

Diseño de un Sistema de Generación Basado en Fuentes Renovables e Hidrógeno

Sánchez H. Víctor, Chan P. Freddy I., Torres M. Emmanuel, Acosta O. Roberto, Ramírez A. Juan M.

System Design Based on Renewable Generation and Hydrogen

Abstract— The possibility of reducing the manufacturing costs of photovoltaic modules and wind generators in small and medium size power offers, on a short-term basis, a competitive and economic solution for electrical loads isolated of the grid. On the other hand, the use of hydrogen technology, as an energy storage vector in generation systems that use renewable energy, will provide a sustainable source supply. However, the design and configuration of these generation systems, based on renewable sources, depend greatly on the local weather conditions.

Usually, this kind of generation system is over-dimensioned with the aim of satisfying the electrical load connected to them, which implies a reduction in the efficiency and an increase in the costs of investment, maintenance and operation. On this way, this work presents the design of a wind-solar-hydrogen generating system based on Particle Swarm Optimization (PSO). The main aim of the design in this study is to reduce the costs of the renewable generating system which will satisfy the requests of electricity.

Keywords— Renewable energy, photovoltaic modules, wind turbines, fuel cell, electrolyzer, PSO.

Resumen— La reducción en los costos de producción de módulos fotovoltaicos y generadores eólicos de pequeña y mediana potencia abre la posibilidad en el corto plazo de ofrecer una solución económicamente competitiva para cargas eléctricas que estén aisladas de la red eléctrica. Por otra parte, el uso de la tecnología del hidrógeno como vector de almacenamiento de energía en sistemas de generación con fuentes renovables permitirá disponer de un suministro de energía de forma sustentable. Sin embargo, el diseño y configuración de estos sistemas de generación basados en fuentes renovables dependen de forma importante de las condiciones climáticas locales. Usualmente esta clase de sistema de generación se sobre-dimensionan con la finalidad de poder satisfacer la carga eléctrica conectada a ellos, lo que implica un reducción de su eficiencia así como también eleva los costos de inversión, mantenimiento y operación. De esta forma, en este artículo se presenta el diseño de un sistema de generación eólico-solar-

hidrógeno basado en un optimizador de enjambre de partículas (PSO por sus siglas en inglés) y en el que se emplea como objetivo de diseño la reducción de los costos del sistema de generación renovable que satisfaga la energía demandada por la carga eléctrica.

Palabras clave— Energía renovable, módulos fotovoltaicos, generadores eólicos, celda de combustible, electrolizador, PSO.

NOMENCLATURA

v	energía eólica
s	energía solar
$elec$	electrolizador
FC	celda de combustible
tk	tanque de almacenamiento de hidrógeno
As	Área de paneles fotovoltaicos
C_{INV}	Costos de inversión
C_{OM}	Costos de operación y mantenimiento
NH	Tiempo de vida del electrolizador y celda de combustible (años)
Np	Tiempo de vida del proyecto (años)
P_{best}	Mejor población
G_{best}	Mejor posición global
G	Irradianza
L_{PSP}	Probabilidad de pérdida del suministro de energía
LPS	Pérdida de suministro de energía
n	número de partículas del PSO
$iter$	iteración actual
C_1, C_2	coeficientes positivos de aceleración
$(R) rand$	variables aleatorias
w	peso inercial
E_{FC}	Energía de la celda de combustible
E_{tk}	Energía en el tanque de almacenamiento de hidrógeno
CI	Condición inicial

Manuscrito recibido el 20 de octubre de 2013. Este trabajo fue respaldado por la Universidad de Quintana Roo, Chetumal, Q. Roo., México.

Dr. Víctor Sánchez H. hasta la fecha se ha desempeñado como Profesor Investigador del Departamento de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Quintana Roo, Chetumal, Q. Roo., México. E-mail: vsanchez@uqroo.mx.

Dr. Freddy Chan hasta la fecha se ha desempeñado como Profesor Investigador del Departamento de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Quintana Roo, Chetumal, Q. Roo., México. E-mail: freddy@uqroo.mx.

M.C. Emmanuel Torres hasta la fecha se ha desempeñado como Profesor Investigador del Departamento de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Quintana Roo, Chetumal, Q. Roo., México. Teléfono (983) 83 50300 Ext.192 Fax (983) 83 50389. E-mail: etorres@uqroo.mx.

MES Roberto Acosta hasta la fecha se ha desempeñado como Profesor Investigador del Departamento de Ciencias e Ingeniería, UQROO.

Dr. Juan M. Ramírez hasta la fecha se ha desempeñado como Profesor Investigador CINVESTAV-GDL, Guadaluajara, Jalisco, México.

E-mail: jramirez@gdl.cinvestav.mx.

CF	Condición final
FRC	Factor de recuperación de capital
ir	Tasa de interés anual
PF	Paneles fotovoltaicos
P_{nom}	Potencia nominal
$P_v(t)$	Potencia producida por el generador eólico
$P_s(t)$	Potencia producida por el arreglo de paneles fotovoltaicos
A_{eol}	Área de barrido del generador eólico
C_p	Eficiencia del generador eólico
η_{elec}	Eficiencia del electrolizador
η_{FC}	Eficiencia de la celda de combustible
η_{inv}	Eficiencia del inversor
η_s	Eficiencia de paneles fotovoltaicos
ρ	Densidad del aire

I. INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es vital para el desarrollo de un país ya que permite el acceso a servicios como salud, educación los cuales elevan el nivel de vida de la población. El uso de los combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica es un esquema no sustentable debido en primer lugar, a que su disponibilidad a largo plazo no está asegurada ya que las reservas de petróleo probadas se están agotando y que como consecuencia elevan los costos de los energéticos, en segundo lugar el efecto negativo en el ambiente debido a las emisiones de gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático del planeta. Ante este escenario las fuentes de energías renovables se han convertido en una opción viable para reducir la quema de combustibles fósiles y reducir las emisiones de contaminantes a la atmósfera. La energía eólica y la energía solar son las tecnologías más empleadas a nivel mundial para la generación de energía eléctrica, sin embargo, debido a que su disponibilidad es incierta debido a días con poco viento, días nublados o lluviosos se requiere de un sistema de almacenamiento de energía. En los sistemas con fuentes renovables se ha empleado diferentes tipos de baterías para almacenar la energía y emplearla cuando se requiera, sin embargo, las baterías tienen una densidad de energía baja. Una opción en el almacenamiento de energía son las celdas de combustible las cuales tienen una densidad de potencia mayor al de las baterías. La tecnología del hidrógeno en conjunto con las celdas de combustible permite almacenar mayor cantidad de energía en una batería además que pueden operar por periodos de tiempo más largos con gran durabilidad incluso en ambientes difíciles. Para lograr almacenar hidrógeno se requiere de equipo adicional al sistema de energía como lo son el electrolizador, la celda de combustible y el tanque de almacenamiento. A pesar de que los costos de los paneles fotovoltaicos y generadores eólicos se han reducido a lo largo de los años aún son costosos comparados con la energía convencional, al precio total se le suma el costo del electrolizador y las celdas de combustible y se incrementa. Debido a esto un punto importante en el diseño de

un sistema de generación de energía híbrido solar-eólico-celda de combustible optimizar cada uno de los equipos que lo integran.

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 [1] utilizaron el método simplex para el dimensionamiento y el análisis de costos de un sistema fotovoltaico-microhidroeléctrico [1]. Nelson et. al [2] 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. [3] presentó un estudio técnico-económico de un sistema eólico-celda de combustible basado en el software TRNSYS153. 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. [4] proponen la solución para un sistema de generación híbrido, optimizado mediante algoritmos genéticos. Dufo-López et. al. [5] presentan una optimización en la estrategia de control para un sistema aislado de generación renovable de energía mediante algoritmos genéticos. Hakimi y Tafreshi [6] utilizan la técnica de optimización PSO para el dimensionamiento óptimo de un sistema de generación. 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 diseño 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.

II. DESARROLLO Y CONDICIONES EXPERIMENTALES

A. Optimizador de Enjambre de partículas.

El PSO es una técnica de optimización estocástica, adaptativa, basada en poblaciones, e introducida por Kennedy y Eberhart como una alternativa a los algoritmos genéticos [7 - 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 $rand()$ y $Rand()$, 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].

$$V_{ij}^{iter+1} = wV_{ij}^{iter} + C_1 * rand() * (pbest - X_i) + C_2 * Rand() * (gbest - X_i) \quad (1)$$

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

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

B. 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).

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

C. 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.

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

D. 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).

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

E. 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 .

$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^T LPS(t)}{\sum_{t=1}^T E_{carga}(t)} \quad (6)$$

$$LPS(t) = E_{carga}(t) - (E_{gen}(t) + E_{tk}(t-1) \cdot \eta_{FC}) \quad (7)$$

$E_{gen}(t)$ 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 (8).

$$E_{gen}(t) = P_{gen}(t) = P_v(t) + P_s(t) \quad (8)$$

F. 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.

G. 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.

H. Generador eólico

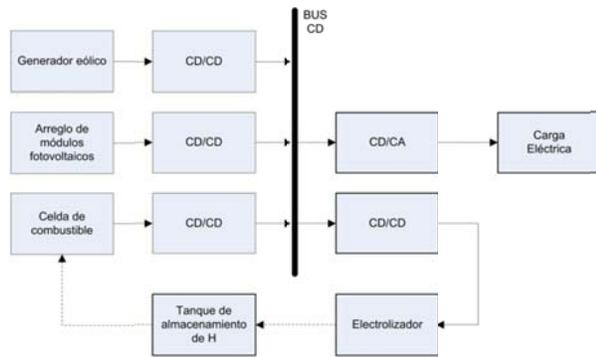


Fig. 1 Diagrama a bloques del sistema híbrido de generación con almacenamiento de hidrógeno.

La generación de energía eólica está en función de la velocidad del viento $v(t)$ (9). 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.

$$\begin{cases} P_v(t) = P_{nom}, & V_{nom} < v(t) < V_{co} \\ P_v(t) = \frac{1}{2} \rho A_v C_p v(t)^3, & V_{ci} < v(t) < V_{nom} \\ P_v(t) = 0, & v(t) < V_{ci}, v(t) > V_{co} \end{cases} \quad (9)$$

I. Módulos fotovoltaicos

La conversión de la energía proveniente de los datos de insolación por el arreglo de paneles fotovoltaicos se obtiene a partir de (10). Se consideran paneles fotovoltaicos de 120 watts pico.

$$P_s(t) = G(t) \cdot A_s \cdot \eta_s \quad (10)$$

J. Celda de combustible

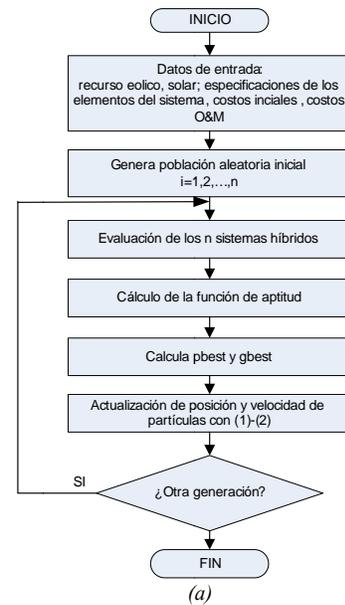
El modelo de la celda de combustible supone que trabaja en un mismo punto de operación con lo que la conversión de la energía química del hidrógeno contenida en los tanques de almacenamiento se reduce a una ganancia como se describe en la ecuación (11).

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

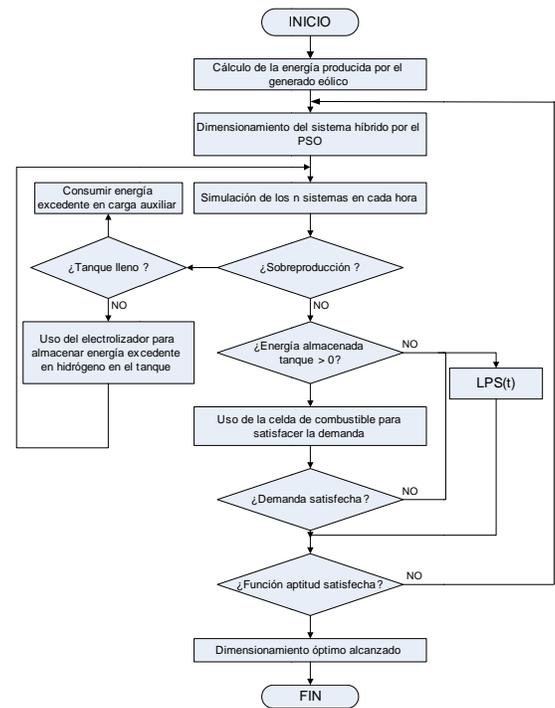
K. Electrolizador

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 (12).

$$E_{tk}(t) = \eta_{elec} \cdot (E_{gen}(t) - E_{carga}(t) / \eta_{inv}) \quad (12)$$



(a)



(b)

Fig. 2 Proceso de optimización propuesto. (a) Diagrama de flujo. (b) Diagrama de flujo de la evaluación del sistema.

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 (13):

$$0 \leq E_{tk}(t) \leq E_{tk\ max} \quad (13)$$

L. 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.

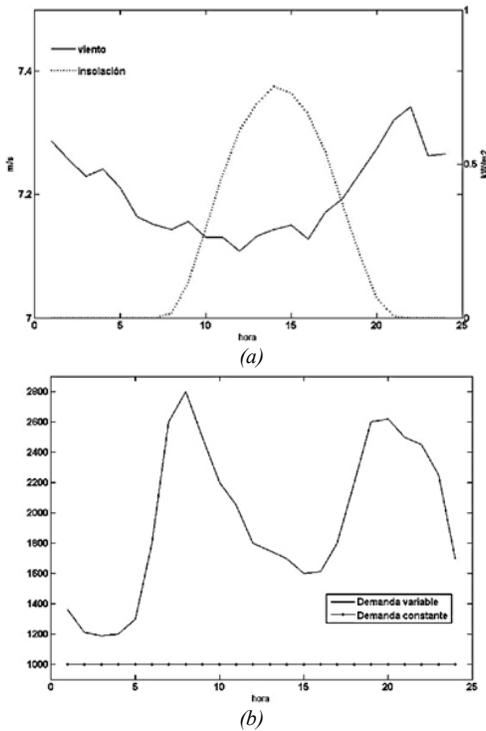


Fig. 3 (a) Datos del recurso eólico y solar disponible en el sitio.
(b) Demanda eléctrica promedio.

M. 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 $n=50$ 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 complementaria. 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).

N. 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

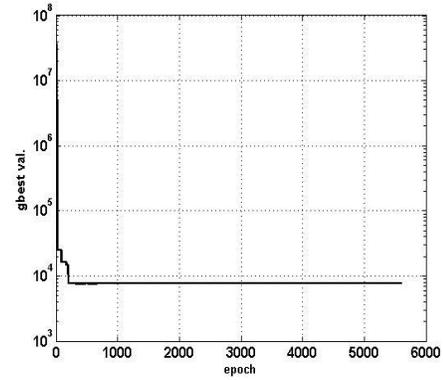


Fig. 4 Convergencia del PSO en el proceso de optimización.

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

O. 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 (14) describe la energía equivalente almacenada en el tanque hidrógeno.

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

P. 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 (15). 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).

$$E_t(t) = E_{carga}(t) - (E_{gen}(t) + E_t(t-1)) / \eta_{FC} \quad (15)$$

Q. Función de aptitud

El proceso de optimización del PSO debe considerar las restricciones descritas en E y F . Para ello se han propuesto diferentes técnicas para el manejo de restricciones en algoritmos evolutivos 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

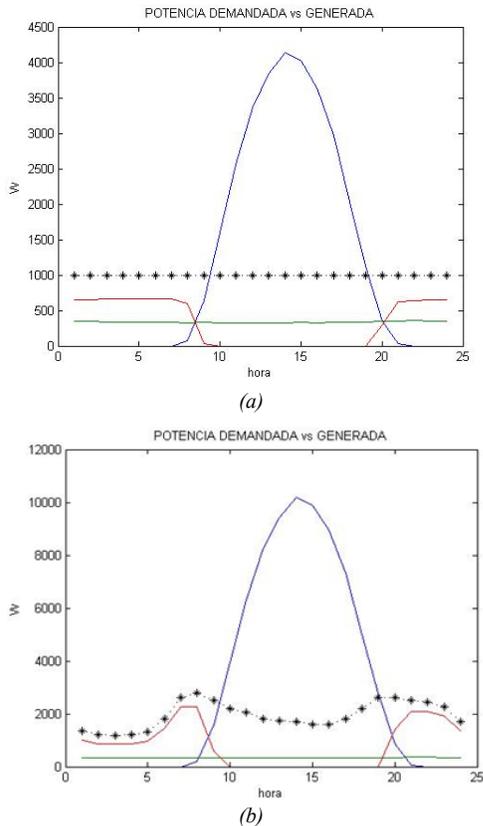


Fig. 5 (a) Energía producida por el generador eólico, arreglo de módulos fotovoltaicos y celda de combustible con demanda constante. (b) demanda variable.

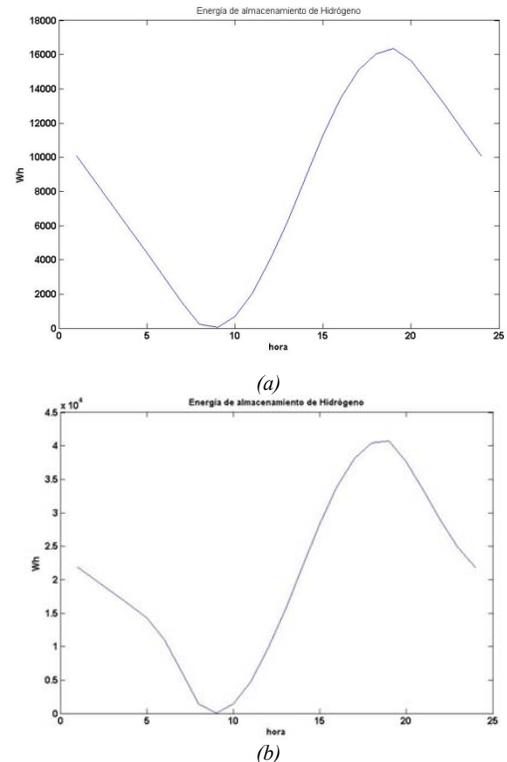


Fig. 6 (a) Energía equivalente de hidrógeno en el tanque de almacenamiento para el caso de demanda constante de 1 kW. (b) Demanda variable.

TABLA I
CONFIGURACIÓN ÓPTIMA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN HÍBRIDO

EJEMPLO	No. Generadores eólicos	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

está formada por la función objetivo más los términos que penalizan a las partículas que no la satisfacen y está expresada por la ecuación (16).

$$F^{opt} = F^{obj} + abs \left\{ \sum_{i=1}^n (K_1(LPSP_{obj} - LPSP_n) + K_2(E_{tkCI_n} - E_{tkCF_n})) \right\} \quad (16)$$

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.

III. 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°46', longitud: 102°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.

Los resultados del proceso de optimización por PSO determinan que la óptima configuración del sistema híbrido. La figura 4 exhibe el desempeño del PSO en la búsqueda de la configuración óptima del sistema híbrido para el ejemplo de demanda variable.

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.

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

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.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado el diseño óptimo de un sistema de generación híbrido formulado mediante un problema de optimización resuelto mediante PSO. El resultado del proceso de optimización ha sido la mejor configuración del sistema que satisface el compromiso confiabilidad en el suministro de energía-costos del sistema de generación de energía. 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 lo cual permite disponer de un sistema de generación de energía sostenible. 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.

RECONOCIMIENTOS

Víctor Sánchez agradece al Programa de mejora del profesorado (PROMEP) por su apoyo en la realización de este trabajo bajo el convenio UQROO-EXB-072.

REFERENCIAS

- [1] M. Santarelli, D. Pellegrino, *Mathematical optimization of a RES-H2 plant using a black box algorithm*, *Renewable Energy* 30(2005) 493.
- [2] D.B. Nelson, M.H. Nehrir, C. Wang, *Unit sizing and cost analysis of stand-alone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems*, *Renewable Energy* 31(2006) 1641.
- [3] J. Samaniego, F. Alija, S. Sanz, C. Balmaceda, F. Frechoso, *Economic and technical análisis of a Irbid wind fuel cell energy system*, *Renewable Energy* 33 (2008) 839.
- [4] J. Lagorse, D. Paire, A. Miraoui, *Sizing optimization of a stand-alone street lighting system powered by a hybrid system using fuel cell, PV and battery*, *Renewable Energy* 34 (2009) 683.
- [5] J.L. Bernal-Agustin and R. Dufo-Lopez, *Efficient design of hybrid renewable energy systems using evolutionary algorithms*, *Energy Conversion and Management* 50 (2009) 479.
- [6] S.M. Hakimi and S.M. Moghaddas-Tafreshi, *Optimal sizing of a stand-alone hybrid power system via particle swarm optimization for Kahnouj area in south-east of Iran*, *Renewable Energy* 34 (2009) 1855.
- [7] R.C. Eberhart and J. Kennedy, *A new optimizer using particle swarm theory*, Proc. Sixth International Sysposium on Micro Machine and Human Science 1995 pp. 39.
- [8] J. Kennedy and R.C. Eberhart, *Particle swarm optimization*, Proc. IEEE International conference on neural networks 1995, pp. 1942.
- [9] J. Kennedy and R.C. Eberhart, *Swarm Intelligence*, Morgan KauffmanUK 2001.
- [10] X.H. Yuhui and R.C. Eberhart, *Recent advances in particle swarm*, *IEEE proceedings of 2004 congress on evolutionary computation* 1 (2004) 90.
- [11] B.S. Borowy and Z.M. Salameh, *Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a Wind/PV hybrid system*, *IEEE Transaction on Energy Conversion* 11 No. 2 (1996) 367.
- [12] I. Abouzahr and R. Ramakumar, *Loss of power supply probability of stand-alone photovoltaic systems: a closed form solution approach*, *IEEE Transactions on Energy Conversion* 6 No. 1 (1991) 1.
- [13] Z. Michalewicz, N. Attia, A. V. Sebald and L. Fogel, *Evolutionary optimization of constrained problems*, Proc. 3rd Annu. Conf. Evolutionary Programming (1994), 98.
- [14] W.D. Kellog, M.H. Nehrir, G. Venkatamanan, V. Gerez, *Generation unit sizing and cost analysis for stand-alone wind, photovoltaic, and hybrid Wind/PV systems*, *IEEE Transactions on Energy Conversion* 13 No. 1 (1998) 70.



E. Torres nació el 2 de Septiembre de 1979 en Chetumal Quintana Roo, obtuvo el título de Ingeniero eléctrico por el Instituto Tecnológico de Chetumal, en la ciudad de Chetumal Quintana Roo, México en el 2002. Obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería.

Eléctrica por el CINVESTAV Unidad GDL, en la ciudad de Guadalajara Jalisco en el 2006. Del 2002 al 2004 laboró en la Industria de la Construcción en el diseño y supervisión de instalaciones eléctricas en baja y media tensión. En el 2007 participó como profesor por honorarios en la Universidad de Quintana Roo. A partir del 2008 es profesor Investigador de la Universidad de Quintana Roo en la ciudad de Chetumal Quintana Roo, México. Sus líneas de investigación de interés son: análisis y control del generador de inducción auto-excitado, calidad de energía y ahorro de energía.



F. Chan nació el 5 de marzo de 1973 en Mérida Yucatán. Obtuvo el grado de Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Mérida en 1991. Obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica y el Doctorado en ciencias en Ingeniería Electrónica en el *cenidet* de Cuernavaca en 1999 y 2008 respectivamente. Desde el 2000 funge como profesor investigador de la Universidad de Quintana Roo. Sus áreas de interés son la electrónica de potencia y la conversión de energía. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores.



Acosta O. Roberto titulado de la Maestría en Energía Solar de la UNAM. Profesor-Investigador Asociado "B", Definitivo de la Universidad de Quintana Roo, adscrito a la División de Ciencias e Ingeniería desde 2002. Sus áreas de interés son la medición de la radiación solar, los sistemas fototérmicos (particularmente los sistemas de calentamiento de agua y de concentración solar) y la evaluación de sistemas fotovoltaicos.



Juan M. Ramírez nació el 20 de Febrero de 1961 en Salamanca de Guanajuato en 1984. El grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica lo obtuvo por la Universidad Nacional Autónoma de México en 1987. Obtuvo el grado de Doctor en Ciencias por la Universidad Autónoma de Nuevo León en 1992. Ha sido Profesor Investigador en la Universidad de Guanajuato, entre 1987-1995. En la Universidad de Guadalajara, entre 1995-1996 y en la Universidad Autónoma de Nuevo León, entre 1997-1998. Desde Febrero de 1999 a la fecha es Investigador del CINVESTAV Unidad Guadalajara en la ciudad de Guadalajara, Jalisco, México. Dr. Ramírez es miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel II Ramírez A. Sus áreas de interés son los dispositivos FACTS y el control de los Sistemas Eléctricos de Potencia.



Víctor Sánchez es ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Orizaba (1996), Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (2000) y Dr. en Ingeniería Eléctrica por el CINVESTAV Unidad GDL (2011). De 2002 a la fecha es profesor investigador de la Universidad de Quintana Roo. Sus áreas de estudio son sistemas de generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables, convertidores de potencia de alta eficiencia y sistemas de generación distribuidos. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores.