

ISSN 1870-9532

**Diciembre 2010
Volumen 8
Número 1**

RIEE & C

Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación

Revista publicada por el Departamento
de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del
Instituto Tecnológico de Sonora



ITSON – Instituto Tecnológico de Sonora
5 de Febrero 818 Sur. C.P. 85000
Ciudad Obregón, Sonora, México.

RIEE&C: Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación

Año 6, Volumen 8, Número 1, Diciembre de 2010.

DERECHOS RESERVADOS © 2010.

ISSN: 1870-9532

Publicación semestral editada por ITSON a través del
Departamento de Eléctrica y Electrónica.
Esta publicación fue completada en Diciembre de 2010.

Editor en jefe: José Antonio Beristáin Jiménez

Grupo editor ejecutivo: José M. Campoy S., Rafael León V., Javier Pérez R., Juan C. Murrieta L., Manuel Domitsu K., Griselda González D. C.

Editores asociados: Adolfo Espinoza R., Adolfo Soto C., Andrés O. Pizarro L., Armando Ambrosio L., Armando García B., Eduardo Romero A., Enrique Aragón M., Erica Ruiz I., Gabriel Nuñez R., Jesús H. Hernández L., Ismael Murillo V., Joaquín Cortéz G., Juan J. Padilla Y., Moisés Rodríguez E., Raymundo Márquez B.

Diseño de portada: Jessica Beltrán Márquez

Contacto: rieeandc@itson.mx

Internet: <http://www.itson.mx/rieeandc>.

Impreso en el taller del Instituto Tecnológico de Sonora. Fecha de Impresión Diciembre 2010. Tiraje de 200 ejemplares con 13 hojas.

El contenido de los artículos que se publican son responsabilidad de los autores.
Prohibida la reproducción total o parcial del contenido de la revista,
en cualquier medio, sin previa autorización por escrito del editor.
Quedan reservados todos los derechos.

Análisis Dinámico del Generador de Inducción Auto-excitado

Torres M. Emmanuel, Chan-Puc Freddy, Ramírez A. Juan

Dynamic analysis of self-excited induction generator

Abstract— This article is focused on the analysis of the dynamic behavior of the self-excited induction generator (SEIG). Due to the high fossil fuel costs, the environmental problems generated by an irrational use and the fact that a great part of the world-wide population lives far from the network of provision of electric power, the technology is being oriented to the development of the renewable sources of energy like wind, micro fuel cells and/the mini-hydraulic. The induction generator is always associated with alternative sources of energy. The SEIG it is the best option for generation of energy in remote or isolated zones, nevertheless, is necessary to know its dynamic characteristics for this configuration. This article presents an analysis of the operation of the SEIG in no-load case and on-load case. It's presented the model for both conditions of operation and a criterion to determine the enough and necessary conditions to operate a SEIG with renewable sources applications.

Keywords: Self-Excited Induction Generator, magnetic saturation.

Resumen — Este artículo está enfocado al análisis del comportamiento dinámico del generador de inducción auto-excitado (GIAE). Debido a los altos costos de los combustibles fósiles, los problemas ambientales generados por un uso irracional y al hecho que una gran parte de la población mundial vive lejos de la red de suministro de potencia eléctrica, la tecnología se está orientando al desarrollo de las fuentes renovables de energía como la solar, eólica, celdas de combustibles y la micro/mini-hidráulica. El generador de inducción se encuentra siempre asociado con fuentes alternativas de energía. Para generación de energía en zonas remotas o aisladas el GIAE es la mejor opción, sin embargo, es necesario conocer sus características dinámicas bajo esta configuración. Este artículo presenta un análisis de la operación del GIAE en vacío y bajo carga. Se presenta el modelo para ambas condiciones de operación y un criterio para determinar las condiciones necesarias y suficientes para operar una GIAE con aplicaciones de fuentes renovables.

Palabras Clave – Generador de inducción auto-excitado, saturación magnética.

Manuscrito recibido el 13 de octubre del 2010. Este trabajo fue financiado por la División de Ciencias e Ingeniería de la Universidad de Quintana Roo.

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

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

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

I. INTRODUCCIÓN

El impacto de la contaminación del ambiente en el calentamiento global y los cambios climáticos resultantes pueden tener consecuencias desastrosas a largo plazo. El desarrollo tecnológico para la generación de energía eléctrica se está orientando hacia las fuentes seguras y renovables como la eólica, fotovoltaica, las celdas de combustible así como a la explotación de los recursos mini y micro hidráulicos disponibles en las poblaciones aisladas o remotas que no tienen acceso al servicio de energía eléctrica [1], [2]. Una máquina de inducción trifásica puede operar como generador de inducción auto-excitado (GIAE), [3]. Si se conecta un banco de capacitores con un valor apropiado a las terminales de la máquina mientras el rotor es impulsado por un primo motor a una velocidad apropiada, se establecerá un voltaje cuyo valor estará determinado por la saturación magnética [4-6]. En aplicaciones de energía renovable de baja y mediana potencia (hasta 100 kW), el generador de inducción auto-excitado ofrece muchas ventajas debido a su robustez, bajo costo, ausencia de escobillas (rotor jaula de ardilla), construcción sencilla, mantenimiento mínimo, mayor estabilidad, auto protección en condiciones de falla y libre de problemas de operación por mucho años [1], [4-7]. Sin embargo, la demanda de potencia reactiva y una pobre regulación de voltaje y frecuencia cuando la velocidad ó la carga varían son las principales desventajas del GIAE. Diferentes controladores de voltaje y frecuencia se han reportado en la literatura [8-11].

II. METODOLOGÍA

Como parte inicial se presenta el modelo del generador en coordenadas dq , posteriormente se describe el proceso de auto-excitación y se realiza un análisis de las condiciones necesarias y suficientes para que la auto-excitación sea exitosa y se describe la importancia de incluir la saturación magnética en el modelo del generador. Finalmente se presenta el comportamiento del generador de inducción en vacío y con carga.

A. Modelo del Generador de Inducción Auto-Excitado

El modelo del GIAE es similar al modelo tradicional de la máquina de inducción; la diferencia radica en el capacitor conectado en las terminales del estator el cual tiene la función de proporcionar a la máquina la potencia reactiva para establecer el campo magnético en el entrehierro. La Fig. 1 muestra el circuito equivalente del generador de inducción en coordenadas dq . Las ecuaciones de este circuito proporcionan la respuesta transitoria y de estado estable del proceso de auto-excitación [6].

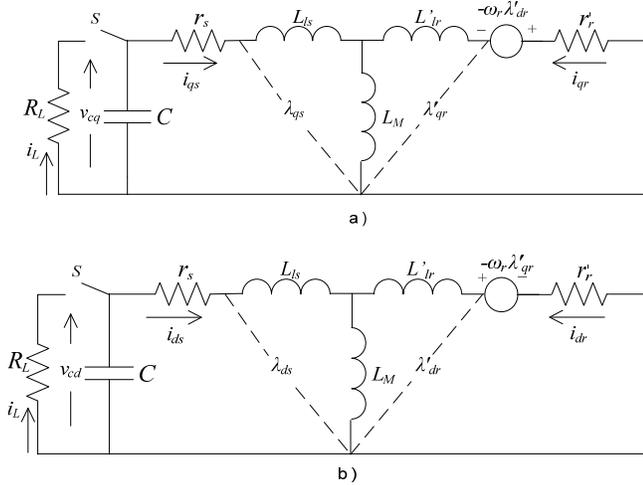


Fig. 1 Circuito equivalente del GIAE (a) eje q (b) eje d.

Planteando la ecuaciones de voltaje de Kirchoff del circuito equivalente mostrado en la Fig. 1, el comportamiento transitorio y de estado estable del GIAE está descrito por [6]:

$$\begin{bmatrix} r_s + pL_s & 0 & pL_M & 0 \\ 0 & r_s + pL_s & 0 & pL_M \\ pL_M & -\omega_r L_M & r_r + pL_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_M & pL_M & \omega_r L_r & r_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -V_{cq} \\ -V_{cd} \\ -K_q \\ -K_d \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde $L_s = L_{ls} + L_M$, $L_r = L_{lr} + L_M$, p es el operador $\frac{d}{dt}$,

ω_r es la velocidad eléctrica del rotor y K_q y K_d son constantes que representan los voltajes inducidos iniciales a lo largo de los ejes q y d , respectivamente, debido al flujo remanente en el núcleo, V_{cq} y V_{cd} son los voltajes en los capacitores.

Los voltajes en los capacitores se calculan por medio:

$$V_{cq} = \frac{1}{C} \int i_{qs} dt + V_{cq} |_{t=0} \quad (2)$$

$$V_{cd} = \frac{1}{C} \int i_{ds} dt + V_{cd} |_{t=0} \quad (3)$$

donde C es el valor seleccionado del capacitor.

Los parámetros del circuito equivalente del modelo de la máquina de inducción se obtienen de la prueba de corriente directa, la prueba de vacío y la prueba de rotor bloqueado. La máquina de inducción usada como GIAE en esta investigación es un motor trifásico tipo jaula de ardilla con las siguientes especificaciones: 2 kW, 120/208 V, 15.2/8.8 A, 60 Hz, 4 polos y conexión estrella. Los parámetros obtenidos de las pruebas son: $r_s = 0.6\Omega$, $r_r = 1.06\Omega$, $L_{ls}=L_{lr} = 6.4mH$, $L_M = 51.3mH$.

B. Análisis del proceso de auto-excitación

Una máquina de inducción trifásica puede funcionar como un generador auto-excitado, cuando un primo motor hace girar su rotor a una velocidad apropiada, y la excitación necesaria para establecer el campo magnético giratorio en el entrehierro es suministrada conectando a las terminales del estator un banco trifásico de capacitores [2-3].

El fenómeno de auto-excitación de la máquina de inducción puede o no ocurrir. Es decir, que incluso conectando capacitores a las terminales del estator de la máquina y haciendo girar el rotor, puede o no aparecer voltaje en las terminales del generador. Cuatro son los factores que determinan el proceso de auto-excitación.

- 1) Los parámetros de la máquina.
- 2) La Inductancia de Magnetización.
- 3) Velocidad del primo motor.
- 4) Banco de capacitores.

1.- *Parámetros de la máquina.* Estos se encuentran determinados por el tipo de material de los devanados del estator, tipo de rotor (devanado, tipo jaula, doble jaula, de barras profundas), clase de diseño (NEMA, IEC), etc.

2.- *Inductancia de magnetización.* Es el factor principal en el establecimiento, incremento y la estabilización del voltaje en terminales en condiciones de vacío y con carga, y está determinada por el grado de saturación del material magnético.

3.- *Velocidad del primo motor.* Cuando el generador de inducción trabaja en vacío, existe una velocidad mínima para que el proceso de auto-excitación sea exitoso. Mientras que en condiciones con carga existen una velocidad mínima y una velocidad máxima. Por lo tanto, es necesario determinar en el caso general, la velocidad mínima necesaria para que el fenómeno de auto-excitación ocurra.

4.- *Banco de capacitores.* Junto con la velocidad del primo motor, el tamaño del banco de capacitores (valor en faradios), es uno de los factores que pueden ser manejados para obtener el voltaje requerido en condiciones de vacío y con carga. Sin embargo, con una velocidad seleccionada, existe también un valor mínimo de los capacitores para que se establezca un voltaje en las terminales del generador.

Para realizar un análisis detallado del proceso de auto-excitación, las ecuaciones (1-3) se transforman al dominio de Laplace, con lo que se obtiene, [11]:

$$\begin{bmatrix} r_s + sL_s + \frac{1}{sC} & 0 & sL_M & 0 \\ 0 & r_s + sL_s + \frac{1}{sC} & 0 & sL_M \\ sL_M & -\omega_r L_M & r_r + sL_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_M & sL_M & \omega_r L_r & r_r + sL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -V_{cq}(0) \\ -V_{cd}(0) \\ -K_q \\ -K_d \end{bmatrix} \quad (4)$$

Las corrientes de auto-excitación se obtienen haciendo $I = Z^{-1}V_0$. Donde I es el vector de corrientes, Z^{-1} es la matriz inversa y V_0 es el vector de condiciones iniciales. El comportamiento transitorio y de estado estable de la máquina puede determinarse con cualquiera de las dos corrientes del

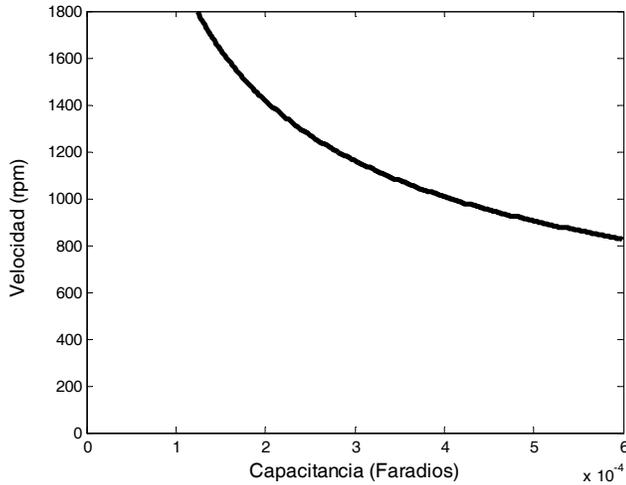


Fig. 2 Característica capacitancia-velocidad para el GIAE en vacío.

estator, en esta investigación se trabajó con la corriente de cuadratura i_{qs} . Despejando de (4) la corriente i_{qs} se obtiene [11]:

$$i_{qs} = \frac{U}{As^6 + Bs^5 + Ds^4 + Es^3 + Fs^2 + Gs + H} \quad (5)$$

donde s es el operador de Laplace y U representa todos los términos del numerador y depende de las condiciones iniciales en los capacitores y de los parámetros de la máquina, sin embargo solamente tiene efecto en los coeficientes de las fracciones parciales de (5) y no afecta el comportamiento de las corrientes [6]. A, B, D, E, F, G, H y U se definen en el Apéndice. Igualando a cero el denominador de (5) se obtiene el polinomio característico de la corriente i_{qs} esto es:

$$As^6 + Bs^5 + Ds^4 + Es^3 + Fs^2 + Gs + H = 0 \quad (6)$$

El éxito del proceso de auto-excitación depende de la ubicación de las raíces del polinomio característico. Si al menos una de las seis raíces de (6) se encuentra en el lado derecho del semiplano complejo (raíz con parte real positiva), entonces la respuesta transitoria crecerá con el tiempo y un voltaje comenzará a establecerse en las terminales del generador. Este voltaje continuará incrementándose hasta alcanzar un valor determinado por la saturación magnética.

Los valores mínimos de capacitancia y velocidad para la auto-excitación pueden obtenerse calculando las raíces de (6) que tengan parte real positiva y almacenando los valores de capacitancia y velocidad que originaron al menos una raíz con parte real positiva. Usando esta técnica, los puntos calculados para la auto-excitación en vacío de la máquina de inducción empleada en esta investigación se muestran en la Fig.2.

La Fig. 2 permite determinar los valores apropiados para que el proceso de auto-excitación sea exitoso, por ejemplo para un banco de capacitores de 200 μ F se requiere de una velocidad mínima de 1400 rpm. Este método es simple ya que solo se requiere de un algoritmo que incremente los valores de C y ω_r ,

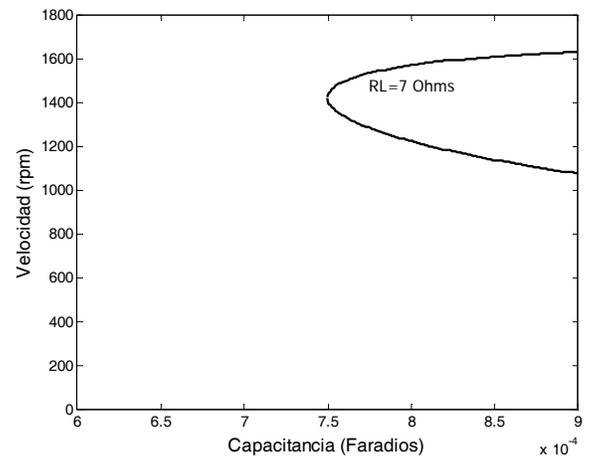


Fig. 3 Característica capacitancia-velocidad para el GIAE con carga.

calcule las raíces de (6) y almacene los valores de C y ω_r con los cuales se obtuvo al menos una raíz con parte real positiva.

C. Generador de Inducción auto-excitado con carga

Cuando una carga eléctrica se conecta a las terminales del GIAE, el generador entregará potencia activa. Sin embargo, el voltaje y la frecuencia generados varían junto con la carga. El modelo con carga del GIAE está dado por:

$$\begin{bmatrix} r_s + sL_s + \frac{R_L}{R_L + R_L s C} & 0 & sL_M & 0 \\ 0 & r_s + sL_s + \frac{R_L}{R_L + R_L s C} & 0 & sL_M \\ sL_M & -\omega_r L_M & r_r + sL_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_M & sL_M & \omega_r L_r & r_r + sL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -V_{cq}(0) \\ -V_{cd}(0) \\ -K_q \\ -K_d \end{bmatrix} \quad (7)$$

Resolviendo (7) de forma similar a (4), se obtiene la corriente de auto-excitación en el estator en el eje q . El polinomio característico de i_{qs} está dado por:

$$A_2 s^6 + B_2 s^5 + D_2 s^4 + E_2 s^3 + F_2 s^2 + G_2 s + H_2 = 0 \quad (8)$$

Calculando las raíces de (8) que tengan partes reales positivas es posible determinar la curva capacitancia-velocidad para el caso con carga. Empleando esta técnica se calcula para la máquina empleada en esta investigación la curva con carga para $R_L=7 \Omega$ de, esto se ilustra en la Fig.3

Se observa de la Fig. 3 que para el caso con carga, existe no solamente una velocidad mínima para la auto-excitación, sino que también existe una velocidad máxima. Para el caso con $R_L=7 \Omega$, el rango de velocidad se encuentra entre 1220 y 1570 rpm, aproximadamente. Cuanto mayor sea la potencia demandada por la carga (es decir R_L se aproxime a cero), esta curva será más cerrada. Si R_L es grande la curva se aproxima más al caso en vacío. Empleando esta característica es posible determinar si el generador seleccionado es apropiado para aplicaciones eólicas, es donde los generadores eólicos operan dentro de un rango de velocidad determinado.

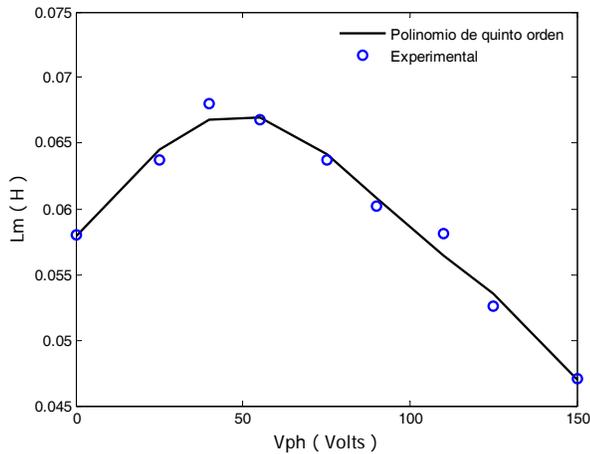


Fig. 4 Variación de la inductancia de magnetización respecto al voltaje de fase.

D. Saturación magnética

Cuando la máquina de inducción funciona como generador auto-excitado, la variación de la inductancia de magnetización L_M es el factor principal en la dinámica del voltaje y su estabilización. La saturación magnética es la responsable de que el voltaje generado en terminales, alcance un valor de estado estacionario. Existen diversas formas de incluir la saturación magnética en el modelo de la máquina de inducción, como se reporta en [12-14] algunas más complicadas que otras. En el presente trabajo la saturación magnética se incluye en el modelo del generador como en [6], por medio de un polinomio el cual representa la variación de la inductancia de magnetización respecto al voltaje de fase. Para determinar el polinomio se hace girar la máquina de inducción a velocidad síncrona por medio de un primo motor y se aplica un voltaje al estator que varía de 0 a 120% del su valor nominal. Para cada valor de voltaje se mide el valor de la corriente. Con estos datos se calcula la inductancia de magnetización y se grafican los puntos obtenidos los cuales se ajustan con un polinomio de 5° orden para incluir la saturación magnética en el modelo del generador. Esto se muestra en la Fig. 4.

El polinomio de quinto orden está dado por (9):

$$L_m = -4.3205 \cdot 10^{-12} V_{ph}^5 + 1.6065 \cdot 10^{-9} V_{ph}^4 - 1.9225 \cdot 10^{-7} V_{ph}^3 + 5.2616 \cdot 10^{-6} V_{ph}^2 + 2.2883 \cdot 10^{-4} V_{ph} + 0.0579 \quad (9)$$

III. RESULTADOS

A. Operación del GIAE en vacío

Para la simulación del comportamiento del GIAE se empleó el software MATLAB-SIMULINK y se programó el modelo del GIAE. El proceso de auto-excitación en vacío con una velocidad de 1500 rpm y una capacitancia de 165 μ F se muestra en la Fig. 5. El voltaje generado se establece en un valor de 120 V debido a la saturación magnética. La frecuencia del voltaje es de 50 Hz.

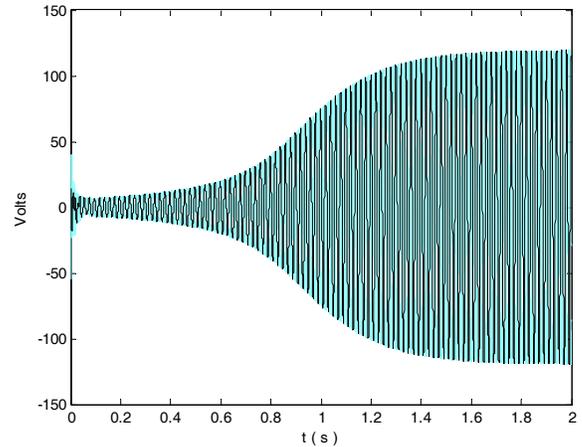


Fig. 5 Voltaje generado en el proceso de auto excitación con una velocidad mecánica de 1500 rpm y un banco trifásico de capacitores de 165 μ F.

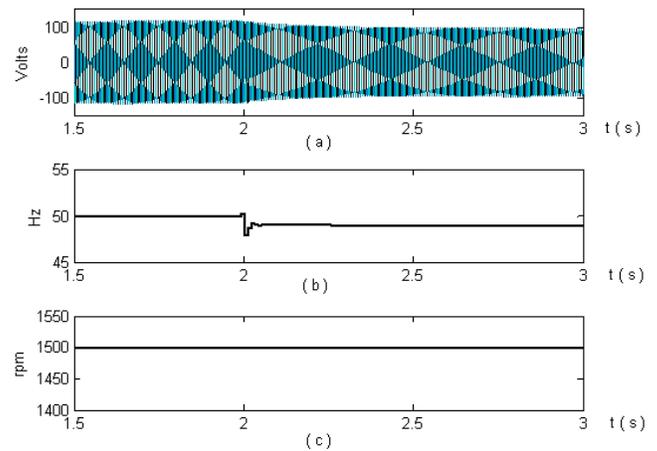


Fig. 6 Efecto de la conexión de una carga después de que el voltaje alcanza su valor de estado estacionario. (a) Voltaje (b) Frecuencia (c) Velocidad del primo motor.

B. Operación del GIAE con carga

Cuando una carga se conecta al generador la magnitud del voltaje y la frecuencia disminuyen. Esto se ilustra en la Fig. 6 cuando en el instante de conexión de una carga ($t = 2$ s) puede observarse que la magnitud del voltaje cae por debajo de 100 V y la frecuencia por debajo de 50 Hz.

Si en el instante de conexión de la carga ($t = 2$ s) la velocidad del primo motor también disminuye la magnitud del voltaje y la frecuencia se reducen en una proporción mayor que en el caso anterior cuando la velocidad del primo motor permanecía constante, esta situación se muestra en la Fig. 7.

La magnitud del voltaje depende directamente de la capacitancia y de la velocidad del primo motor. Esto significa que un incremento en cualquiera de estos dos parámetros ocasionaría un aumento en la magnitud del voltaje. La Fig. 8 muestra un incremento ($t = 2.5$ s) en el valor de la capacitancia lo que se traduce en aumento en la magnitud del voltaje más no en la frecuencia

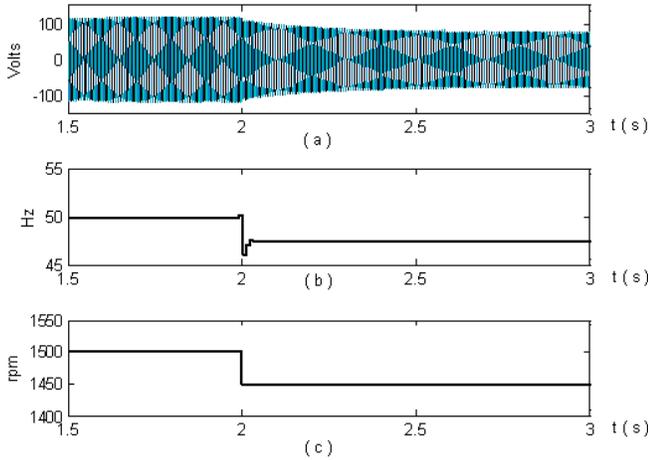


Fig. 7 Efecto de la disminución de la velocidad del primo motor cuando se conecta una carga. (a) Voltaje (b) Frecuencia (c) Velocidad del primo motor.

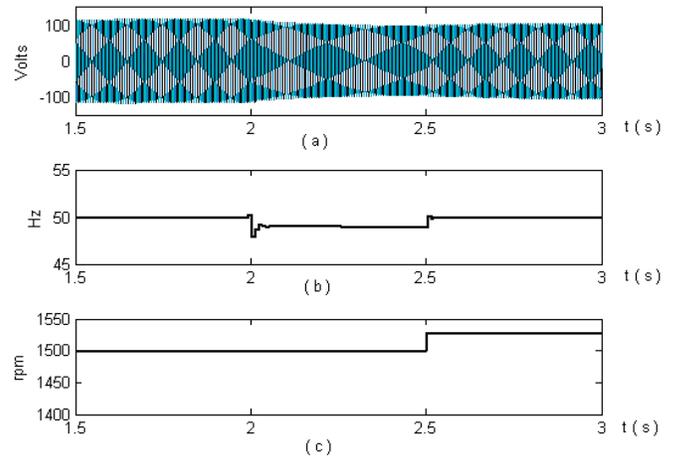


Fig. 9 Incremento de la velocidad del primo motor, después de la conexión de carga. (a) Voltaje (b) Frecuencia (c) Velocidad del primo motor.

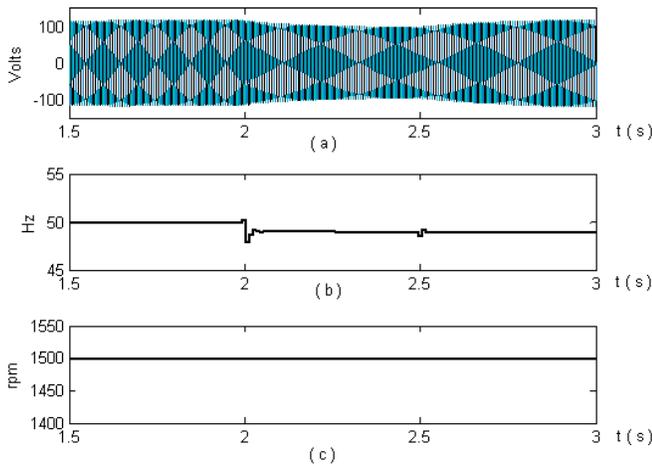


Fig. 8 Incremento del valor de la capacitancia después de la conexión de carga. (a) Voltaje (b) Frecuencia (c) Velocidad del primo motor.

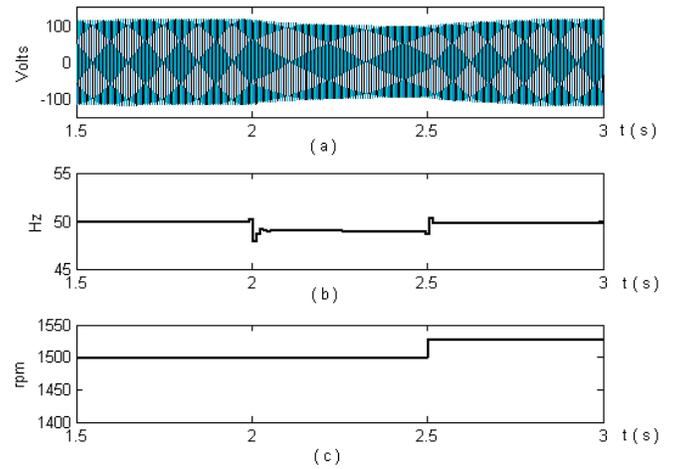


Fig. 10 Incremento de la capacitancia y de la velocidad del primo motor después de la conexión de carga. (a) Voltaje (b) Frecuencia (c) Velocidad del primo motor.

La frecuencia depende básicamente de la velocidad del primo motor y un incremento en la capacitancia ocasiona un cambio muy ligero en la frecuencia. La Fig. 9 ilustra esta situación. En $t=2.5$ s se incrementa la velocidad del primo motor lo que ocasiona un incremento en la magnitud de la frecuencia y el voltaje.

Para mantener tanto el voltaje como la frecuencia en los valores deseados (120 V y 50 Hz), es necesario un incremento tanto de la capacitancia como de la velocidad del primo motor, como se observa en la Fig. 10. En el instante $t=2.5$ s, se incrementan tanto la velocidad del primo motor como la capacitancia, lo que produce que la magnitud del voltaje y la frecuencia se mantengan en los valores deseados. La Fig. 11 muestra la corriente generada $i_g(a)$, la corriente de carga $i_L(b)$ y la potencia entregada a la carga $P_{out}(c)$.

En el instante de conexión de la carga ($t=2$ s) la potencia de salida disminuye por debajo del valor esperado debido al decremento en la magnitud del voltaje. Sin embargo, debido al aumento en el valor de la capacitancia y de la velocidad del

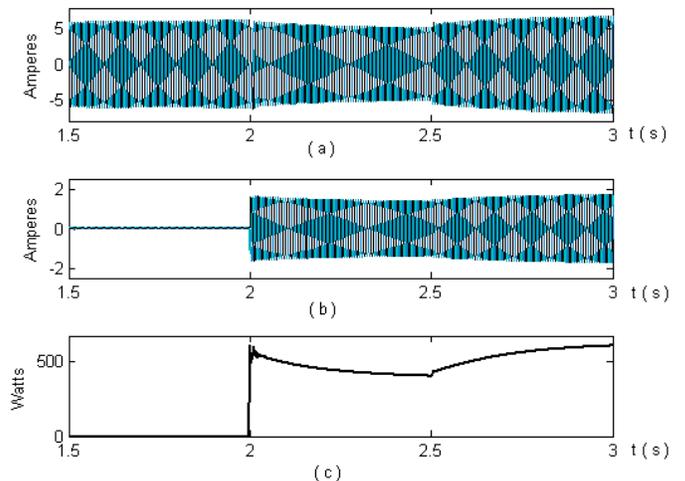


Fig. 11 Incremento de la capacitancia y de la velocidad del primo motor después de la conexión de carga. (a) Corriente generada (b) Corriente de carga (c) Potencia de salida.

primo motor en ($t = 2.5$ s) la potencia de salida se restablece en el valor esperado.

Cabe mencionar que la velocidad del primo motor se estableció en 1500 rpm porque genera en una máquina de 4 polos voltaje con una frecuencia de 50 Hz. Debido a que estas pruebas se realizarán en laboratorio y que la velocidad nominal de la máquina es de 1765 rpm, se cuenta con un margen de 300 rpm para incrementar la velocidad de la máquina hasta alcanzar las condiciones deseadas de voltaje y frecuencia.

Debido a la alta dependencia del voltaje con la carga es necesario operar el GIAE con controladores que permitan tener un voltaje constante sin importar la variación de la carga.

Para sistemas de potencia mecánica constante como los mini/micro-hidráulicos se han diseñado *Controladores Electrónicos de Carga* como se reporta en [8]-[11,12], banco de capacitores conmutados [10]. Para sistemas con potencia mecánica variable se han publicado [6,9].

Por último si se desea emplear un GIAE en aplicaciones eólicas se debe determinar el rango de velocidad en el cual se operará así como la carga por alimentar, de esta forma se selecciona los valores mínimos y máximos de capacitancia y velocidad y se determinan las variaciones de voltaje y frecuencia que se presentarán. Adicionalmente se puede diseñar un controlador de voltaje y frecuencia.

IV. CONCLUSIONES

Se propuso una forma sencilla para determinar los valores apropiados de capacitancia y velocidad para que la máquina de inducción opere como GIAE, esto simplemente calculando para que valores de capacitancia y de velocidad del primo motor las raíces del polinomio característico de alguna de las corrientes del estator tienen parte real positiva y con cada par de valores de velocidad y capacitancia se obtienen las curvas en vacío o con carga que permiten determinar el rango de velocidad en el cual el GIAE puede operar. La saturación magnética se incluye en el modelo del generador de una forma sencilla empleando un polinomio que se ajusta a los datos obtenidos de la prueba realizada en el laboratorio, esto da como resultado un polinomio que simula la variación no lineal de la inductancia de magnetización L_m respecto al voltaje generado. Se programó el modelo del GIAE empleando Matlab-Simulink y se presentó un análisis de las características dinámicas del generador en vacío y con carga con lo cual es posible determinar si una máquina de inducción puede ser empleada como GIAE para aplicaciones renovables como la eólica o la mini/micro-hidráulica. Se determinó que existe una fuerte dependencia del voltaje y frecuencia respecto a la carga conectada, sin embargo, un incremento de capacitancia o velocidad del primo motor o una combinación de ambas pueden lograr mantener voltaje y frecuencia constantes en las terminales del generador, lo que lo hace una opción viable para generación de energía eléctrica en poblaciones alejadas de la red eléctrica.

APÉNDICE

$$A = (L_r L_s - L_M^2)^2 C^2$$

$$B = 2(L_r L_s - L_M^2)(r_s L_r + r_r L_s) C^2$$

$$D = \left(\begin{aligned} &((r_s^2 + \omega_r^2 L_s^2) L_r^2 + (-2\omega_r^2 L_s L_M^2 + 4r_r r_s L_s) L_r \\ &+ \omega_r^2 L_M^4 + r_r^2 L_s^2 - 2r_r r_s L_M^2) C + 2L_r^2 L_s - 2L_r L_M^2 \end{aligned} \right) C$$

$$E = 2 \left(\begin{aligned} &(\omega_r^2 L_r L_s + (r_s r_r - \omega_r^2 L_M^2) L_r + L_s r_r^2) r_s C \\ &+ r_s L_r^2 + 2L_r L_s r_r - r_r L_M^2 \end{aligned} \right) C$$

$$F = (r_s^2 (\omega_r^2 L_r^2 + r_r^2) C^2 + (2\omega_r^2 L_r L_s + (4r_s r_r - 2\omega_r^2 L_M^2) L_r + 2L_s r_r^2) C + L_r^2)$$

$$G = (2r_s (\omega_r^2 L_r^2 + r_r^2) C + 2r_r L_r)$$

$$H = \omega_r^2 L_r^2 + r_r^2$$

REFERENCIAS

- [1] M. Godoy Simoes, Felix a. Farret, "Renewable Energy Systems. Design and Analysis with Induction Generators". CRC PRESS, 2004.
- [2] R.C. Bansal, "Tree phase self excited induction generator: an overview", IEEE Trans. On Energy Conversion, vol 20, no.2, pp. 292-299, June 2005.
- [3] E.D. Basset and F.M. Potter, "Capacitive excitation of induction generators", Trans. of the Amer. Inst. Electr. Eng., Vol. 54, No. 5, pp. 540-545, May 1935.
- [4] S.S. Murthy, B.P. Singh, C. Nagamani, K.V.V. Satyanarayana, "Studie on the use of conventional Induction Motors as Self-Excited Induction Generators", IEEE Transactions on energy Conversion, Vol. 3, No. 4, December 1988.
- [5] L. Shridhar, B. Singh, C. S. Jha, B. P. Singh, SM and S.S. Murthy, "Selection of Capacitors for the Self Regulated Short and Shunt Self Excited Induction Generators", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 1. March 1995.
- [6] D. Seyoum, C. Grantham and Muhammed F. Rahman, "The dynamic Characteristics of an Isolated Self-Excited Induction Generator Driven by a Wind Turbine", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 39, No. 4 July/August 2003.
- [7] S.P. Singh, B. Singh, M.P. Jain, "Performance Characteristics and Optimum Utilization of a Cage Machine as Capacitor Excited Induction Generator", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 5, No. 4, December 1990.
- [8] B. Singh, S.S. Murthy, S. Gupta, "Analysis and implementation of an electronic load controller for a self-excited induction generator", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 151, No. 1, January 2004.O. Yanez, private communication, May 2002.
- [9] C. Grantham, F. Rahman, D. Seyoum, "A self-Excited Induction Generator with Voltage Regulation for use in a Remote Area Power Supply", Power Electronics and Motion Control Conference, 2000. Proceedings. PIEMC 2000. The Third International. Vol. 2, 15-18 Aug. 2000 Page(s):710 – 715.
- [10] M. A. Al Saffar, E. C. Nho, T. A. Lipo, "Controlled shunt Capacitor Self-Excited Induction Generator", Industry Applications Conference, 1998. Thirty-Third IAS Annual Meeting. The 1998 IEEE, Vol. 2, pages 1486-1490, 12-15 Oct. 1998.
- [11] Ramirez, J.M, Torres E. "An Electronic Load Controller for the Self-Excited Induction Generator", Cinvestav, Guadalajara; Transaction on Energy Conversion, IEEE, June 2007. Volume: 22, Issue: 2 On page(s): 546-548.
- [12] B. Singh, S.S. Murthy, S. Gupta, "Analysis and implementation of an electronic load controller for a self-excited induction generator", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 151, No. 1, January 2004.
- [13] L. Shridhar, Bhim Singh, C. S. Jha, B.P. Singh, SM and S.S. Murthy, "Selection of capacitors for the self regulated short shunt self excited induction generator", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.10, No.1, March 1995.
- [14] Décio Bispo, Luciano Martins Neto, José Tarcisio de Resende, and Darizon Alvez de Andrade. "A new strategy for Induction Machine Modeling Taking Into Account the Magnetic Saturation", IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 37, No. 6, November/December 2001.



Torres M. Emmanuel 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.



Chan P. Freddy 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.



Ramírez A. Juan nació el 20 de Febrero de 1961 en Salamanca Guanajuato, obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico por la Universidad 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.

Simulación y Comparación Energética de un Sistema de Enfriamiento por Ciclo de Absorción

Mireles J. Damián U., Herrera S. Manuel, Murillo V. Ismael, León V. Rafael, Oroz G. Gilberto

Simulation and Energetic Comparison of a Cooling System based on Absorption Cycle

Abstract— At present, the main equipment related to electric power consumption are those that use systems of mechanical compression, which generally are presented as refrigerators, air conditioned units, chillers, among others. In counterpart, the application of cooling equipments that use absorption cycle are a feasible alternative to reduce the consumption and turnover of electric power. In 1930, the Icyball was created by Powell Crosley Jr.. The Icyball is a type of non-continuous absorption cycle, that needs to be reloaded manually, subsequent to it, releases the cooling amount which it was designed. The proposal is a model that supports the production of a continuous cooling cycle using the Icyball unit. This model allows the energetic comparison of a refrigeration system based on absorption cycle against a refrigeration system based on mechanical compression. The calculation of energy wasted in the components of the system is realized by means of the energy balance method, where the energy levels depend on the thermodynamic state conditions of the working fluid. On this basis, it is possible to realize an energetic comparison between this model and the refrigeration system based on mechanical compression, by using conversions of already existing units, and simulation of change conditions in the working fluid through I/O components (generator and evaporator) that allow to evaluate the energy equivalence from one refrigeration system to another.

Keywords —Absorption cycle, simulation, energetic comparison.

Resumen— En la actualidad los equipos que generan mayor consumo y facturación de energía eléctrica son aquellos que utilizan sistemas de compresión mecánica activados por fuente de energía eléctrica, los cuales generalmente están presentes en refrigeradores, aires acondicionados, enfriadores de agua, entre otros. En contra parte, la aplicación de equipos de enfriamiento utilizando ciclo de absorción es una alternativa factible para disminuir el consumo y facturación de energía eléctrica. En 1930 Powell Crosley, Jr. fabricó un equipo de enfriamiento denominado Icyball, el cual trabaja con

Manuscrito recibido el 6 de Julio 2010. Este trabajo fue respaldado por el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del Instituto Tecnológico de Sonora, la Coordinación de Gestión y Apoyo a Cuerpos Académicos, apoyo interno (PROFAPI 0037), y apoyo externo del Fondo Sectorial CONAVI-CONACYT (CONAFOVI 2008-01-106608).

Mireles Juárez Damián U. es Ingeniero Electricista y pasante de Maestría en Ciencias en Energía. Profesor Auxiliar en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica en el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON), Ave. Antonio Caso S/N, C.P. 85132, Col. Villa ITSON; Ciudad Obregón, Sonora, México; Tel/Fax: (644) 4109001. (e-mail: dakme24@hotmail.com)

Herrera Sarellano Manuel., I. Murillo Verduzco y R. León Velázquez son Profesores Tiempo Completo en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON).

Oroz Galaviz Gilberto es Profesor Tiempo Completo en el Departamento de Ingeniería Industrial del Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON).

un ciclo de absorción intermitente, de tal manera, que tiene que ser reiniciado en forma manual después que realiza la cantidad de enfriamiento para la cual esta diseñado. La propuesta es un modelo que ayude a producir un ciclo termodinámico continuo utilizando como base la unidad de enfriamiento Icyball, y que permita la comparación energética de un sistema de refrigeración por ciclo de absorción contra un sistema de refrigeración por compresión. La cantidad de energía en cada uno de los elementos del sistema, se cuantifica por medio de las ecuaciones de balance energético, describiendo los niveles de energía cuyas magnitudes varían dependiendo de las condiciones de estado termodinámico en el que se encuentre el fluido de trabajo (par refrigerante). Con esto, es posible realizar una comparativa contra un sistema de refrigeración por compresión, utilizando conversiones de unidades ya existentes, e inclusive una simulación de los cambios de estado en los componentes de entrada y salida (generador y evaporador) que permita evaluar el equivalente en energía de un sistema de refrigeración por absorción con uno de compresión mecánica.

Palabras clave— ciclo de absorción, simulación, comparación energética.

I. INTRODUCCIÓN

Los ciclos de absorción se han utilizado por más de 100 años [1], antes de la disponibilidad de los compresores confiables de vapor, el ciclo de la absorción pertenecía a un número relativamente pequeño de las tecnologías disponibles para las necesidades de fabricación de hielo.

El sistema de enfriamiento por absorción, al igual que en el sistema de enfriamiento por compresión, se aprovecha que ciertas sustancias absorben calor al cambiar de estado líquido a gaseoso [8].

Los sistemas de absorción se diferencian por el tipo de refrigerante y de absorbente químico que utilizan [2]. Se refieren éstos como "par de trabajo", cuyo caso es amoníaco con agua, el amoníaco como refrigerante y el agua como absorbente [3]. En el mercado actual, la tecnología del amoníaco se utiliza principalmente en grandes compañías de refrigeración (congeladora de mariscos, hortícolas y fabricas de hielo).

Una impresión general de las características principales de la tecnología de refrigeración por absorción se puede obtener por la comparación con la tecnología más común de la refrigeración de la compresión del vapor. El enfriamiento se genera por el consumo de energía que se utiliza para evaporar un líquido. Si el líquido se encuentra confinado en un depósito aumentará su temperatura, al ceder su contenido energético (calor latente de evaporación) [4] [5].

En base a esta tecnología, en 1930, Powell Crosley, Jr. fabricó un equipo de enfriamiento denominado "Icyball", el cual trabaja con un ciclo de absorción intermitente, debido que al estar transcurriendo las horas, la temperatura va incrementando [6], para posteriormente de haber acabado el enfriamiento tenga que ser reiniciado manualmente para generar un nuevo ciclo. Cabe mencionar que el sistema puede ser activado con la quema de un combustible, carbón, leña u otras fuentes de calor, incluyendo energía térmica, solar.

Algunos de los proyectos de esta índole en México, han sido desarrollados por la UNAM y el Instituto de Investigaciones Eléctricas, que fue un sistema de aire acondicionado por ciclo absorción para 6 viviendas, en Mexicali, Baja California, utilizando como fuente de calor, energía solar térmica, y par refrigerante bromuro de litio-agua, donde cabe mencionar todas las viviendas incorporaban elementos pasivos para la reducción de carga térmica, y se redujeron 7kW de los 18kW de carga térmica con este sistema [22].

Por otro lado, se han realizado otras investigaciones en la misma zona del país, dirigidos por Comisión Federal de Electricidad y el Instituto de Investigaciones Eléctricas, el cual comprende el análisis de una bomba de calor para refrigeración y aire acondicionado por absorción de calor, utilizando como fuente de calor energía geotérmica [23].

En la actualidad el sistema de refrigeración y aire acondicionado que utiliza ciclo de absorción, existe en ciertas cantidades las cuales son; o demasiado pequeñas que están presentes en refrigeradores de 20 a 50 litros, o grandes que son máquinas que van desde 170 a 4850 kW, las cuales se utilizan para la fabricación de grandes toneladas de hielo. El mercado de estos sistemas no cubre la necesidad de la climatización de vivienda [20] [21], por tal motivo se desarrolla esta investigación en base a dicha oportunidad.

La propuesta de un modelo que consiste en el diseño de un condensador – absorbedor, elementos que ofrecen disipar la energía térmica tanto del refrigerante como del absorbente, ayudando en si a mantener un ciclo constante en el sistema [7].

El tener un ciclo termodinámico en un sistema de enfriamiento permite obtener la ecuación de balance energético, esto se puede hacer conociendo los parámetros de temperatura, presión, entalpías y flujo másico de entrada y salida del refrigerante, o de cada uno de ellos según sea el elemento del sistema que se este analizando. De esta manera, la cantidad de energía se cuantifica y se hace una comparativa energética, logrando equivalencia entre el sistema de enfriamiento por absorción que se presenta contra un sistema de enfriamiento por compresión convencional, utilizando conversiones de unidades ya existentes, e inclusive una simulación de los cambios de estado en los componentes de entrada y salida (generador y evaporador). La metodología que utilizada, toma en cuenta las gráficas del punto de estado para un par de trabajo amoniaco-agua

La cantidad de energía obtenida para el intercambio de calor es aproximadamente $\frac{3}{4}$ de tonelada de refrigeración, bajo consideraciones de estado estable. La importancia de los resultados radica en el desarrollo de un sistema funcional (prototipo) dimensionando su escala ya sea para la climatización de vivienda o simplemente la conservación de alimentos, sin

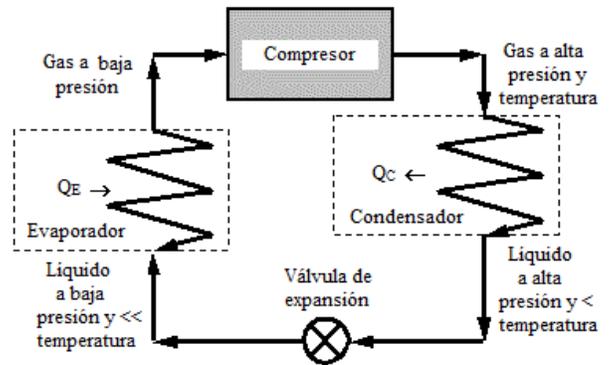


Fig. 1 Ciclo de refrigeración por compresión simple [12].

dejar de señalar que la tendencia de este tipo de sistemas es la utilización de la energía térmica solar.

Para comprender la metodología que se va desarrollando es necesario entender el funcionamiento de los sistemas de refrigeración, tanto por compresión mecánica como el de absorción, e inclusive conocer la equivalencia de uno con el otro a través de los componentes que los conforman.

II. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DEL CICLO DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN Y ABSORCIÓN

A. Sistemas de refrigeración por compresión

La figura 1 muestra el ciclo de refrigeración por compresión simple, donde se emplean cuatro elementos en el ciclo de refrigeración: compresor, condensador, válvula de expansión y evaporador.

El compresor realiza la succión de los vapores que salen del evaporador, comprimiéndolos de tal manera que estos lleguen al condensador a una temperatura y presión alta.

A la llegada del condensador, los vapores cambian de estado, cediendo su energía latente a un medio externo, de tal manera, que los vapores pasan a ser líquidos a la salida con una presión alta y temperatura baja con respecto a la entrada del mismo.

A su paso por el orificio calibrado de la válvula de expansión, el líquido experimenta una caída de presión provocando. Por una parte, su evaporación parcial y, por la otra, el enfriamiento hasta la temperatura de evaporación del líquido restante. La expansión del fluido es una expansión isoentálpica, en el curso de la cual la cantidad de calor total contenida en el líquido antes de la válvula y dentro de la mezcla líquido-vapor a su paso por el orificio, no ha variado; ha ocurrido solamente la transferencia de energía y la modificación del estado físico del fluido.

La mezcla líquido-vapor expansionado entra al evaporador, en este, la mezcla de vapor líquido absorbe la cantidad necesaria de calor latente de un medio externo, para convertirse totalmente en vapor, la presión se mantiene constante durante todo el proceso de evaporación, por la succión del compresor de los vapores producidos.

TABLA I
COMPARACIÓN DE ELEMENTO POR ELEMENTO DE LOS SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO POR COMPRESIÓN Y ABSORCIÓN.

Compresión	Absorción
Condensador	Condensador
Válvula de expansión	Válvula de expansión
Evaporador	Evaporador
Succión	absorbedor
Compresión	Bomba de absorbedor
Suministro de amoniaco	Generador

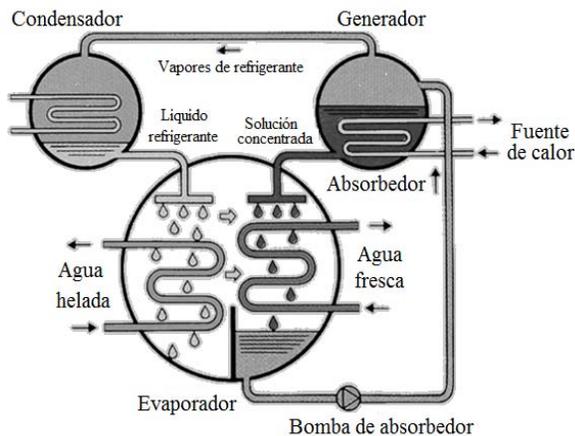


Fig. 2 Principio de una unidad de absorción de simple efecto, [13].

III. SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN

Cuando existe una fuente de energía térmica barata, es decir una fuente de energía de fácil acceso (ejemplo: energía solar), a una temperatura entre 100 y 200 °C los sistemas de refrigeración por absorción son bastante atractivos. Algunos ejemplos de fuentes de energía térmica barata incluyen la energía geotérmica, la solar, el calor de desecho de la cogeneración o de plantas de vapor de proceso, e incluso el gas natural cuando está disponible a un precio relativamente bajo.

Los ciclos de absorción requieren al menos dos sustancias de trabajo, una absorbente y un fluido refrigerante. Dada ésta limitación, muchas combinaciones no son alcanzables. Uno de los sistemas de refrigeración por absorción más utilizado es el sistema de amoniaco-agua, donde el amoniaco (NH_3) sirve como refrigerante y el agua (H_2O) como medio de transporte. Otros sistemas de refrigeración por absorción son los de agua-bromuro de litio y de agua-cloruro de litio, en los que el agua sirve como refrigerante [14]. Los últimos dos sistemas se limitan al uso de acondicionamiento de aire en los que la temperatura mínima está por arriba del punto de congelación del agua.

En la Figura 2, la mezcla del par refrigerante amoniaco-agua se encuentran ubicados dentro del depósito llamado generador, al cual se le aplica una fuente de calor externa, ocasionando que incrementa la temperatura y la presión de la mezcla, de tal manera que el amoniaco se separa del agua convirtiéndose en



Fig. 3 Unidad de enfriamiento Icyball [6].

vapor, este viaja hacia el rectificador el cual actúa como una especie de trampa donde separa las pocas partículas de agua.

El amoniaco viajará en forma de vapor hacia el condensador lo más puro posible, a una temperatura alta y presión alta. De manera que antes de llegar al condensador existe una válvula la cual manipula la presión, haciendo una reducción de la misma para ayudar al fluido que reduzca su temperatura, este se enfría y condensa en el condensador al ceder calor hacia un medio externo.

Antes de que el amoniaco entre al evaporador su presión es reducida por una válvula de expansión, de tal forma que entre al mismo a una presión y temperatura baja, en estado líquido. En el evaporador se hace la transferencia de calor entre el Amoniaco y la sustancia u objeto a refrigerar, que por lo regular es agua.

A medida que va sucediendo la transferencia de calor el amoniaco alcanza una temperatura tal que este empieza a evaporarse de manera que en ese estado viaja al absorbedor, donde se mezcla con el agua que fue separada en el rectificador, al suceder esto, el agua absorbe al amoniaco volviendo en sí la mezcla del par refrigerante.

Finalmente, una vez que se haya efectuado la absorción, la mezcla es tomada por una bomba mecánica la cual lleva la mezcla hacia el generador donde se reinicia el ciclo [3].

Existen sistemas de absorción de simple, doble, triple efecto y más. Los cuales se diferencian entre sí, debido al aprovechamiento del calor rechazado en ciertas etapas para el uso en otras partes del mismo ciclo [9].

Analizando cada parte de los dos sistemas se tiene la siguiente relación que muestra la equivalencia de los equipos que forman cada sistema, la cual se puede ver en la tabla I.

La energía suministrada al sistema, consiste en la energía cedida en la bomba mecánica, y en la energía calorífica necesaria para hacer hervir y evaporarse el amoniaco en el generador [5].

IV. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO POR CICLO DE ABSORCIÓN

A. Modelo físico de la Icy ball

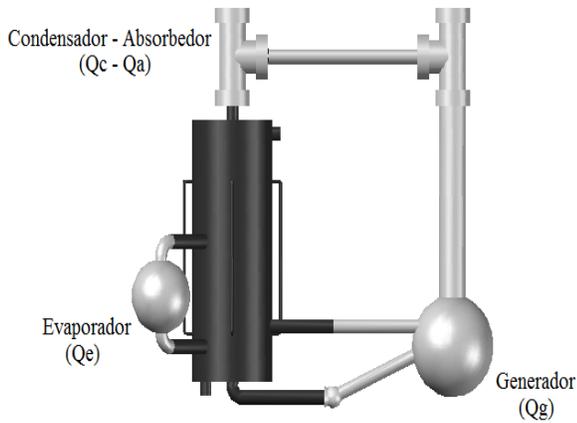


Fig. 4 Condensador-absorbedor adaptado en unidad de enfriamiento.

Icyball [7].

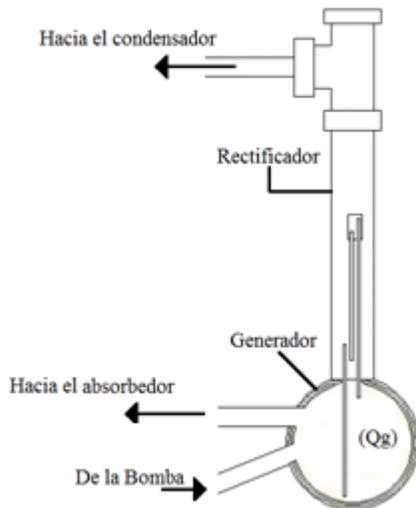


Fig. 5 Generador y rectificador [7].

La unidad de enfriamiento Icyball es tomado como base del proyecto, se muestra en la figura 3. El diseño del condensador-absorbedor se adaptará a él para generar el ciclo termodinámico.

El modelo físico representado en AutoCAD de la figura 4, es con el objetivo de mantener un ciclo que beneficie a la unidad de enfriamiento Icyball, el prototipo es diseñado tomando en cuenta que es sometido a constante humedad que permite disipar la energía térmica debido al requerimiento demandado por el proceso de condensación y absorción que se lleva a cabo en el interior del modelo.

B. Representación del ciclo termodinámico generado en la unidad "icyball"

La unidad de enfriamiento denominada Icyball, es un equipo de refrigeración que funciona por medio de la absorción para lograr el enfriamiento. En el generador la fuente de calor evapora la solución de amoníaco-agua, este mismo cuenta con un rectificador localizado en la parte superior del generador dentro de la trayectoria del tubo que conecta con el condensador-absorbedor, ver Figura 4 y 5, donde se reducen los pequeños

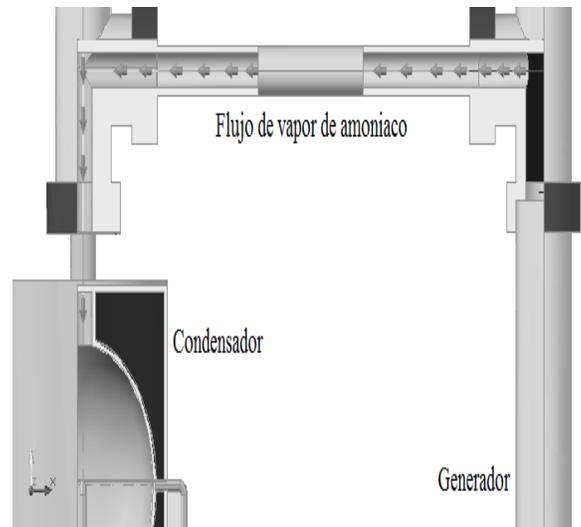


Fig. 6 Vapor de amoníaco hacia el condensador [7].

porcentajes de vapor de agua que logran evaporarse junto con los del amoníaco.

El agua tiene gran afinidad por el vapor de amoníaco mientras se encuentre a una temperatura ambiente, por lo cual deja al generador dirigiéndose al absorbedor (Q_a) reduciendo su presión a través de una válvula que separa el lado de alta presión del de baja presión, facilitando así la disipación de calor a la cual llega del generador (ver Figura 5).

Una vez en el condensador (Q_c) estos gases de amoníaco se condensan, facilitando el proceso el hecho de que el depósito que los contiene se mantiene sumergido en agua (ver figura 6). Originalmente Icyball no es un ciclo, por lo cual una vez transcurrido el enfriamiento, el sistema tenía que ser reiniciado en forma manual.

Ese es el motivo por el cual se agregaron los componentes de condensador-absorbedor y una bomba de circulación para que se generara un sistema de enfriamiento por absorción como un ciclo.

En el ciclo adaptado a la Icyball, en el condensador el amoníaco cede el calor y es por eso que cambia de estado, pasando enseguida al evaporador (Q_e) donde ahora tendrá la capacidad para absorber el calor del objeto o sustancia a enfriar, dado esto, se vuelve a evaporar el amoníaco y viaja al depósito llamado absorbedor (Q_a), donde el agua que fue separada en el generador absorbe al amoníaco y estos vuelven a mezclarse, posteriormente son enviados por la bomba de nueva cuenta hacia el generador (Q_g), es ahí donde se completa el ciclo, ver Figura 7.

C. Comparación energética del sistema de refrigeración por ciclo de absorción

Para efectos del cálculo en la unidad Icyball, se considera 0.851 litros de agua destilada y 1.040 litros de amoníaco. Considerando los puntos del diagrama de la figura 8.

El balance energético en el ciclo se puede escribir como se muestra en la ecuación (1), la cual representa la energía en cada uno de los componentes del prototipo [19] (para efectos de

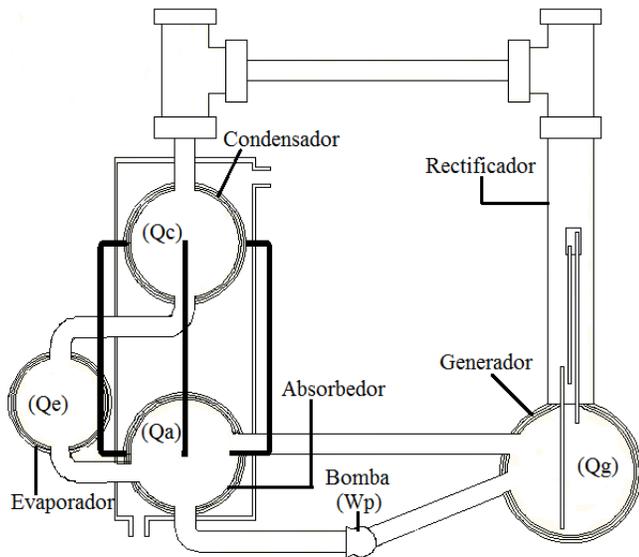


Fig. 7 Balance energético y esquematización de ciclo adaptado en Icyball [7].

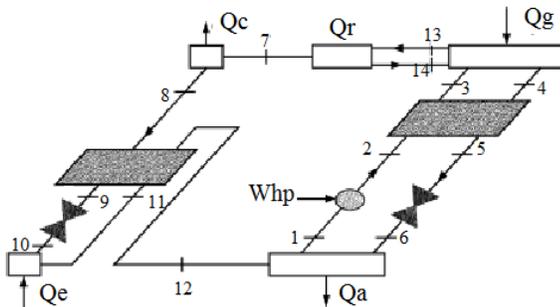


Fig. 8 Puntos de medición para un sistema de simple efecto amoniaco-agua [9].

TABLA II
CANTIDAD DE ENERGÍA PARA LOS DATOS DEL CICLO DE ABSORCIÓN AMONIACO/AGUA [9].

Componente	Símbolo	Ecuación	Potencia (kW)
Evaporador	Q _e	m ₁₀ (h ₁₁ -h ₁₀)	2.86
Absorbedor	Q _a	m ₁₂ (h ₁₂ -h ₁)+m ₁ h ₁ +m ₆ h ₁	20.80
Condensador	Q _c	m ₇ (h ₇ -h ₈)	13.72
Generador	Q _g	m ₄ h ₄ +m ₃ h ₃ -m ₁₄ h ₁₄	39.31
Rectificador	Q _r	m ₇ h ₇	7.10
Bomba de Solución	W _{hp}	m ₁ (h ₂ -h ₁)	0.12

visualización se omite mostrar el desglose elemento por elemento de la ecuación, los cuáles se muestran en la tabla II).

TABLA III
PARÁMETROS DEL SISTEMA DE ABSORCIÓN AMONIACO-AGUA DE SIMPLE EFECTO [9].

Puntos	H (kJ/kg)	M (kg/s)	P (kPa)	T (°C)	X (Fracción de NH3)
1	-075.8	0.100	270	035.0	0.41
2	-074.6	0.100	1337	035.1	0.41
3	0270.8	0.100	1337	097.0	0.41
4	0622.1	0.066	1337	162.6	0.11
5	0163.1	0.066	1337	057.2	0.11
6	0163.1	0.066	270	057.4	0.11
7	1485.3	0.036	1337	091.4	0.96
8	0178.2	0.001	1337	091.4	0.41
9	1405.7	0.034	1337	072.9	0.99
10	0158.5	0.034	1337	035	0.99
11	0074.2	0.034	1337	017.4	0.99
12	0074.2	0.034	270	-11.5	0.99
13	1264.4	0.034	270	007	0.99
14	1348.7	0.034	270	030.4	0.99
15	-030.9	0.100	1337	045	0.41

El balance energético está satisfecho dentro de la precisión de los parámetros dados en la tabla III.

$$Q_g + Q_c + W_p = Q_a + Q_e + Q_r \quad (1)$$

$$39.314\text{kW} + 2.8662\text{kW} + 0.12\text{kW} = 42.3\text{kW}$$

$$20.8\text{kW} + 13.72\text{kW} + 7.1\text{kW} = 41.62\text{kW}$$

$$42.3\text{kW} \approx 41.62\text{kW}$$

(El resultado obtenido del balance energético muestra un relativo equilibrio entre la igualdad)

El cálculo de la energía en cada uno de los elementos se reproduce por diferencia de entalpías de entrada y salida de cada uno de ellos (tabla III).

De la tabla II, en el evaporador del sistema de absorción la energía es Q_e=2.86 kW, y considerando que una tonelada de refrigeración equivale a 3.514kW.

Entonces al convertir el calor del evaporador, se obtiene 0.8149 toneladas de refrigeración, lo cual representa aproximadamente lo que se tiene en un evaporador de un aire acondicionado de ¾ de tonelada de refrigeración. Haciendo la misma comparativa con un enfriador de agua que existe en el mercado (capacidad de enfriamiento de 0.11kW, con una carga de 2 litros de agua a 10°C) [11], el sistema es aproximadamente equivalente a 26 equipos de estos en conjunto, o bien, a 3 refrigeradores de 10 pies cúbicos de enfriamiento. Considerando este como el alcance ideal del sistema en estado estable.

Para mantener una tonelada de refrigeración con un aire acondicionado por compresión tipo ventana, se necesitan 1.2 kW, aproximadamente [11]. En la región de sonora el costo de kW/hr en verano del sector doméstico es de \$2.46 y para el sector doméstico de alto consumo de \$3.00 [15]. La comparativa radica

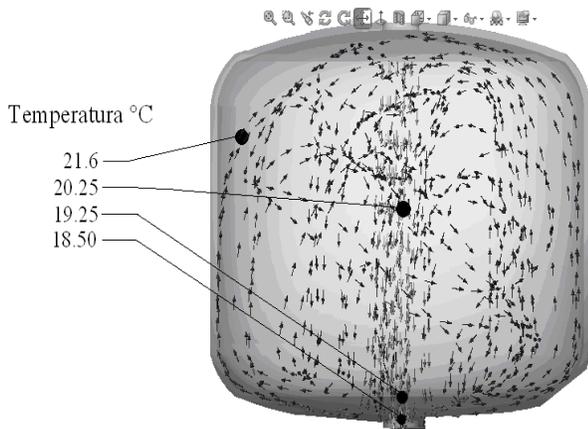


Fig. 9 Trayectoria y temperaturas del fluido en el evaporador [10].

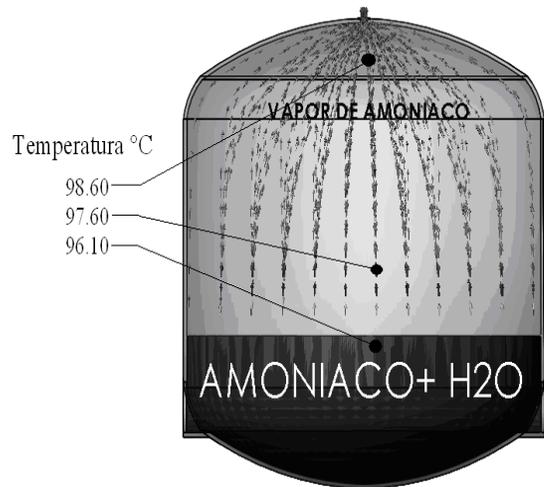


Fig. 11 Trayectorias y temperaturas del fluido en el generador [10].

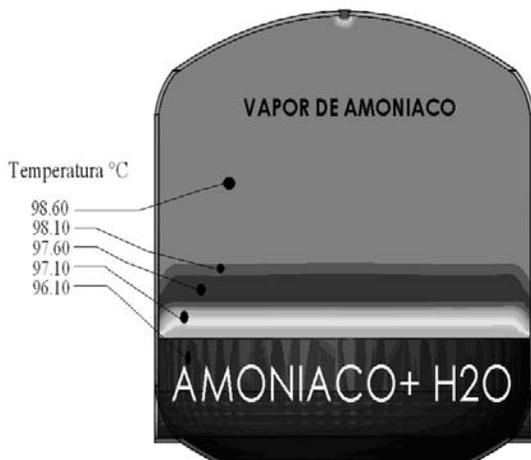


Fig. 10 Espectro de temperaturas del fluido en el generador [10].

en la posibilidad de obtener el mismo beneficio utilizando energía renovable, como lo es la energía térmica solar [24][16][17].

Los resultados para el balance energético del sistema de refrigeración por ciclo de absorción de simple efecto, fueron obtenidos en base al método de la ASHRAE [9], donde se toman algunas de las siguientes consideraciones:

- Sistema en estado permanente, sin cambios de presión, excepto en los reductores de caudal y de la bomba.
- En los puntos 1, 4, 8, 11 y 14 se tiene líquido saturado, en 12 y 13 vapor saturado, ver Tabla III.
- Los reductores de caudal son adiabáticos.
- No hay cambios de entalpía a través de la bomba.
- No hay pérdidas de calor y la mezcla de refrigerante es 50%.

D. Simulación del sistema de refrigeración por ciclo de absorción

El estudio que se hace en el evaporador con resultados de las ecuaciones energéticas [24], es ideal, debido a que se analiza

TABLA IV
INTERVALO DE TEMPERATURAS EN EL EVAPORADOR DEL SISTEMA [10].

Temperaturas en °C	
Paredes del tanque	20.61
Fluido de entrada	20.05
Fluido de salida	18.92

omitiendo ganancias térmicas del ambiente hacia el sistema [18]. Se observa la obtención de los resultados en el evaporador de la simulación [10], para una temperatura ambiente de 35°C y las presiones indicadas, ver intervalos en la tabla IV y el espectro en diferentes puntos del tanque en la figura 9. Lo cual indica que si habrá transferencia de calor en las paredes del mismo, debido a que la temperatura ambiente es mayor.

Para representar el ciclo de enfriamiento por absorción, se necesita aplicar calor al par de trabajo, en este caso amoniaco-agua, en el depósito llamado generador.

El amoniaco se evapora aproximadamente a 96°C, como se ilustra en la Figura 10. El amoniaco se separará de la mezcla debido a que su punto de evaporación es más bajo que el del agua, en la Figura 11, se puede observar las trayectorias y el desprendimiento del amoniaco del agua.

Entonces el amoniaco viaja a través de las tuberías, pasa por el proceso de condensado y después llegue al depósito del evaporador, donde pueda intercambiar calor con el objeto o sustancia a enfriar. En los sistemas de refrigeración por compresión el cambio de fase en el refrigerante se hace por medio de un compresor, cuya energía mecánica tiene un equivalente en energía calorífica para lograr ver mismo efecto, sin dejar de mencionar que el compresor es activado por una fuente de energía eléctrica.

E. Discusión de resultados

El diagrama esquemático del equipo térmico de referencia (Figura 8), presenta 14 puntos de medición debido al efecto regenerativo de los intercambiadores de calor con los valores

numéricos mostrados en la Tabla III. Al desarrollar el ciclo termodinámico para Icyball, se establece un modelo simplificado (Fig. 7) que no considera dicho efecto regenerativo y el análisis se realiza en 6 puntos de medición, cuya cantidad de energía para cada componente se presenta en la Tabla II y el balance energético del sistema se muestra en la ecuación (1).

Con los resultados propios de balance de energía, se sustenta un estudio de simulación por computadora para visualizar las trayectorias, la distribución de temperaturas y presiones del fluido de trabajo en la entrada y salida (generador y evaporador) del equipo térmico. Para definir la fuente de calor, se cuenta con el nivel de energía en el generador, por otro lado, se conocen los parámetros como temperatura y presiones en cada parte del sistema, las cuales servirán para la selección de tubería, válvulas y accesorios de control en el prototipo.

Posteriormente, se realiza un análisis entre el prototipo y equipo comercial de refrigeración existente en el mercado, tomando como base la demanda de energía total requerida para establecer un comparativo, así como la escala y el alcance del equipo térmico propuesto. El resultado es equivalente a un equipo de aire acondicionado de $\frac{3}{4}$ de tonelada de refrigeración.

V. CONCLUSIONES

El balance energético determina la capacidad del sistema y la simulación ayuda a definir los materiales así como sus dimensiones para resistir los esfuerzos a los que estará sometido en el estado permanente.

La comparación energética radica en encontrar la equivalencia de la cantidad de energía que se tiene en el evaporador de un sistema con respecto al otro.

Los sistemas de compresión son activados por medio de una fuente de energía eléctrica, por otro lado, el ciclo de absorción se activa con una fuente de calor, la oportunidad reside en la utilización del recurso renovable de energía térmica solar, cuyo impacto sería directamente en el consumo energía eléctrica, sin descartar el impacto que pudiera llevar a una disminución a la facturación de las mismas.

El presente estudio permitirá desarrollar un modelo funcional (prototipo) para evaluar su desempeño y dimensionar su potencial para cubrir la implementación en conservación de alimentos, o bien, en servicio de climatización en espacios habitables con abastecimiento de energía calorífica de fuente renovable.

Un sistema de enfriamiento por ciclo de absorción puede sustituir a uno por ciclo de compresión, debido a que es técnicamente factible generar un ciclo termodinámico de enfriamiento con una fuente de calor.

Los resultados del método ASHRAE ayudan a determinar una escala dependiendo de la necesidad de enfriamiento que se desee cubrir.

RECONOCIMIENTOS

El balance energético está satisfecho dentro de la precisión dada en la Tabla III [1], proporcionada por Natural Gas-Fired Cooling Technologies and Economics. Editores: Dharam V. Punwani, Dr. William A. Ryan PhD, David C. Kalensky. Donde contribuyeron para la realización de esta investigación: Prof. Keith Herold PhD The University of Maryland, Enrique de los Reyes Energy Systems Design Inc., Lew Arriman Mason-Grant

Consulting, Dharam V. Punwani Avalon Consulting Inc, Dr. William A. Ryan PhD University of Illinois at Chicago.

REFERENCIAS

- [1] http://www.GTI040205_Natural_Gas_Fired_Cooling_Technologies_and_Econ_sm.pdf
- [2] Faires Virgil M., Simmang Clifford M. (1983) Termodinámica, Sexta Edición, Editorial UTEHA, México.
- [3] Cengel Yunus, Boles Michael (2003), Termodinámica, Cuarta Edición, Editorial McGraw-Hill, México.
- [4] Dossat, Roy J. (1990) Principios de Refrigeración, Editorial CECSA, México primera edición.
- [5] Hernandez-Goribar, E. (2005) Fundamentos de Aire Acondicionado y Refrigeración, Editorial LIMUSA, México.
- [6] http://www.ggw.org/cac/IcyBall/Crosley_icyball (15-Sept-2009).
- [7] Luna López, J.L. (2007) "Enfriamiento por calor: Desarrollo del ciclo de enfriamiento en IcyBall mediante adaptación de un Condensador-Absorbedor" ITSON, Tesis de licenciatura, México.
- [8] <http://www.caloryfrio.com> (15-Sept-2009).
- [9] ASHRAE, Fundamentals handbook, SI edition, Thermodynamics and Refrigeration Cycles, 2005.
- [10] Solid Works 2008 (Paquete de software con post-procesador COSMOSFloWorks 2008).
- [11] www.reacsa.com.mx/pdf/enfriadores-agua/enfriadores-crt.p15 (15-Sept-2009).
- [12] www.fisicanet.com.ar/fisica/termodinamica/ap07_ciclos_termicos.php, octubre de 2009.
- [13] www.northeastchp.org .Imagen del ciclo de efecto simple de absorción. Fecha de consulta: Marzo de 2010.
- [14] ASHRAE, Fundamentals handbook, SI edition 2005, Thermophysical Properties of Refrigerants, 2005.
- [15] www.cfe.gob.mx/casa/ConocerTarifa/Paginas/Conocetutarifa.aspx, Junio 2010.
- [16] Development of a Simple Intermittent Absorption Solar Refrigeration System, J. K. Tangka and N. E. Kamnang, Department of Agricultural Engineering, University of Dschang, Cameroon, Africa, 2003.
- [17] Direct Expansion Solar Absorption Chiller Cooled by Air, Mahmoud Bourouis, Alberto Coronas, CREVER - Universitat Rovira i Virgili. Autovia de Salou, s/n. 43006, Tarragona (España), 2006.
- [18] Computer Simulation Optimization of Ammonia-Water Absorption Refrigeration System, Da-wen-sun, Department of Agricultural and food Engineering, University College Dublin, National University of Ireland, 1996.
- [19] Energy Analisis of an Ammonia-Water Absorption Refrigeration System, Ibrahim Dincer, Sadik Dost, Department of mechanical Engineering, University of Victoria, British Columbia, Canada, 1995.
- [20] www.bibing.us.es. Listado de marcas y capacidades de equipos de enfriamiento por ciclo de absorción..
- [21] www.coolmaxbar.com . Refrigeradores de 20 a 50 litros. Fecha de consulta: Abril de 2010.
- [22] Pilatowsky, I., Tanner, W., Haberd, F. and Obermair, F., Proyecto Sonntlan: "Investigación Aplicada y Desarrollo Tecnológico para la Utilización de la Energía Solar Parte II. Casas Solares Mexicali", en 1992.
- [23] ["Investigación y desarrollo tecnológico sobre bombas de calor en México operando con energía geotérmica", Alfonso García Gutiérrez, Rosa María Barragán Reyes y Victor Manuel Arellano Gómez. Publicado, en 2007.
- [24] Refrigeración solar en la edificación: presente y futuro, Universidad Internacional de Andalucía. Jornadas de calidad energética y medioambiental en edificios. La calidad de instalaciones térmicas: máquinas de absorción. Baeza 15/03/2004, Marcelo Izquierdo Millán.
- [25] Instalaciones de refrigeración solar por absorción: análisis y simulación dinámica, Xavier García Calals, Universidad Pontificia Comillas, ETSII del ICAI, Departamento de Fluidos y Calor, Madrid, España, en 2004.

NOMENCLATURA

- h** entalpia kJ/kg .
m Flujo masico,kg/s.
P Presión en kPa.
Q potencia en kW.
T Temperatura, °C .

X Concentración de Refrigerante en solución, kg/kg.
W_{hp} Trabajo de Bomba en kW.

Subíndices

a Absorbedor.
e Evaporador.
g Generador.
c Condensador.
r Rectificador.
1-15 Puntos.



Damián Ulises Mireles Juárez nació el 20 de octubre de 1983, en Guaymas, Sonora Mexico. Egresado del Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON), como Ingeniero Electricista en 2006. Actualmente Pasante de Maestría en Ciencias de la Energía: opción Energía eléctrica. El labora como docente auxiliar en ITSON en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, en Ciudad Obregón, Sonora, México. dakme24@hotmail.com.



Manuel Herrera Sarellano egresó de la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco en 1990 como Ingeniero Mecánico, obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Sistemas de Manufactura del ITESM-CEM en cooperación con The University of Texas at Austin en 1994. Realizó estudios de Doctorado en Ingeniería de Manufactura en The University of Nottingham, UK (candidato PhD). De 1990 a 1993 laboró en la División de Graduados e Investigación del ITESM-CEM en el Área de Manufactura Flexible. De 1994 hasta Abril 2009 se desempeñó como Profesor de Tiempo Completo del Instituto Tecnológico de Sonora en el Departamento de Ingeniería Industrial Área de Manufactura. Desde Abril 2009 a la fecha colabora en el Área Mecánica del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la misma Institución. mherrera@itson.mx, manuel.herrera@itson.edu.mx.



Ismael Murillo Verduzco egresó de la Universidad Autónoma de Nuevo León en 1989 como Ingeniero Mecánico Electricista, obtuvo el grado de Maestro en Ingeniería en el Área Mecánica de la Universidad Nacional Autónoma de México el 2 de julio de 2004. Desde 1991 hasta la fecha se ha desempeñado como Profesor de Tiempo Completo del Instituto Tecnológico de Sonora en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. imurillo@itson.mx, Ismael.murillo@itson.edu.mx.



Rafael León Velázquez egresó de la Universidad Autónoma de Nuevo León en 1988 como Ingeniero Mecánico Electricista, obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Autónoma de Nuevo León en julio de 1997. Desde 1989 hasta la fecha se ha desempeñado como Profesor de Tiempo Completo del Instituto Tecnológico de Sonora en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. rleon@itson.mx, rafael.leon@itson.edu.mx.



Gilberto Oroz Galaviz egresó del Instituto Tecnológico de Culiacán en 1990 como Ingeniero Industrial Mecánico, obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Sistemas de Manufactura del ITESM-CEM en 2000. De 2000 a 2002 laboró como Profesor Interino del departamento de Ingeniería Industrial de ITSON. Desde 2002 hasta la fecha se ha desempeñado como Profesor de Tiempo Completo del Instituto Tecnológico de Sonora en el Departamento de Ingeniería Industrial. goroz@itson.mx, gilberto.oroz@itson.edu.mx

Estudio del Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia Perturbar y Observar

Ruiz C. Luis J., Beristáin J. José A., Sosa T. Ian M. y Hernández L. Jesús H.

Study of the maximum power point tracking algorithm perturb and observe

Abstract— This paper studies the Perturb and Observe algorithm for Photovoltaic Maximum Power Point Tracker Systems.

A boost converter is used operating in Continuous Conduction Mode as a power stage, and a DSC (Digital Signal Controller) is used for the algorithm implementation.

The working parameters of the algorithm were modified in order to analyze its behavior taking in account its convergence toward the MPP and its oscillation in steady state.

It is proposed a modification on the algorithm in order to minimize the convergence time while maintaining a small oscillation in steady state.

Experimental results show how the variations of working parameters such as width of perturbation of the algorithm has an effect on the convergence time toward the MPP and in the steady state oscillation. Furthermore, as the modification was realized, it's observed an enhancement in the convergence time and in the steady state oscillation.

Keywords— MPPT, P&O, width of perturbation, DSC, converter.

Resumen— En este artículo se realiza un estudio del algoritmo perturbar y observar para el seguimiento del punto de máxima potencia de sistemas fotovoltaicos.

Se utiliza un convertidor elevador operando en modo de conducción continuo como etapa de potencia y un controlador digital de señales para la implementación del algoritmo de seguimiento.

Se realizan variaciones a los parámetros de funcionamiento del algoritmo para analizar su comportamiento en cuanto al tiempo de convergencia hacia el máximo punto de potencia y su oscilación en estado estable.

Se propone un cambio en el algoritmo perturbar y observar para disminuir el tiempo de convergencia al punto de máxima potencia conservando una oscilación en estado estable pequeña.

Los resultados experimentales muestran cómo la variación del tamaño de la perturbación en el ciclo de trabajo influye en el tiempo de convergencia al punto de máxima potencia y en la oscilación en

estado estable. Así mismo, con el cambio propuesto, se observa una mejora sustancial en el tiempo de convergencia y en la disminución de la oscilación alrededor del punto de máxima potencia.

Palabras clave— MPPT, P&O, tamaño de perturbación, DSC, convertidor.

I. INTRODUCCIÓN

El sol es considerado una de las fuentes de energía más prometedoras, pues se considera una fuente inagotable, debido a esto las tecnologías de aprovechamiento de energía solar han tenido un gran auge en el mercado, donde la tecnología que mayor ha impactado es la fotovoltaica, la cual convierte directamente la energía solar en electricidad [1].

Las celdas fotovoltaicas tienen curvas características $V-I$ que definen el comportamiento de las mismas ante diferentes condiciones de operación. La potencia de una celda solar está dada por el producto de la corriente y el voltaje de la misma. El punto de máxima potencia (MPP, Maximum Power Point) es el producto del voltaje en el punto máximo (V_{MPP}) y corriente en el punto máximo (I_{MPP}) para los cuales la potencia extraída del arreglo fotovoltaico es máxima (P_{MPP}). El punto de máxima potencia varía continuamente, pues depende de factores como la temperatura de la celda solar y de las condiciones de irradiancia [2].

Los algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) se utilizan en sistemas fotovoltaicos para maximizar la energía entregada por los mismos, dicho seguimiento se realiza básicamente variando el valor de ciclo útil de un convertidor de potencia. Existen gran variedad de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia como se muestra en [3], como por ejemplo: perturbar y observar, basados en lógica difusa, basados en redes neuronales artificiales, RCC (Ripple Correlation Control) [4], conductancia incremental (INC) [5,6,7] entre otros. Estos algoritmos varían en su complejidad, su velocidad de convergencia al punto de máxima potencia, los sensores utilizados, su costo, su efectividad y otros aspectos.

El algoritmo perturbar y observar (P&O) es muy utilizado debido a su simplicidad de funcionamiento [8], éste consiste en modificar el ciclo útil de un convertidor de potencia conectado a la salida del arreglo fotovoltaico, con el cambio del ciclo útil se modifica la corriente extraída del arreglo fotovoltaico, por lo consiguiente la potencia obtenida se modifica en relación a la modificación del ciclo útil de la señal de disparo del convertidor de potencia.

Manuscrito recibido el 4 de Agosto de 2009. Este trabajo fue respaldado por el departamento de Ing. Eléctrica y Electrónica del Instituto Tecnológico de Sonora. Este trabajo se realizó bajo el apoyo del Programa de Fomento y Apoyo a Proyectos de Investigación (PROFAP) y del Programa del Mejoramiento del Profesorado (PROMEP).

Ruiz C. Luis Jorge estudiante de la carrera de Ingeniero en Electrónica del Instituto Tecnológico de Sonora, actualmente se encuentra desarrollando su trabajo de titulación. Tel. Cel. (644) 1437422, e-mail: jorgeruiz.c@gmail.com

Beristáin J. José Antonio, Sosa T. Ian M. y Hernández L. Jesús H., se desempeñan como profesores del Instituto Tecnológico de Sonora en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica; Ave. Antonio Caso S/N Col. Villa ITSON; Ciudad Obregón, Sonora, México; C.P. 85000; Tel: (644) 4109001, ext. 230, Fax: (644) 4109001; e-mail: bantonio@itson.mx, isosa@itson.mx, jehdez@itson.mx.

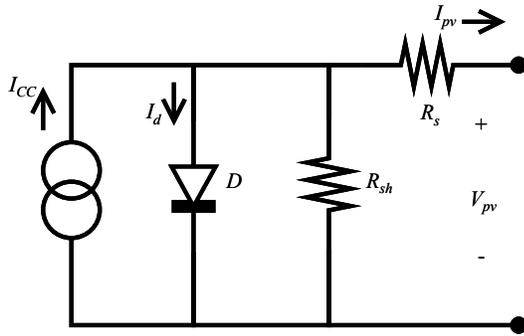


Fig. 1 Modelo de una celda fotovoltaica.

La implementación de los algoritmos de seguimiento puede ser analógica o digital dependiendo de cuál se quiera utilizar. La implementación digital ofrece flexibilidad al momento de realizar variaciones en los parámetros de funcionamiento sin modificación del hardware.

El objetivo de este trabajo es realizar un estudio del algoritmo de seguimiento de punto de máxima potencia perturbar y observar utilizando un controlador digital de señales (DSC) que tenga la flexibilidad de probar cualquiera de los algoritmos mencionados sin la modificación del hardware. Así mismo, se propone una solución para obtener rapidez de convergencia y una oscilación en el punto de máxima potencia pequeña.

II. FUNCIONAMIENTO DE UNA CELDA SOLAR

La figura 1 muestra el circuito eléctrico equivalente de una celda fotovoltaica, se observa que está constituida por una fuente de corriente, I_{CC} , que representa la corriente generada por la radiación solar, un diodo y dos resistencias, R_s en serie y R_{sh} en paralelo. R_s representa las pérdidas debidas a contactos y conexiones y R_{sh} representa la corriente de fuga del diodo [7, 9].

La ecuación característica de una celda solar se muestra en (1). Donde k es la constante de Boltzman, T es la temperatura absoluta, I_0 es la corriente de saturación inversa del diodo, q es la carga del electrón y n es el factor de idealidad del diodo.

$$I_{pv} = I_{CC} - I_0 \left(e^{\frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

Para obtener un voltaje y corriente apropiados para diferentes aplicaciones se interconectan varias celdas solares en serie-paralelo para formar un módulo fotovoltaico, a su vez estos pueden interconectarse entre sí para formar lo que se conoce como un arreglo fotovoltaico [1].

La figura 2 muestra las curvas características de una celda fotovoltaica, se observa, en la curva de potencia, la existencia de un máximo denominado máximo punto de potencia (MPP) al cual le corresponden valores de corriente en el punto de máxima potencia I_{MPP} y de voltaje en el punto de máxima potencia V_{MPP} , dicho punto es único para cada celda solar y varía conforme cambia la irradiancia solar como se muestra en la figura 3. Ésta variación plantea la necesidad de realizar un algoritmo capaz de modificar V_{pv} de manera tal que la energía aprovechada sea la máxima.

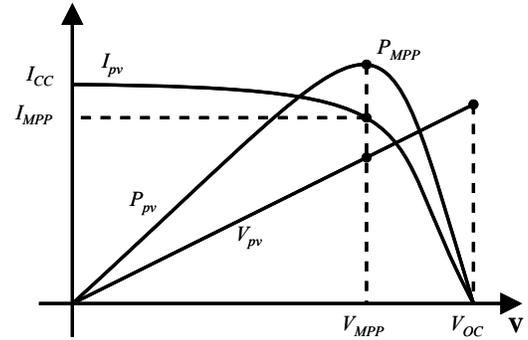


Fig. 2 Gráficas de corriente, potencia y voltaje de una celda fotovoltaica.

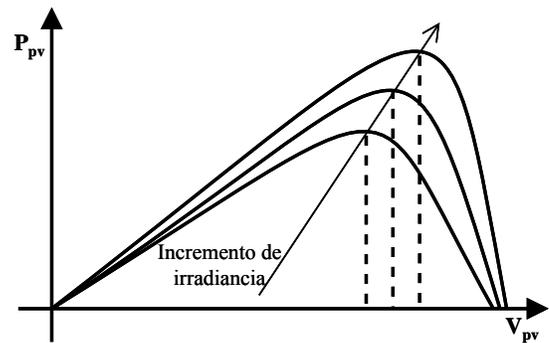


Fig. 3 Gráfica P-V normalizada.

III. ALGORITMO PERTURBAR Y OBSERVAR (P&O)

El algoritmo perturbar y observar se basa en el siguiente criterio: si el voltaje de operación, V_{pv} , del arreglo fotovoltaico se perturba en cierta dirección y la potencia extraída del mismo se incrementa significa que el punto de operación se ha movido hacia el MPP, por consiguiente el voltaje de operación deberá perturbarse en la misma dirección, de otra forma si la potencia extraída del arreglo fotovoltaico disminuye, el punto de operación se ha movido en dirección opuesta de la ubicación del MPP, por consiguiente el voltaje de operación deberá ser perturbado en dirección contraria a la que se tenía [6, 8, 9].

En la figura 4 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo perturbar y observar utilizado en este trabajo, donde $pact$ es la potencia medida, $pant$ es la potencia anterior, $pert$ es una variable binaria que indica la dirección de la perturbación, $step$ es el tamaño de la perturbación y pwm es el valor de ciclo útil utilizado para variar el voltaje del arreglo fotovoltaico, el algoritmo compara la potencia actual con la anterior y con base en ello determina si se sigue aplicando la misma perturbación o se deberá invertir en el siguiente ciclo.

IV. ANÁLISIS TRANSITORIO

Se utiliza un convertidor elevador para modificar la potencia a la salida de los paneles fotovoltaicos. Éste se conecta entre los paneles y el banco de baterías.

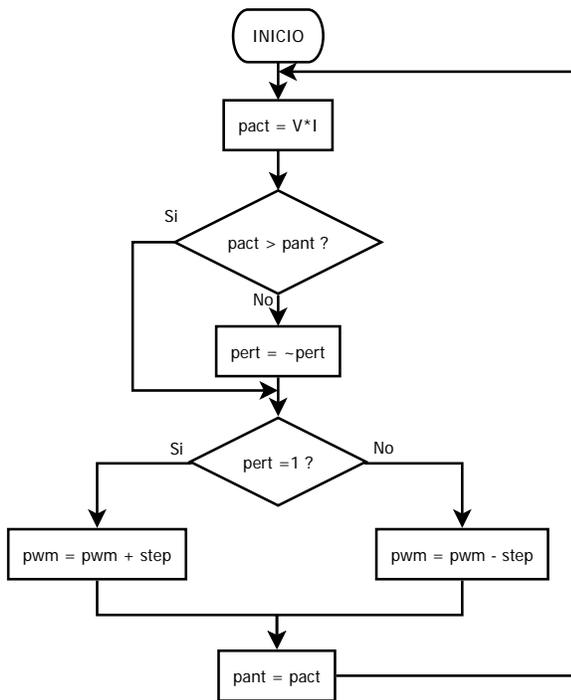


Fig. 4 Algoritmo Perturbar y Observar

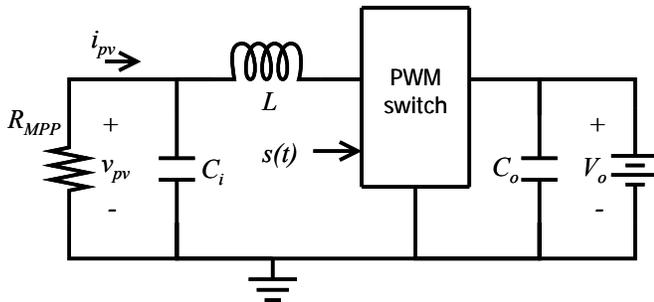


Fig. 5 Modelo del convertidor elevador.

Acorde con [8, 10] la función de transferencia de un convertidor boost conectado a baterías, como el mostrado en la figura 5 se plantea a continuación.

Utilizando métodos de análisis de circuitos se obtienen las ecuaciones de estado del convertidor elevador operando en modo de conducción continuo y utilizando la función de conmutación $s(t)$:

$$\begin{aligned} \dot{i}_L &= \frac{V_{C_i}}{L} - \frac{s(t)V_o}{L} \\ \dot{V}_{C_i} &= -\frac{V_{C_i}}{R_{MPP}C_i} - \frac{i_L}{C_i} \\ V_{C_i} &= -V_{pv} \end{aligned} \quad (2)$$

Donde:

$$s(t) \in \{0,1\} \quad (3)$$

Aplicando el operador de promediado (4) a todas las variables del sistema, se puede expresar (2) de forma matricial como (5):

$$\hat{f}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}V_o \\ V_{pv} &= \mathbf{C}\mathbf{x} \end{aligned} \quad (5)$$

En donde:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_L \\ V_{C_i} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C_i} & -\frac{1}{R_{MPP}C_i} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{d(t)}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{C} = [0 \quad -1] \quad (9)$$

Para separar el análisis de señal pequeña del de estado estable del convertidor, se supone que las variables sufren perturbaciones en torno al punto de operación de régimen permanente. El sistema perturbado es:

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \mathbf{X} + \tilde{\mathbf{x}} \\ v_o &= V_o + \tilde{v}_o \\ v_{pv} &= V_{MPP} + \tilde{v}_{pv} \\ d &= D + \tilde{d} \end{aligned} \quad (10)$$

Si los productos de los términos en señal pequeña son omitidos y el voltaje de salida se supone constante.

$$\tilde{v}_o = 0 \quad (11)$$

El modelo en señal pequeña queda:

$$\begin{aligned} \tilde{\dot{\mathbf{x}}} &= \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{B}V_o \\ \tilde{v}_{pv} &= \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}} \end{aligned} \quad (12)$$

Aplicando la transformada de Laplace y resolviendo para $\tilde{v}_{pv}(s)$ se obtiene:

$$\tilde{v}_{pv}(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B}V_o \quad (13)$$

Resolviendo las matrices se obtiene la FDT:

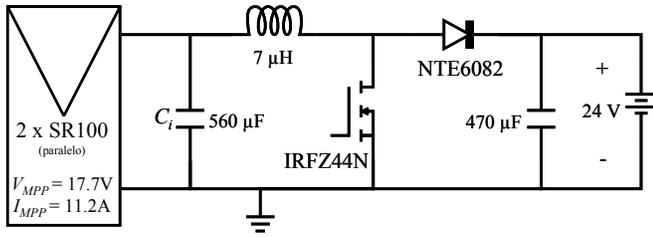


Fig. 6 Convertidor elevador propuesto.

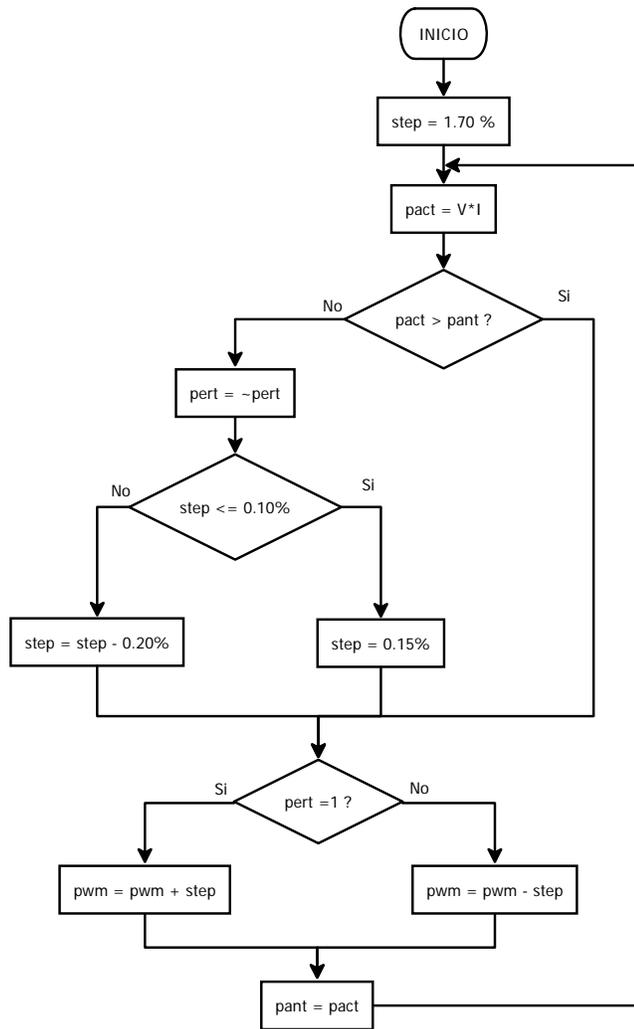


Fig. 7 Modificación al algoritmo P&O.

$$\tilde{v}_{pv}(s) = \frac{-\tilde{d}(s)V_o}{LC_i} \frac{1}{s^2 + s \frac{1}{R_{MPP}C_i} + \frac{1}{LC_i}} \quad (14)$$

Que se puede expresar como:

$$\frac{\tilde{v}_{pv}(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (15)$$

Con $k = -V_o$, $\omega_n = 1/\sqrt{LC_i}$, $\zeta = 1/(2R_{MPP})\sqrt{L/C_i}$ y $R_{MPP} = V_{MPP}/I_{MPP}$ notando que R_{MPP} depende de los valores de irradiancia.

Se propone un periodo de muestreo mayor a un tiempo de asentamiento del 5%, que se muestra en (16) [11]:

$$T_{0.05} = \frac{3}{\zeta \cdot \omega_n} \quad (16)$$

Simplificando (16) se obtiene (17):

$$T_{0.05} = 6 \cdot \frac{V_{MPP}}{I_{MPP}} \cdot C_i \quad (17)$$

V. DESARROLLO DEL SISTEMA PROPUESTO

La implementación del sistema de seguimiento del punto de máxima potencia se lleva a cabo mediante el convertidor elevador mostrado en la figura 6, se utilizan dos módulos fotovoltaicos SR100 conectados en paralelo y un banco de baterías de 24V. El convertidor se diseña para operar en modo de conducción continuo, se utiliza un sensor de corriente de efecto Hall y un divisor resistivo para el sensado de las señales I_{pv} y V_{pv} utilizadas en el algoritmo.

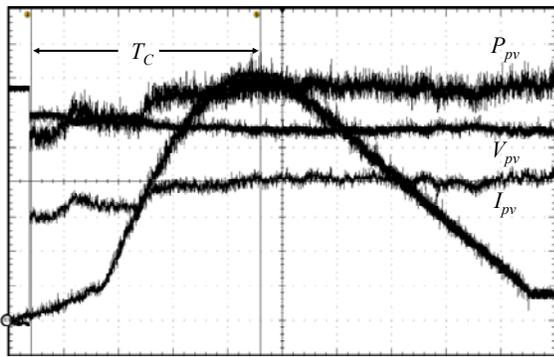
Para realizar el cálculo para el periodo de muestreo se utilizan los valores mostrados en la figura 7 y se sustituyen en (17), se obtiene que el periodo de muestreo debe ser mayor a 5.31 ms, por lo que se propone un periodo de muestreo 8 ms.

Considerando un valor menor al máximo voltaje del arreglo fotovoltaico (V_{OC}) igual a 19 V y un voltaje de baterías máximo de $V_{Bat} = 26$ V cuando están plenamente cargadas, se establece un ciclo útil, d , inicial del convertidor elevador. Este valor se obtiene tomando en cuenta que en un convertidor elevador $V_f = V_o(1-d)$ de donde se obtiene que $d \geq 0.27$. Para los experimentos que se presentan en este artículo se utilizó un ciclo de trabajo inicial de 0.35.

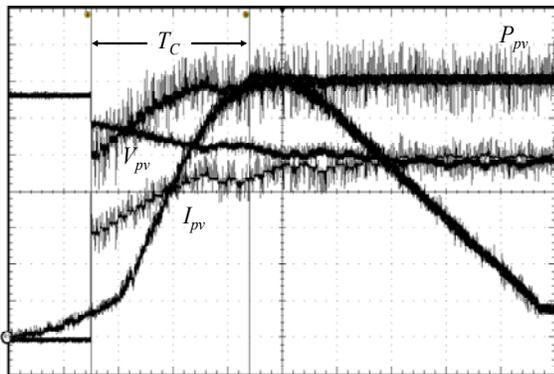
Se propone un cambio al algoritmo presentado en [8] que realiza una mejora sustancial en el tiempo de convergencia al punto de máxima potencia y al mismo tiempo disminuye la oscilación en estado estable ya que se utiliza un tamaño de perturbación variable que se reduce conforme el algoritmo ubica el MPP. El diagrama de flujo con la modificación propuesta se presenta en la figura 7.

VI. PRUEBAS Y RESULTADOS

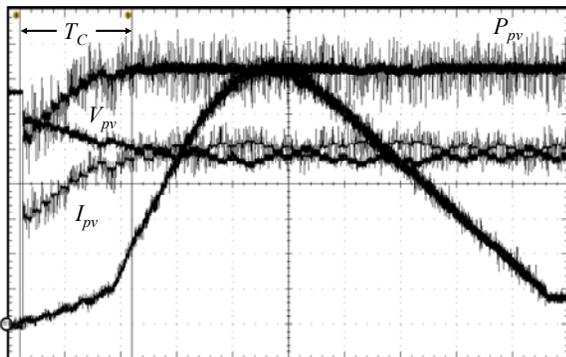
Se realizaron pruebas al prototipo utilizando el algoritmo perturbar y observar propuesto implementado en un DSC dsPIC30F2020, el cual posee un módulo PWM de alta velocidad y alta resolución para fuentes de alimentación conmutadas y un módulo ADC de diez bits de resolución con capacidad de muestrear hasta cuatro canales de manera simultánea. El diagrama de flujo del programa se muestra en el apéndice, se utilizaron diferentes tamaños de paso en la perturbación para comprobar su comportamiento en cuanto al tiempo de convergencia hacia el MPP y su oscilación en estado estable.



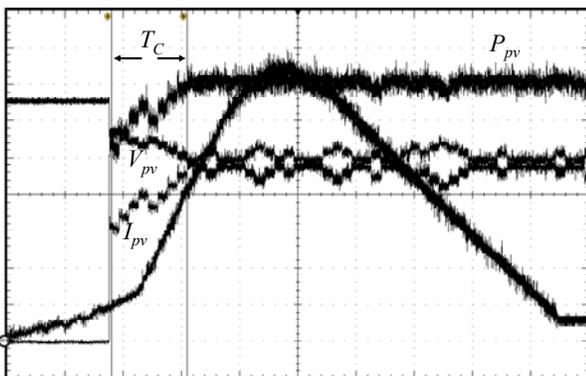
(a) $T_C = 8.4$ s, $step = 0.10$ %, $V_{pv} = 3$ V/div, $I_{pv} = 1$ A/div, $P_{pv} = 10$ W/div, $Caracterización = 10$ W/div, $horizontal = 2$ s/div.



(b) $T_C = 145$ ms, $step = 0.86$ %, $V_{pv} = 3$ V/div, $I_{pv} = 1$ A/div, $P_{pv} = 10$ W/div, $Caracterización = 10$ W/div, $horizontal = 50$ ms/div.



(c) $T_C = 100$ ms, $step = 1.29$ %, $V_{pv} = 3$ V/div, $I_{pv} = 1$ A/div, $P_{pv} = 10$ W/div, $Caracterización = 10$ W/div, $horizontal = 50$ ms/div.



(d) $T_C = 65$ ms, $step = 2.15$ %, $V_{pv} = 3$ V/div, $I_{pv} = 1$ A/div, $P_{pv} = 10$ W/div, $Caracterización = 10$ W/div, $horizontal = 50$ ms/div.

Fig. 8 Tiempo de convergencia al MPP con diferentes tamaños de perturbación:

(a) 0.10%, (b) 0.86%, (c) 1.29%, (d) 2.15%.

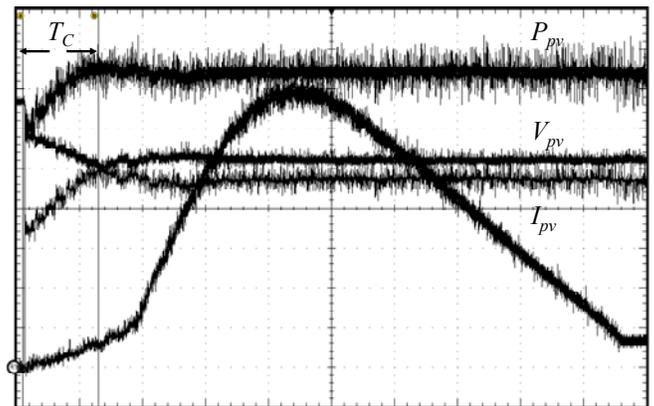
Datos obtenidos con osciloscopio digital Tektronix DPO7104.

TABLA I
TIEMPO DE CONVERGENCIA AL MPP VS TAMAÑO DE PERTURBACIÓN

Tamaño de perturbación	Tiempo de convergencia
0.10 %	8.4 s
0.86 %	145 ms
1.29 %	100 ms
2.15 %	65 ms

TABLA II
OSCILACIÓN EN EL MPP VS TAMAÑO DE PERTURBACIÓN

Tamaño de perturbación	Oscilación en el MPP
0.10 %	No perceptible a CD
0.86 %	No perceptible a CD
1.29 %	6 W
2.15 %	6 W



$T_C = 60$ ms, $\Delta P_{pv} =$ No perceptible a CD,
 $V_{pv} = 3$ V/div, $I_{pv} = 1$ A/div, $P_{pv} = 10$ W/div,
 $Caracterización = 10$ W/div, $horizontal = 50$ ms/div.

Fig. 9 Tiempo de convergencia y oscilación en estado estable para algoritmo modificado.

La figura 8 muestra el tiempo de convergencia hacia el MPP con un tamaño de perturbación de 0.1, 0.16, 0.21 y 0.27% respectivamente y sus resultados se resumen en la tabla I.

En la tabla I se observa cómo incrementando el tamaño de la perturbación el tiempo de convergencia disminuye haciendo que se localice el MPP de una manera más rápida.

En la figura 9 se observa el tiempo de convergencia y la oscilación del algoritmo presentado en la figura 7.

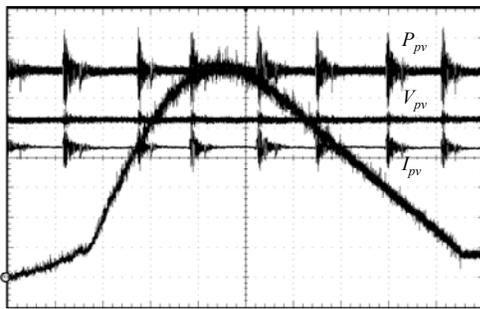
La figura 10 muestra la oscilación de la curva de potencia en estado estable en el MPP con un tamaño de perturbación de 0.1, 0.16, 0.21, y 0.27% respectivamente y sus resultados se resumen en la tabla II.

La tabla II muestra que a mayor tamaño de perturbación existirá un menor aprovechamiento de la energía disponible, dada una mayor oscilación en las cercanías del MPP.

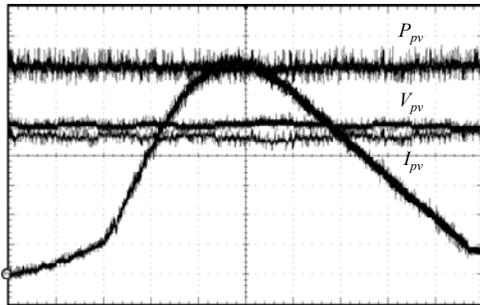
VII. CONCLUSIONES

En este trabajo se realiza un estudio del efecto de variar el tamaño de la perturbación observándose las siguientes relaciones:

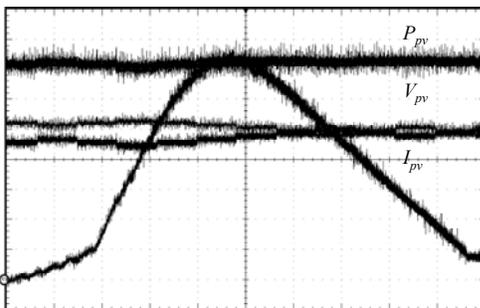
- El tiempo de convergencia al MPP es inversamente proporcional al tamaño de perturbación
- La oscilación de potencia alrededor del MPP es directamente proporcional al tamaño de perturbación.

(a) $\Delta P_{pv} = \text{no perceptible a CD, step} = 0.10 \%$

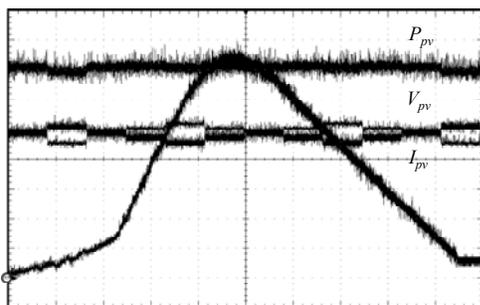
$V_{pv} = 3 \text{ V/div}$, $I_{pv} = 1 \text{ A/div}$, $P_{pv} = 10 \text{ W/div}$, Caracterización = 10 W/div , horizontal = 20 ms/div .

(b) $\Delta P_{pv} = \text{no perceptible a CD, step} = 0.86 \%$

$V_{pv} = 3 \text{ V/div}$, $I_{pv} = 1 \text{ A/div}$, $P_{pv} = 10 \text{ W/div}$, Caracterización = 10 W/div , horizontal = 10 ms/div .

(c) $\Delta P_{pv} = 6 \text{ W, step} = 1.29 \%$

$V_{pv} = 3 \text{ V/div}$, $I_{pv} = 1 \text{ A/div}$, $P_{pv} = 10 \text{ W/div}$, Caracterización = 10 W/div , horizontal = 10 ms/div .

(d) $\Delta P_{pv} = 6 \text{ W, step} = 2.15 \%$

$V_{pv} = 3 \text{ V/div}$, $I_{pv} = 1 \text{ A/div}$, $P_{pv} = 10 \text{ W/div}$, Caracterización = 10 W/div , horizontal = 10 ms/div .

Fig. 10 Comportamiento en estado estable con diferentes tamaños de paso:

(a) 0.10%, (b) 0.86%, (c) 1.29%, (d) 2.15%.

Datos obtenidos con osciloscopio digital Tektronix DPO7104.

Se realiza la propuesta de modificación al algoritmo perturbar y observar mostrado en la figura 7, la cual permite obtener un tiempo de convergencia al MPP y una oscilación alrededor del MPP optimizada para obtener un mayor

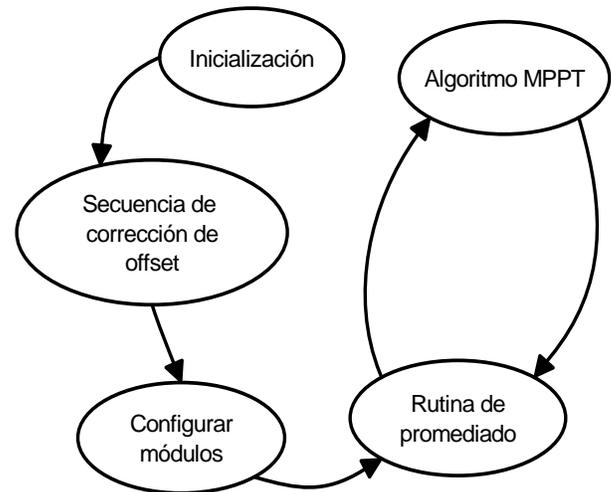


Fig. 11 Diagrama de estados para la implementación del sistema.

aprovechamiento de la energía generada por el arreglo fotovoltaico.

Se puede destacar que para su uso en condiciones de rápido cambio de irradiancia, es preferible un tiempo de convergencia muy pequeño a pesar de un aprovechamiento menor de energía en estado estable, sin embargo para regiones cuyas condiciones ambientales permanezcan relativamente constantes durante el día es preferible una menor oscilación en el MPP a pesar de mantener un tiempo de convergencia elevado.

APÉNDICE

En la figura 11 se muestra el diagrama de estados utilizado en el DSC para llevar a cabo este trabajo.

El proceso consiste en inicializar el DSC con las variables y constantes necesarias, se realiza una secuencia de corrección de offset necesario para la utilización de un sensor de corriente de efecto Hall (ACS755), posteriormente se configura el módulo PWM, el ADC y los temporizadores para realizar una rutina de promediado y aplicar el algoritmo P&O cada 4 ms.

REFERENCIAS

- [1] Rashid Muhammad H. and Lana Char "Solar Power Conversion" *Power Electronics Handbook*, Capítulo 26, pp. 661 – 672, Academic Press, Segunda edición, 2007.
- [2] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo and M. Vitelli "Optimizing Duty-cycle Perturbation of P&O MPPT Techinque" *Power Electronics Especialists Conference, 2004. PESC 2004. 35th Annual. vol. 3*, pp 1939 – 1944, 20 – 25 Junio 2004.
- [3] Trishan ESRAM and Patrick L. Chapman "Comparision of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking techniques", *IEEE Transactions on energy conversion*, vol 22 (2), Junio de 2007.
- [4] Trisham ESRAM, Jonathan Kimball, Phillip T. Krein, Patric L. Chapman and Pallab Midya "Dynamic Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Arrays Using Ripple Correlation Control" *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21 (5), Septiembre 2006.
- [5] Chad Alberts, Justin Brown, Rpbert Button, Anna Flower and Srinivasa Vemuru "Solar Array Peak Power Tracker", *American Socierty*, 31 Marzo de 2006 – 1 Abril 2006.
- [6] Dezso Sera, Tamas Kerekes, Remus Teodorescu and Frede Blaabjerg "Improved MPPT algorithms for rapidly changing environmental conditions", *Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. EPE-PEMC 2006*, pp 1614 – 1619, 12th International. 30 Agosto 2006 – 1 Septiembre 2006.
- [7] J. Kouta, A. El-Ali, N. Moubayed, and R. Outlib "Improving the incremental conductance control method of a solar energy conversion

system”, *International Conference on Renewable Energy and Power Quality (ICREPO'08)*, Santander, Spain, March 12-14 2008.

- [8] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo and M. Vitelli “Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20 (4), pp 963 – 973, Julio 2005.
- [9] Joe-Air Jiang, Tsong-Liang Huang, Ying-Tung Hsiao and Chia-Hong Chen “Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Power Systems”, *Tamkang Journal Science and Engineering*, vol. 8, pp. 147 – 153, 2005.
- [10] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo and M. Vitelli “Optimizing sampling rate Perturbation of P&O MPPT Techinque” *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 2004. 35th Annual*. vol. 3, pp 1945 – 1949, 20 – 25 Junio 2004.
- [11] Katsuhiko Ogata “Análisis de la Respuesta Transitoria” *Ingeniería de Control Moderna, Capítulo 4*, pp. 134 – 210, Prentice Hall, Tercera edición, 1998.



Ruiz C. Luis J. nació en Uruapan, Michoacán en Agosto de 1986. El es estudiante de la carrera de Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de Sonora, actualmente se encuentra desarrollando su trabajo de titulación.



Beristáin J. José A. obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), y el grado de Doctor por la Universidad Politécnica de Cataluña, actualmente labora en el Instituto Tecnológico de Sonora como Maestro-Investigador de tiempo completo.



Sosa T. Ian M. nació en Tampico, Tamaulipas en Noviembre de 1982, obtuvo el grado de Ingeniero en Electrónica en el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON) y el grado de Maestro en Ciencias en la Universidad Estatal de Arizona (ASU), actualmente se desempeña como Profesor-Investigador en el Instituto Tecnológico de Sonora.



Hernández L. Jesús H. obtuvo el grado de Doctor en Ciencias con especialidad en Ingeniería Eléctrica en el año 2008 en el Centro de Investigación y Estudios Avanzados (CINVESTAV) del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Guadalajara. Actualmente se desempeña como Profesor-Investigador en el Instituto Tecnológico de Sonora. Sus áreas de interés son: Análisis y control de sistemas eléctricos de potencia, calidad de la energía eléctrica y aprovechamiento de

energía solar.



RIEE&C

Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación

**AGRADECE AL GRUPO DE REVISORES QUE COLABORARON
EN LA PRESENTE EDICIÓN**

**Adolfo Soto Cota
Alma Delia Cota Espericueta
Eduardo Romero Aguirre
Germán Eduardo Dévora Isiordia
Isaac Pilatowsky Figueroa
Isidro Ignacio Lázaro Castillo
Ismael Murillo Verduzco
Jesús Perfecto Xamán Villaseñor
José Manuel Campoy Salguero
Juan Carlos Murrieta Lee
Juan José Padilla Ybarra
Luciano Armando Cervantes
Luis Eduardo Ugalde Caballero
Luis Villaseñor González
Pedro Bañuelos Sánchez
Rafael Sánchez Lara
Rodrigo Montiel Uribe
Salvador Ramírez Zavala**



RIEE&C

Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación

INVITACIÓN A FORMAR PARTE DEL COMITÉ REVISOR

El Instituto Tecnológico de Sonora a través del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica pone en marcha la Revista RIEE&C (ISSN: 1870-9532) con el fin de coadyuvar a la difusión científica y cultural en el país en las áreas de Electrónica, Eléctrica y Sistemas Computacionales. RIEE&C es un espacio donde se pueden publicar resultados científicos y de desarrollo tecnológico tanto para investigadores como para estudiantes de nivel superior.

En esta revista se publican artículos de investigación con resultados originales y deseamos que dichos artículos estén sujetos a un estricto arbitraje realizado por investigadores líderes en su especialidad, adscritos a instituciones nacionales y extranjeras. Lo anterior con el objetivo de ser incluida en el índice de revistas reconocidas por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT.

Por lo anterior le hacemos una cordial invitación para que forme parte del grupo de revisores de la revista RIEE&C. En busca de indexarse, RIEE&C crea un expediente de cada uno de sus revisores, por lo que en caso de aceptar la invitación, se le solicita envíe su currículum vitae así como una copia de la cédula profesional o copia del título del máximo grado académico obtenido. Es importante que su currículum contenga datos como:

- Número de cédula profesional.
- Grado académico.
- Áreas de interés.
- Centro de trabajo.

Estos datos deberán ser enviados a la dirección de correo electrónico rieecandc@itson.mx. También le invitamos a conocer nuestra página electrónica en la dirección <http://www.itson.mx/rieecandc>.

Atentamente

José Antonio Beristáin Jiménez
Editor en Jefe de la RIEE&C
Instituto Tecnológico de Sonora
Departamento de Ing. Eléctrica y Electrónica



RIEE&C

Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación

INFORMACIÓN PARA LOS AUTORES

RIEE&C, Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación (ISSN: 1870-9532) se publica semestralmente. Se aceptan artículos originales en aplicaciones de la ciencia, desarrollo de nueva tecnología o soluciones eficientes de ingeniería, siempre y cuando no hayan sido publicados o estén bajo consideración para publicarse en alguna otra revista.

Todos los documentos deberán enviarse al editor en jefe de RIEE&C, José Antonio Beristáin Jiménez, por e-mail a: rieandc@itson.mx

Los artículos se revisarán por especialistas en el área y dictaminarán si el artículo es apropiado para su publicación. No se deberán enviar manuscritos directamente a los editores asociados.

Los manuscritos enviados por los autores deberán seguir el formato que muestra la guía para el autor, la cual se encuentra en la página de internet <http://www.itson.mx/rieandc>.

RIEE&C

Contenido

Análisis Dinámico del Generador de Inducción Auto-excitado.

Torres M. Emmanuel, Chan-Puc Freddy, Ramírez A. Juan

1

Simulación y Comparación Energética de un Sistema de Enfriamiento por Ciclo de Absorción.

Mireles J. Damián U., Herrera S. Manuel, Murillo V. Ismael, León V. Rafael, Oroz G. Gilberto

9

Estudio del Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia Perturbar y Observar.

Mireles J. Damián U., Herrera S. Manuel, Murillo V. Ismael, León V. Rafael, Oroz G. Gilberto

17

