

Simulación y Optimización de Estrategias de Control para Sistemas Energéticos Renovables de Baja Potencia

Simulation and Optimization of Control Strategies for Renewable Energy Low Power Systems

URBANO-ARCILA, Paola Andrea†*, LASTRES-DANGUILLECOURT, Orlando, HERNÁNDEZ-GALVEZ, Giovanni e IBÁÑEZ-DUHARTE, Guillermo Rogelio

Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables. Estudiante de doctorado en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables

ID 1^{er} Autor: Paola Andrea, Urbano-Arcila / **ORC ID:** 0000-0002-2321-8358, **CVU CONACYT ID:** 822755

ID 1^{er} Coautor: Orlando, Lastres-Danguillecourt / **ORC ID:** 0000-0002-7420-7173, **CVU CONACYT ID:** 252788

ID 2^{er} Coautor: Geovanni, Hernández-Galvez / **ORC ID:** 0000-0003-1500-0284, **CVU CONACYT ID:** 255374

ID 3^{er} Coautor: Guillermo Rogelio, Ibáñez-Duarte / **ORC ID:** 0000-0002-2437-1928, **CVU CONACYT ID:** 215574

DOI: 10.35429/JRE.2020.13.4.26.36

Recibido 03 de Junio, 2020; Aceptado 30 de Octubre, 2020

Resumen

Se presenta una metodología para la optimización de sistemas híbridos de generación de baja potencia (SHGBP) analizando el desempeño del mismo bajo diferentes estrategias de control y de esta manera reducir los costos de la generación de energía utilizando equipos existentes, variando únicamente la configuración de los ajustes de fábrica. Lo anterior se logra por medio de la utilización de herramientas de software para las simulaciones y análisis de sensibilidad. En primera instancia, se hace una descripción de las diferentes estrategias de control que han sido aplicadas a los SHGBP. En segundo lugar se desarrolla una metodología de optimización de SHGBP por medio de las estrategias de control. Como tercer y último punto, se realiza la aplicación de la metodología obtenida a un sistema en operación, donde, por medio de simulaciones, se obtienen los valores óptimos que permiten analizar la operación del sistema bajo diferentes estrategias. Los resultados muestran que una estrategia de control apropiada permite un mejor desempeño y operación de los sistemas, y por lo tanto es importante realizar un análisis operativo y de optimización a los sistemas existentes, para aprovechar de mejor manera los equipos que se tienen así como los recursos renovables disponibles.

Estrategias de control, Sistemas de energía renovable, Eólica/Solar Fotovoltaica

Abstract

A methodology for the optimization of renewable hybrid low power generation systems (RHLPS) is presented, analyzing its performance under different control strategies and thus reducing the costs of power generation using the existing equipment, and varying only the configuration of the factory settings. The above is achieved through the use of software tools for simulations and sensitivity analysis. In the first instance, a description of the different control strategies that have been applied to the RHLPSs is made. Secondly, a RHLPS optimization methodology is developed by means of control strategies. As a third and last point, the methodology is applied to a system in operation, where, through simulations, the optimal values are obtained and those allow to analyze the operation of the system under different control strategies. The results show that an appropriate control strategy allows a better performance and operation of the systems, and therefore it is important to perform an optimization and operational analysis to the existing systems, to make a better use of the equipment, as well as the available renewable resources.

Control strategies, Renewable power systems, Wind/PV

Citación: URBANO-ARCILA, Paola Andrea, LASTRES-DANGUILLECOURT, Orlando, HERNÁNDEZ-GALVEZ, Giovanni e IBÁÑEZ-DUHARTE, Guillermo Rogelio. Simulación y Optimización de Estrategias de Control para Sistemas Energéticos Renovables de Baja Potencia. Revista de Energías Renovables. 2020. 4-13: 26-36

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

En aras de ofrecer mejores condiciones de vida a la población residente en zonas alejadas del tendido eléctrico nacional, se hace necesario investigar y desarrollar tecnologías de aprovechamiento de las energías renovables para explotar los recursos disponibles en dichas regiones. 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 (Ponce, García, Ñeco & Valenzuela, 2014).

Los sistemas renovables de baja potencia (10 a 100 kW) se presentan como una alternativa prometedora para subsanar esta falencia, entre los cuales sobresalen los sistemas híbridos de generación de energía (SHGE), los cuales tienen la ventaja de proveer energía a partir de dos o más fuentes renovables, de manera tal que si una de ellas no se encuentra disponible (e. g. la energía solar en las noches) la otra puede suplir la demanda eléctrica existente, como por ejemplo, los sistemas eólicos/fotovoltaicos (E/PV). Además de los dispositivos de transformación de la energía a partir de fuentes renovables, a energía eléctrica, los sistemas híbridos cuentan además con un sistema de almacenamiento, que generalmente se compone de un banco de baterías; y de un sistema de generación de respaldo, como puede ser un generador a diésel (Olatomiwa, Mekhilef, Ismail & Moghavvemi, 2016).

Las estrategias de control y despacho de energía, son un conjunto de reglas que controlan la operación de los generadores eléctricos y de los bancos de baterías dentro de los sistemas híbridos, siempre que las energías renovables sean insuficientes para satisfacer la demanda (Lambert, Gilman & Lilienthal, 2006). Para obtener un mejor aprovechamiento de los SHGE se plantea desarrollar una metodología que permita el análisis operativo del mismo, así como la optimización de los parámetros correspondientes a la estrategia de control, por medio de software de optimización y análisis de sensibilidad sobre dichas variables, con el fin de obtener mayor participación de las energías renovables, reduciendo el consumo de combustibles fósiles y conservando la vida útil de las baterías, empleando los equipos existentes.

La figura 1 muestra el esquema de un sistema híbrido de energías renovables, que suministra la demanda energética de los laboratorios de energía eólica y solar en el campus Tehuantepec de la UNISTMO; donde se puede identificar los diferentes elementos que lo componen, tales como los dispositivos de conversión de energía (panel solar y aerogenerador), el sistema de almacenamiento (banco de baterías), sistema de regulación y adecuación de energía (inversor/rectificador), sistema de respaldo (red eléctrica o motor a diésel) y la demanda energética a suplir. Las flechas claras indican que la corriente eléctrica que circula es en corriente alterna (Inversor a red, por ejemplo); y las flechas oscuras indican corriente directa (Módulo fotovoltaico a baterías).

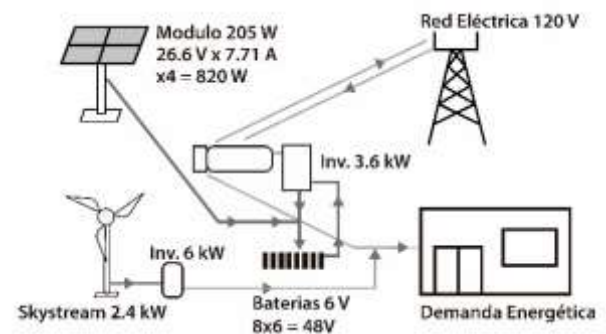


Figura 1 Esquema del sistema híbrido UNISTMO-Tehuantepec

Fuente: Elaboración Propia

A partir de este punto, se encuentran las siguientes secciones: Estrategias de control, donde se explican las estrategias de control existentes en los sistemas convencionales de control de SHGE; Antecedentes, donde se establece el estado del arte de las estrategias de control y se presentan estudios relacionados con la simulación y optimización de SHGE, para los cuales se ha tenido en cuenta el análisis de las estrategias de control; Metodología, donde se explica el marco metodológico de la presente investigación por medio de un diagrama de bloques y la descripción de cómo se obtuvo;

Aplicación de la metodología, donde se presenta un caso de estudio para demostrar la aplicabilidad de la misma. Posteriormente se encuentra la sección de resultados, donde se exponen los resultados de la simulación. En la sección de análisis de sensibilidad, se presenta el proceso de optimización y análisis de sensibilidad sobre el set point (SP) del estado de carga (SOC, state of charge) del banco de baterías.

Finalmente, se desarrolla el análisis comparativo entre las simulaciones antes y después de la optimización; y las conclusiones de la investigación realizada.

Dentro de los diferentes paquetes de software de simulación y optimización de sistemas híbridos que se encuentran en el mercado, sobresale por su popularidad y porque en un principio fue de uso libre, el programa HOMER (Hybrid Optimization Modeling). Las estrategias empleadas por HOMER para la simulación de SHGE son: Seguimiento de la demanda energética y seguimiento del ciclo de carga de las baterías.

Además, para sistemas cuyo sistema de respaldo es un motor a diésel o gasolina, se cuenta con una combinación de ambas estrategias, donde el uso de una u otra, va determinado por los valores críticos de carga (L_c) y descarga (L_d) del banco de baterías. La estrategia óptima entre ellas depende de muchos factores, incluyendo los tamaños de los generadores y del banco de baterías, el precio del combustible, los costos de operación y mantenimiento, la cantidad de fuentes renovables en el sistema y el carácter de los recursos renovables. El modelador puede seleccionar ambas estrategias, ante lo cual HOMER simula cada alternativa del sistema, usando una por una las estrategias seleccionadas y luego se puede ver cuál es la óptima (Hernández, 2011).

Bajo la estrategia seguimiento de la demanda, las baterías sólo son cargadas por los recursos renovables y nunca por el sistema de respaldo. Si las baterías pueden suministrar la demanda que no cubren las energías renovables, el sistema de respaldo permanecerá apagado (fuera de línea). Cuando las baterías no pueden suministrar la energía que no cubren las fuentes renovables, es el sistema de respaldo que la suministra. Esta estrategia tiende a ser la óptima en sistemas con alta participación renovable.

Bajo la estrategia ciclo de carga, mientras las baterías puedan suministrar la demanda no cubierta por las fuentes renovables, el sistema de respaldo permanecerá apagado (o fuera de línea). Cuando las baterías no pueden suministrar la energía no cubierta por las fuentes renovables, el sistema de respaldo funciona a la potencia nominal, supliendo el faltante de la demanda y cargando las baterías con el resto de energía.

Los excesos de energía son dirigidos hacia los objetivos de menor prioridad, en el siguiente orden de prioridad decreciente: carga diferible o secundaria, cargar el banco de baterías, y finalmente electrolizador si es que el sistema cuenta con uno.

En esta estrategia, se puede establecer un *Setpoint* o punto de ajuste (SP, entre 0 y 100%) para el estado de carga de las baterías (SOC, por sus siglas en inglés), de tal forma que si las baterías están por debajo del mismo y el sistema de respaldo ha estado funcionando la hora anterior, éste cargará las baterías hasta que alcancen el SP.

Desde finales de la década de los 90s se han encontrado investigaciones relacionadas con los sistemas híbridos de generación de energía, las estrategias de control que los rigen y la influencia que ejercen en los desempeño.

Dufo-López y Bernal-Agustín (2008), desarrollaron una metodología para el diseño y optimización de sistemas híbridos usando algoritmos evolutivos multi-objetivo (MOEA, por sus siglas en inglés), tomando la estrategia de control como una de las variables a optimizar. Desarrollaron un software para diseño y optimización multi-objetivo de nuevos sistemas híbridos, para diferentes aplicaciones de sistemas aislados (de la Cruz Fernández, 2020) o interconectados a la red eléctrica.

Hernández, Probst, Lastres, Núñez, Juantorena, Andrade Durán & Sebastian, (2012), trabajaron en el diseño integrado de un sistema de generación de energía eólico/hidrógeno/celdas de combustible. Tomando en cuenta, entre las variables y restricciones, la componente ambiental para evaluar la mejor configuración del sistema, aplicando metodologías de análisis multicriterio para el cumplimiento de los objetivos de diseño, por medio de una evaluación del ciclo de vida del sistema.

De esta manera, no solamente se tiene en cuenta la componente técnico-económica, sino también la componente ambiental, encaminando la nueva tendencia de diseño de los SHGE hacia la sustentabilidad. Chong, Wong, Kumar, Kumar & Isa, (2016), presentan una investigación documental sobre el sistema de almacenamiento de energía y las estrategias de control aplicadas a los SHGE.

Enumeran diferentes estrategias de control tanto las clásicas como las computacionales y enfatizan en la importancia de seleccionar y configurar adecuadamente la estrategia de control, ya que el control óptimo de los SHGE puede mejorar el desempeño y la viabilidad económica del sistema global. Los principales objetivos de las estrategias de control son:

1. Prevenir que el banco de baterías realice descargas profundas.
2. Reducir el pico de la demanda energética, los ciclos de carga y descarga, y el nivel de estrés dinámico de las baterías.
3. Minimizar el costo operacional del sistema.
4. Mantener estable el voltaje DC.
5. Regular la frecuencia.
6. Reducir la posibilidad de cortes energéticos (LPSP, por sus siglas en inglés)
7. Reducir el costo de operación y mantenimiento (O&M).
8. Mejorar la eficiencia del sistema.

Olatomiwa et. Al. (2016), Presenta una revisión de diversas investigaciones a través de diferentes configuraciones de sistemas híbridos aislados y conectados a la red para asegurar y finalmente concluir que la estrategia de administración de la energía que opera bien y puede ser adoptada para ciertos sistemas energéticos, puede no ser la mejor para otras configuraciones.

Según lo anterior, cada sistema debe ser evaluado de manera individual, y es necesario desarrollar una metodología que pueda ser ampliamente aplicada para este análisis. Según lo anterior, se pretende entonces obtener una metodología para evaluar las estrategias de control y despacho de energía en un sistema híbrido eólico/fotovoltaico, para maximizar la extracción de energía. Caso de estudio ubicado en el Istmo de Tehuantepec.

Metodología

Durante el presente proyecto se obtuvo la metodología que se muestra en la figura 2, para la optimización de SHGE existentes y en operación. Las etapas del proyecto inician con:

1. Identificación de los componentes del sistema híbrido, tales como las tecnologías de transformación energética (panel solar, aerogenerador), el sistema de almacenamiento (banco de baterías), el sistema de respaldo (la red) y la demanda que se suministra.
2. La consecución de toda la información referente al sistema instalado (fichas técnicas y manuales).
3. Las bases de datos de la estación solar, anemométrica, o meteorológica, más cercana al sistema instalado, para estimar los perfiles anuales de demanda energética y de los recursos eólico y solar disponibles.
4. Tomar los datos de la configuración inicial del shge, tales como valores máximos, mínimos, cortes y sp en general.
5. verificar que los datos meteorológicos, de consumo energético, y de comportamiento del sistema estén guardando los registros con el fin de evaluar el comportamiento del sistema antes y después de la optimización.
6. establecer una analogía entre los parámetros modificables en el simulador y los parámetros modificables en la configuración del sistema real.
7. obtener la simulación del comportamiento actual del sistema, a partir de los parámetros iniciales y las bases de datos de años anteriores.
8. análisis de sensibilidad en torno a la o las variables que permitan modificar el despacho de energía en el sistema híbrido, y su optimización.
9. obtener el valor de la variable evaluada, que mejore el desempeño energético del sistema e ingresar esta información en la configuración del sistema real.
10. observar el comportamiento del sistema real después de modificar los valores de optimización encontrados por medio del análisis de sensibilidad. Presentar los resultados al administrador del sistema con el fin de conservar esta nueva configuración o regresar a los valores iniciales.

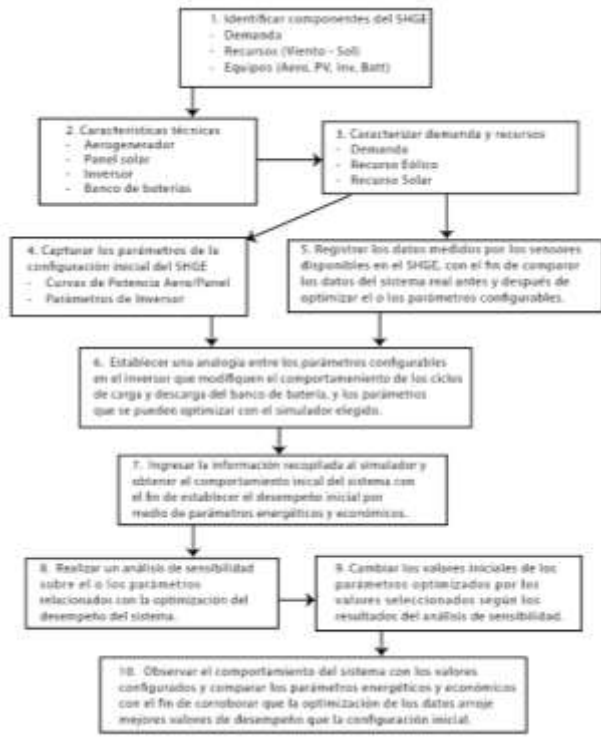


Figura 2 Esquema de la metodología para la optimización de SHGE existentes y en operación
Fuente: Elaboración Propia

La metodología anterior se obtuvo siguiendo los siguientes pasos:

1. Estudiar los componentes de los sistemas híbridos eólico/fotovoltaico.
2. Explicar el funcionamiento de un sistema eólico/fotovoltaico y de las estrategias de control y despacho que se pueden configurar.
3. Establecer una metodología para mejorar el desempeño de los sistemas híbridos eólico-fotovoltaico.
4. Probar la metodología desarrollada para mejorar el desempeño de un sistema híbrido real.

Aplicación de la metodología

La metodología desarrollada se aplicó a un sistema existente y en operación, ubicado en inmediaciones de la Universidad del Istmo, campus Tehuantepec; región caracterizada por la abundancia de recurso eólico y solar, por tanto, es un escenario adecuado para la evaluación de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico.

En primera instancia, se procede a identificar los componentes del SHGE, que en este caso, son la demanda energética, el recurso eólico, el recurso solar y los equipos.

Luego se procede a identificar los componentes del sistema híbrido que se quiere optimizar. En este caso, el sistema se compone de 4 paneles solares y un aerogenerador como fuentes de energía, un banco de baterías como sistema de almacenamiento, dos inversores para el tratamiento y adecuación de la energía entre los buses de corriente directa y alterna; y la red eléctrica que hará las veces de sistema de respaldo. Al ingresarlo al simulador se presenta como se muestra en la figura 3.

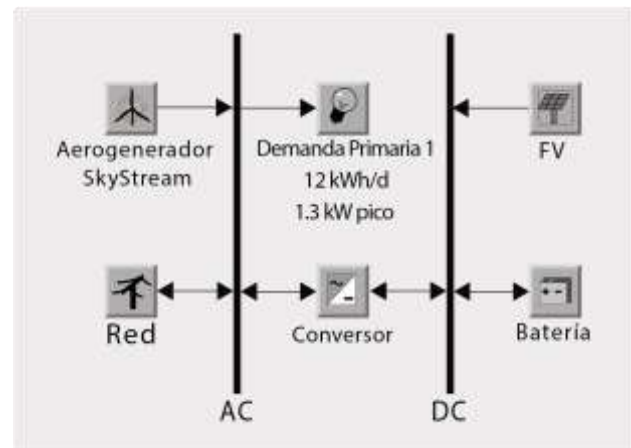


Figura 3 Esquema del SHGE de la UNISTMO en el simulador. HOMER

El segundo paso es obtener las características técnicas de los equipos que componen el sistema, tales como panel solar, aerogenerador, banco de baterías, inversores y la red eléctrica como sistema de respaldo. A partir del manual de cada equipo, así como de la información disponible en laboratorios, se obtiene la información necesaria para la simulación, la cual se enlista en la tabla 1:

Equipos del sistema	Costo (USD)	O&M (USD)	Reemplazo (USD)	Vida útil (años)
Aerogenerador 2400 W	\$10.496	\$420	\$10.496	15
Panel Solar 820 W	\$12.657	\$506	\$12.657	20
Banco de baterías 48 V	\$15.792	\$632	\$15.792	12
Convertidor 3600 W	\$5.312	\$212	\$5.312	12

Tabla 1 Equipos y características técnicas del SHGE. Sistema de generación UNISTMO

El tercer paso es caracterizar la demanda energética así como los recursos renovables que utiliza el SHGE, identificados en el paso 1.

La demanda energética del sistema híbrido se obtiene a partir de una base de datos anual. La serie de datos de la demanda energética contiene el consumo de energía eléctrica promedio por hora, en un lapso de un año. Para poder conocer el comportamiento de la carga en las diversas etapas del año, en este caso particular, se tomaron medidas del consumo energético en la línea que alimenta los laboratorios de energía eólica y solar de la Universidad del Istmo Campus Tehuantepec, utilizando un analizador de calidad de energía marca FLUKE 435.

Los datos se tomaron de jueves a martes en época laboral. A pesar de tratarse de un periodo de medición corto, este es representativo, ya que se alcanzan a observar los dos diferentes tipos de demanda diarias: 1. días laborales, 2. fines de semana y vacaciones. El día miércoles se consideró como día laboral y los datos del perfil diario resultan del promedio de los días martes y jueves. De esta manera puede construirse una base de datos anual teniendo en cuenta lunes a viernes como días laborales entre semana y fines de semana como fines de semana laborales, festivos y vacaciones.

El perfil diario de la demanda energética para los días laborales se presenta a continuación en el gráfico 1:

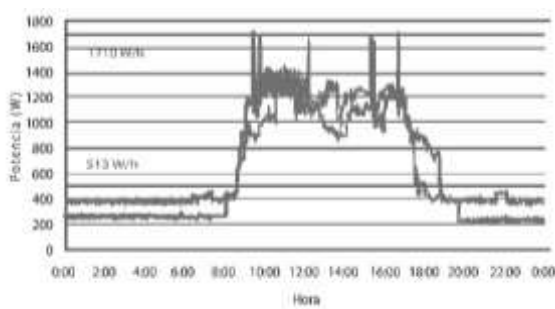


Gráfico 1 Perfiles diarios de la demanda energética en días laborales. *Mediciones sistema UNISTMO*

La demanda promedio anual que se obtiene al ingresar la base de datos anual al HOMER es de 12.3 kWh/día, una potencia promedio de consumo de 513 W y una potencia pico de 1.3 kW. Gráficamente se expresa con un perfil diario (Gráfico 2) y una gráfica monocromática anual (Gráfico 3):

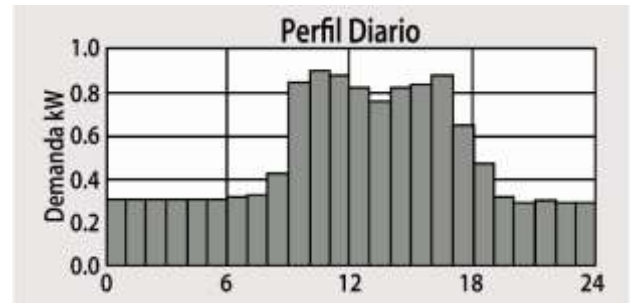


Gráfico 2 Perfil de demanda energética. *HOMER*



Gráfico 3 Perfil de demanda energética anual. *HOMER*

La potencia nominal del sistema híbrido es de 2.6 kW (como se verá más adelante), por tanto la demanda energética sí puede cubrirse con la energía generada a partir de las fuentes renovables.

Los datos necesarios para la evaluación de los recursos renovables mencionados, son medidos a lo largo de un año por medio de una estación anemométrica ubicada a unos 10 metros del sistema híbrido. Estos son registrados cada minuto y almacenados en un servidor. En el gráfico 4 se presenta la velocidad del viento y en el gráfico 5 la irradiancia solar a lo largo del año, como parámetros para evaluar el recurso eólico y solar, respectivamente. La velocidad promedio anual en el emplazamiento es 3.34 m/s que se clasifica como pobre, pero extrapolando a una altura de 40 m, la velocidad media es de 4.5 m/s, lo cual se acerca a la siguiente clase de potencia de viento (Elliott, Schwartz, Scott, Haymes, Heimiller, George, 2004).



Gráfico 4 Ventana del recurso eólico en el emplazamiento. *HOMER*

En este caso la estación anemométrica se encuentra en inmediaciones de un terreno con edificaciones y arboles altos, condición que impacta negativamente en las mediciones de la velocidad del viento. Sin embargo, el sistema híbrido puede generar energía suficiente para cubrir la demanda energética asignada.

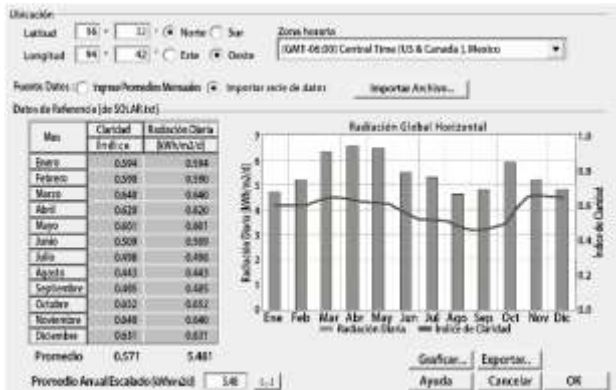


Gráfico 5. Ventana del recurso solar en el emplazamiento. HOMER

México cuenta con una radiación diaria promedio de 5.3 kWh/m² (Hernández Cruz, 2012). El recurso solar existente en el emplazamiento es de 5.48 kWh/m². Lo anterior indica que es un recurso altamente aprovechable. El paso cuatro indica capturar los parámetros inicialmente configurados en el inversor. Se presentan en la tabla 2:

No	Variable	Inicial (V)	SOC%	Fábrica (V)	SOC%
1	ABSORB FX/BATT	57,6	100,00328	57,6	100,0033
2	ABSORB FX/CHAR	57,6	100,00328	57,6	100,0033
3	FLOAT FX/BATT	53,2	71,79796	53,6	74,3621
4	FLOAT CC/SETP	54,4	79,49032	54,4	79,4903
5	SELL RE-VOLTS	52	64,1056	47,2	33,33616
6	REFLOAT FX/CHR	50	51,285	50	51,285
7	REFLOAT FX/BATT	50	51,285	50	51,285
8	LOW BATTERY CUT-IN	50	51,285	50	51,285
9	LOW BATTERY CUT-OUT	42	0,0026	42	0,0026
10	HBXDGSP	39	-19,2283	39	-19,2283
11	HBXUGSP	36	-38,4592	36	-38,4592

Tabla 2 Parámetros inicialmente configurados en el MATE para el SHGE. Sistema de generación UNISTMO.

Éstos pueden ser modificados a través de un dispositivo denominado MATE (compañero en inglés) por el fabricante, el cual se compone de una pantalla, 2 teclas rígidas y 4 teclas blancas que permiten navegar por los diferentes menús de configuración y cambiar los parámetros que gobiernan el comportamiento del SHGE. Es allí donde se realiza la configuración de diferentes parámetros que, no son en sí estrategias de control y despacho de energía. Sin embargo, “el usuario puede maximizar el aprovechamiento de la energía renovable y minimizar el suministro desde la red a través del uso cuidadoso de los parámetros y modos de operación”. (Manual del usuario Outback-MATE, 2008), (Palacios, 2020).

El quinto paso es identificar y almacenar los datos medidos por los sensores disponibles en el SHGE. El MATE se encuentra conectado al inversor, que a su vez está conectado a una estación de operación (PC) donde se tiene instalado el software de adquisición y registro de datos de las variables medidas, WattPlot®, los cuales se almacenan en archivos de formato *.txt. El documento “MATE Serial Communications Guide”, suministrado por el fabricante, indica cual es la manera de interpretar la base de datos generada. Algunas de las variables de interés son:

- Corriente del cargador - Corriente del PV
- Voltaje de entrada del PV -kWH diarios
- Voltaje de la batería - AH diarios
- Corriente del inversor- Corriente cargador
- Corriente comprada - V. AC de entrada
- Voltaje AC de salida - Corriente vendida
- Modo de operación del inversor

El sexto paso es establecer una analogía entre las estrategias de control disponibles en el software de simulación y las opciones configurables en el inversor que sean similares a las del simulador. Se presenta la siguiente analogía para sistemas aislados:

– Seguimiento de la demanda/HBX

Cuando entra en operación el sistema de respaldo, cubre la demanda energética y no carga el banco de baterías a no ser que el voltaje sea menor que el límite inferior de protección o corte por bajo voltaje.

El modo de intercambio alto de baterías o *high battery exchange* (HBX), permite el control sobre el uso de la energía suministrada por la red eléctrica según los SP del voltaje y tiempo para las baterías, determinados por el usuario y de esta manera maximizar el aprovechamiento de la energía renovable, minimizando el consumo de energía de la red o combustibles. Este modo de operación es usado principalmente en SHGE que tienen suficiente generación de energía renovable para cubrir la totalidad de la demanda la mayor parte del tiempo.

– Ciclo de carga/ DROP Mode

El sistema de respaldo opera para satisfacer la demanda que no se alcanza a cubrir con la energía generada a partir de las fuentes renovables y además, carga las baterías hasta su SP de SOC o voltaje de Flotación.

El modo de operación DROP desconecta el inversor de la entrada del sistema de respaldo pero permite que se vuelva a conectar si el voltaje de baterías alcanza el valor de “corte por batería baja” o si el inversor se sobrecarga. Las baterías solo se cargarán con la red (o sistema de respaldo) cuando el SOC sea del 0% marcado por el valor del “corte por batería baja”, y reanudará la entrega de energía a la demanda al superar el valor de voltaje de reconexión. La manera de incorporar el SP para el SOC sería activando el modo flotante, y de esta manera ingresar el valor del SP en la variable VRefloat o voltaje de refloatación.

Resultados de la simulación

A partir de los datos ingresados al simulador se obtienen los siguientes resultados, que permiten analizar el desempeño y modo de operación del sistema real, para tener una base de comparación con el desempeño que tendrá el sistema cuando opere según los parámetros optimizados por medio del análisis de sensibilidad.

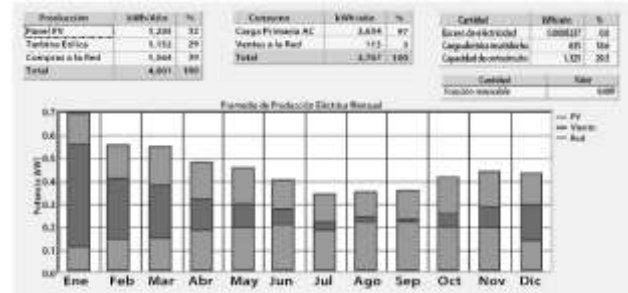


Gráfico 6 Resultados de la simulación. HOMER

En el primer cuadro del gráfico 6 se puede observar la cantidad de energía aportada por cada fuente de energía: Arreglo de módulos fotovoltaicos (32%), Aerogenerador (20%) y la red como sistema de respaldo (50%). En la segunda tabla de la misma figura, se observa que se consume el 97% de toda la energía y el 3% es vendido a la red, lo que en un sistema aislado serían pérdidas por energía en exceso. En el tercer cuadro se puede ver un exceso de energía del 0%, el porcentaje de energía no servida del 18%, la capacidad de corto del 29.5% Y finalmente una fracción renovable del 60.9%.

La gráfica de barras de la figura 8 indica que la energía solar generada (sombreado claro superior) es similar a lo largo del año. La energía eólica (sombreado oscuro) es proporcional a la variación anual de los vientos, y la energía requerida de la red (sombreado claro inferior) guarda una relación inversa con la generación de energía eólica, ya que compensa la ausencia de este recurso en los meses de bajas velocidades del viento.

Análisis de sensibilidad

A partir de los datos ingresados al HOMER podemos analizar el desempeño del sistema según los resultados arrojados para la configuración inicial y realizar el análisis de sensibilidad sobre el SP del SOC (gráfico 7), y sobre las estrategias de control (Figura 4).

NOTA: Para el análisis en adelante se omite el aerogenerador ya que este se encontraba fuera de línea durante las pruebas iniciales y posteriores a la optimización.

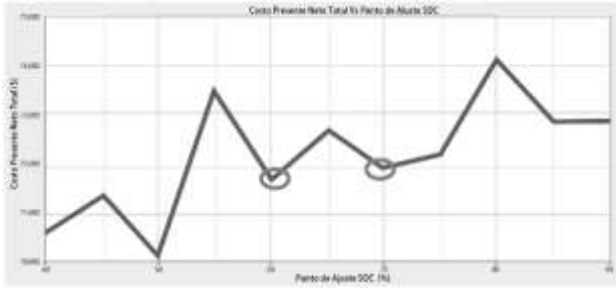


Gráfico 7 Análisis de sensibilidad sobre el SP del SOC. HOMER

La fig. 9 muestra tres puntos críticos mínimos de interés para el análisis: 50, 60 y 70%. El 50% presenta el menor costo neto presente (NPC por sus siglas en inglés), pero no se toma en cuenta ya que no es conveniente tener la batería con una carga baja. Se elige el SP del 60% con NPC menor que el dado para el SP del 70% y un valor similar para los costos de operación del sistema de respaldo.

FV (kW)	Gen 1 (kW)	SoCS2SP	Conv. (kW)	Disp. (MWh)	Capital Inicial	Capital Inicial	Total NPC	COE (\$/kWh)
0.82	3	8	3.6	CC	\$33,286	\$33,286	\$81,150	1.576
0.82	3	8	3.6	LF	\$33,286	\$33,286	\$98,124	1.906
0.82	3	3.6	CC	\$28,286	\$28,286	\$72,343	2.369	

Figura 4 Análisis de sensibilidad sobre la estrategia de control. HOMER

Según la figura 4 el costo anual de producción de energía, el costo neto de producción NPC y el costo de la energía COE, son menores con la estrategia CC, mientras que la fracción de energía renovable es mayor con la estrategia LF.

SOC (%)	FV (kW)	SoCS2SP	Conv. (kW)	Est. (MWh)	Red. (kW)	Capital Inicial	Costo Operación (\$/Año)	NPC Total
71%	0.82	8	3.6	CC	0.348	33,278	1,893	54,993
60%	0.82	8	3.6	CC	0.349	33,278	1,892	54,984

Figura 5 Comparación del SP inicial con el final bajo la misma estrategia de control. HOMER

Podemos concluir que el sistema tendrá un mejor desempeño energético si se emplea la estrategia CC y un SP del 60%, ya que el NPC es 0.02% menor que en el estado inicial cuando se tenía el SP de 71% y la estrategia CC, como se muestra en la figura 5.

Análisis comparativo

Para implementar la estrategia de control y el valor óptimo de SP encontrado, se puso a prueba el sistema durante una semana en la cual operó con el modo flotante OFF y el modo de operación de red DROP, con un SP de 51.4 V, equivalente al 60% del SOC.

Esto con el fin de tener el sistema operando como un sistema aislado sin conexión a la red eléctrica, usando la red eléctrica como sistema de respaldo para fines académicos y de protección a los equipos. Los resultados se presentan en la tabla 3 y en el gráfico 8.

Criterio	Unidad	Inicial	Final	%cambio
Costo anual de operación	USD/año	1.893	1.892	0.05
Costo total neto presente	USD	54993	54982	0.02
Costo ponderado de la energía	USD/kWh	1309	1308	0.08
Fracción de energía renovable	%	30	32	-6.67
Energía que ingresa al banco de baterías	kWh/d	8.427	8.541	-1.35
Energía comprada a la red	kWh/d	9.408	0.023	99.76
Energía vendida a la red	kWh/d	25.899	0	100.00

Tabla 3 Comparación del desempeño antes y después de la optimización. Sistema de generación UNISTMO

Los datos que se reportan en la tabla 3, muestran los cambios que tendrían los diferentes criterios de operación del SHGE si se operara bajo los parámetros encontrados con la optimización: el costo anual de operación se reduce un 0.05%; el costo total neto presente, se reduce un 0.02%; el costo ponderado de la energía se reduce un 0.08%; la fracción de energía renovable se incrementa un 6.67%; La energía que ingresa al banco de baterías se incrementa un 1.35%, La energía comprada a la red se reduciría casi en su totalidad (99.76%) al igual que las ventas a la red. Esto último es beneficioso porque la energía que se deja de comprar a la red (alto costo) se obtiene de la que anteriormente se vendía (bajo costo).

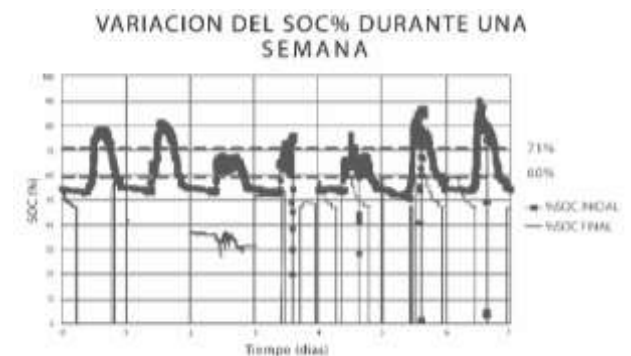


Gráfico 8 Variación del SOC durante una semana antes/después de la optimización. Sistema de generación UNISTMO

En el gráfico 8 se puede apreciar el cambio en el comportamiento del sistema entre el estado inicial (línea gruesa \blacksquare) y el estado final 60% (línea delgada —). En el estado INICIAL el SP era del 70% y los valores registrados oscilaban entre el 60 y el 70%. Sin embargo, se presentan valores de overshoot o sobre paso del SP, más evidentes cuando la demanda energética disminuye. Durante los fines de semana el consumo de energía es bajo, mientras que la generación de energía solar es la misma. Por tanto, se incrementa el estado de carga del banco de baterías. En el estado FINAL, disminuye el valor del SP al 60% (línea delgada —), y los valores de operación se encuentran la mayor parte del tiempo por debajo de este valor. Se observa que cuando el SOC alcanza el SP de 60% inicia la entrega de energía del banco de baterías a la demanda energética, debido al modo de operación DROP ya que las baterías entregan toda la energía almacenada hasta alcanzar el SP de VLBCO (Voltaje *Low Battery Cut-Out*) el cual es el voltaje que marca el límite inferior seguro para la descarga de las baterías, que en términos de SOC es del 0% y en términos de voltaje es de 42 V.

Conclusiones

Para optimizar SHGE E/PV, se deben conocer las características de los recursos disponibles y el tipo de demanda energética. Por tanto, es importante contar con el registro o modelo de las variables del sistema, durante todo un año y su posterior análisis estadístico.

En general, se logró un mejor aprovechamiento de la energía generada por el panel solar ya que se tiene disponible mayor espacio en el banco de baterías para el almacenamiento de energía solar.

Es conveniente utilizar otro tipo de herramientas de software para la simulación y optimización del SHGE con el fin de incluir otros modos de operación disponibles en el menú de configuración del MATE y aprovechar las ventajas que brindan los diferentes escenarios de operación (Armijo, 2020), (Ramos-Teodoro, 2020).

La metodología desarrollada se basa en el análisis de operación del SHGE, en el análisis de desempeño energético y en la optimización de variables económicas, mediante un algoritmo lógico que busca minimizar el costo de la energía producida, variando los parámetros de control, tales como el estado de carga de las baterías y las estrategias de control y despacho de energía.

Aplicando la metodología desarrollada, se logró establecer que la configuración del control que permite una administración adecuada de la energía, que para el sistema híbrido de estudio, es la estrategia del ciclo de carga de las baterías, con SP del 60% que equivale a 51.4 V. Este se configura en el parámetro de voltaje de flotación.

Es recomendable mantener alto el voltaje del banco de baterías porque así protege de descargas profundas que deterioran el equipo.

Todos los sistemas híbridos de generación de potencia deben tener un estudio y proceso de optimización para un mejor aprovechamiento energético de los recursos. Cada sistema es diferente según sus componentes, tipo de demanda energética y cantidad de recursos disponibles.

Se espera que el sistema opere de manera más eficiente con los parámetros optimizados ya que el costo de operación anual se redujo un 0.05%, el costo total neto presente se redujo un 0.02%, el costo de producción de energía se redujo un 0.08%, y la fracción de energía renovable se incrementó del 30 al 32%.

Referencias

Armijo Landskron, I. A. (2020). Plataforma de simulación para estudios de estabilidad en una microrred. Universidad de Chile, Santiago de Chile.

Bernal-Agustín, J. M. & Lopez-Dufo, R., (2009). Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13, 2111–2118.

Chong, L. W., Wong, Y. W., Kumar Rajkumar, Rajprasad., Kumar Rajkumar, Rajpartiban, Isa, D., (2016). Hybrid energy storage systems and control strategies for stand-alone renewable energy power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 66, 174–189.

URBANO-ARCILA, Paola Andrea, LASTRES-DANGUILLECOURT, Orlando, HERNÁNDEZ-GALVEZ, Geovanni e IBÁÑEZ-DUHARTE, Guillermo Rogelio. Simulación y Optimización de Estrategias de Control para Sistemas Energéticos Renovables de Baja Potencia. *Revista de Energías Renovables*. 2020

De la Cruz Fernández, E. (2020). Diseño de un sistema eléctrico aislado utilizando el software HOMER para electrificar el caserío Santa Rosa de Tumar en el distrito de Huambos, provincia de Chota–Cajamarca.Perú.

Elliott, D., Schwartz, M., Scott G., Haymes, S., Heimiller, D., George R. (2004). Atlas de los recursos eólicos del estado de Oaxaca.

Hernández, G., Probst, O., Lastres, O., Núñez Rodríguez, A., Juantorena Ugás, A., Andrade Durán, E., Sebastian, P. J., (2012). Optimization of autonomous hybrid systems with hydrogen storage: Life cycle assessment. *Int. J. Energy Res.* 2012; 36. DOI: 10.1002/er.1830749 763.

Hernández Cruz, N., (2012). Relación entre la irradiancia solar y las zonas de marginación en México. CONAGUA. Febrero de 2012, Morelos-México.

Lambert, T., Gilman, P., and Lilienthal, P., (2006). Micropower system modeling with HOMER. En: *Integration of alternative sources of energy*. New Jersey. Wiley Interscience. John Wiley & Sons, Inc. 2006, pp. 379-418.

Olatomiwa, L., Mekhilef, S., Ismail, M. S., Moghavvemi M., (2016). Energy management strategies in hybrid renewable energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No 62 Pp 821–835.

Palacios Duarte, J. E. (2020). Diseño e implementación de estrategias de control para inversores de tensión trabajando en paralelo y funcionando como generadores síncronos virtuales. Cali, Colombia.

Ponce Corral, C., GarcíaVillalba, L. A., Ñeco Caberta, R., Valenzuela, R. A., (2014). Diseño de un sistema Híbrido eólico solar para suministro de energía eléctrica a zona rural en el estado de Chihuahua. *CULCyT*, año 11, No 54 Especial No 1, Septiembre - Diciembre.

Ramos-Teodoro, J., Gimenez-Miralles, A., Rodriguez-Diaz, F., & Berenguel, M. (2020). Simulación de escenarios de reparto económico en sistemas multi-energía. España.