

Algoritmo para la optimización de Sistemas Híbridos Renovables

Algorithm for optimization of Hybrid Renewable Systems

GÓMEZ-GONZÁLEZ, Francisco Javier†*, VALENCIA-SALAZAR, Iván¹ y PÉREZ-NAVARRO-GÓMEZ, Ángel²

¹Instituto Tecnológico de Veracruz, México

²Universidad Politécnica de Valencia, España

ID 1^{er} Autor: *Francisco Javier, Gómez-González* / ORC ID: 0000-0001-7798-9601, Researcher ID Thomson: I-6550-2018, CVU CONACYT ID: 831120

ID 1^{er} Coautor: *Iván, Valencia-Salazar* / Researcher ID Thomson: T-7960-2018, CVU CONACYT ID: 545916

ID 2^{do} Coautor: *Ángel, Pérez-Navarro-Gómez* / ORC ID: 0000-0003-2274-0520

Recibido: Marzo 29, 2018; Aceptado Mayo 31, 2018

Resumen

El presente artículo muestra el desarrollo de un algoritmo para la optimización de un sistema de microgeneración híbrido fotovoltaico-eólico-diésel-baterías. Se proporciona al algoritmo información sobre los recursos renovables disponibles en la zona donde se desea implementar el sistema, la demanda energética requerida y el costo de los componentes. El algoritmo utiliza la información para estimar el balance de energía cada hora, a lo largo de un año, para calcular los periodos de sobredemanda y de sobregeneración. Basándose en posibles combinaciones de componentes proporcionadas por el usuario, el algoritmo determina el costo anualizado total (CAT) y el costo de energía (COE) para cada combinación. Con la información obtenida, se podrá encontrar una combinación óptima de componentes que satisfaga la demanda de la carga al costo más asequible. Además, el algoritmo proporciona otros datos de utilidad, como el consumo anual de diésel y las emisiones de CO₂ producidas por el sistema en un año. El algoritmo fue implementado en MATLAB para un sistema aislado y como caso de estudio, se consideró una granja acuícola localizada en el municipio de Alvarado, Veracruz, México.

Algoritmo, Sistema de microgeneración, Optimización

Abstract

This paper shows the development of an algorithm for optimizing a hybrid microgeneration PV/wind/diesel/battery system. Information about the available renewable resources in the region where the system could be installed, the required energy demand and the cost of each component is provided to the algorithm. The algorithm uses the information in order to estimate the energy balance each hour, over a year, to calculate the periods of over-demand and over-generation. Based on possible component combinations provided by the user, the algorithm determines the total annualized cost (TAC) and the cost of energy (COE) for each combination. With this information, an optimum combination of components can be obtained for meeting the load demand with an affordable cost. In addition, the algorithm determines other useful information, such as the annual diesel consumption and CO₂ emissions produced by the system in a year. The algorithm was implemented in MATLAB for a stand-alone system and as case of study, an aquafarm located in the municipality of Alvarado, Veracruz, Mexico, was considered.

Algorithm, Microgeneration system, Optimization

Citación: GÓMEZ-GONZÁLEZ, Francisco Javier, VALENCIA-SALAZAR, Iván y PÉREZ-NAVARRO-GÓMEZ, Ángel. Algoritmo para la Optimización de Sistemas Híbridos Renovables. Revista de Tecnología e Innovación. 2018, 5-15: 20-29.

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: ffgomezg@itver.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El aumento gradual de la población mundial ha acelerado las necesidades energéticas a nivel global. Además, el uso de combustibles fósiles como materia principal para la generación de electricidad, ha causado niveles de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) preocupantes que aceleran los efectos del calentamiento global y el cambio climático en el planeta [1].

Ante esta situación y los cambios en materia energética que se vienen dando en México [2], la aplicación de las energías renovables para la generación de electricidad se hace relevante para contribuir a reducir las emisiones de GEI y sus efectos.

Para el aprovechamiento de las energías renovables, se utilizan distintas tecnologías. Módulos fotovoltaicos (FV) para la energía solar, aerogeneradores para la energía eólica y biodigestores para la biomasa, son algunos ejemplos de estas tecnologías. Sin embargo, debido a la intermitencia inherente de las energías renovables su aplicación individual no es eficiente, por lo que se integran en conjunto para formar lo que se conoce como un sistema híbrido renovable [3].

Por otra parte, la acuicultura es una de las principales actividades económicas en zonas costeras de México y representan una fuente de empleo importante para la población de dichas regiones [4].

El estado de Veracruz, localizado frente a las costas del Golfo de México cuenta con un número importante de granjas acuícolas, dedicadas a la cría de mojarra tilapia y camarón principalmente. Sin embargo, sus costos de operación por consumo de electricidad son elevados. Ya que la disponibilidad de recursos renovables como la radiación solar y el viento, se presenta en cantidades importantes en el estado de Veracruz [5], se plantea en este artículo un algoritmo implementado en MATLAB que apoye en el diseño y optimización de un sistema híbrido renovable.

Se pretende que el sistema obtenido aproveche adecuadamente algunos de los recursos renovables disponibles en la región, para satisfacer las necesidades energéticas de una granja acuícola modelo y que sea factible tanto técnica como económicamente.

El artículo presenta en principio, la definición de un sistema híbrido renovable y su estructura básica.

Posteriormente se presenta la metodología desarrollada, donde se caracterizan la región donde se localiza la granja, los recursos renovables disponibles en la zona, así como la demanda energética. El algoritmo elaborado para la optimización del sistema híbrido renovable propuesto se describe también, apoyándose en un diagrama de flujo.

Finalmente, se muestran los resultados de la simulación obtenidos en MATLAB para extraer las conclusiones correspondientes.

Sistemas Híbridos Renovables

Un sistema híbrido renovable (*HRES*, por sus siglas en inglés) combina dos o más fuentes de generación de energía renovable, un sistema de generación convencional y un sistema de almacenamiento [6]. Además, puede trabajar aislado de la red de suministro eléctrico o conectado a ella. Una representación de un HRES puede apreciarse en la figura 1.

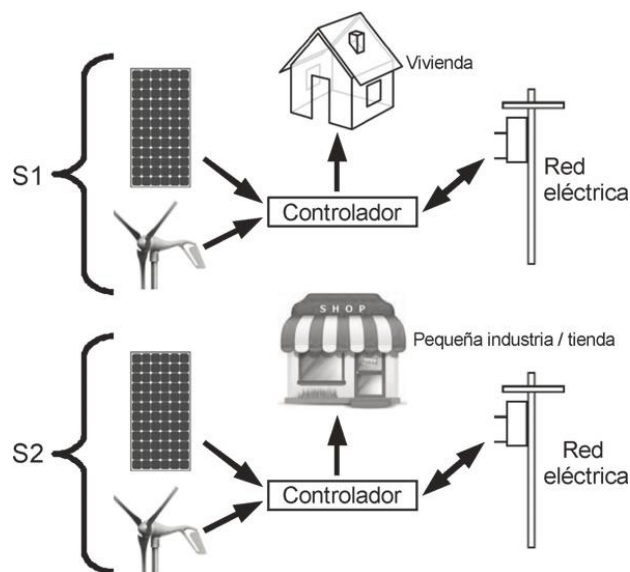


Figura 1 Esquema genérico de un sistema híbrido renovable

Fuente: [7]

Cabe mencionar que en este campo de estudio si bien se pueden encontrar distintos trabajos sobre teoría, modelado y optimización de los sistemas híbridos renovables como son [8], [9], [10], [11] y [12], no se encontraron aplicaciones enfocadas a granjas acuícolas.

Metodología

En la literatura sobre el dimensionado de sistemas híbridos renovables, aparecen distintas metodologías para su optimización [13]. Para propósitos del presente trabajo, la metodología propuesta contempla los siguientes pasos:

- A. Caracterizar la región donde se ubica la granja.
- B. Caracterizar los recursos renovables presentes en la región.
- C. Caracterizar la demanda energética de la granja acuícola modelo.
- D. Proponer el sistema híbrido a optimizar.
- E. Modelar los componentes del sistema.
- F. Desarrollar un algoritmo para la optimización del sistema híbrido renovable propuesto, que incluya el despacho de la energía producida por las fuentes de generación.
- G. Validar el algoritmo en el caso de estudio seleccionado.

1 Caracterización de la región

La granja acuícola utilizada como caso de estudio, se localiza en el poblado conocido como Camaronera, correspondiente al municipio de Alvarado, en la zona costera central del estado de Veracruz. La ubicación del estado en el interior del país, se muestra en la figura 2.



Figura 2 Localización del estado de Veracruz, México
Fuente: [14]

El municipio del Alvarado, se encuentra regado por los ríos Papaloapan y Blanco, siendo ambos afluentes del complejo lagunar de Alvarado, constituido de Norte a Sur, por las lagunas Camaronera, Buen País, Alvarado y Tlalixcoyan. El tipo de clima es cálido-húmedo con una temperatura mayor a 18°C.

La temperatura media anual es de 25.23°C, con régimen de lluvias en verano donde ocurre la canícula (época de calor), con poca oscilación térmica.

La velocidad de los vientos con mayor dominancia es, para los vientos del N, de más de 15.55 nudos; para los del NE entre 7.77 y 15.55 nudos; los del E presentan una velocidad de 3.88 a 15.55 nudos y los del NW de 7.77 a más de 15.55 nudos [15].

2 Caracterización del recurso renovable

En principio, la implementación de un sistema de energía híbrido renovable, requiere de la recolección de datos por un largo periodo, generalmente de un año, de los recursos energéticos renovables disponibles en la región de estudio [16].

Para este caso, tomando como base los datos meteorológicos proporcionados por algunas herramientas se obtuvo el potencial de insolación y velocidad del viento en la zona de ubicación de la granja, mostrados en los gráficos 1 y 2.

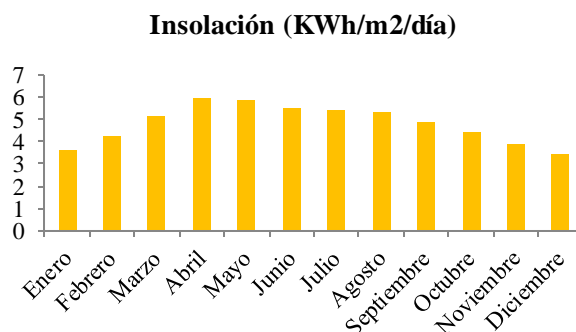


Gráfico 1 Potencial de recurso solar en la zona de estudio

Fuente: Elaboración propia

Dentro de las herramientas analizadas se encuentran los mapas de estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) [17], la Comisión Nacional del Agua [18], así como el servidor del Centro de Datos de Ciencias Atmosféricas de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) [19] y la red de estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias [20].

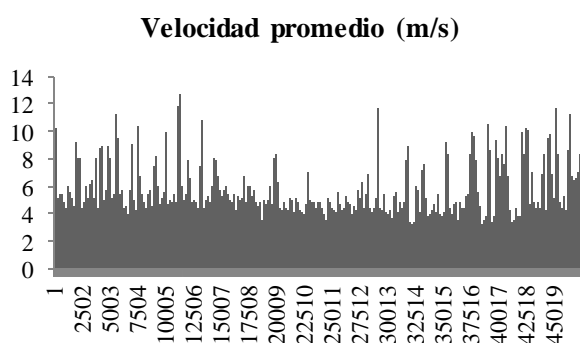


Gráfico 2 Potencial de recurso eólico en la zona de estudio

Fuente: Elaboración propia

3 Caracterización de la demanda energética

Para conseguir un perfil de demanda energética, se instaló un analizador/registrador de datos trifásico. El analizador se programó para registrar mediciones de la demanda cada 5 minutos, durante una semana, obteniendo de esta manera un total de 2016 muestras, mostradas gráficamente en el gráfico 3.

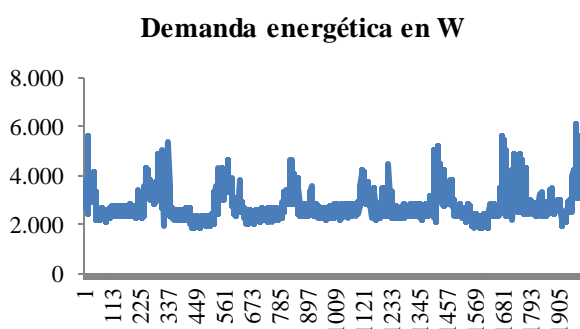


Gráfico 3 Perfil de demanda en Watts para la granja bajo estudio

Fuente: Elaboración propia

4 Propuesta del sistema híbrido a optimizar

La selección del sistema híbrido renovable más conveniente, dependerá, entre otros factores, del clima imperante en la zona [21].

Ya que se cuenta con potenciales eólico y solar adecuados debido a las condiciones climatológicas en la región bajo estudio, se propone la aplicación de un sistema híbrido con la siguiente arquitectura:

- Aislado de la red eléctrica.
- Tecnologías de energía eólica y solar fotovoltaica como fuentes de generación renovable.

- Generador diésel como fuente de generación no renovable.
- Banco de baterías como sistema de almacenamiento.

5 Modelos de los componentes del sistema

Los componentes seleccionados para su modelado y análisis posterior, se enlistan en la Tabla 1.

Componente	Especificaciones
Aerogenerador	Windspot 3.5 kW
Módulo fotovoltaico	ERDM SOLAR 3.9 kWp
Generador diésel	Perkins 10 kW
Baterías	Trojan 6 V, 360 Ah

Tabla 1 Lista de componentes considerados en el estudio

Fuente: Elaboración propia

Para estos componentes, se incluyeron en el algoritmo los modelos matemáticos para el arreglo fotovoltaico, el aerogenerador, el generador diésel y el estado de carga del banco de baterías.

Para el aerogenerador, se utilizó la curva de generación proporcionada por el fabricante [22], para obtener la generación de potencia eólica:

$$P_{wt} = 0.002786v^6 + 0.21908175v^5 - 6.3924223v^4 + 84.812451v^3 - 507.745659v^2 + 1484.9246v - 1538.70485 \text{ W, para } 3\text{m/s} \leq v \leq 20\text{m/s}$$

$$P_{wt} = 0, \text{ para cualquier otro valor de } v \text{ (1)}$$

Donde:

P_{wt} = Potencia de salida del aerogenerador.

v = Velocidad del viento

Para el módulo fotovoltaico, la potencia de salida se calcula como [23]:

$$P_{FV} = f_{FV} Y_{FV} \frac{I_T}{I_S} \quad (2)$$

Donde:

P_{FV} = Potencia de salida del módulo fotovoltaico

f_{FV} = Factor de degradación; 0.75 para este caso.

Y_{FV} = Capacidad del módulo fotovoltaico.

I_T = Radiación global incidente en la superficie del módulo fotovoltaico.

$I_S = 1 \text{ kW/m}^2$.

Para el generador diésel, el consumo de combustible se obtiene de la siguiente manera [24]:

$$Q(t) = \alpha_{GD} P(t)_{GD} + \beta_{GD} P_{GD} \quad (3)$$

Donde:

$Q(t)$ = Consumo de combustible del generador diésel en la hora t , en lt/hr.

$P(t)$ = Potencia producida por el generador diésel en la hora t .

P_{GD} = Potencia nominal del generador diésel.

α_{GD} y β_{GD} = Coeficientes de la curva de consumo proporcionados por el fabricante. Para este caso, las magnitudes asignadas para α_{GD} y β_{GD} fueron de 0.246 y 0.08145 lt/kWh, respectivamente.

Para el estado de carga de las baterías, éste se define como [25]:

$$SOC(t) = SOC(t-1) \pm \frac{E_{bat} \eta_{bat}}{Enbat} \times 100 \quad (4)$$

Donde:

$SOC(t)$ = Estado de carga de la batería en la hora t .

$SOC(t-1)$ = Estado de carga de la batería en la hora $t-1$.

E_{bat} = Energía de carga o descarga de la batería (kWh).

η_{bat} = Eficiencia *round-trip* de la batería; 1 para este caso.

$Enbat$ = Capacidad nominal de la batería (kWh).

6 Desarrollo del algoritmo

Una vez que se cuenta con los datos de los recursos renovables disponibles y la demanda energética de la granja acuícola modelo.

Estos son arreglados e introducidos al algoritmo en periodos de una hora. El algoritmo propuesto tiene dos funciones principales:

1. Establecer una estrategia de despacho para la energía producida por las fuentes de generación incluidas en la arquitectura del sistema híbrido.
2. Servir como herramienta de decisión para seleccionar un sistema de microgeneración óptimo, tanto técnica como económicamente.

El algoritmo básicamente calcula la energía generada por las fuentes de generación renovable y la resta de la demanda energética, cada hora durante un año; es decir, se calcula el balance de energía para cada una de las 8760 hora anuales.

Si el balance es positivo (demanda supera la generación renovable), la demanda faltante será satisfecha con el banco de baterías. En caso de no ser suficiente, el generador diésel cubrirá el déficit.

En caso de balance negativo (generación renovable supera a la demanda), el exceso de energía se utiliza para cargar el banco de baterías y en caso de existir sobrante, podría ser inyectado a la red de suministro eléctrico en caso de contar con un sistema híbrido interconectado, lo que representaría un ahorro en el consumo de electricidad.

El diagrama de flujo del algoritmo utilizado se muestra en la figura 3, donde:

Balance(t) = Balance de energía en la hora t .

DE(t) = Demanda energética en la hora t .

GenW(t) = Generación eólica en la hora t .

GenFV(t) = Generación fotovoltaica en la hora t .

GenD(t) = Generación diésel necesaria en la hora t .

GenDnom = Generación diésel nominal.

EDtot(t) = Energía diésel total requerida en la hora t , incluyendo la necesaria para cargar el banco de baterías.

$Exceso(t)$ = Excedente de energía en la hora t .

$Ebat(t)$ = Energía almacenada en el banco de baterías en la hora t .

$Ebat(t-1)$ = Energía almacenada en el banco de baterías en la hora $t-1$.

$Ebatmax$ = Energía máxima almacenable en el banco de baterías.

$Ebatmín$ = Energía mínima almacenable en el banco de baterías.

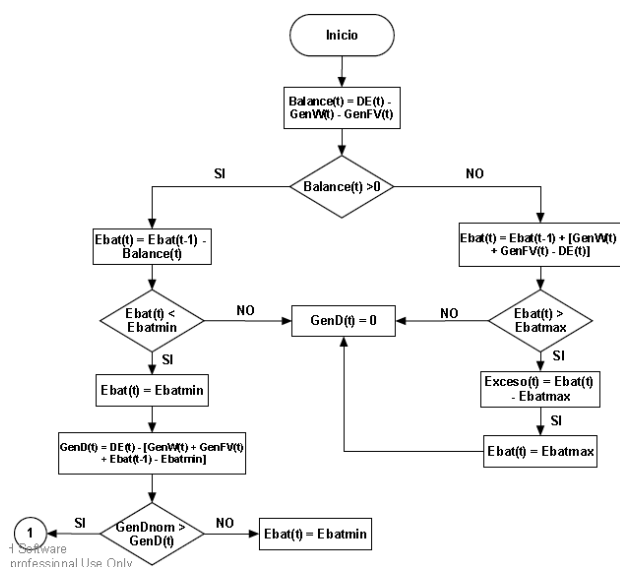


Figura 3 Diagrama de flujo del algoritmo propuesto

Fuente: Elaboración propia

Dentro de los criterios económicos utilizados en la optimización de sistemas híbridos renovables, se encuentran el costo presente neto (NPC), el costo nivelizado de energía (LCOE) y el costo de ciclo de vida (LCC) [26] [27].

Para este estudio, como criterios económicos para el análisis de costo del sistema, se incluyó en el algoritmo la estimación del costo anualizado total (CAT) y el costo de energía (COE).

El CAT puede calcularse en términos del costo de capital anual (*Capital*) y el costo de mantenimiento anual (*Mantenimiento*) de la siguiente manera:

$$CAT = Capital + Mantenimiento \quad (5)$$

.

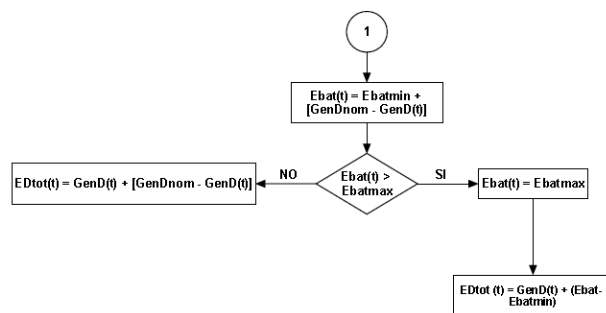


Figura 3 (cont.) Diagrama de flujo del algoritmo propuesto

Fuente: Elaboración propia

Ahora, para convertir el costo de capital inicial en costo de capital anual, se utiliza el factor de recuperación de capital (*CRF*), dado por [28]:

$$CRF = \frac{i(i+1)^n}{(i+1)^n - 1} \quad (6)$$

Donde i es la tasa de interés y n es el ciclo de vida del sistema. Para fines de simulación, se utilizaron valores de i y de n de 9% y 20 años, respectivamente.

Para los componentes que requieren ser reemplazados a lo largo de la vida útil del sistema, se aplica el factor de valor presente como sigue [28]:

Para las baterías:

$$Cbat = Pbat * \left(1 + \frac{1}{(1-i)^5} + \frac{1}{(1-i)^{10}} + \frac{1}{(1-i)^{15}}\right) \quad (7)$$

Para el generador:

$$Cdis = Pdis * \left(1 + \frac{1}{(1-i)^5} + \frac{1}{(1-i)^{10}} + \frac{1}{(1-i)^{15}}\right) \quad (8)$$

Donde $Cbat$ y $Cdis$ corresponden al valor presente de la batería y el generador diésel, respectivamente; mientras que $Pbat$ y $Pdis$ son el costo unitario de la batería y el generador diésel.

Se asume para fines de análisis, la necesidad de reemplazo cada 5 años tanto para las baterías como para el generador diésel. Para el arreglo fotovoltaico y el aerogenerador se consideró una vida útil de 20 años.

En términos anuales, el costo de capital se calcula como:

$$Capital = CRF * [Nwt * Cwt + Nfv * Cfv + Nbat * Cbat + Ngen * Cdis] + Dt * Cdiesel \quad (9)$$

GÓMEZ-GONZÁLEZ, Francisco Javier, VALENCIA-SALAZAR, Iván y PÉREZ-NAVARRO-GÓMEZ, Ángel. Algoritmo para la Optimización de Sistemas Híbridos Renovables. Revista de Tecnología e Innovación. 2018

Donde Nwt es el número de aerogeneradores, Nfv es el número de módulos FV, $Nbat$ es el número de baterías, $Ngen$ es el número de generadores diésel, Dt son los litros totales de diésel consumidos por año y $Cdiesel$ es el costo unitario por litro de diésel.

Para el costo anual de mantenimiento se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Mantenimiento} = Npv * Cfv + Nwt * Cwtm + Ngen * Cdism \quad (10)$$

Donde Cfv , $Cwtm$ y $Cdism$ son los costos anuales de mantenimiento de módulos FV, aerogenerador y generador diésel. Se despreciaron los costos anuales de mantenimiento de las baterías para este caso de estudio.

7 Validación del algoritmo

Para la validación correspondiente, se le proporcionan al algoritmo las posibles combinaciones de componentes (cantidad y/o capacidad de cada uno de ellos) para analizar los resultados. De esta manera, se podrá seleccionar el arreglo óptimo del sistema híbrido renovable de acuerdo a los criterios económicos establecidos. El software seleccionado para introducir y probar el algoritmo fue MATLAB.

Para este estudio se eligieron nueve escenarios de prueba, con combinaciones de aerogeneradores y arreglos fotovoltaicos, los cuales se resumen en la tabla 2. Se consideró en todo momento, la aplicación de un generador diésel y un banco de 64 baterías.

Escenario	Combinación
A	Sin aerogeneradores y sin arreglo fotovoltaico
B	Sin aerogeneradores y un arreglo fotovoltaico de 32 kW
C	Sin aerogeneradores y un arreglo fotovoltaico de 62 kW
D	Un aerogenerador y sin arreglo fotovoltaico
E	Un aerogenerador y un arreglo fotovoltaico de 32 kW
F	Un aerogenerador y un arreglo fotovoltaico de 62 kW
G	Diez aerogeneradores y sin arreglo fotovoltaico
H	Diez aerogeneradores y un arreglo fotovoltaico de 32 kW
I	Diez aerogeneradores y un arreglo fotovoltaico de 62 kW

Tabla 2 Combinaciones de prueba utilizadas en el algoritmo

Fuente: Elaboración propia

ISSN: 2410-3993

ECORFAN@ Todos los derechos reservados

Resultados

Luego de ejecutar el algoritmo en MATLAB con los escenarios mencionados, se obtuvieron los resultados para el CAT y el COE mostrados en las tablas 3 y 4, respectivamente.

Escenario	Costo Anualizado Total (USD)
A	14851
B	10819
C	14638
D	14361
E	11783
F	15608
G	17973
H	20521
I	24346

Tabla 3 Relación del CAT por escenario

Fuente: Elaboración propia

Asimismo en las tablas 5 y 6 se muestran, respectivamente, el consumo anual de diésel y las emisiones anuales de CO₂ para cada escenario analizado.

Escenario	Costo de Energía (USD)
A	0.6170
B	0.4495
C	0.6081
D	0.5967
E	0.4895
F	0.6485
G	0.7467
H	0.8526
I	1.0115

Tabla 4 Relación del COE por escenario

Fuente: Elaboración propia

De la información anterior y considerando que el sistema óptimo debe corresponder a aquel con los valores de CAT y COE más bajos, se puede establecer el escenario B (*sistema híbrido FV-diésel-baterías*) como el sistema híbrido óptimo.

Sin embargo, este arreglo no considera la tecnología eólica propuesta para la arquitectura del sistema.

Escenario	Consumo anual de diésel (litros)
A	7864.5
B	6.6
C	0
D	6403.6
E	0
F	0
G	1277.4
H	0
I	0

Tabla 5 Consumo anual de combustible por escenario

Fuente: Elaboración propia

Escenario	Emisiones de CO ₂ (kg)
A	20488
B	17
C	0
D	16649
E	0
F	0
G	3321
H	0
I	0

Tabla 6 Emisiones anuales de CO₂ por escenario

Fuente: Elaboración propia

Para cubrir con la arquitectura del sistema híbrido propuesto, el sistema óptimo consiste de un *sistema híbrido fotovoltaico-eólico-diésel-baterías* (escenario E) que engloba un arreglo FV de 32 kW, un aerogenerador de 3.5 kW, un generador diésel de 10 kW y un banco de baterías de 138.24 kWh, con un CAT de 11783 USD y un COE de 0.4895 USD, valores más bajos que para cualquier otra combinación.

Una ventaja adicional para el sistema híbrido óptimo consiste en el abatimiento del consumo de combustible y de las emisiones de CO₂, lo que representaría una posible eliminación del generador diésel y reducción en los costos de inversión inicial y por supuesto del CAT y el COE.

Por otra parte, el estado de carga del banco de baterías para el sistema óptimo, se presenta en el gráfico 1. Se puede observar que el banco se mantiene en un estado de carga de entre el 50 y 100%, lo que da fiabilidad al sistema seleccionado en el suministro de energía a la carga.

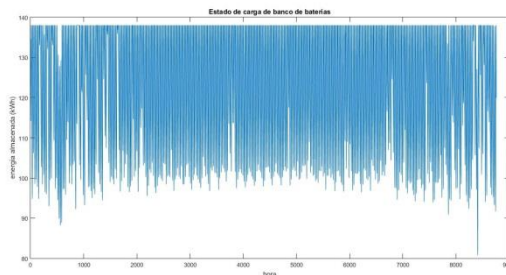


Gráfico 4 Estado de carga del banco de baterías correspondiente al escenario E

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

Se consiguió poner en práctica una metodología para la optimización de un sistema híbrido fotovoltaico-eólico-diésel-baterías aislado de la red de suministro eléctrico, basada en la aplicación de un algoritmo codificado en MATLAB. Como caso de estudio no encontrado en la literatura, se consideró una granja acuícola de la zona costera central del estado de Veracruz, México.

El algoritmo integró una estrategia de despacho para la energía producida por las distintas tecnologías de generación integradas, basada en balances de energía, así como la estimación del CAT y el COE utilizados como criterios económicos en la selección del sistema óptimo.

Se propusieron nueve escenarios de análisis con fines de prueba del algoritmo, aunque el número de escenarios, así como el número y/o capacidad de los componentes pueden ser ajustados sin inconvenientes.

Además de los criterios económicos aplicados, se obtuvieron datos sobre el consumo anual de combustible y las emisiones anuales de CO₂, para cada escenario.

El sistema óptimo consiste en un sistema híbrido *fotovoltaico-eólico-diésel-baterías* y contempla no sólo los valores más bajos de CAT y COE, sino también permite una reducción máxima en el consumo de combustible y de emisiones de CO₂, lo que además de significar un sistema factible técnica y económicamente, también reduce de manera importante el impacto ambiental e incrementa la participación de fuentes de energía renovable.

El sistema híbrido óptimo también garantiza fiabilidad en el suministro de energía eléctrica, al mantenerse el estado de carga del banco de baterías entre un 50 y 100%.

Finalmente, destacar que el logro de esta investigación es relevante, por su posible impacto en el diseño y optimización preliminares de sistemas híbridos renovables aplicados no sólo a granjas acuícolas, sino a cualquier otra aplicación de los sectores residencial, comercial e industrial.

Sin embargo, es pertinente mencionar que los resultados obtenidos de la aplicación del algoritmo aquí presentado deben compararse con aquellos conseguidos de la aplicación de herramientas de software especializadas, como por ejemplo HOMER [29] (*HOMER Energy, 2014*), desarrollado por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable de Estados Unidos (*NREL*), para validar su eficiencia.

Referencias

- [1] Ramanathan, V., & Feng, Y. (2009). Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives. *Atmospheric Environment*, 43(1), 37–50. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.063>
- [2] International Energy Agency. (2017). *Energy Policies Beyond IEA Countries Mexico 2017*. Retrieved from <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EnergyPoliciesBeyondIEACountriesMexico2017.pdf>
- [3] Nehrir, M. H., Wang, C., Strunz, K., Aki, H., Ramakumar, R., Bing, J., ... Salameh, Z. (2011). A review of hybrid renewable/alternative energy systems for electric power generation: Configurations, control, and applications. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2(4), 392–403. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2011.2157540>
- [4] Rangel, L., Lango, F., Asian, A., & Castañeda, M. del R. (2014). Diagnóstico de la Acuicultura en el Municipio de Alvarado, Veracruz, México. *Ra Ximhai*, 10, 55–73.
- [5] Gómez, F. J., & Valencia, I. (2016). Potential Application of Hybrid Renewable Energy Systems in Aquafarms of Veracruz, Mexico. *Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ)*, (14), 420–425.
- [6] Deshmukh, M. K., & Deshmukh, S. S. (2008). Modeling of hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(1), 235–249. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.07.011>
- [7] Mikati, M., Santos, M., & Armenta, C. (2012). Modelado y Simulación de un Sistema Conjunto de Energía Solar y Eólica para Analizar su Dependencia de la Red Eléctrica. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, 9(3), 267–281. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2012.05.010>
- [8] Mohammed, Y. S., Mustafa, M. W., & Bashir, N. (2014). Hybrid renewable energy systems for off-grid electric power: Review of substantial issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, 527–539. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.022>
- [9] Kelly, A. C., & Merritt, J. A. (2014). Hybrid Systems: A Review of Current and Future Feasibility. *Electricity Journal*, 27(9), 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2014.10.008>
- [10] Trifkovic, M., Sheikhzadeh, M., Nigim, K., & Daoutidis, P. (2013). Modeling and Control of a Renewable Hybrid Energy System With Hydrogen Storage. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 22(1), 1–1. <https://doi.org/10.1109/TCST.2013.2248156>
- [11] Muhamad, M. I., Amran, M., & Radzi, M. (2014). Optimal Design of Hybrid Renewable Energy System Based on Solar and Biomass for Halal Products. 2014 IEEE Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Asia), 692–696.
- [12] Shadmand, M. B., Member, S., Balog, R. S., & Member, S. (2014). Multi-Objective Optimization and Design of Photovoltaic-Wind Hybrid System for Community Smart DC Microgrid, 5(5), 2635–2643.
- [13] 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. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.10.006>
- [14] TravelbyMexico. (2001). Veracruz | Estados de México. Retrieved July 17, 2018, from http://www.travelbymexico.com/estados/veracruz_edo

- [15] SEMAR. (2016). Alvarado, Veracruz. Retrieved from <https://digaohm.semar.gob.mx/cuestionarios/cnarioAlvarado.pdf>
- [16] Bhandari, B., Lee, K. T., Lee, C. S., Song, C. K., Maskey, R. K., & Ahn, S. H. (2014). A novel off-grid hybrid power system comprised of solar photovoltaic, wind, and hydro energy sources. *Applied Energy*, 133, 236–242. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.033>
- [17] Centro Meteorológico Nacional. (n.d.). Estaciones Meteorológicas Automáticas EMAS. Retrieved July 17, 2018, from <http://smn.cna.gob.mx/es/emas>
- [18] CONAGUA. (n.d.). Estaciones Automáticas. Retrieved July 17, 2018, from <http://smn1.conagua.gob.mx/emas/>
- [19] NASA. (2018). POWER Data Access Viewer. Retrieved July 17, 2018, from <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- [20] INIFAP. (2018). MapaEstaciones - LNMySR. Retrieved July 17, 2018, from <http://clima.inifap.gob.mx/lnmysr/Estaciones/MapaEstaciones>
- [21] 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. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.010>
- [22] WINDSPOT. (2006). WINDSPOT Owner's Manual. Santander (Cantabria) Spain. Retrieved from [https://www.energistar.com/documentation/50_030_001_C_MANUAL_windspot_3.5_y_1.5_\(inglés\).pdf](https://www.energistar.com/documentation/50_030_001_C_MANUAL_windspot_3.5_y_1.5_(inglés).pdf)
- [23] Lambert, T., Gilman, P., & Lilienthal, P. (n.d.). MICROPOWER SYSTEM MODELING WITH HOMER. Retrieved from <https://www.homerenergy.com/documents/MicropowerSystemModelingWithHOMER.pdf>
- [24] Kaabeche, A., & Ibtouen, R. (2014). Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery generation in a stand-alone power system. *Solar Energy*, 103, 171–182. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.02.017>
- [25] Sharafi, M., & ElMekkawy, T. Y. (2014). Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy systems using PSO-simulation based approach. *Renewable Energy*, 68, 67–79. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.011>
- [26] Negi, S., & Mathew, L. (2014). Hybrid Renewable Energy System: A Review. *International Journal of Electronic and Electrical Engineering*, 7(5), 535–542. https://doi.org/ISSN_0974-2174
- [27] Perera, A. T. D., Attalage, R. A., Perera, K. K. C. K., & Dassanayake, V. P. C. (2013). Designing standalone hybrid energy systems minimizing initial investment, life cycle cost and pollutant emission. *Energy*, 54, 220–230. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.028>
- [28] Maleki, A., & Pourfayaz, F. (2015). Optimal sizing of autonomous hybrid photovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms. *Solar Energy*, 115, 471–483. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.03.004>
- [29] HOMEREnergy. (2014). HOMER - Hybrid Renewable and Distributed Generation System Design Software. Retrieved July 18, 2018, from <https://www.homerenergy.com/>