

## CONTROLADOR DE INYECCION DE ENERGIA PARA CICLO FRIGORIFICO DE ABSORCION DE AMONIACO-AGUA

**Caceres<sup>1</sup> M., Busso<sup>1</sup> A., Franco<sup>2</sup> J.**

<sup>1</sup> G.E.R – Grupo en Energías Renovables – FaCENA – UNNE  
 Campus Libertad – Av. Libertad 5460 – 3400 Corrientes  
 Tel: +54 3783 473931 int. 129 / Fax: +54 3783 473930/ e.mail: chiro\_frida@yahoo.com.ar  
<sup>2</sup> INENCO – CONICET - UNSa.

**RESUMEN:** El trabajo presenta los resultados de la implementación de un controlador de inyección de energía eléctrica aplicado al calefactor del generador de un ciclo de refrigeración por absorción de amoníaco-agua. La caracterización del ciclo mostró que, bajo ciertas condiciones, este puede funcionar sin colapsar hasta con un 45% menos en la potencia eléctrica inyectada al generador. Esto motivó el desarrollo de un controlador electrónico que administra la energía en función de la temperatura interior del gabinete y la temperatura del ambiente de trabajo del refrigerador. Los ensayos con el dispositivo instalado permitieron obtener un 20% de ahorro energético en refrigeradores de 60 lts. y se prevé un ahorro de 45% para refrigeradores de 150 lts. o de mayor capacidad.

**Palabras Clave:** ciclo de absorción, ahorro energético, PWM

### INTRODUCCION

En el marco de dos proyectos, PICTO (2006) y del Estudio Exploratorio E655/07Bis1PET33 (2008), ambos subvencionados por la ANPCyT – Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, se examinó la posibilidad de acoplar una fuente de calor por energía solar a un ciclo de absorción. Los resultados obtenidos durante este proyecto indicaron que la inyección de calor necesaria para el correcto funcionamiento del ciclo de absorción no necesariamente debía permanecer constante (cosa que ocurre usualmente en los refrigeradores comerciales) sino que, dependiendo de ciertos parámetros, podría reducirse sin limitar las prestaciones del refrigerador (Busso et al, 2007). Partiendo de esta hipótesis se llevó a cabo el estudio exploratorio denominado “*Diseño y construcción de un prototipo de un controlador electrónico para optimizar y disminuir el consumo eléctrico de una heladera de ciclo de absorción amoníaco-agua*”.

Una de las motivaciones principales del Estudio Exploratorio era la posibilidad de transferir, desde la universidad pública, un producto final que pueda ser empleado por la empresa privada para desarrollar equipos optimizados, capaces de competir en el mercado local e internacional calificando para una etiqueta correspondiente a alta eficiencia en el etiquetado energético regulado, en nuestro caso, por la norma IRAM 2404 cuya obligatoriedad quedó vigente en el año 2005 mediante el decreto 35/2005 de la ex Secretaría de Industria Comercio y Minería (SICyM). (Ver Figura 1).



*Figura 1.- Etiquetado energético para refrigeradores según norma IRAM 2404*

Otra motivación no menos importante, fue la obtención de un protocolo de ensayo de determinación de eficiencia energética para este tipo de equipos así como también, el desarrollo del equipamiento de monitoreo y control necesario para implementar este protocolo, lo que brinda a la universidad la posibilidad de realizar los ensayos de homologación requeridos por el estado a las empresas privadas respecto de sus productos.

El presente trabajo expone brevemente el desarrollo del controlador de inyección de energía y los resultados obtenidos mediante su utilización en un refrigerador comercial por ciclo frigorífico de absorción de amoníaco-agua de 60 lts.

## MATERIALES Y METODOS

Teniendo como objetivo la determinación de un algoritmo óptimo de control de potencia y el desarrollo de un equipo que permita alimentar de manera eficiente la fuente de calor de los refrigeradores de ciclo de absorción amoníaco-agua, se realizaron diversos ensayos, los que se describen a continuación.

### **Determinación de la curvas de trabajo del ciclo**

Con el objetivo de identificar las diferentes variables que gobiernan la operación del ciclo frigorífico bajo estudio, se realizó un monitoreo de temperaturas en diferentes puntos del ciclo durante el funcionamiento del mismo y bajo distintas situaciones de trabajo. Los datos obtenidos fueron analizados con la ayuda de un modelo termodinámico del ciclo determinándose las curvas de trabajo de los distintos componentes y de esta manera, se tuvo una caracterización completa del funcionamiento del ciclo frigorífico (Busso et al, 2007).

En términos generales y dependiendo del tipo de refrigerador ensayado, la potencia de inyección de energía eléctrica al generador se variaba desde un valor máximo hasta un valor crítico por debajo del cual el ciclo colapsaba. La Figura 2 muestra una gráfica típica de la evolución de las temperaturas en distintos componentes del ciclo para un refrigerador de 150 lts. de capacidad para un ensayo de un mes de duración.

El estudio llevado a cabo permitió concluir que ante determinadas condiciones, la potencia eléctrica inyectada al generador podía reducirse hasta en un 40% sin afectar las prestaciones del refrigerador.

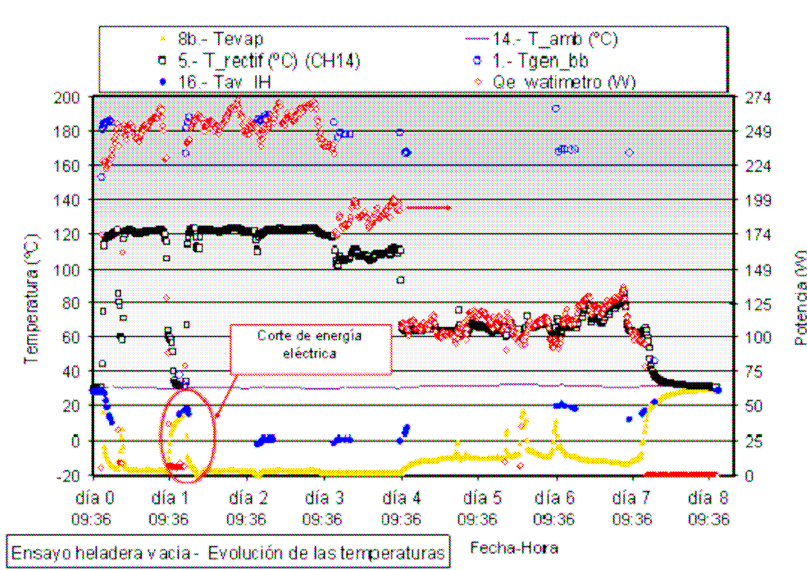


Figura 2.- Evolución de temperaturas en componentes del ciclo frigorífico durante ensayo con potencia entre 250 W y 140W para un refrigerador de 150 lts. de capacidad.

### **Control de potencia comandado por PC. Software:**

Una de las formas más comunes utilizadas en la variación de potencia aplicada a cargas resistivas alimentadas desde la red es mediante la variación de tensión sobre la carga. Existen muchas maneras de variar la tensión, una de ellas se logra mediante el control de fase, es decir recortando la señal alterna de manera de lograr una tensión eficaz menor que la provista por la señal completa.

Se desarrolló un prototipo basado en un microcontrolador PIC16F877A de Microchip, cuyas amplias prestaciones permiten, entre otras cosas, disponer de comunicación RS232, conversión analógica-digital y salida tipo PWM (modulación por ancho de pulso).

Como primera aproximación se estudió la posibilidad de controlar la tensión efectiva sin recortar cada semiciclo de la señal de red, se propuso la posibilidad de generar una señal de tipo PWM, mediante el uso del modulo interno del micro, a una frecuencia de 1Hz y aplicar dicha señal a un opto-triac con detección de cruce por cero (MOC3041) como disparo de un triac de potencia (BT137), actuando este último como llave de estado sólido para la corriente aplicada al calefactor. Con esto se logra una amplia variación de la potencia media entregada a la carga.

Considerando que en 1 segundo transcurren 100 semiciclos de tensión de red, existe la posibilidad de dividir la energía total entregada en un segundo en 100 partes y si se logra controlar el número de semiciclos que se deja actuar sobre la resistencia, se consigue un control de potencia que permite una variación paso a paso desde 0 a 100 semiciclos.

A los efectos de producir calentamiento, la inercia térmica del calefactor proporciona una integral que permite la aplicación de este método de control. Para otros tipos de carga resistiva esta manera de controlar produciría efectos adversos a causa, en su mayoría, de la fatiga térmica. En la Figura 3 se muestra el circuito desarrollado.

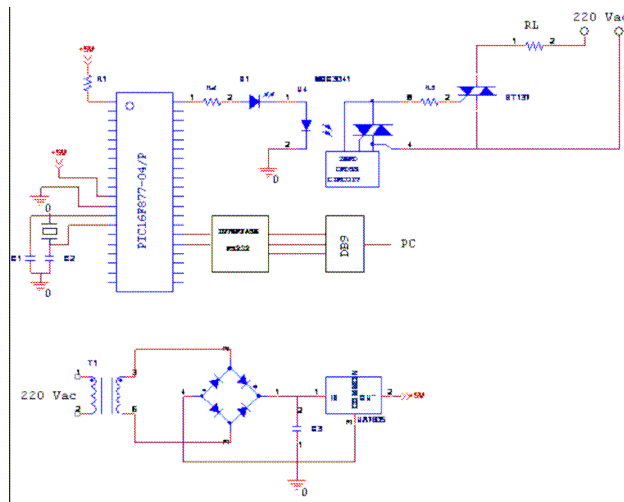


Figura N° 3 – Esquema del circuito de control desarrollado

Con la finalidad de identificar los parámetros principales de control y definir la estrategia de control de inyección de potencia que permitirían lograr un ahorro de energía asegurando a la vez el correcto funcionamiento del ciclo, se encaró la construcción de un controlador de potencia comandado por PC. Podemos dividir el desarrollo en dos partes, hardware y software. El hardware consiste en una fuente de tensión alterna variable totalmente electrónica con comunicación para PC de tipo RS232 y que provee un cierto número de canales de medición de temperatura. Variando la tensión efectiva sobre una carga se consigue variar la potencia inyectada a la misma. La variación de potencia en el tiempo es proporcionada por la PC mediante seteos ingresados por software. En la figura 4 pueden apreciarse algunas fotografías del prototipo.

En lo referente al software, el mismo consiste en un programa desarrollado completamente en Visual Basic cuya finalidad es la de proveer una interface amigable de seteo de los parámetros de ensayo para el usuario, y también sistematizar la adquisición de datos a través de los canales de medición dispuestos en el equipo. La figura 5 muestra el entorno del software. Además de permitir alimentar la resistencia calefactora del generador y medir de manera independiente temperaturas, el software permite emplear algunos de los canales de medición como parámetro de realimentación permitiendo emular algoritmos de control empleando el mismo equipamiento.



Figura 4.-Vista frontal y posterior del prototipo

Los primeros ensayos emulados consistieron en establecer intervalos de tiempo durante los cuales la potencia de inyección de energía eléctrica al calefactor se mantenía constante en un porcentaje del valor de la potencia nominal máxima. Transcurrido el intervalo, la potencia crecía o decrecía, según el ciclo de trabajo elegido. En paralelo, se monitoreaba la temperatura del interior del gabinete para evaluar el tipo de respuesta del sistema a tal estímulo. En la Figura 6 se presentan curvas típicas de evolución de la potencia inyectada y de la temperatura en el interior del gabinete obtenidas durante estos ensayos. Se observa que a medida que la potencia aumenta, la temperatura interior disminuye indicando una mejora en el funcionamiento del ciclo. En el ensayo presentado se partió de un 55% de la potencia nominal máxima y, para una potencia de 70% de la máxima se observa que la temperatura interior del gabinete ya alcanzó un valor de aproximadamente 5°C, temperatura apropiada para conservación de alimentos.

Este tipo de ensayos permitieron correlacionar el rango de potencia y temperaturas óptimas necesarias para asegurar el nivel térmico en el interior del gabinete adecuado para preservación de alimentos.



Figura 5.- Ventana de configuración y seteo de parámetros del ensayo.

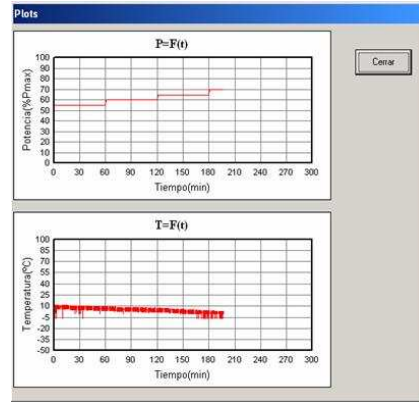


Figura 6.- Ventanas de visualización de la evolución de potencia inyectada y temperatura de gabinete durante el ensayo.

**Ensayos de determinación de parámetros:**

Con el calefactor del refrigerador conectado al prototipo de controlador se realizaron distintos ensayos, algunos de estos consistieron en someter al equipo a distintas curvas de inyección de potencia obteniéndose como resultado la respuesta en el tiempo del ciclo, otros consistieron en emplear distintas temperaturas del ciclo como parámetro de realimentación y realizar control de tipo realimentado. En todos los casos se realizaron mediciones de las temperaturas relevantes (del ambiente, del evaporador y del interior de gabinete) empleando equipos de adquisición de datos para cuantificar mediante curvas los efectos derivados de los ensayos. A modo de ejemplo, las figuras 7 y 8 muestran las respuestas para uno de los ensayos realizados con y sin realimentación.

En la Figura 7 se puede observar como a medida que decrece la potencia inyectada la temperatura del evaporador aumenta degradando el funcionamiento del ciclo. Por el contrario, en la Figura 8, el proceso de realimentación permite que el ciclo oscile en forma autónoma sin colapsar dependiendo de las condiciones externas a través del parámetro de control seleccionado. La Figura 9 presenta la curva de potencia suministrada observándose las variaciones de la misma entre el valor máxima y mínimo pre-estipulado. En la Figura 10 se presentan las curvas de energía acumulada durante el ensayo para los casos sin controlador, y con controlador de inyección de potencia. Se observa que al cabo de 14 hs de funcionamiento se produjo un ahorro de energía de un 17% aproximadamente.

Los ensayos realizados permitieron concluir que el punto de trabajo óptimo para el control autónomo queda fijado según las siguientes pautas:

- Es suficiente para mantener un buen desempeño del equipo que los puntos de potencia a inyectar se fijen en 150W para el de menor potencia y 200W para el de mayor potencia.
- Tomando como parámetro de realimentación la temperatura del ambiente interno del refrigerador, los valores umbrales de regulación deben quedar fijados entre 6,5°C y 9°C, de forma de estabilizar las temperaturas interiores en valores aceptables lográndose así obtener todas las prestaciones normales de una heladera sin perder la posibilidad de lograr un ahorro energético considerable.

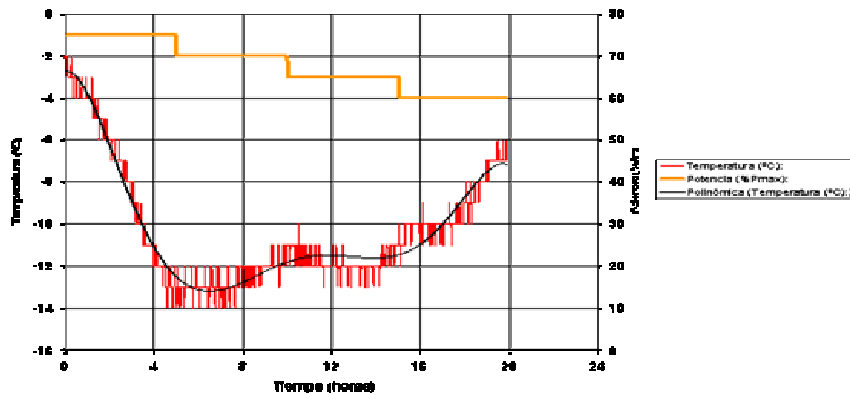


Figura 7.-Curvas de potencia y temperatura del evaporador en función del tiempo para ensayo sin parámetro de realimentación

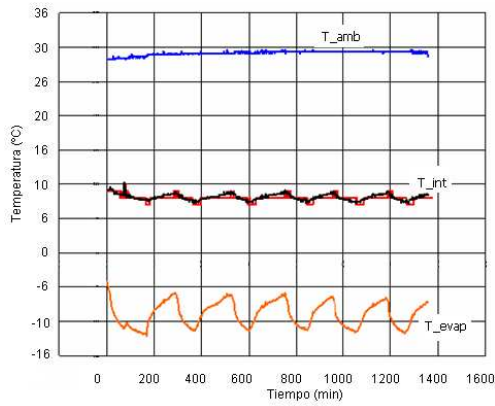


Figura 8.- Curvas de temperaturas en función del tiempo para ensayo con temperatura interna de gabinete como parámetro de realimentación.

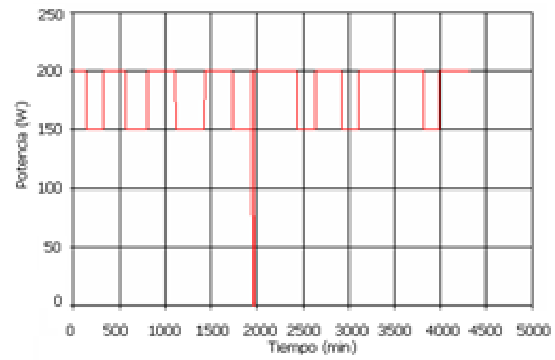


Figura 9.- Curvas de potencia en función del tiempo para ensayo con temperatura interna de gabinete como parámetro de realimentación.

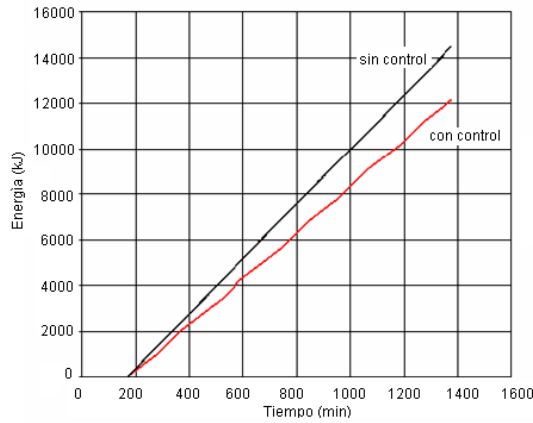


Figura 10.- Comparación de la evolución de la energía entregada con y sin controlador ( $P_{max}=200W$ ) durante el Ensayo 6.

Determinados los parámetros de control apropiados, se procedió a implementar la unidad de control autónomo. El diagrama de flujo del programa o estrategia de control seleccionada se presenta en la Figura 11.

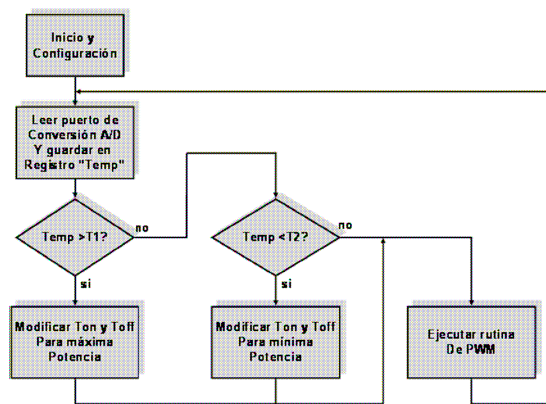


Figura 11 –Diagrama de flujo correspondiente al programa de control desarrollado.

#### Circuito de control de potencia autónomo de bajo costo

Definido el algoritmo de control más apropiado, se diseñó un dispositivo autónomo configurable vía PC que permite la posibilidad de conexión a cualquier equipo que funcione bajo este tipo de ciclo y régimen de control.

El mismo cuenta con dos canales de medición de temperatura (interna del gabinete y ambiente), la fuente de tensión variable y una salida de alarma acústica para aviso en caso de funcionamiento fuera de las condiciones normales de uso. Debido a que estos ciclos de absorción son muy sensibles a la temperatura del entorno de operación, el monitoreo de la temperatura ambiente es necesario a fin de adecuar el régimen de control a las condiciones ambientales del lugar de operación asegurando así el funcionamiento óptimo del ciclo. Las Figuras 12 y 13 muestran fotografías del dispositivo ensamblado y del montaje empleado para los ensayos respectivamente. En la Figura 14 se expone la variación de potencia requerida en función de la temperatura ambiente del entorno de trabajo del ciclo.

Partiendo de los datos de temperatura ambiente registrados durante el año para la ciudad de Corrientes, fue posible obtener una proyección anual de la evolución de la temperatura ambiente para el entorno de operación de los ciclos (Figura 15). Esta estimación se obtuvo realizando correcciones comparativas entre los datos experimentales de temperatura en el ambiente interior y datos de temperatura ambiente exterior tomada de una base de datos propia conteniendo información climática local a lo largo del año tomados a frecuencia horaria. De esta forma, el gráfico de la Figura 16 muestra la variación estimada para la potencia media entregada a lo largo del año obtenida aplicando la relación entre potencia media inyectada y temperatura ambiente (Fig.14). El gráfico de la Figura 17 se muestra la curva de ajuste obtenida mediante regresión polinómica de orden 2.



Figura 12.- Fotografías del equipo de control ensamblado.



Figura 13.- Montaje empleado para ensayos del control.

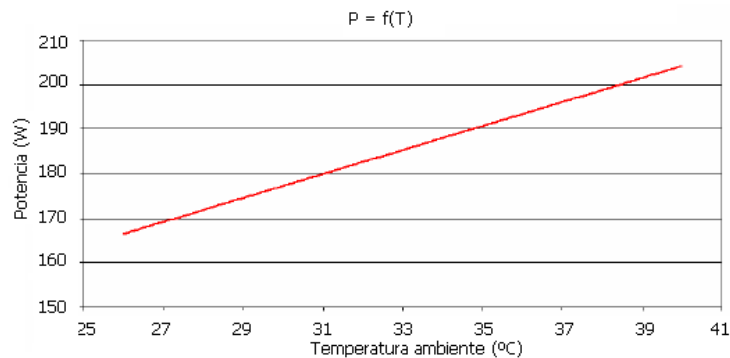


Figura 14- Requerimiento de potencia en función de la temperatura ambiente  $\{P=f(T)\}$ .

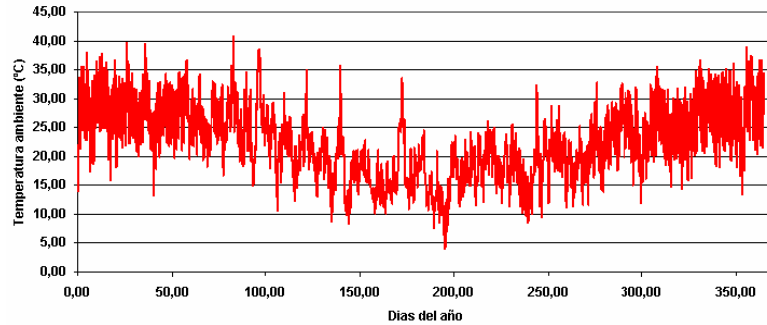


Figura 15.- Proyección de la evolución anual de la temperatura ambiente en el entorno del refrigerador

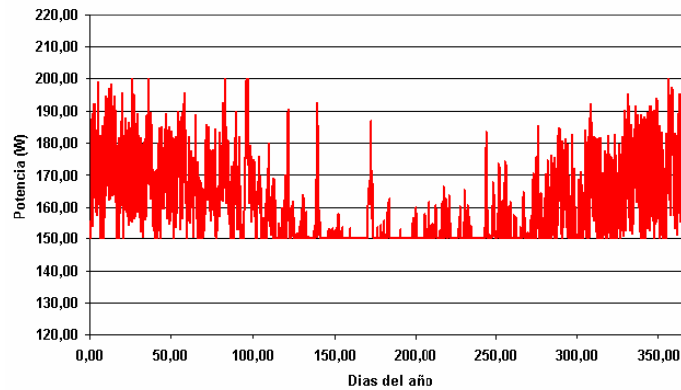


Figura 16.- Proyección de la evolución anual de la potencia inyectada

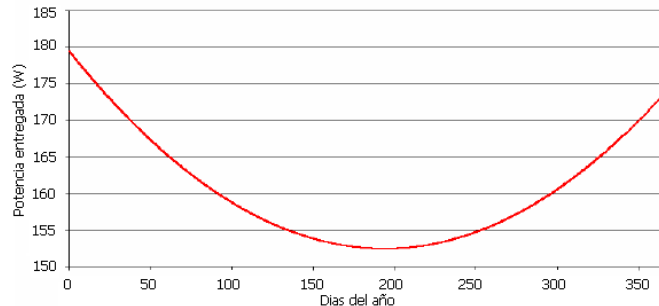


Figura 17.- Proyección ajustada de la evolución anual de la potencia inyectada

**Ensayos de respuesta del control y análisis de ahorro energético proporcionado por el mismo**

Se realizaron ensayos en equipos de distinto porte durante un período de 6 meses. Las curvas de la Figura 18 muestran la evolución de las temperaturas de un refrigerador trabajando con el control conectado para un lapso de tiempo de 75 horas. En la Figura 19 se presenta el ahorro energético anual estimado a partir de los datos de 6 meses. Esta curva corresponde a un refrigerador de 60 lts. En promedio se logra un ahorro del 20%. En equipos de 150 lts. y de mayor capacidad el ahorro promedio ronda el 45%.

Observando las Figuras 17 y 19 se hace evidente que el mayor ahorro se produce durante los meses de invierno debido a que bajas temperaturas ambientes implican menor inyección de energía para la operación del ciclo, esto es, el ciclo opera en forma más eficiente. Para ejemplificar cómo este hecho juega en contra, se puede analizar el caso de refrigeradores por absorción utilizados en hotelería. Al no tener partes mecánicas móviles, estos equipos operan silenciosamente haciéndolos populares para esta aplicación. En general, para disimular el refrigerador en la habitación, se lo introduce en gabinetes lo que produce acumulación de calor en su entorno, deteriorando la operación del ciclo y haciendo que no enfríen lo suficiente a pesar de operar a máxima potencia.

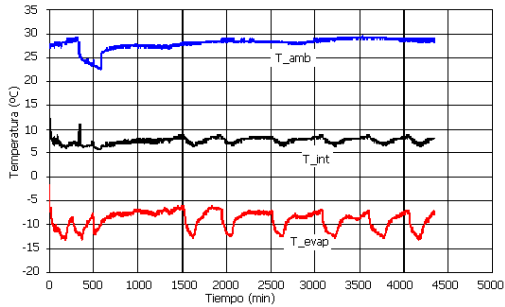


Figura 18.- Evolución de temperaturas en un equipo de 60lts conectado al control.

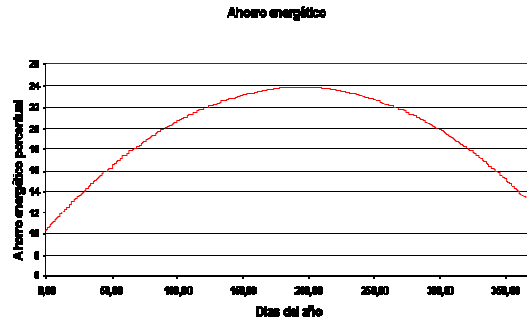


Figura 19.- Evolución del ahorro energético proporcionado por el control conectado para un equipo de 60lts

## CONCLUSIONES

- La caracterización del ciclo de refrigeración por absorción de amoníaco-agua permitió establecer que es suficiente para mantener un buen desempeño del equipo que los puntos de potencia a inyectar se fijen en 150W para el de menor potencia y 200W para el de mayor potencia.
- Tomando como parámetro de realimentación la temperatura del ambiente interno del refrigerador, los valores umbrales de regulación deben quedar fijados entre 6,5°C y 9°C, de forma de estabilizar las temperaturas interiores en valores aceptables lográndose así obtener todas las prestaciones normales de una heladera sin perder la posibilidad de lograr un ahorro energético considerable.
- Se desarrolló un controlador de inyección de potencia de bajo costo que permite obtener un 20% de ahorro energético en refrigeradores de 60 lts. y un ahorro de 45% para refrigeradores de 150 lts. o de mayor capacidad.
- Los parámetros de control del dispositivo desarrollado son configurables por software lo que permite su utilización en todo tipo de sistema que cuente con una resistencia eléctrica como fuente de energía.

## REFERENCIAS

- PICTO 18617 (2006). Evaluación del Recurso Solar - Eólico. Desarrollo de un sistema de refrigeración utilizando energía solar como fuente térmica. Climatización de ambientes mediante enfriamiento evaporativo. ANPCyT 2006.
- ESTUDIO EXPLORATORIO E655/07Bis1PET33 “*Diseño y Construcción de un prototipo de un controlador electrónico para optimizar y disminuir el consumo eléctrico de una heladera de ciclo de absorción amoníaco-agua*”. ANPCyT 2008.
- Busso, O. Esquivel, N. Sogari, J. Franco, (2007). Uso De La Energía Solar Como Fuente Térmica Para El Funcionamiento De Un Refrigerador Por Ciclo De Absorción Amoníaco-Agua. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 11. ISSN 0329-5184.

**ABSTRACT:** The paper presents results of testing an injection controller applied to the heater power generator of an amoníaco-water absorption refrigeration cycle. The characterization of the cycle showed that under certain conditions, the cycle can work without collapsing with up to 45% less electrical power injected into the generator. This fact led to the development of an electronic controller to manage the injected energy in terms of temperature inside the cabinet and working environment temperature of the refrigerator. Testing of installed devices allowed to obtain a 20% energy savings in refrigerators of 60 lts. and anticipates savings of 45% for refrigerators 150 liters. or greater capacity.

**Keywords:** absorption cycle, energy efficiency, PWM