

Sistema para el ahorro de energía en un climatizador evaporativo

Fernando Arturo Ramírez-Sánchez y Marco Antonio Arjona-López
Instituto Tecnológico de La Laguna (Méjico)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7629>

1. INTRODUCCIÓN

La preocupación por los precios del petróleo y el cambio climático asociado a la quema de hidrocarburos, ha impulsado la búsqueda del consumo eficiente de la energía [1],[2]. Una parte importante de la demanda de energía eléctrica en las edificaciones se asocia al control de temperatura [3],[4]. Los climatizadores evaporativos se emplean en zonas cálidas o semidesérticas en donde se tiene clima seco y cálido por su bajo costo, facilidad de fabricación, menor consumo energético y mantenimiento cuando se le compara con un sistema de aire acondicionado de gas. Su empleo es común en viviendas, locales comerciales e industriales. Por la naturaleza del clima en que se emplean, es posible crear una zona de confort mediante el enfriamiento y la humidificación del aire que es forzado a pasar por una cortina de agua al momento de entrar al equipo. Regularmente, estos aparatos emplean motores de inducción monofásicos de fase partida. Estos motores requieren un devanado auxiliar de arranque y un interruptor centrífugo externo. Además, por la naturaleza de su diseño, estos motores cuentan con una baja eficiencia energética [5],[6]. Sin embargo, en muchas instalaciones residenciales y comerciales solamente se tiene servicio monofásico. Lo anterior se vuelve crítico en regiones remotas donde el alto costo del cableado inhibe la instalación de redes trifásicas, especialmente si se consideran países con grandes extensiones territoriales [7]. El uso de un motor trifásico de inducción de jaula de ardilla ofrece ventajas sobre su contraparte monofásica, como: mayor eficiencia energética, par constante y ausencia de elementos externos como capacitores y contactores centrífugos. Por lo anterior, la alimentación de motores de inducción trifásicos empleando alimentaciones monofásicas presenta

una oportunidad de ahorro de energía. Actualmente existen esquemas que emplean capacitores externos para operar motores trifásicos a partir de una señal de monofásica, entre ellos se encuentran las conexiones: Steinmetz, Smith y Wang [8]-[11]. Algunas conexiones logran altas eficiencias en el motor. Sin embargo, la conexión propuesta por Wang requiere de tensiones de 220 V o 190 V RMS [11]. Esto es un problema en instalaciones de 120 V RMS. El arreglo propuesto en [8], presenta alta eficiencia y opera a tensiones de 120/220 V RMS cubriendo la mayoría de las instalaciones y motores disponibles. Sin embargo, solamente se puede operar utilizando una o dos velocidades fijas cambiando el número de polos por medio de contactores externos.

La disponibilidad de la electrónica de potencia y los procesadores digitales ha permitido desarrollar convertidores electrónicos de potencia que interactúan con la red eléctrica en tiempo real [12]. Mediante el empleo de un motor trifásico y un convertidor electrónico de potencia, se puede operar cualquier motor de inducción trifásico sobre un rango continuo de velocidades independientemente de la frecuencia de red [13]-[15]. Lo anterior es posible sin la necesidad de emplear componentes externos calculados para el motor en cuestión, como son los arreglos de capacitores utilizados en los arreglos de una fase a tres fases mencionados previamente. Cuando se emplea un motor trifásico de 220V accionado por un inversor, se puede lograr un ahorro mayor si se emplea un lazo de control de temperatura; ya que el climatizador solamente consumirá la energía necesaria para crear el confort en la edificación. Sin embargo, en diferentes aplicaciones, el uso de convertidores se ha reducido a aplicaciones en lazo abierto. Este enfoque si bien es fácil de implementar, no representa la solución más eficiente en términos de consumo de energía.

En la actualidad, se ha observado una amplia preferencia por el empleo de motores trifásicos de inducción en diferentes aplicaciones industriales por su confiabilidad. Durante los últimos años, el uso de motores trifásicos en aplicaciones de velocidad variable ha sido resuelto emplean-

do convertidores de frecuencia y tensión variable. Existen diferentes esquemas de control para motores de inducción. Entre los más populares se encuentran: control escalar, control de flujo orientado y el control de par directo [16]-[18]. Los últimos dos, son sistemas de alto rendimiento que requieren la integración de sensores y una elevada capacidad de cómputo, por lo que son empleados en aplicaciones como: tracción, energías renovables y automatización. Por otro lado, el control escalar es un sistema de bajo costo que no requiere sensores ni de cálculos sofisticados; por lo anterior, suele ser empleado para accionar ventiladores y bombas sin incrementar de forma negativa el costo del sistema [18].

En este artículo se presenta el desarrollo experimental de un sistema novedoso de ahorro de energía. Se basa en el empleo de un motor de inducción trifásico, un inversor de tensión y un lazo de control de temperatura para disminuir el consumo eléctrico de un climatizador evaporativo. La velocidad del motor es controlada utilizando un esquema de control escalar y la técnica de Modulación por Ancho de Pulso por Espacios Vectoriales (MAPEV). El potencial de CD empleado por el inversor se obtiene a partir de un rectificador controlado. El algoritmo de control del sistema se implementó en el Controlador Digital de Señales (CDS) de 40 MIPS dsPIC33FJ128MC802, el cual es operado por medio del sistema operativo en tiempo real FREERTOS [19]. Dicho sistema permite al CDS realizar diferentes tareas en tiempo real de forma simultánea sin incrementar el tiempo muerto de las tareas y eliminando el riesgo de empalme. El sistema propuesto es evaluado experimentalmente y su consumo energético es comparado contra el de un climatizador convencional donde se demuestra el ahorro en el consumo de energía eléctrica.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE AHORRO DE ENERGÍA

Los climatizadores evaporativos aprovechan la baja humedad del aire presente en localidades semidesérticas para la transferencia de calor del mismo. Cuando entra el aire externo al equipo, pasa por una caída de agua sobre materiales como paja o cartón. De este modo, el aire cálido y seco pierde energía térmica por medio

de la evaporación adiabática. Posteriormente, el aire fresco es inyectado a la vivienda por medio de un ventilador (Fig. 1). El uso de estos climatizadores se limita a condiciones atmosféricas de baja humedad, ya que el aire saturado con humedad pierde la capacidad de evaporar agua y disminuir la sensación térmica. El sistema propuesto, se compone de un motor de inducción trifásico y un convertidor electrónico que permite operar este sistema en un rango de velocidad variable a partir de una instalación monofásica.

Adicionalmente, durante el encendido, el rectificador emplea un arranque suave que limita la corriente de carga del capacitor, evitando corrientes elevadas y disminuyendo las pérdidas por efecto Joule durante el inicio. Una vez completada la carga del bus de CD, el CDS, comienza la tarea de accionar el algoritmo de modulación MAPEV que genera los disparos de puerta del inversor. De este modo, se evita el funcionamiento del inversor durante el transitorio de carga. El potencial es medido por medio de un divisor de tensión y un

electrónico de potencia utilizando los sensores de efecto Hall ACS758ECB y de temperatura digital DS1820 respectivamente. El sistema compara la corriente de CD que alimenta al inversor y la compara con un límite predeterminado. Si el límite es superado, se detiene la operación del sistema. Lo anterior se logra por medio de un pulso de inhibición en el puerto de falla del IR2130 para suspender los pulsos de disparo. Adicionalmente, la temperatura registrada se usa para controlar los ventiladores del convertidor en función de la temperatura de los IGBTs.

El inversor trifásico se utiliza para controlar la velocidad del motor de inducción. Este motor se encuentra en el interior del equipo evaporativo, donde se acopla a un ventilador centrífugo. La referencia de temperatura se da directamente por el usuario, este valor junto con la temperatura al interior del edificio son utilizados para operar un lazo de control Proporcional Integral (PI). La diferencia entre la referencia y la temperatura determina la velocidad del motor. La temperatura del interior de la edificación es monitoreada empleando el sensor de temperatura digital TC72.

El empleo de un controlador en lazo cerrado permite un mayor ahorro de energía, debido a que la velocidad del motor, cambia automáticamente en función de la temperatura. Cuando la temperatura ambiente se acerca al punto de referencia, la velocidad de giro de motor se verá reducida, disminuyendo el consumo de energía eléctrica.

3. MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO BASADA EN ESPACIOS VECTORIALES (MAPEV)

En una técnica de modulación se busca una generación mínima de armónicos, pocas pérdidas de conmutación y un rango de modulación lineal. La modulación MAPEV presenta un buen acercamiento a esos requerimientos. En un inversor trifásico se tienen ocho estados de funcionamiento; dos de ellos representan un valor nulo, ya que las terminales de carga se encuentran conectadas al mismo punto de potencial eléctrico. Los seis estados restantes entregan un potencial diferente de cero a las terminales de salida del inversor y pueden ser representados vectorialmente en un plano hexagonal como en la Fig. 3. Cada uno de los vectores se identifica por un sistema coordinado de tres números. Cada número indica el estado de operación de cada pata del inversor; donde 1 representa conducción en el

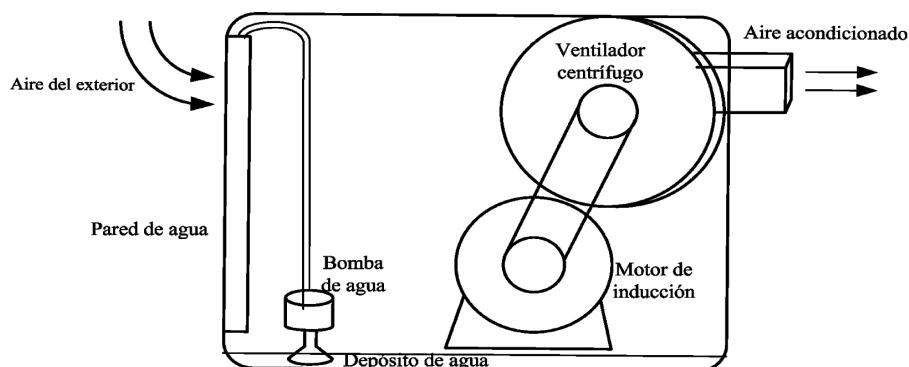


Fig. 1: Climatizador evaporativo

El diagrama a bloques del sistema se presenta en la Fig. 2, y se compone de un inversor trifásico, un rectificador monofásico, etapa de control, sistema de protecciones y los circuitos de cebado de puerta empleados para disparar los IGBTs y los SCR.

La energía del sistema es suministrada por la red eléctrica. Si la tensión es de 120 V, se emplea un transformador para elevar a 220V, de lo contrario la red se puede conectar directamente al rectificador. Este, permite regular la tensión de CD utilizada por el inversor ante variaciones en la red.

amplificador de aislamiento HPCL7800, mientras que el rectificador es controlado por medio del DAC de 16 bits MAX 541.

Los disparos de puerta del inversor son procesados por un circuito de cebado de compuerta, este dispositivo acondiciona los disparos de puerta y asegurar la saturación de los IGBTs. El circuito emplea los opto-acopladores 6N137 y el circuito integrado (CI) IR2130, el cual, cuenta con una terminal de falla que puede ser accionada por la etapa de protecciones. La etapa de protecciones monitorea la corriente y temperatura del convertidor

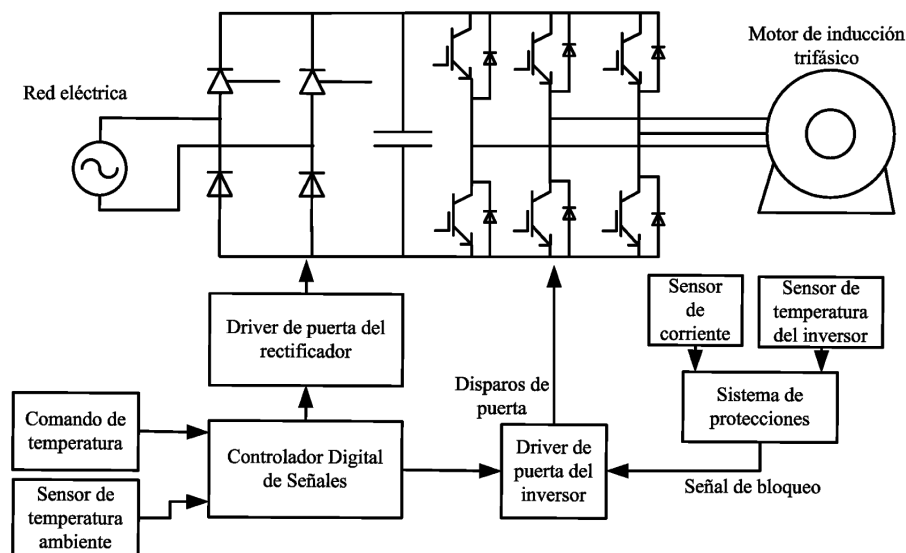


Fig. 2: Diagrama a bloques del sistema desarrollado

Mayo - Junio 2016 | Vol. 91 nº3 | Dyna | 259

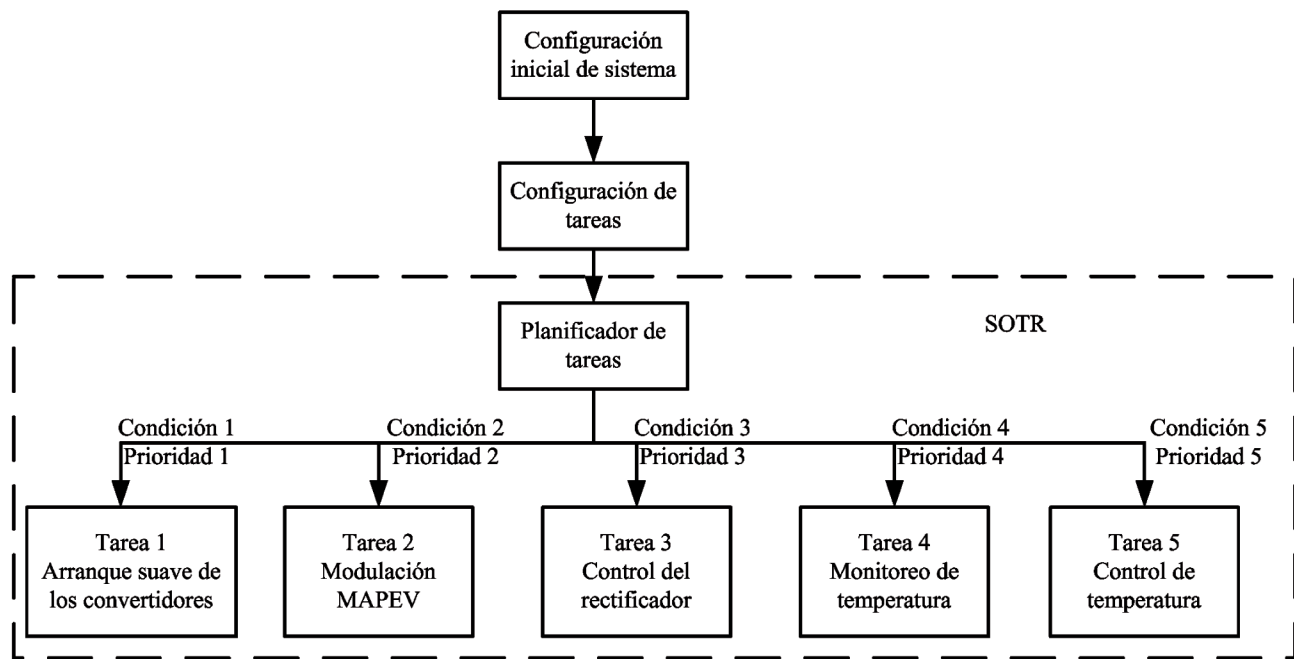


Fig. 5: Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema propuesto

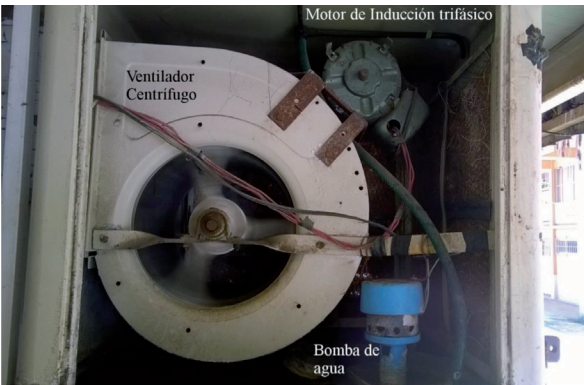


Fig. 6: Sistema experimental

la Fig. 9, la gráfica del lado izquierdo corresponde a la potencia consumida por el rectificador, y del lado derecho se muestra la potencia del inversor. A partir de los registros de potencia mostrados, es posible determinar una eficiencia energética del 93.54%. La corriente de arranque del motor monofásico y del sistema de ahorro de energía se comparan en la Fig. 10, donde la corriente de arranque se ve reducida de 80 a 8 A.

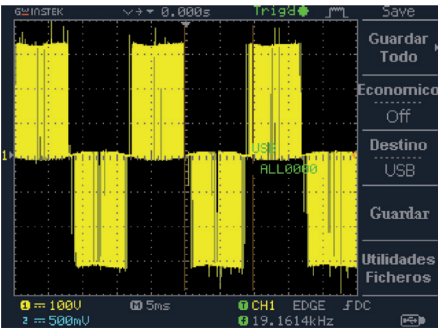


Fig. 7: Voltaje de línea a línea generado por el inversor trifásico (100V/div, 5 ms/div)

Lo anterior se asocia a la carga controlada del capacitor de CD y el arranque suave del motor. La disminución de la corriente de arranque se traduce en menos pérdidas por efecto Joule y en la ausencia de transitorios en la instalación eléctrica. El perfil de consumo de un climatizador convencional y del sistema propuesto se muestra en la Fig. 11. Se puede apreciar el consumo del sistema operando bajo el esquema de control de temperatura así como el consumo operando a velocidad máxima de manera constante. Al comparar la demanda de potencia del sistema propuesto contra el perfil del sistema convencional, se puede apreciar un ahorro de energía eléctrica del 45% para operación a velocidad máxima, el cual representa la condición de mayor consumo posible. Este ahorro se vuelve

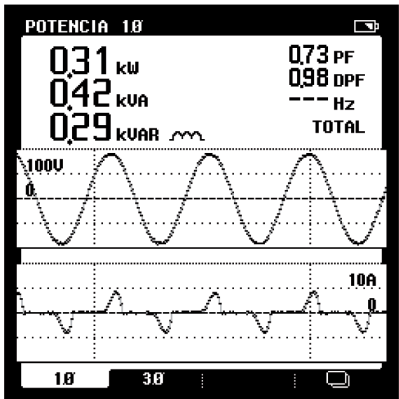


Fig. 9: Potencia eléctrica registrada en la entrada y la salida del convertidor electrónico

más importante si se emplea el lazo de temperatura que ajusta la velocidad del motor en función de la temperatura.

El ahorro de energía del sistema se asocia a la mayor eficiencia del motor de inducción y a la regulación de velocidad en función de la temperatura. Después de un tiempo de operación de 29 horas, el climatizador convencional consumió 15,7749 kWh, mientras que el sistema propuesto consumió 7,7072 kWh a velo-

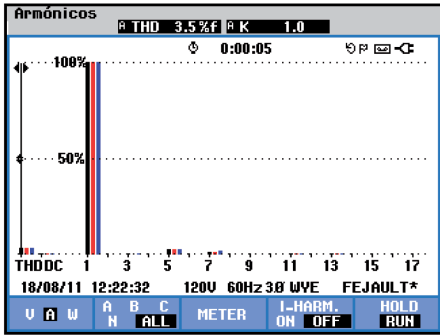
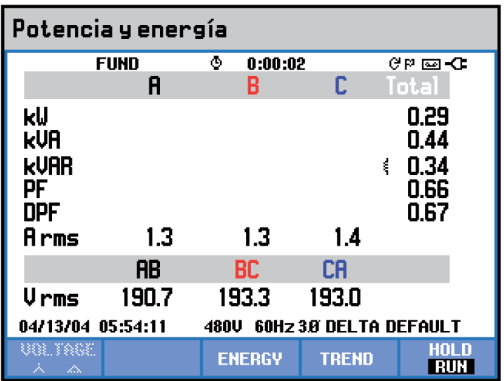


Fig. 8: Perfil armónico de la corriente entregada por el inversor trifásico



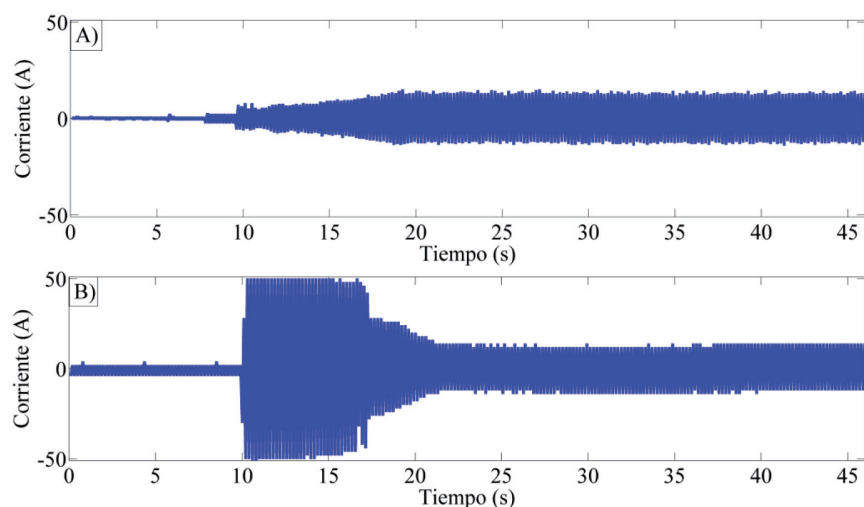


Fig. 10: Corriente de arranque del equipo climatizador A) equipado con el sistema de ahorro de energía y B) equipado con motor monofásico de fase partida

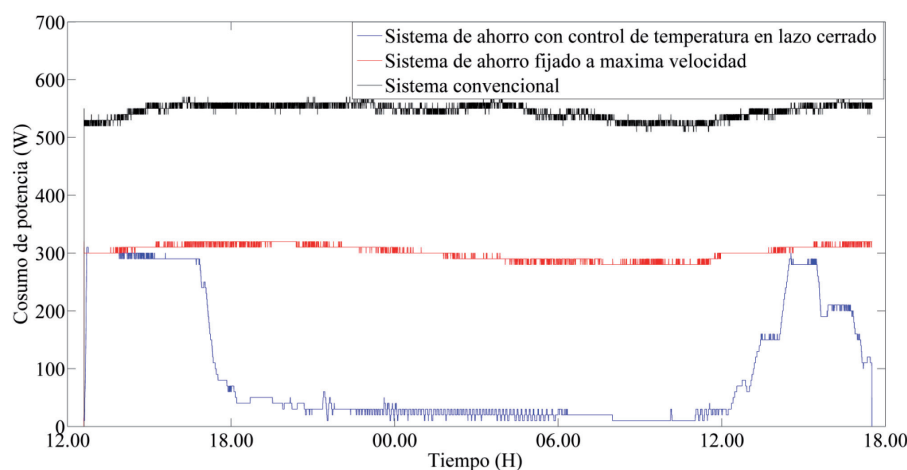


Fig. 11: Comparación de consumo de potencia empleando un motor monofásico y el sistema propuesto

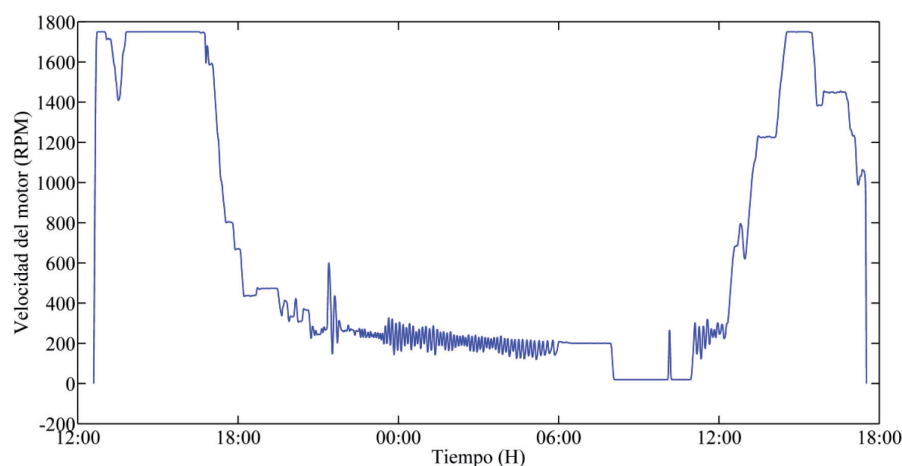


Fig. 12: Velocidad experimental del motor durante un día de operación

cidad constante y 2,7673 kWh con el control de temperatura habilitado.

La velocidad del motor con el esquema de control de temperatura se muestra en la Fig. 12. La velocidad es ajustada por un lazo de control en función de la temperatura del inmueble. Lo anterior puede observarse comparando la velocidad del motor, la cual se muestra en la Fig. 13, con la temperatura al exterior de la edificación

(Fig. 12). Las condiciones de humedad relativa durante la prueba fueron de 33% durante el día y 50% durante la noche. Con base a lo anterior, se puede deducir que el aparato disminuye su consumo durante las horas frescas del día y lo incrementa durante el tiempo cálido.

Se realizó una evaluación económica para cuantificar el ahorro por consumo energético en comparación con el incre-

mento de costo global del sistema (50% más con respecto a un sistema convencional). La evaluación se realizó empleando el método del Valor Presente Neto (VPN) y se puede encontrar en la Fig. 14. Se consideró un tiempo de vida promedio de 10 años, un ciclo de trabajo de 12 horas diarias durante 7 meses al año, así como operación a velocidad máxima. Lo anterior se hace con el objeto de evaluar la viabilidad económica del sistema considerando el peor de los casos en lo que refiere al consumo energético. Se encontró que el sistema propuesto tarda entre 2 y 3 años en recuperar la inversión necesaria para su implementación. El beneficio económico se obtiene entonces durante los 7 años restantes, lo cual se considera un buen rendimiento económico.

6. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó un sistema de ahorro de energía eléctrica para aparatos climatizadores evaporativos. En el sistema propuesto se sustituye el motor monofásico de inducción de fase partida por un motor trifásico. Dicho motor, es alimentado por medio de un inversor trifásico y un rectificador controlado. El control del sistema es llevado a cabo en el CDS de bajo costo dsPIC33FJ128MU802 y el SOTR FreeRTOS. El control en lazo cerrado de la temperatura, el control de velocidad del motor de inducción, la modulación MAPEV, el control del rectificador y el registro de temperatura y velocidad fueron administrados por el SOTR de manera exitosa. La presencia del SOTR facilita la posibilidad de incrementar y modificar las funciones del sistema sin comprometer la estabilidad de control ni el rendimiento del sistema. Para la evaluación experimental se empleó un aparato de aire de 372.8 W (1/2 HP), el cual fue evaluado experimentalmente durante 29 horas con el motor monofásico así como con el sistema propuesto operando a velocidad máxima y con el control de temperatura habilitado. También se evaluó la eficiencia de los convertidores que fue de 93.54% la cual se considera aceptable. Posteriormente, se comparó el consumo global del sistema operando con el lazo de control de temperatura habilitado y deshabilitado. En ambos casos se logró obtener un consumo energético significativamente menor (ahorro mayor o igual al 45%) al compararse con el mismo sistema equipado con el motor monofásico de fase partida que se emplea convencionalmente. Adicionalmente, la presencia del convertidor de potencia permite variar la velocidad del motor en un rango continuo, mientras

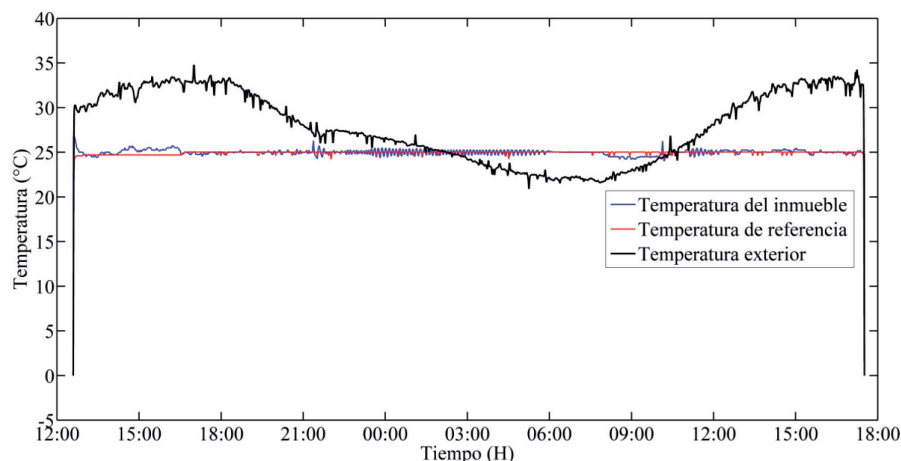


Fig. 13: Comportamiento de las temperaturas dentro del edificio y de referencia del sistema propuesto

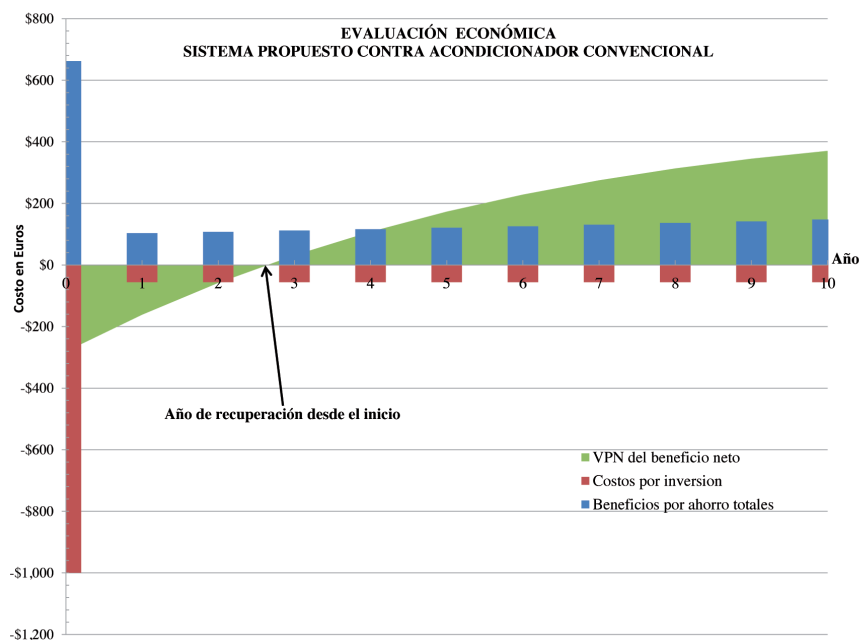


Fig. 14: Evaluación económica del sistema propuesto empleando por medio del VPN

que con el motor monofásico solo se tienen una o dos velocidades fijas. Se realizó una evaluación económica y se encontró que el incremento de costo asociado a la instalación del sistema, tarda entre 2 y 3 años para retornar la inversión inicial. Finalmente, se concluye que el empleo de un motor de inducción trifásico accionado por un inversor de tensión controlado por un CDS de bajo costo y un SOTR representa una alternativa factible y confiable para la disminución del consumo de energía en edificaciones ubicadas en climas cálidos y secos. Adicionalmente, la instalación del sistema no implica modificaciones a la instalación eléctrica existente.

PARA SABER MÁS

[1] Rodríguez DR, Eizaguirre F, Milo A. "Optimización del coste de la electricidad en vecindarios desplazando cargas y evitando picos demanda conjuntos". Dyna energía y sostenibilidad. Enero 2014. Vol 3-1. p. [No Consta]. (DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/ES6918>)

[2] Bashash S, Fathy HK. "Modeling and Control of Aggregate Air Conditioning Loads for Robust Renewable Power Management," IEEE Transactions on Control Systems Technology. Julio 2013. Vol. 21, No.4, p.1318,1327. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TCST.2012.2204261>)

[3] Fernández-Salvador V, "Simulación energética de una vivienda de consumo casi nulo". Dyna energía y sostenibilidad, Enero 2012. Vol. 1-1 p. no consta. (DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/ES1012>)

[4] Perea-Olabarria E, Mera-Vásquez A, Santos-Moro LM, et al. "Aplicación para la toma de decisiones relativas al uso eficiente de energía en edificios". Dyna energía y sostenibilidad, Enero 2013. Vol. 2-1. p. [No Consta]. (DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/ES6901>)

[5] Obhani S, Talebian M.E., Nejad H.V., "Elimination the centrifugal switch in Single-phase Induction Motor(SPIM) to increase torque and efficiency," En: Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), (Estambul, Turquía, 2-4 Oct. 2013) vol., no., pp.1,7, (DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/EPECS.2013.6713032>)

[6] Huang H., Fuchs E.F., White J.C., "Optimization of single-phase induction motor design. II. The maximum efficiency and minimum cost of an optimal design," IEEE Transactions on Energy Conversion, , vol.3, no.2, pp.357,366, Jun 1988 (DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/60.4742>)

[7] Cipriano dos Santos E, Jacobina CB, Cabral da Silva ER, Rocha N. "Single-phase to three-

phase power converters: State of the art". IEEE Transactions on Power Electronics. Mayo 2012. Vol. 27-5. p. 2437-2452 (DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2011.2175751>)

[8] González A, Hernández C, Arjona MA. "A novel high-efficiency parallel-winding connection for a three-phase induction motor fed by a single-phase power supply". IEEE Transactions on energy conversion. June 2014. Vol. 29-2. p.262-277. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TEC.2014.2305755>)

[9] Murthy SS, Berg GJ, Singh B, Jha CS, and Singh BP. "Transient analysis of a three phase induction motor with single phase supply," IEEE Transactions Power Apparatus and Systems. Enero 1983. Vol. 102-1. p. 28-37. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPAS.1983.317994>)

[10] Wang YJ, Zhou H. "A new method for balancing a three-phase induction motor supplied by a single-phase source," en Proceedings Utility Exhibition on Power and Energy Systems: Issues & Prospects for Asia. 28-30 Septiembre de 2011. Vol. Pattaya city. pp. 1-7. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICUEPS.2011.6497758>)

[11] Wang X, Zhong H, Yang Y, Mu X. "Study of a novel energy efficient single-phase induction motor with three series-connected windings and two capacitors," IEEE Transactions on Energy Conversion. Junio 2010. Vol. 25-2. p. 433-440. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TEC.2009.2039218>)

[12] Echegoyen Arellano T, Cardenas Galindo VM, Alvarez Salas R. "Compensador de armónicos de tensión usando un convertidor matricial y un modelo lineal". Dyna Ingeniería e Industria. Noviembre 2013. Vol.88-6. p. 689-699. (DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5630>)

[13] Jacobina CB, Cipriano dos Santos E, Rocha N, Fabricio LL. "Single-phase to three-phase drive system using two parallel single-phase rectifiers". IEEE Transactions on Power Electronics. Mayo 2010. Vol. 25-5. p. 1285-1295. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2009.2037420>)

[14] Lee DC, Kim YS. "Control of Single-phase-to-three-phase AC/DC/AC PWM converter for induction motor drives". IEEE Transactions on Industrial Electronics. Abril 2007. Vol. 54-2. p. 797-804. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2009.2037420>)

[15] Enjeti PN, Rahman A, Jakkli R. "Economic single-phase to three-phase converter topologies for fixed and variable frequency output". IEEE Transactions on power electronics. Julio 1993. Vol. 8-3. p. 329-335. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/63.233290>)

[16] Holmes, D.G., McGrath B.P., Parker, S.G.. "Current Regulation Strategies for Vector-Controlled Induction Motor Drives," IEEE Transaction on Industrial Electronics, Octubre 2012 vol.59, no.10, pp.3680,3689, (DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2011.2165455>)

[17] Inoue Y., Morimoto S., Sanada M. "Comparative Study of PMSM Drive Systems Based on Current Control and Direct Torque Control in Flux-Weakening Control Region," IEEE Transactions on Industry Applications. vol.48. no.6. Noviembre 2012. pp.2382,2389. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2012.2227134>)

[18] Smith A., Gadoue S., Armstrong M., Finch J., "Improved method for the scalar control of induction motor drives," IET Electric Power Applications, Julio 2013. vol.7, no.6, pp.487,498. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/iet-epa.2012.0384>)

[19] R. Barry. "The FreeRTOS Reference manual API Functions and Configuration Options". Real Time Engineers Ltd. www.freertos.org

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico de La Laguna, TNM y al CONACYT por el apoyo financiero otorgado para la realización del presente trabajo.