

DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN AISLADO EÓLICO-SOLAR-CELDA DE COMBUSTIBLE BASADO EN EL MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN DE ENJAMBRE DE PARTICULAS

V. Sánchez-Huerta^{1,2}, Juan M. Ramírez-Arredondo², L. G. Arriaga-Hurtado³

¹ Depto. Eléctrica, CINVESTAV Unidad Guadalajara, Av. Científica 1145, Zapopan, Jalisco, C.P. 45015.
vsanchez@gdl.cinvestav.mx

² División de Ciencias e Ingenierías, Universidad de Quintana Roo, Av. Blvd. Bahía s/n, Chetumal, Q. Roo

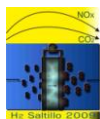
³ Depto. Química, CIDETEQ, Pedro Escobedo, Sanfandila, Querétaro, C.P. 76703

RESUMEN

El dimensionamiento de un sistema de generación de energía eléctrica requiere un análisis de los costos de inversión, mantenimiento y operación. En el caso de un sistema de generación que utiliza fuentes renovables la capacidad óptima resulta más compleja con respecto a un sistema convencional, debido a la aleatoriedad de los recursos renovables (eólico, solar), y a los aún altos costos de generadores eólicos y módulos fotovoltaicos. En este trabajo se presenta el dimensionamiento óptimo de un sistema de generación eólico-solar-celda de combustible minimizando los costos del sistema que satisfaga la energía demandada por una carga aislada. El método de optimización utilizado está basado en una técnica de programación evolutiva conocida como enjambre de partículas (PSO por sus siglas en inglés: “particle swarm optimization”). Se plantea la generación de energía del sistema híbrido con base a la insolación y el perfil del viento disponible en sitio, con objeto de satisfacer una demanda eléctrica determinada.

Palabras clave:

Energía renovable, dimensionamiento óptimo, programación evolutiva, enjambre de partículas, PSO, celda de combustible.



NOMENCLATURA

v	energía eólica	w	peso inercial
s	energía solar	E_{FC}	Energía de la celda de combustible
elec	electrolizador	E_{tk}	Energía en el tanque de almacenamiento de hidrógeno
FC	celda de combustible	CI	Condición inicial
tk	tanque de almacenamiento de hidrógeno	CF	Condición final
As	Área de paneles fotovoltaicos	FRC	Factor de recuperación de capital
C_{INV}	Costos de inversión	i_r	Tasa de interés anual
C_{OM}	Costos de operación y mantenimiento	PF	Paneles fotovoltaicos
N_H	Tiempo de vida del electrolizador y celda de combustible (años)	P_{nom}	Potencia nominal
N_p	Tiempo de vida del proyecto (años)	$P_v(t)$	Potencia producida por el generador eólico
Pbest	Mejor población	$P_s(t)$	Potencia producida por el arreglo de paneles fotovoltaicos
Gbest	Mejor posición global	A_{eol}	Área de barrido del generador eólico
G	Irradianza	C_p	Eficiencia del generador eólico
LPSP	Probabilidad de pérdida del suministro de energía	η_{elec}	Eficiencia del electrolizador
LPS	Pérdida de suministro de energía	η_{FC}	Eficiencia de la celda de combustible
n	número de partículas del PSO	η_{inv}	Eficiencia del inversor
iter	iteración actual	η_s	Eficiencia de paneles fotovoltaicos
C_1, C_2	coeficientes positivos de aceleración	ρ	Densidad del aire
(R) rand	variables aleatorias		

1.- Introducción

El crecimiento constante de la población mundial ocasiona un incremento en la demanda de energía que le permita satisfacer sus necesidades básicas así como permitirle su crecimiento económico. Convencionalmente, la generación de energía se realiza principalmente a partir de combustibles fósiles que además de ser recursos no renovables implican una importante emisión de partículas contaminantes. Ante este panorama, la investigación y desarrollo de sistemas de generación de energía a partir de fuentes renovables se ha convertido en un tema prioritario en la agenda de energía de todos los gobiernos del mundo. Los sistemas de generación eólico-fotovoltaico han sido estudiados extensamente en las últimas 2 décadas. Debido a la intermitencia del recurso solar y eólico es que estos sistemas requieren de un sistema de almacenamiento de energía. Tradicionalmente, las baterías han sido utilizadas como el medio de almacenamiento de energía; sin embargo su uso implica ciertos aspectos negativos al ambiente con respecto a los materiales que se utilizan en su fabricación. El desarrollo de la tecnología del hidrógeno como medio de almacenamiento de energía la posiciona como una opción ecológica y viable para su integración en los sistemas de generación de energía a partir de fuentes renovables. El uso de hidrógeno como un medio de almacenamiento de energía implica la integración de equipo adicional al sistema de energía como lo son el electrolizador, tanque de almacenamiento, y la celda de combustible. Actualmente, los costos de módulos fotovoltaicos, turbinas eólicas, electrolizador y celdas de combustible son aún altos por lo que un aspecto crítico en el diseño de un



sistema de generación de energía híbrido solar-eólico-celda de combustible es la optimización de la capacidad de estos elementos.

El dimensionamiento óptimo de un sistema de generación híbrido utilizando como medio de almacenamiento el hidrógeno ha tratado de resolverse bajo diferentes técnicas de optimización. Santarelli y Pellegrino utilizaron el método simplex para el dimensionamiento y el análisis de costos de un sistema fotovoltaico-microhidroeléctrica.¹ Nelson et. al. presentan una evaluación económica de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico-celda de combustible y presentan un análisis de los costos de electricidad mediante una aplicación computacional.² Samaniego et. al. presentó un estudio técnico-económico de un sistema eólico-celda de combustible basado en el software TRNSYS15.³ Asimismo, existen también algunos trabajos sobre el dimensionamiento de un sistema de generación híbrido basado en métodos heurísticos de optimización. Así es como Lagorse et. al. proponen la solución para un sistema de generación híbrido, optimizado mediante algoritmos genéticos.⁴ Dufo-López et. al. presentan una optimización en la estrategia de control para un sistema aislado de generación renovable de energía mediante algoritmos genéticos.⁵ Hakimi y Tafreshi utilizan la técnica de optimización PSO para el dimensionamiento óptimo de un sistema de generación.⁶ Emplean un equipo de generación eólico-reformador de metano-celda de combustible para el suministro de energía de un poblado de 2000 personas. Sin embargo, no se presenta el perfil de demanda de energía de la carga eléctrica, además de que asumen un suministro constante de hidrógeno desde un reformador de metano.

En el presente trabajo se propone el dimensionamiento óptimo de un sistema de generación renovable híbrido eólico-solar con almacenamiento de hidrógeno optimizado mediante la técnica PSO. En la formulación, se incluyen los conceptos de la probabilidad de pérdida del suministro de energía (LPSP por sus siglas en inglés, “loss of power supply probability”) así como los costos anualizados del sistema. El proceso de optimización tiene como objetivo determinar la mejor configuración del sistema de generación renovable de energía que satisfaga el compromiso entre la confiabilidad del suministro de energía (LPSP) y los costos del mismo.

2.- Desarrollo y condiciones experimentales

2.1 Optimizador de Enjambre de partículas .

El PSO es una técnica de optimización estocástica, adaptiva, basada en poblaciones, e introducida por Kennedy y Eberhart como una alternativa a los algoritmos genéticos.^{7,8,9} PSO es un método de optimización en el que el espacio de búsqueda se puede extender a las N dimensiones del problema a optimizar, y donde cada partícula se identifica como una potencial solución al problema. Cada partícula del PSO es caracterizada por un vector velocidad y un vector posición, ambos en N dimensiones. Las partículas se mueven alrededor

del espacio de búsqueda multidimensional hasta que encuentran la solución óptima. El PSO primero produce una población inicial, cuyos miembros representan una posible solución al problema de optimización; esta tiene su propia posición y velocidad inicial. En cada iteración, cada partícula memoriza y sigue el rastro de su mejor población (Pbest), y el vector con la mejor posición global (Gbest) para actualizar la velocidad. La mejor población (Pbest) es la posición con el mejor valor de aptitud que se ha encontrado. La mejor posición global (Gbest), es la mejor posición de entre todas las partículas de la mejor población (Pbest). Conociendo estas dos mejores posiciones, las partículas pueden modificar velocidades y posiciones usando las ecuaciones (1) y (2) respectivamente. Las variables $\text{rand}()$ y $\text{Rand}()$, son variables aleatorias uniformemente distribuidas en el rango $[0, 1]$ cuyo objetivo es emular el comportamiento estocástico que exhibe la población de partículas; w , es conocido como el peso inercial, y cumple la función de balancear la búsqueda local y la búsqueda global.¹⁰

$$V_{i,j}^{iter+1} = wV_{i,j}^{iter} + C_1 * \text{rand}() * (pbest - X_i) + C_2 * \text{Rand}() * (gbest_i - X_i) \quad (1)$$

para $i = 1, 2, \dots, NIND; j = 1, 2, \dots, NVAR$

$$X_{i,j}^{iter+1} = X_{i,j}^{iter} + V_{i,j}^{iter+1} \quad (2)$$

2.2.- Formulación del problema

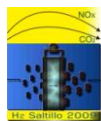
El principal objetivo del dimensionamiento del sistema híbrido es minimizar los costos totales, los cuales incluyen los costos de inversión, operación y mantenimiento. En este trabajo se utilizó el método de costos anualizados para el cálculo de los costos del sistema híbrido. El costo anualizado del sistema está formado por los costos anualizados de capital y de operación y mantenimiento de cada componente del sistema. En el caso del electrolizador y celda de combustible se tienen que incluir los costos de su reemplazo ya que tienen un tiempo de vida menor al del proyecto. La función objetivo es descrita por la ecuación (3).

$$F^{obj} = \min \left\{ \sum_{m=v,s,elec,FC,dk} (C_{CAC_m} + C_{OM_m}) + \sum_{m=elec,FC} C_{REMP_n} \right\} \quad (3)$$

2.2.1. Costos de capital y mantenimiento anualizado

El costo de capital anualizado de cada elemento del sistema se calcula a partir de la ecuación (4). El costo de mantenimiento y operación se considera constante durante el transcurso del tiempo de vida del proyecto, el cual se integra al costo anual total del sistema.

$$C_{CAC} = C_{INV} \cdot FRC(i_r, N_p) = \frac{i_r (1 + i_r)^{N_p}}{(1 + i_r)^{N_p} - 1} \quad (4)$$



2.2.2.- Costos de reemplazo anualizado

La celda de combustible y el electrolizador tienen un tiempo de vida menor al tiempo de vida del proyecto, por lo que se debe considerar el costo anualizado de su reemplazo. El costo anualizado del reemplazo del electrolizador y la celda de combustible está descrito por la ecuación (5).

$$C_{CAC} = C_{REMP} \cdot SFF(i_r, N_H) = \frac{i_r}{(1+i_r)^{N_H} - 1} \quad (5)$$

2.2.3. Restricción 1: Confiabilidad (LPSP)

LPSP es la probabilidad de que tanto el sistema de generación como de almacenamiento de energía deje sin suministro de energía a la carga por un periodo de tiempo y es un indicador de la confiabilidad del sistema. La técnica de LPSP se utilizó para dimensionar la cantidad de energía equivalente en hidrógeno que debe almacenarse para satisfacer la demanda de la carga. En este trabajo se utiliza un valor de LPSP de 0.0003 que equivale a la pérdida en el suministro de energía de un día en un periodo de 10 años.^{11,12} El valor de LPSP se calcula a partir de la ecuación (6). La condición de $LPS(t)$ se presenta cuando la energía generada y almacenada es insuficiente para satisfacer la demanda en el tiempo t .

$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^T LPS(t)}{\sum_{t=1}^T E_{carga}(t)} \quad \text{donde: } LPS(t) = E_{carga}(t) - (E_{gen}(t) + E_k(t-1) \cdot \eta_{FC}) \quad (6)$$

$E_{gen}(t)$ es la energía producida por el generador eólico y el arreglo de paneles fotovoltaicos en la hora particular t , y puesto que el análisis se realiza en intervalos de una hora, se considera que la energía es equivalente a la potencia eléctrica de acuerdo con la ecuación (7).

$$E_{gen}(t) = P_{gen}(t) = P_v(t) + P_s(t) \quad (7)$$

2.2.4. Restricción 2: Energía almacenada en el tanque de hidrógeno

Esta restricción tiene que ver con que al final de un periodo de 24 h de funcionamiento del sistema híbrido la energía almacenada en el tanque en forma de hidrógeno no sea cero, para con ello permitir que el sistema híbrido pueda repetir otro periodo de operación de 24 h. Esta restricción mantendrá el nivel promedio de energía almacenada como hidrógeno cercano al nivel de energía inicial en el tanque.

2.3.- Descripción de los componentes del sistema de generación renovable

El sistema de generación renovable está compuesto por una turbina eólica y paneles fotovoltaicos como medios de generación de energía, y emplea un sistema de almacenamiento de energía electrolizador-tanque-celda de combustible, como se muestra en la figura 1.

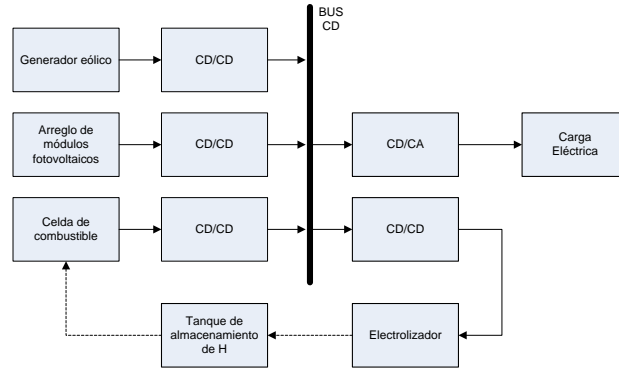


Figura 1. Diagrama a bloques del sistema híbrido de generación con almacenamiento de hidrógeno

2.3.1.- Generador eólico

La generación de energía eólica está en función de la velocidad del viento $v(t)$ (8). Se considera que la potencia nominal del generador eólico es de 4 kW. En donde, V_{co} es la velocidad del viento máxima que soporta el generador eólico antes de que se proteja para no dañarse, V_{ci} velocidad del viento mínima en que el generador eólico comienza a generar energía.

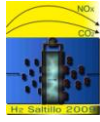
$$\begin{cases} P_v(t) = P_{nom}, & V_{nom} < v(t) < V_{co} \\ P_v(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_v \cdot C_p \cdot v(t)^3, & V_{ci} < v(t) < V_{nom} \\ P_v(t) = 0, & v(t) < V_{ci}, v(t) > V_{co} \end{cases} \quad (8)$$

2.3.2.- Módulos fotovoltaicos

La conversión de la energía proveniente de los datos de insolación por el arreglo de paneles fotovoltaicos se obtiene a partir de (9). Se consideran paneles fotovoltaicos de 120 watts pico.

$$P_s(t) = G(t) \cdot A_s \cdot \eta_s \quad (9)$$

2.3.3.- Celda de combustible



El modelo de la celda de combustible supone que trabaja en un mismo punto de operación con lo que la conversión de la energía química del hidrógeno contenida en los tanques de almacenamiento se reduce a una ganancia como se describe en la ecuación (10).

$$E_{FC}(t) = \eta_{FC} \cdot (E_{carga}(t) / \eta_{inv} - E_{gen}(t)) \quad (10)$$

2.3.4.- Electrolizador

El hidrógeno producido por el electrolizador se considera proporcional a su eficiencia, considerando al igual que en la celda de combustible, que trabaja en un punto de operación constante (11).

$$E_k(t) = \eta_{elec} \cdot (E_{gen}(t) - E_{carga}(t) / \eta_{inv}) \quad (11)$$

No se consideran las fugas de hidrógeno que pudiesen existir en el tanque de almacenamiento. En todo momento se debe cumplir la restricción especificada en (12):

$$0 \leq E_k(t) \leq E_{kmax} \quad (12)$$

2.4.- Solución Propuesta

El diagrama de flujo del proceso de optimización propuesto se muestra en la figura 2(a). Los principales pasos del método de optimización propuesto se describen a continuación.

2.4.1.- Datos de entrada y población inicial del PSO.

Los datos de entrada para la optimización del sistema híbrido con el PSO corresponden a los costos iniciales, costos de operación y mantenimiento de cada uno de los componentes del sistema. De igual forma, se introducen las eficiencias y tiempo de vida de cada elemento, así como del recurso eólico y solar disponible en el sitio además de la demanda de energía en cada hora por un periodo de 24 h. El PSO determina el número de paneles del arreglo fotovoltaico así como la energía inicial de almacenamiento de hidrógeno necesario en el tanque para satisfacer la demanda de energía de la carga y satisfacer el LPSP deseado. Para ello, el optimizador genera dos vectores con n partículas (en este trabajo se utilizaron $n=60$ partículas) cada uno, donde un vector representa el número de paneles fotovoltaicos y otro corresponde a la energía inicial de almacenamiento de hidrógeno en el tanque, obteniendo así n combinaciones diferentes de módulos fotovoltaicos y energía almacenada inicial. de combustible como la energía complementaría. Cada uno de los

n sistemas es evaluado durante un periodo de 24 h a partir de la estrategia de operación que muestra el diagrama de flujo de la figura 2 (b).

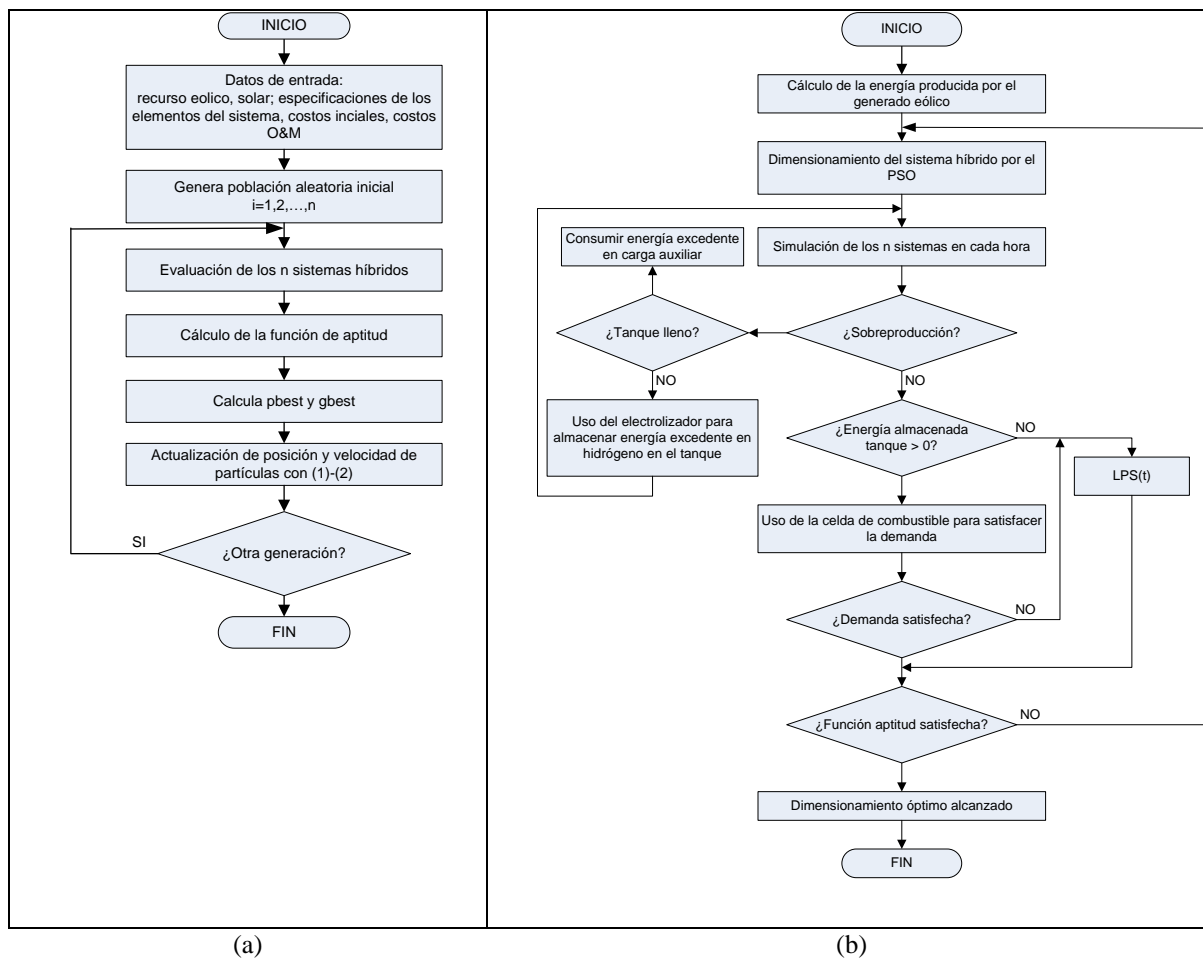


Figura 2. (a) Diagrama de flujo del proceso de optimización propuesto. (b) Diagrama de flujo de la evaluación del sistema híbrido por el PSO

2.4.3.- Evaluación de la estrategia de operación del sistema de generación híbrido

La estrategia de operación del sistema de generación renovable es una analogía de la operación de un sistema de generación convencional, en que los medios de generación más económicos son utilizados como generación base y los más costosos en los momentos de mayor demanda de energía. En este trabajo se utiliza la generación del generador eólico como generación base y la energía de los módulos fotovoltaicos y la celda.



En la evaluación de la operación de cada sistema de generación híbrido se consideran los casos de sobreproducción y sobredemanda, los cuales se describen a continuación

2.4.4.- Sobreproducción

En este caso, la energía generada por el generador eólico y los módulos fotovoltaicos es mayor a la energía demandada por la carga, por lo que la energía excedente es enviada al electrolizador para almacenarla en el tanque como hidrógeno. La ecuación (13) describe la energía equivalente almacenada en el tanque hidrógeno.

$$E_t(t) = E_t(t-1) + (E_{gen}(t) - E_{carga}(t)) \cdot \eta_{elec} \quad (13)$$

2.4.5.- Sobredemanda

En este caso la energía demandada es mayor a la energía generada por el generador eólico y el arreglo de módulos fotovoltaicos, por lo que la diferencia de energía debe ser suministrada por la celda de combustible. La celda de energía recupera la energía equivalente en hidrógeno almacenada en el tanque produciendo una disminución en la energía almacenada como lo describe la ecuación (14). Cuando la energía generada como la almacenada por el sistema híbrido no satisface la demanda entonces existe la pérdida de suministro de energía (LPS(t)) para la hora particular t y este parámetro se calcula con base en la ecuación (6).

$$E_t(t) = E_{carga}(t) - (E_{gen}(t) + E_t(t-1)) / \eta_{FC} \quad (14)$$

2.4.6.- Función de aptitud

El proceso de optimización del PSO debe considerar las restricciones descritas en 2.2.3 y 2.2.4. Diferentes técnicas para el manejo de restricciones en algoritmos evolutivos han sido propuestas en la literatura especializada.¹³ La técnica seleccionada en este trabajo para el manejo de restricciones consiste en penalizar la función objetivo. La función de aptitud está formada por la función objetivo más los términos que penalizan a las partículas que no la satisfacen y está expresada por la ecuación (15).

$$F^{apt} = F^{obj} + abs \left\{ \sum_{i=1}^n \left(K_1 (LPSP_{obj} - LPSP_n) + K_2 (E_{kCI_n} - E_{kCF_n}) \right) \right\} \quad (15)$$

En cada iteración del PSO, cada uno de los sistemas formados con las n partículas es evaluado de modo de satisfacer el LPSP deseado y minimizando los costos del sistema. El PSO calcula la siguiente posición y velocidad de cada partícula hasta encontrar el mínimo global del problema de optimización.

3.- Resultados y discusión

Se presentan dos ejemplos de dimensionamiento con el método de optimización propuesto. El primer ejemplo considera una demanda constante de 1 kW y el segundo considera una demanda de energía variable. La figura 3(a) muestra los datos de insolación y velocidad de viento en un modelo de 24 h promedio anual correspondiente a la ciudad de Zacatecas (latitud: $22^{\circ}46'$, longitud: $102^{\circ}38'$). El perfil de la demanda eléctrica fue tomado del trabajo presentado por Kellog et. al y se muestra en la figura 3(b).¹⁴ Se asume que tanto la generación como la demanda de energía se mantienen constantes en cada intervalo de una hora.

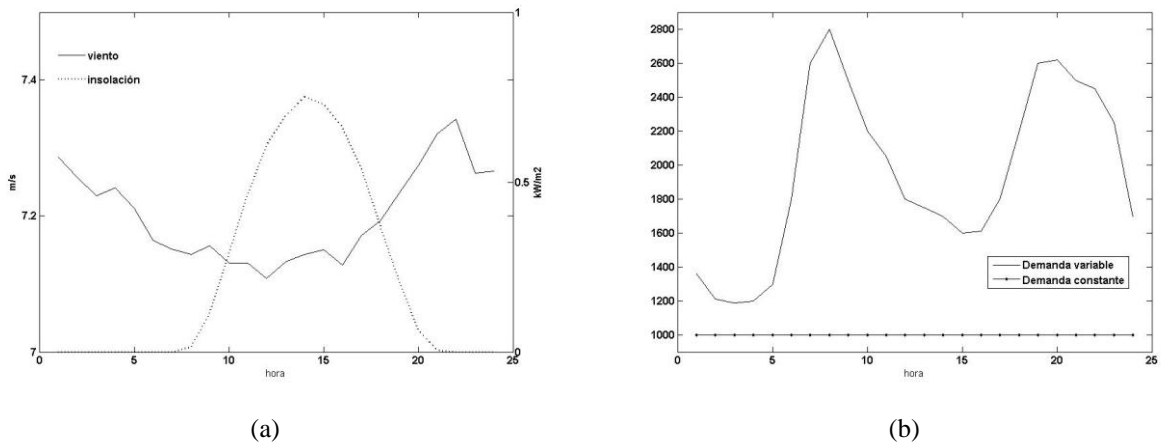


Figura 3. (a) Datos del recurso eólico y solar disponible en el sitio. (b) Demanda eléctrica promedio

La figura 4 exhibe el desempeño del PSO en la búsqueda de la configuración óptima del sistema híbrido para el ejemplo de demanda variable.

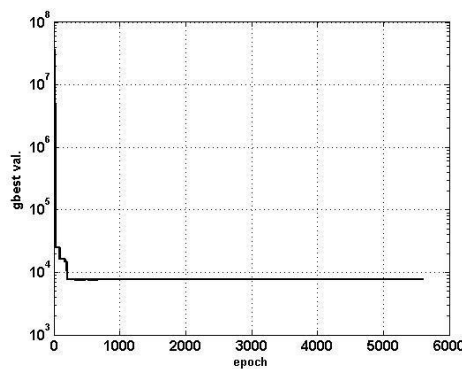


Figura 4. Convergencia del PSO en el proceso de optimización

La figura 5 muestra los resultados del sistema híbrido óptimo que cumple con satisfacer la energía demandada al costo más bajo. La figura 5(a) muestra los resultados para el ejemplo de la demanda constante de 1 kW y en la figura 5(b) para la demanda variable. Los puntos marcados con asteriscos (*) muestran la demanda de energía de la carga y la línea continua la energía entregada por el sistema híbrido. Se observa que las configuraciones óptimas del sistema híbrido satisfacen durante las 24 h la demanda para ambos ejemplos.

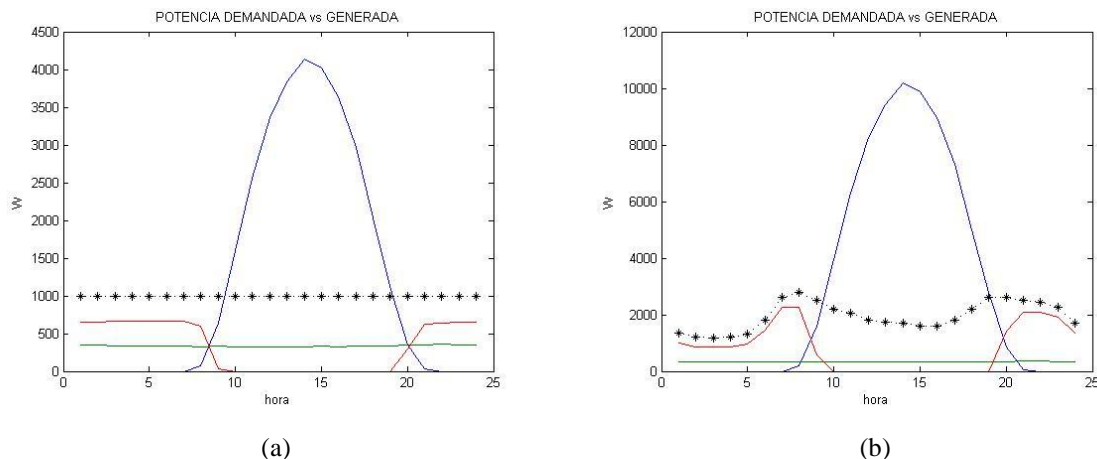


Figura 5. (a) Energía producida por el generador eólico, arreglo de módulos fotovoltaicos y celda de combustible con demanda constante. (b) demanda variable.

Los resultados de la configuración y costos totales anualizados se muestran en la tabla I.

Tabla I. Configuración óptima del sistema de generación híbrido

EJEMPLO	No. Generadores eolicos	No. Paneles fotovoltaicos	Energía inicial en tanque de H	Costos anualizados totales (US)
Demanda constante	1	46	10.08 kW	\$4358.87
Demanda variable	1	113	23.95 kW	\$6070.84

La energía almacenada en el tanque para los casos de demanda constante y variable se muestra en las figuras 6 (a) y (b). En ambos casos se observa que los sistemas mantienen en promedio el valor inicial de la energía contenida en el tanque de almacenamiento y que durante el periodo de tiempo analizado la energía en el tanque es mayor a cero.

El código computacional para realizar este trabajo fue implementado en Matlab y ejecutado en una computadora personal con procesador Pentium IV de 3 GHz y 1 GB de memoria RAM.

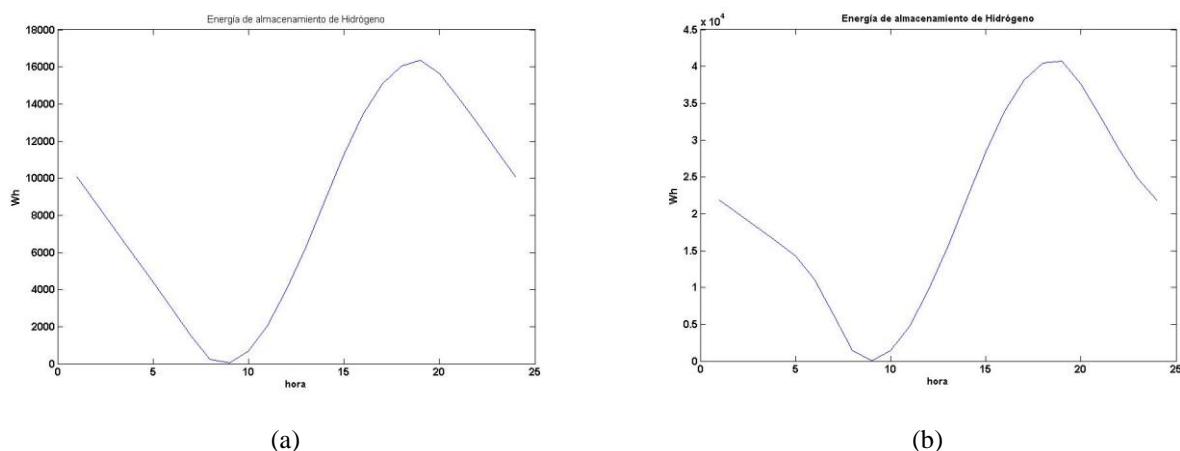


Figura 6. (a) Energía equivalente de hidrógeno en el tanque de almacenamiento para el caso de demanda constante de 1 kW. (b) Demanda variable

4.- Conclusiones

En este trabajo se ha presentado el dimensionamiento óptimo de un sistema de generación híbrido formulado mediante un problema de optimización resuelto mediante PSO, encontrando la mejor configuración del sistema que satisface el compromiso confiabilidad en el suministro de energía-costos del sistema. Los resultados de la simulación del funcionamiento del sistema indican que la baja eficiencia del electrolizador y la celda de combustible ocasionan la necesidad de una alta capacidad de almacenamiento de energía en hidrógeno con respecto a la carga, además de una mayor capacidad de generación de energía. Sin embargo, el uso del hidrógeno como medio de almacenamiento de energía tiene un impacto ambiental importante. El desarrollo de nuevos materiales para el uso en electrolizadores y celdas de combustible que los hagan más eficiente impactará de forma importante en la eficiencia del sistema de almacenamiento de energía y el desempeño completo del sistema.

5.- Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero otorgado por el CONACYT mediante los proyectos FOMIX-COQCyT 109675 y el proyecto CFE-CONACyT 88160.

6.- Referencias

- ¹ M. Santarelli, D. Pellegrino, *Renewable Energy* 30(2005) 493.
- ² D.B. Nelson, M.H. Nehrir, C. Wang, *Renewable Energy* 31(2006) 1641.
- ³ J. Samaniego, F. Alija, S. Sanz, C. Balmaceda, F. Frechoso, *Renewable Energy* 33 (2008) 839.



IX Congreso Internacional de la SMH, Saltillo 2009

- ⁴ J. Lagorse, D. Paire, A. Miraoui, *Renewable Energy* 34 (2009) 683.
- ⁵ J.L. Bernal-Agustin and R. Dufo-Lopez, *Energy Conversion and Management* 50 (2009) 479.
- ⁶ S.M. Hakimi and S.M. Moghaddas-Tafreshi, *Renewable Energy* 34 (2009) 1855.
- ⁷ R.C. Eberhart and J. Kennedy, *Proc. Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science* 1995 pp. 39.
- ⁸ J. Kennedy and R.C. Eberhart, *Proc. IEEE International conference on neural networks 1995*, pp. 1942.
- ⁹ J. Kennedy and R.C. Eberhart, *Swarm Intelligence*, Morgan Kaufman, UK 2001.
- ¹⁰ X.H. Yuhui and R.C. Eberhart, *IEEE proceedings congress on evolutionary computation* 1 (2004) 90.
- ¹¹ B.S. Borowy and Z.M. Salameh, *IEEE Transaction on Energy Conversion* 11 No. 2 (1996) 367.
- ¹² I. Abouzahr and R. Ramakumar, *IEEE Transactions on Energy Conversion* 6 No. 1 (1991) 1.
- ¹³ Z. Michalewicz, N. Attia, A. V. Sebald and L. Fogel, *Proc. 3rd Annu. Conf. Evolutionary Programming* (1994), 98.
- ¹⁴ W.D. Kellog, M.H. Nehrir, G. Venkatamanan, V. Gerez, *IEEE Transactions on Energy Conversion* 13 No. 1 (1998) 70.