fotovoltaico** (PV, por sus siglas en inglés). La radiación electromagnética de la energía solar puede convertirse en electricidad a través del efecto fotovoltaico. La celda solar se compone de una unión p-n, fabricada de una capa delgada de un semiconductor. Al exponerse a la luz solar, los fotones con la energía suficiente como para romper la banda ancha de energía del semiconductor es absorbido y crean pares de electrones huecos de manera proporcional a la irradiación incidente. Bajo la influencia de los campos eléctricos internos de la unión p-n, estos portadores son barridos y crean una fotocorriente que es directamente proporcional a la radiación solar. El modelo PV tiene características de corriente-voltaje

del módulo solar, como se muestra en la figura 1. En este modelo, en cada paso de la simulación se determina el Punto de Máxima Potencia (MPP, por sus siglas en inglés).



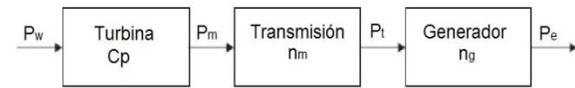
**Figura 1:** Características del módulo solar de corriente-voltaje.

Las entradas, salidas y parámetros del modelo se enlistan en la Tabla 1. De hecho, los parámetros pueden consultarse en las hojas de datos del fabricante de los módulos solares. La cantidad de energía generada por un arreglo PV depende del voltaje al que opere el arreglo y en el MPP, el cual varía con la radiación solar y con la temperatura. El MPP especifica un punto de operación único, en el cual es posible extraer la máxima potencia posible, es decir, tiene su máxima eficiencia. (Bajpai & Dash, 2012). Se han desarrollado muchos métodos para el seguimiento del MPP. Una forma de mejorar la potencia y eficiencia del módulo solar es instalarlo en el mejor ángulo, para aprovechar la luz solar incidente.

**Tabla 1.** Parámetros del modelo fotovoltaico

Parámetros de un modelo PV		
Parámetro	Descripción	Unidad
<i>Entrada</i>		
TU	Temperatura Ambiente	[°C]
G	Radiación Solar	$W/m^2$
<i>Salida</i>		
PMPP	Potencia en MPP	[W]
VMPP	Voltaje en MPP	[V]
<i>Parámetros del módulo PV</i>		
PSTC	Potencia bajo condiciones estándar en MPP	[W]
VOC, STC	Voltaje de corto circuito bajo condiciones estándar	[V]
ISC, STC	Corriente de corto circuito bajo condiciones estándar	[A]
ICOEF	Coefficiente de temperatura de la corriente de corto circuito	$V/^{\circ}C$
VCOEF	Coefficiente de temperatura de la voltaje de corto circuito	$A/^{\circ}C$
F	Área del módulo solar	$m^2$
A	Parámetro A para determinar la temperatura del módulo	[°C]

**Generador eólico.** El proceso del sistema de conversión de energía eólica se muestra en la figura 2.



**Figura 2:** Proceso básico del sistema de conversión de energía eólica.

El generador eólico es un generador que convierte la energía cinética del viento en trabajo mecánico. La curva de potencia del generador describe la relación entre la variable de entrada de la velocidad del viento en m/s y la variable de salida de la potencia eléctrica en W, como se muestra en la figura 3. La hoja de datos del generador de viento proporciona los parámetros que se utilizan para modelar el dispositivo (Panahandeh et al., 2011).



**Figura 3:** Curva de potencia de un generador de 5 kW.

La tabla 2 muestra los parámetros que se consideran en el modelo eólico.

Existen tres factores que determinan la potencia de una turbina (Thapar et al., 2011):

a) La distribución del viento donde la turbina sea instalada, por tanto, se debe elegir un sitio con un buen potencial de energía eólica. Ya que la velocidad del

viento varia, incluso de segundo a segundo, se utiliza una función de distribución de probabilidades de Weibull, la cual describe la velocidad del viento más adecuada.

b) La altura de la turbina. Existen muchas relaciones que se utilizan para encontrar la variación del viento a una altura determinada. Ya que son muy complejas, se utilizan expresiones mucho más simples, que aunque no son exactas, sus aproximaciones son satisfactorias.

c) La curva de potencia eléctrica de salida. Esta información la genera y proporciona el fabricante, ya que cada generador cuenta con diferente diseño y clasificación.

**Tabla 2:** Parámetros del modelo de un generador eólico

Parámetros de un modelo de un generador eólico		
Parámetro	Descripción	Unidad
<i>Entrada</i>		
TU	Velocidad del viento	[m/s]
<i>Salida</i>		
PW	Potencia eléctrica de un generador eólico	[W]
Característica	Curva de potencia: Relación entre potencia eléctrica y velocidad del viento $PW = f(VW)$	[W]

Para pronosticar el desempeño de un generador eólico, se requiere de un análisis de modelos que predigan el clima. Celik (Deshmukha & Deshmukhb, 2008) desarrolló un método simplificado para estimar el desempeño mensual de los sistemas de energía eólica. Este método requiere de una distribución Weibull para establecer los parámetros mensuales de distribución del viento, la proporción de la energía a la carga y la proporción de la batería a la carga. De esta manera el sistema funciona de forma autónoma y aunque no se cuenta con la información del viento, se cuenta con un estimado del desempeño. Una expresión generalizada para caracterizar la

velocidad del viento en forma estadística es la función de densidad de probabilidad Weibull:

$$f(x) = \frac{k}{c} \left(\frac{x}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^k}$$

Donde:

$k$  Factor de forma.

$c$  Factor de escala.

Para introducir esta variable aleatoria (velocidad del viento) se utiliza la función de probabilidad inversa.

$$F^{-1}(u) = \beta(-\log(1-u))^{\frac{1}{\alpha}} \quad 0 < u < 1$$

Donde  $u$  es un número aleatorio, distribuido uniformemente entre 0 y 1. La potencia  $P$  (Watts) del aerogenerador está dada por la ecuación;

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

Donde el valor de  $P$  es la densidad del aire en el lugar donde se localiza la turbina, con un valor de 1.225 kg/m,  $A$  es el área de barrido de las palas y  $v$  es la velocidad del viento en m/s.

**Generador diésel.** Los generadores diésel como respaldo han ganado popularidad desde hace bastante tiempo, sobre todo por su disponibilidad las 24 horas a un precio barato. Sin embargo, con los costos cada vez mayores del combustible fósil y con la preocupación sobre las emisiones nocivas de carbono, se han vuelto menos preferidos, además, la eficiencia del sistema baja cuando debe reducirse el generador para igualar a la potencia nominal (Bajpai & Dash, 2012).

**Banco de baterías.** El modelo de la batería muestra un comportamiento estacionario en

aplicaciones para sistemas de suministro de potencia, y pueden simular carga y descarga de la batería. Las entradas del modelo son potencia eléctrica, temperatura ambiente y valor medio de la corriente de descarga. Si el signo de la potencia es positivo la batería está cargando, y si es negativo, la batería se descarga. El estado de la carga (SOC, por sus siglas en inglés) es la salida del modelo de la batería. Contar con una batería de respaldo permite al sistema que sea más fácil de utilizar. El cálculo del tamaño óptimo del almacenaje de la batería para un HRES se hace mediante el estudio de la variación existente en la capacidad de la batería al generar potencia mediante sistemas híbridos (Deshmukha & Deshmukhb, 2008). Para lograr las condiciones de voltaje y corriente que la carga o el inversor requieran, las baterías se conectan en arreglos serie-paralelo. Las baterías para uso fotovoltaico tienen que cumplir los siguientes requisitos (Suárez Velázquez, 2010): Bajo valor de auto descarga, larga vida útil, mantenimiento casi nulo, elevado número de ciclos de carga-descarga y capacidad de almacenamiento adecuada. Más del 90% de los acumuladores del mercado corresponden a baterías de plomo-acido, las cuales son generalmente las que mejor se adaptan a los sistemas de generación fotovoltaica, por lo que se consideran las baterías de este tipo en este proyecto. De entre las características de algunos tipos de acumuladores de energía, se destacan:

a) El volante de inercia. Se trata de un elemento mecánico capaz de almacenar energía cinética, usando la inercia restante en un sistema. Esa energía cinética se puede transformar en energía eléctrica.

b) Superconductores magnéticos. Los sistemas de almacenamiento de energía por superconductores magnéticos (SMES, por sus siglas en inglés) almacenan energía en

forma de campo magnético creado por el flujo de corriente directa en una bobina superconductora refrigerada a una temperatura debajo de su temperatura crítica de superconductividad.

c) Acumuladores de Níquel-Cadmio. De entre las ventajas que tienen estos acumuladores frente a los de Plomo-acido, es que tienen la posibilidad de ser utilizados sin elemento regulador, la posibilidad de permanecer largo tiempo con bajo estado de carga y no requieren de demasiado mantenimiento. Sin embargo, su costo se cuadruplica con respecto a los acumuladores de Plomo-ácido y tienen baja capacidad de régimen de descarga lenta, por lo que no se recomiendan para sistemas fotovoltaicos.

d) Ultracapacitores. Los ultracapacitores se sugieren como dispositivos que ofrecen energía de alta densidad, en comparación con los capacitores regulares y las baterías. También tienen una alta eficiencia (mayor al 90%) y pueden resistir un gran número de ciclos de carga y descarga (Bajpai & Dash, 2012).

**El controlador.** El controlador determina la energía disponible para cada componente del sistema y es capaz de proporcionar el costo de producción, la energía que requiere la carga y la que se desperdicia, y las pérdidas de carga y descarga de la batería. El modelo funciona de la siguiente forma: Las fuentes de energía primaria se conectan al puerto de corriente directa mediante convertidores DC-DC para obtener una potencia regulada y un voltaje constante. Generalmente se utilizan dos convertidores DC en cascada después de generadores eólicos y solares. El primero para el seguimiento de máxima potencia, y el segundo para regular el voltaje. De igual forma, las cargas DC y AC se conectan al puerto DC a través de convertidores AC-DC y DC-DC. De esta forma se suministra

potencia a las carga. Las baterías y los ultracapacitores se conectan al puerto DC de manera bidireccional a través de convertidores DC-DC para cargar y descargar electricidad. Los generadores diésel se conectan a través de convertidores AC-DC. Las celdas de combustible y el electrolizador necesitan convertidores DC-DC individuales para regular y convertir la potencia de salida.

**Optimización.** Para el diseño, existen dos formas en que se pueden optimizar a los HRES. La primera es: minimizando el Costo del Valor Presente (NPC, por sus siglas en ingles), es decir, reduciendo el costo de la inversión más el costo de mantenimiento durante el ciclo de vida del sistema. La otra es minimizando el Costo de Nivel de Energía (LCE, por sus siglas en ingles), es decir, el total de las HRES dividido entre la energía que suministra el sistema. Existen además, restricciones que generalmente se incluyen en la confiabilidad y que evalúan la reducción mediante los siguientes parámetros (Bernal-Agustín & Dufo-López, 2009): LOLP (Probabilidad de Perdida de la Carga, por sus siglas en ingles). Es la probabilidad de falla dividida en un periodo de tiempo (generalmente un año).

La probabilidad de pérdida de suministro de potencia (LPSP, por sus siglas en ingles). Es la probabilidad de una insuficiencia de fuente de potencia que resulta en que el HRES sea capaz de satisfacer la demanda. Carga Insatisfecha, es la carga que no llega a su destino dividida entre la carga total durante un periodo de tiempo (generalmente un año). Tasa de Carga Cubierta, se define como la proporción de energía entregada a la carga. Estas técnicas de distribución se utilizan para proporcionar con la probabilidad al sistema. Notton et al. (Deshmukha & Deshmukhb, 2008) presentaron un modelo

matemático para determinar el tamaño de un sistema híbrido PV mediante LOLP. Los autores resaltaron que la solución óptima puede obtenerse si el sistema PV contribuye con el 75% de los requerimientos de energía.

Varias técnicas de optimización tales como programación lineal, enfoque probabilístico, técnicas de iteración, programación dinámica, y programación multi-objetivo se utilizaron por los investigadores para diseñar un sistema híbrido que sea económico. Celik (*ibid.*) presentó una simulación Monte-Carlo para calcular la confiabilidad junto con el costo que tendrá.

Mediante el uso de LOLP, se decidió la proporción óptima del generador PV y eólico en base al gasto del capital y al nivel de autonomía anual. Además, Celik (*ibid.*) presentó un análisis técnico económico basado en un análisis eólico-solar para un sistema autónomo. Se observó que la combinación óptima de energía eólica-solar provee al sistema de un mejor desempeño que de una sola fuente de energía al mismo costo y con igual capacidad de batería. Rahman y Chedid (Nema et al., 2009) proporcionaron el diseño óptimo de sistemas eólico-solar para aplicaciones ya sea autónoma o conectada a la red eléctrica. Ellos utilizaron técnicas de programación lineal para minimizar los costos de producción de electricidad de una manera confiable y tomando en cuenta los factores ambientales en las etapas de diseño y operación.

La curva existente entre el banco de baterías y la capacidad del arreglo PV para la LOLP, ayuda a encontrar a la mejor configuración al menor precio disponible. Se utilizan técnicas de programación lineal para minimizar el costo de producción de electricidad promedio y al mismo tiempo

suministrar electricidad de una manera confiable y que toma en cuenta a los factores ambientales en su diseño y operación. En cuanto a reducción de costos, el valor económico de la potencia del sistema depende de la localización del sistema y tendencia de producción de energía. Dicho valor es afectado por la distancia entre la subestación de potencia y la carga, y por las condiciones de producción la carga.

El valor de la potencia de los HRES en la red toma en cuenta la reducción de costos de producción de energía, tales como ahorro en consumo de combustible, costos de generación y mantenimiento, los costos de transporte y, en algunos casos, la reducción de riesgo posibles situaciones de escasez de energía en horas pico. El valor de potencia puede aumentar o reducir las pérdidas de energía, mejorar la calidad del servicio en horas pico, mejorar la red de distribución de energía y reducir el impacto ambiental (Deshmukha & Deshmukhb, 2008).

**Módulos y Arreglos Fotovoltaicos.** Las celdas solares se conectan en serie para obtener un voltaje de salida adecuado, y para un nivel de corriente apropiado se conectan en paralelo, formando un módulo fotovoltaico. Ya que los sistemas fotovoltaicos operan en múltiplos de 6, 12, 24 volts etc., los módulos se diseñan para funcionar bajo estas características.

El objetivo es diseñar un sistema donde el voltaje máximo del módulo produzca el voltaje suficiente bajo las condiciones de radiación promedio. Los módulos, a su vez, se conectan en serie o paralelo para formar arreglos, con los cuales se genera determinada corriente y voltaje requeridos. Al considerar a un arreglo como varios bloques PV más pequeños, se puede interpretar el funcionamiento eléctrico en situaciones que pudieran resultar

problemáticas. La curva de corriente-voltaje esta proporcionada a la curva de corriente-voltaje de una celda. Por ejemplo, si un módulo cuenta con 72 celdas conectadas en serie, y un arreglo tiene 10 de estos módulos en serie, el voltaje de circuito abierto del módulo en serie tendrá una proporción de 720 veces más que el de la celda.

Además, la corriente de corto circuito puede calcularse de una manera similar en base a las celdas en paralelo, junto con el cálculo del punto de máxima potencia que es un valor en proporción al producto del número de celdas en serie por el de arreglos en paralelo (Solmetric, s.f.). El dimensionado de un sistema fotovoltaico se refiere al proceso de cálculo y selección de los diferentes componentes y subsistemas que constituyen una instalación fotovoltaica.

Todos los elementos que se utilizaran deben tener una relación entre si equilibrada. Para el correcto funcionamiento del sistema en conjunto, se debe tener en cuenta que los componentes utilizados sean adecuados para la tarea que deben cumplir. Existen diversos métodos para el cálculo y dimensionado de las instalaciones fotovoltaicas, dentro de todos estos se utilizara el denominado método del peor mes o del mes más desfavorable por ser, el que ofrece resultados suficientemente precisos, con una metodología intuitiva y fácilmente entendible (Suárez Velázquez, 2010). Este método consiste en dimensionar el sistema para satisfacer las demandas de energía eléctrica en el mes más desfavorable, en el entendido que en el resto del año, el sistema podrá suministrar de manera sobrada la energía eléctrica demandada.

Podría pensarse a primera vista que el peor mes corresponderá a algunos de los meses de invierno, por ser estos en los que menos radiación solar se recibe. Aunque

esto puede ser frecuentemente correcto, se debe tener en cuenta también la aplicación para la cual se utilizará el sistema fotovoltaico, teniendo en cuenta el uso que se le dará a este cada mes. Debe por consiguiente, evaluarse el cociente entre la energía demandada y la energía solar incidente para cada mes para el que el valor obtenido es mayor. Los pasos que deben seguirse para aplicar el método del peor mes son los siguientes:

- Determinación del promedio de la energía eléctrica diaria solicitada por la instalación receptora, determinación del promedio de irradiación diaria disponible en el lugar de ubicación de los módulos fotovoltaicos, para cada mes, cálculo del cociente mensual entre los dos valores anteriores  $Y = E_{elec} / H_s$ ,
- Determinación del peor mes o del mes más desfavorable, el que corresponda el valor  $Y_{max}$ , valor máximo de  $Y$ , elección del tipo de panel fotovoltaico, y en especial la potencia pico del panel  $P_{mod}$ , expresada en  $W_p$ , watts-pico, cálculo del número de módulos o paneles fotovoltaicos necesarios,  $N_{s,mod}$ , y de la potencia total instalada en el sistema de captación, cálculo del número de paneles conectados en serie,  $N_{s,mod}$ , y del número de módulos conectados en paralelo  $N_{p,mod}$ ,
- Determinación del promedio de la energía eléctrica diaria El primer paso para el dimensionado, es calcular la energía del consumo eléctrico según los requerimientos del lugar donde se implementara el sistema, el valor de consumo será un promedio, y serán las potencias consumidas por el tiempo en sean utilizadas, donde la energía total de cada aparato está dada por la ecuación:

$$\text{Energía } E = N \cdot P \cdot hr \text{ (Wh)}$$

Y el consumo total diario está dado por:

$$E_{cc} = \sum e_i$$

donde  $E_{cc}$ , es la energía total de consumo diario en corriente directa.

El siguiente paso consiste en estimar, para cada mes el promedio de la irradiación solar que incide durante un día, sobre un metro cuadrado de una superficie situada en el lugar donde se utilizaran los mismos. La estimación puede realizarse mediante datos estadísticos del lugar o con el uso de aparatos de medición, para fines de esta investigación se utilizaran datos estadísticos del lugar, para cada uno de los meses del año, se calcula el cociente entre el consumo medio total de energía eléctrica,  $E_{elec}$  y el promedio de la radiación diaria disponible en el lugar de uso de los módulos fotovoltaicos. Este cálculo dará como resultado la superficie total requerida para cumplir con la demanda de potencia, el cálculo se realizara mediante la ecuación:

$$Y = E_{elec} / H_s.$$

El sistema fotovoltaico se dimensiona para cubrir las necesidades del mes más desfavorable del año en el lugar de uso de los módulos fotovoltaicos, es decir, el mes en que el cociente entre el consumo total diario y el promedio de la radiación correspondiente al valor de  $Y$  sea máximo. Llegando este punto ya debe de estar determinado el panel fotovoltaico a utilizar, para calcular la energía pico producida por un único panel fotovoltaico, de la potencia pico escogida,  $P_{mod}$  ( $W_p$ ), durante un día cualquiera.

Debe tenerse en cuenta que la potencia pico de un panel es la potencia que produce en condiciones estándar que suponen una radiación incidente de  $1 \text{ kW/m}^2$ . Según lo anterior, la energía producida durante una hora por un panel de potencia pico  $P_{mod}$  ( $W_p$ ) sobre el que incide

una radiación solar de intensidad de  $1\text{kW/m}^2$ , incide sobre el panel durante HPS horas (horas pico de sol), la energía solar producida por el panel será igual a:

$$Hs (\text{kWh m} - 2 \text{ dia} - 1) \cdot P_{mod} (\text{Wp})$$

El cálculo del número de módulos vendrá dado por las ecuaciones:

$$N_{mod} = ST, mod / S_{mod}$$

$$N_{mod} = 1.1 \cdot ST, mod / S_{mod}$$

En esta fase del dimensionado, debe estar definida la tensión del subsistema de acumulación  $VT$ , si la tensión del módulo es  $V_{cel}$ , entonces el número de módulos fotovoltaicos que deberán conectarse en serie vendrá dado por la ecuación:

$$N_{s, mod} = VT, acu / V_{cel}$$

El número de módulos conectados en paralelo,  $N_{p, mod}$  viene dado por la ecuación;

$$N_{p, mod} = N_{mod} / N_{s, mod}$$

Por último el número total de celdas solares,  $N_{mod}$ , es dado por la ecuación:

$$N_{mod} = N_{s, mod} \cdot N_{p, mod}$$

**Módulo Eólico.** Una turbina de viento captura la energía cinética del viento en un rotor, el cual puede tener dos o más aspas, y que están acoplados a un generador eléctrico. La turbina se posiciona en una torre, a varios metros del suelo, para maximizar la captura de energía. Se pueden establecer dos o más turbinas cerca, formando un parque eólico, el cual generara una potencia requerida. Otro factor que incluye en la cantidad de energía recolectada es la localización, puesto que mayor sea la fuerza del viento que golpea en cierto lugar, mayor será el aprovechamiento de la turbina.

**Sistema de Baterías.** Para el máximo aprovechamiento de las fuentes de energía renovables, considerando que no siempre están disponibles, es esencial utilizar baterías como mecanismo de

almacenamiento de energía eléctrica. Las baterías se utilizan en toda clase de sistemas eléctricos para satisfacer la demanda de la carga durante un periodo de tiempo en que la fuente de energía renovable, de la cual se alimenta el sistema, no se encuentre disponible (Panahandeh et al., 2011).

Una vez terminada la selección de la tecnología que mejor se acomoda a las necesidades del sistema, se lleva a cabo el dimensionado del sistema de almacenamiento, para lo cual es necesario considerar los siguientes datos: Las cargas eléctricas  $E_{dia(mes)}$ , datos de la radiación solar, características eléctricas de la batería, número de días de autonomía  $N_{d.aut}$  (que se desea que la instalación pueda funcionar en forma autónoma sin necesidad de que exista irradiación solar), profundidad de descarga máxima permisible ( $PD$ ) y la eficiencia ( $E_{bat}$ ) para el modelo de batería seleccionado), tensión de trabajo ( $V_n$ ) de la instalación. Entonces, la capacidad nominal de las baterías  $C_{nom}$  se puede calcular por medio de la siguiente ecuación:

$$C_{nom} = E_{dia(mes)} \cdot N_{d.aut} / (V_n \cdot PD \cdot E_{bat}).$$

En el caso de que la tensión de la batería sea menor que la nominal del sistema se deberá de colocar el número de baterías en serie siguiente:

$$N_{bs} = V_n / V_{nbat}$$

Una vez obtenida la potencia producida en cada hora por los paneles, se obtiene un modelo donde se muestran las potencias que actúan en el sistema, para lo cual es utilizada la expresión:

$$P_{operación, (t-1)} + P_{carga, t} - P_{descarga, t} = P_{operación, t}$$

Dónde:  $P_{operación, (t-1)}$  es la potencia de operación del periodo anterior ( $t-1$ ), en  $Wh$ .  $P_{carga, t}$  es la potencia suministrada por los paneles solares en el periodo  $t$ , en  $Wh$ .  $P_{descarga, t}$  es la potencia que se consume en

el periodo  $t$ , en  $Wh$ .  $P_{operaci\acute{o}n,t}$  es la

potencia que resulta en el periodo  $t$ , en  $Wh$ .

## Resultados

El caso de estudio se realizó en el poblado La Noria, localizado 1070 msnm y ubicado aproximadamente unos 200 km al sur de la ciudad de Chihuahua, en el municipio de San Isidro y cuenta con una población de 107 habitantes. Se encuentra en las coordenadas  $26^{\circ} 56' 36''$  norte y de  $106^{\circ} 4' 3''$  este. Se estiman 20 casas de aproximadamente 5 habitantes cada una, con 22.78 kWh de carga diaria promedio anual, que consume todo el pueblo. Debido al costo elevado que requiere electrificar el poblado (Rocha, 2003), es necesario alimentar dicha carga utilizando fuentes alternativas de energía, como son las energías renovables. En este caso, mediante la energía solar y la energía eólica.

Para establecer la carga promedio de un poblado de tales dimensiones, se asume el consumo y número de los aparatos eléctricos que se utilizarían, tanto a nivel público, como a nivel familiar. Se establece el consumo de dos tipos diferentes de casas, de la iluminación pública, y el consumo para una escuela, la cual cuenta con una bomba de agua. Se establece tanto el consumo diario como el consumo mensual, como puede observarse en la tabla 3.

Para cubrir con el suministro de la demanda eléctrica, se cuenta con diferentes tecnologías existentes. Este proyecto propone los siguientes componentes en el sistema. Un arreglo fotovoltaico, para el aprovechamiento de la irradiación solar. Una turbina eólica, para el aprovechamiento del viento. Una batería de plomo-acido, con la cual el sistema se autoabastecerá cuando los generadores no se encuentren disponibles. Un generador diésel como respaldo, ya que

las energías renovables se distinguen por su comportamiento impredecible. Un convertidor de corriente con el cual transformar la CD del arreglo fotovoltaico, de la turbina de viento y de la batería en CA.

**Tabla 3:** Tabla de cargas estimadas para el consumo del poblado La Noria.

Carga	Potencia Nominal (W)	Número de aparatos empleados	Energía (Wh/d)
<b>Escuela</b>			
Iluminación	25	2	900
Computadora	200	3	2400
Bomba de agua	1000	1	3000
Radio	15	1	45
<b>Pueblo</b>			
Iluminación	25	4	500
<b>10 Casas Tipo 1 (5 habitantes)</b>			
Iluminación	25	1	2250
TV	80	1	2000
Radio	10	1	550
Refrigerador	150	1	5940
<b>10 Casas Tipo 2 (5 habitantes)</b>			
Iluminación	25	2	2250
TV	80	1	2400
Radio	10	1	550
Carga total diaria			22.785kWh/día
			683.55kWh/mes

**Tabla 4:** Datos de radiación solar

Mes	Radiación Solar ( $kW/m^2$ )		
	Global	Directa	Difusa
Enero	4.59	3.89	0.75
Febrero	5.53	4.61	0.95
Marzo	6.61	5.28	1.10
Abril	7.15	5.45	1.65
Mayo	7.61	5.67	1.75
Junio	7.41	5.19	2.05
Julio	6.93	4.76	2.10
Agosto	6.35	4.25	2.00
Septiembre	5.90	4.06	1.60
Octubre	5.33	3.80	1.20
Noviembre	4.70	3.71	0.80
Diciembre	4.17	2.98	0.77

Los datos son obtenidos en el sitio web del SENER (Secretaría de Energía) y de la NASA (s.f.). Dichos datos establecen una irradiación solar promedio de  $6.1 \text{ kWh/m}^2$  por día y una velocidad del viento promedio

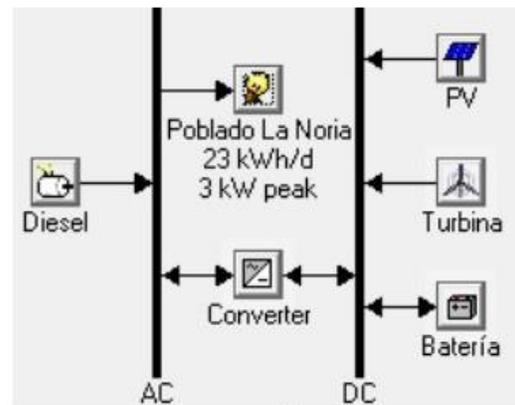
de 6.15 m/s. Las Tablas 4 y 5 muestran los valores de irradiación solar y velocidad del viento de acuerdo a bases de datos del SENER. El proyecto implementa los valores sobre la velocidad del viento que utiliza el SENER, mientras que los valores sobre la velocidad del viento se toman de los valores de la NASA, por ser más precisos.

**Tabla 5:** Velocidad del viento a 50 m.

Mes	Viento (m/s) sobre 50 m
Enero	7
Febrero	8.3
Marzo	8.2
Abril	8.1
Mayo	5.7
Junio	5.8
Julio	5.1
Agosto	4.9
Septiembre	4.8
Octubre	4.8
Noviembre	5.1
Diciembre	5.6

Los modelos de los elementos contemplados para el proyecto son: Para el arreglo fotovoltaico, se utilizan 12 módulos de la marca HJ con una capacidad de producción de energía de 250 Watts cada uno. El costo total del equipo está valuado en 3, 275 USD. Para la turbina eólica se considera una turbina tipo BWCVL.1, con una potencia nominal de 1 kW, de la marca Bergey Windpower. Se consideran las baterías con una capacidad nominal de 225 Ah y un voltaje nominal de 6 V, con cada arreglo de 3 baterías en serie, del modelo Trojan T-105, con un valor de cada batería cuesta 75 USD. Debido a las necesidades del sistema, se eligió la opción ya mencionada. El generador diésel utilizado tiene una potencia nominal de 3 kW y es de la marca ST. Se emplea un generador con una capacidad de 3 kW, el cual tiene un costo de 325 USD. El tipo de convertidor empleado tiene una capacidad de 5 nominal de Watts y su modelo es el Goldsource AR-5000. El sistema únicamente requiere de un

convertidor, por lo que se eligió uno con un costo de 200 USD. El sistema se configura en dos tipos de conexiones: en CD y en CA. Ya que el consumo de la carga es en CA, se busca convertir toda la electricidad producida por los generadores a esta misma. El único generador cuyo diseño permite producir CA es el diésel, el cual se conecta directamente a la red que distribuye la energía a la carga. Tanto el arreglo PV, la turbina y el arreglo de baterías funcionan en CD, por lo cual se conectan al convertidor inversor, cuya función es la de convertir la CD en CA. Una vez tienen CA, pueden conectarse también a la red que se dirige a la carga. Esta conexión se muestra en la figura 4.



**Figura 4:** Conexión del sistema HRES.

Una vez definida la forma de las conexiones de cada elemento, se lleva a cabo la simulación del sistema. La simulación realizada permite además, comparar los resultados para obtener una proyección realística del capital y de los gastos de operación y mantenimiento. La configuración de los sistemas puede variar, empleando más generadores de algún tipo o bien, eliminándolos de la simulación. La simulación, produce un valor de 0.405 USD por cada kWh, Aunque el nivel COE es el valor primordial a considerar, cada uno de

ellos es importante, por lo que se detallan a continuación. Los elementos se presentan en la Tabla 6. El sistema considera 12 módulos PV, 1 turbina y un generador diésel. Se consideran 6 acumuladores y dos convertidores de una capacidad de 1 kW cada uno.

**Tabla 6:** Simulación de los elementos de la configuración

Elemento	Capacidad nominal
Arreglo PV	3 kW
Turbina de viento	1 kW
Generador diesel	2 kW
Batería	6 Baterías
Inversor	2 kW
Estrategia de entrega	Carga de ciclo

La Tabla 7 muestra una breve descripción con los valores principales del costo del sistema.

**Tabla 7:** Costos principales.

Elemento	Capacidad nominal
Valor presente neto	38,318 USD
LCOE	0.405/kWh
Costo de operación	2,396 USD/año

La tabla 8 muestra el desglose de los costos de cada tecnología empleada en cada uno de los aspectos del ciclo de vida del sistema.

**Tabla 8:** Valor presente neto

Componentes	Capital (Costo en USD)	Reemplazo (Costo en USD)	Operación y mantenimiento (Costo en USD)	Combustible Valor en libros (Costo en USD)	Total (Costo en USD)	Total (Costo en USD)
PV	4410	0	0	0	0	4410
Turbina	3500	0	4014	0	-218	7296
Generador Diesel	480	1297	1451	16617	-109	19736
Batería	450	1713	138	0	-137	2163
Converter	2000	835	2294	0	-416	4713
System	10840	3845	7897	16617	-880	38318

La Tabla 9 muestra el valor del costo anual en cada una de las fases del ciclo de vida del sistema de una manera desglosada.

**Tabla 9:** Costo anual de la configuración

Componentes	Capital (Costo en USD/año)	Reemplazo (Costo en USD/año)	Operación y mantenimiento (Costo en USD/año)	Valor en libros (Costo en USD/año)	Total (Costo en USD/año)
PV	384	0	0	0	384
Turbina	305	0	350	0	656
Generador Diesel	42	113	126	1449	1721
Batería	39	149	12	0	189
Converter	174	73	200	0	447
System	945	335	688	1449	3341

La Tabla 10 desglosa la producción eléctrica por cada uno de los sistemas, se observa que la producción primaria se logra mediante el arreglo PV, en segundo lugar el generador diésel y en tercer lugar mediante la turbina.

**Tabla 10:** Producción total de electricidad.

Componentes	Producción (kWh/año)	Fracción
Arreglo PV	6262	0.52
Turbina de viento	2622	0.22
Generador Diesel	3266	0.27
Total	12150	1

La Tabla 11 muestra la electricidad producida los módulos SP-HJM250M-1. Se trata de una comparación entre el sistema PV contra el consumo de la carga.

**Tabla 11:** Costo anual

Cantidad	Valor	Unidades
Electricidad excedente	2882	kWh/año
Carga no suministrada	0.0000151	kWh/año
Escasez de capacidad	0.566	kWh/año
Fracción renovable	0.731	

La Tabla 12 muestra los valores sobre el arreglo fotovoltaico de la conexión de 12 módulos.

**Tabla 12:** Valor nominal del arreglo PV.

Cantidad	Valor	Unidades
Capacidad nominal	3	kW
Potencia promedio	0.715	kW
Potencia promedio	17.2	kWh/d
Factor de capacidad	23.8	%
Producción total	6262	kWh/año

En cuanto a la Tabla 13, se muestra el comportamiento de dicho arreglo en una hora promedio del día.

**Tabla 13:** Comportamiento del arreglo PV

Cantidad	Valor	Unidades
Potencia mínima	0	kW
Potencia máxima	3.09	kW
Penetración PV	75.9	%
Horas de operación	4380	hr/año
Costo nivelado	0.0614	costo en USD/kWh

La Tabla 14 muestra los valores nominales de la turbina BWC XL.1.

**Tabla 14:** Valor nominal de la turbina BWC XL.1

Variable	Valor	Unidades
Capacidad nominal total	1	kW
Potencia promedio	0.299	kW
Factor de capacidad	29.9	%
Producción total	2622	kWh/año

La Tabla 15 muestra el comportamiento de la turbina en una hora promedio del día.

**Tabla 15:** Comportamiento de la turbina BWC XL.1

Variable	Valor	Unidades
Potencia mínima	0	kW
Potencia máxima	1.12	kW
Penetración del viento	31.8	%
Horas de operación	7348	hr/año
Costo nivelado	0.243	costo en USD/kWh

La Tabla 16 muestra las características sobre el generador diésel ST de 3 kW.

**Tabla 16:** Valor nominal del generador diésel

Cantidad	Valor	Unidades
Horas de operación	3952	hr/año
Número de arranques	480	arranques/año
Vida operativa	3.8	año
Factor de capacidad	18.6	%
Costo de generació fijo	0.224	costo en USD/año
Costo de generación marginal	0.25	costo en USD/kWhaño

La Tabla 17 describe los valores de la potencia producida por generador diésel durante un día promedio,

**Tabla 17:** Comportamiento del generador diésel

Cantidad	Valor	Unidades
Producción eléctrica	3266	kWh/año
Potencia promedio	0.826	kW
Potencia mínima	0.6	kW
Potencia máxima	2	kW

Para medir el consumo de combustible diésel utilizado por el generador, se tiene la Tabla 18. Es imprescindible saber el valor del diésel, cuyo precio se encuentra en 1 USD en Mayo del 2013.

**Tabla 18:** Costo anual del combustible

Cantidad	Valor	Unidades
Consumo de combustible	1449	L/año
Consumo de combustible específico	0.444	L/kWh
Consumo de combustible	14256	kWh/año
Eficiencia promedio	22.9	%

La Tabla 19 describe el número de baterías, su configuración, y el voltaje que utiliza.

**Tabla 19:** Valor nominal del arreglo de baterías

Cantidad	Valor
Tamaño del arreglo	2
Arreglos en paralelo	3
Baterías	6
Voltaje del cableado	12

La Tabla 20 muestra las características de la batería con respecto a su capacidad como acumulador de energía y costos de mantenimiento y producción.

**Tabla 20:** Comportamiento del arreglo de baterías

Cantidad	Valor	Unidades
Capacidad nominal	8.1	kWh
Capacidad nominal utilizable	5.67	kWh
Autonomía	6.02	hr
Vida esperada	5070	kWh
Mantenimiento de batería	0.096 & costo en USD/kWh	
Costo de energía promedio	0.072 & costo en USD/kWh	

La Tabla 21 describe los parámetros de la batería que interactúan con el rendimiento.

**Tabla 21:** Parámetros de la batería a escala anual

Cantidad	Valor	Unidades
Energía entrante	1925	kWh/año
Energía saliente	1641	kWh/año
Descarga de la batería	5.35	kWh/año
Pérdidas	278	kWh/yr
Rendimiento anual	1780	kWh/año
Vida esperada	2.85	año

La Tabla 22 muestra los parámetros relacionados únicamente con el sistema, como el tiempo de operación, la energía que pasa a través de él y las pérdidas de energía.

**Tabla 22:** Costo anual

Cantidad	Inversor	Unidades
Horas de operación	6642	hrs/año
Energía entrante	6340	kWh/año
Energía saliente	5706	kWh/año
Pérdidas	634	kWh/año

## Conclusiones

Se observan los resultados en la simulación realizada, basadas en el parámetro COE. En la simulación se obtiene un valor de 0.405 USD/kWh, El costo de la electricidad en el sector residencial en México durante 2006 fue de 0.098 USD/kWh, por lo que la simulación realizada no resulta económicamente competitiva contra la Comisión Federal de Electricidad, ya que se vuelve aproximadamente 4 veces más costoso que el precio de electricidad comercial. Sin embargo, ya que el consumo de la carga en el caso de estudio es considerablemente bajo, y la distancia entre la red eléctrica y el poblado, la opción es viable para la electrificación del poblado. Entre las recomendaciones que se ofrecen se encuentra considerar un poblado con una

población mayor, ya que podría justificarse la adquisición de generadores de mayor escala a un precio proporcional más barato. Además, se requiere de una investigación de mercado mucho más intensiva para lograr obtener el mejor costo en cada una de las tecnologías empleadas. En el caso del arreglo fotovoltaico, se podrían reducir los costos de operación al implementar un dispositivo de seguimiento del sol para mejorar la eficiencia. En el caso de las baterías, deben protegerse del sol y almacenarse en un sitio con ventilación apropiada para evitar que se sobrecalienten y reduzcan su ciclo de vida. Recientemente se han implementado métodos como algoritmos genéticos y lógica difusa para mejorar el rendimiento del sistema mediante

el control de los elementos, por lo que esta investigación también puede lograr reducir el COE y convertir a las tecnologías de

energías renovables en un negocio más competitivo.

## Referencias

- [7] Alcor E. (2008). Instalaciones Solares Fotovoltaicas, Editorial Progenza, España.
- [9] Bajpai, P., & Dash, V. (2012). Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2926-2939.
- [12] Bernal-Agustín, J. L., & Dufo-López, R. (2009). Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 2111-2118.
- [3] Comisión Federal de Electricidad. (2012,Junio). Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico 2011-2025, Disponible [En Línea]: [www.cfe.gob.mx/quienessomos/publicaciones/Paginas/Planeaciondelsistemaelectriconacional.as](http://www.cfe.gob.mx/quienessomos/publicaciones/Paginas/Planeaciondelsistemaelectriconacional.as).
- [2] Deshmukha, M.K. Deshmukhb, S.S. (2008). *Modeling of Hybrid Renewable Energy Systems*, *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 12(1): 235-249.
- [4] Institute of the Americas. (2012). Potencial Eólico de México, Disponible [En Línea]: [www.iamericas.org/presentations/energy/Mexico2010/CarlosArriola.pdf](http://www.iamericas.org/presentations/energy/Mexico2010/CarlosArriola.pdf).
- [1] International Energy Agency. (2011). *Key World Energy Statistics*. (Enero 2013). Disponible [En Línea]: <http://www.iea.org>,
- [15] NASA (s.f.). Surface meteorology and Solar Energy: Global Data Sets. (Febrero del 2013) Disponible [En Línea]: [https://eosweb.larc.nasa.gov/project/sse/sse\\_global\\_data](https://eosweb.larc.nasa.gov/project/sse/sse_global_data).
- [11] Nema, P., Nema, R. K., & Rangnekar, S. (2009). A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 2096-2103.
- [14] Panahandeh, B., Bard, J., Outzourhit, A., & Zejli, D. (2011). Simulation of PV-Wind-hybrid systems combined with hydrogen storage for rural electrification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(6), 4185-4197.
- [6] Rocha, S. (2003). Proyecto de Electrificación de Comunidades Rurales por Medio de Fuentes Alternas de Energía, Tesis en Opción al Grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con Especialidad en Potencia, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Monterrey, Nuevo León.
- [13] Solmetric (s.f.). Guide To Interpreting I-V Curve Measurements of PV Arrays (Abril 2013) Disponible [En Línea]: <http://resources.solmetric.com/get/Guide2>
- [5] Suárez Velázquez, P. (2010). Impacto de la Generación Eólica y Solar en el Sistema Eléctrico de Baja California Norte, Tesis para Obtener el Grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Ingeniería Eléctrica, México, D.F.
- [10] Thapar, V., Agnihotri, G., & Sethi, V. K. (2011). Critical analysis of methods for mathematical modelling of wind turbines. *Renewable Energy*, 36(11), 3166-3177.
- [8] Yamegueu, D. Azoumah, Y. Pyb, X. Zongo, N. (2011). Experimental study of electricity generation by Solar PV/diesel hybrid systems without battery storage for off grid areas, *Renewable Energy*, 36: 1780-1787.