

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN CONTROL ADAPTATIVO PARA UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.

experimental study of adaptive control for a cooling system.

RESUMEN

En las última década, se han destacado las técnicas de control inteligente fuzzy para tratar sistemas de modelamiento tipo caja negra, fuertemente desarrolladas en aplicaciones de investigación e industria (Borja, T. J. A. 2006).

Este trabajo presenta los resultados de un estudio experimental llevando a cabo las etapas de construcción, instrumentación, y desarrollo de un control fuzzy adaptativo aplicado a un banco de pruebas de un sistema de refrigeración; integrando los principios de proyecto térmico, proyecto electrónico, programación y técnicas de control con la finalidad de aumentar la eficiencia térmica del sistema para mantener apropiadamente las condiciones normales de operación en función de las principales variables del proceso.

Los resultados marcaron una gran influencia entre la apertura de la válvula de expansión y la frecuencia de rotación del compresor, los cuales contribuyen positivamente en el incremento del COP.

PALABRAS CLAVES: Control, térmico, refrigeración y eficiencia.

ABSTRACT

In recent decades, have been highlighted intelligent control techniques fuzzy, to treat modeling systems type black box. These techniques are highly developed in research applications and industry (Borja, T. J. A. 2006).

This paper presents the results of an experimental study, in which conducted stages of construction, instrumentation and development of an adaptive fuzzy control, applied to a test bed of a cooling system. Integrating the principles of a thermal project, electronic project, programming and control techniques, with the goal to increase the thermal efficiency of the system, to maintain the normal operating conditions according to the main process variables.

The results marked a strong influence among the opening of the expansion valve and the frequency of rotation of the compressor, which contribute positively in the increase of COP.

KEYWORDS: control, thermal, cooling, efficiency.

1. INTRODUCCIÓN

La motivación de nuestro proyecto es proporcionar una alternativa al modelamiento y diseño de sistemas de control para modelos dinámicos tradicionales. Un principal elemento del éxito de este trabajo es aplicar la teoría adaptativa a plantas desconocidas por sintonización parametrizadas heurísticamente.

Las instalaciones de refrigeración con más de ocho horas de trabajo diario continuo, se vuelven ineficientes con el pasar del tiempo, aunque debido al mantenimiento inadecuado de sus partes pueden presentar también defectos. Tanto en un caso como en otro, la opinión de los usuarios son coincidentes en cuanto a la necesidad de implementar el uso racional y eficiente en el consumo de energía, para cualquier sistema de refrigeración. La

economía de la energía es parte fundamental para la optimización del funcionamiento del equipo, mediante técnicas aplicadas de control a estos sistemas.

Los elevados costos de la energía eléctrica en los sectores comerciales, residenciales e industriales, exigirá un incremento en el rendimiento de los sistemas de refrigeración y aire acondicionado en función de los distintos parámetros de operación, lo que se puede lograr con la obtención de un control de los procesos termodinámicos y mecánicos de mejor calidad y confiabilidad.

Paralelamente con la estrategia de control e instrumentación, que permiten almacenar la hoja de vida de los equipos y un gran número de variables, se debe

AGUSTIN VALVERDE G.

Ingeniero Mecánico, M. Sc.
Director grupo de investigación en Eficiencia Energética y Medio Ambiente GEMA.
Universidad de Ibagué
Agustin.valverde@unibague.edu.co

FRANCISCO MORENO GARCÍA

Ingeniero electrónico, MSc.
Laboratório de Energia e Sistemas Termicos, LEST, Depto. de Ingeniería Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.
femgarcia@mecanica.ufu.br

OSCAR SAÚL HERNÁNDEZ.

Ingeniero Mecánico, PhD
Laboratório de Energia e Sistemas Termicos, LEST, Depto. de Ingeniería Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.
oscarhm@mecanica.ufu.br

realizar la implementación de procesadores cuyo campo de aplicación en el área de la refrigeración y el aire acondicionado va creciendo sustancialmente[4].

Así mismo la instrumentación es una herramienta fundamental para la automatización y optimización de los sistemas de refrigeración y aire acondicionado lo que permite que el usuario pueda tener la opción de controlar y analizar el sistema utilizando para ello programas (software) apropiados.

El presente trabajo se concentró en la implementación de un control adaptativo evaluando el desempeño de un sistema de refrigeración y aire acondicionado comercial, con capacidad de refrigeración de 17,5 kW (5 TR). Para controlar las condiciones ambientales, se utilizó dos intercambiadores de calor refrigerados por agua, lo cual permitió un mejor control en la variación de la carga térmica del evaporador, en función de la rotación del compresor y los grados de apertura de la válvula de expansión.

Para controlar la rotación del compresor se utilizó un variador de frecuencia comandado por un controlador Lógico Programable PLC. [1] Con ello se consiguió los mejores puntos de operación teniendo como objetivo principal el uso racional y eficiente de la energía, lo cual en la actualidad es de suma importancia para la comunidad científica.

2. BANCO EXPERIMENTAL

El diseño de nuestro banco experimental como se muestra en la figura 2, está compuesto primordialmente por un compresor semi-hermético trifásico, válvula de expansión termostática, e intercambiadores de calor condensador y evaporador de tubos concéntricos. El fluido secundario, agua, para alimentación del condensador circula por una torre de enfriamiento[1] Por otro lado, la alimentación del evaporador es realizada desde un tanque de almacenamiento térmico, con una resistencia eléctrica de 15 kW que tiene como función mantener una temperatura estable deseada del agua en la entrada del evaporador, esta resistencia es comandada por un controlador lógico programable (PLC), [1] la velocidad del compresor es controlada por medio de un variador de frecuencia, la finalidad es mejorar el desempeño del proceso ante diversas situaciones.

Un medidor de masa tipo Coriolis fue utilizado para evaluar la cantidad de refrigerante R-22 del circuito principal. Las señales analógicas de Temperatura, presión, cantidad de masa, son adquiridas a través del PLC[1] y gerenciadas desde un software implementado en Labview.

Los sensores de temperatura aplicados para el banco experimental fueron los dispositivos RTD [5] de 3 hilos modelo PT100 con operación entre los -30°C hasta

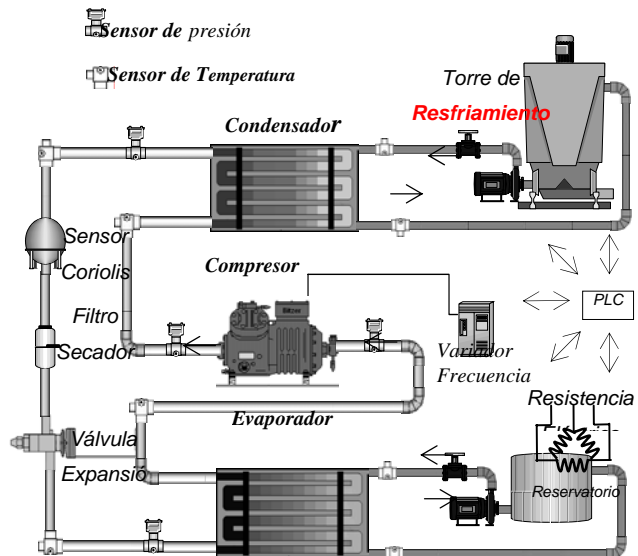


Figura 1. Representación esquemática del banco experimental.

100°C. Fueron utilizados transductores[1] de presión tipo piezo-resistivo (PA3023) con operabilidad desde 0 hasta 35 MPa. Los módulos de condicionadores de señales fueron proyectados en el laboratorio de energía e sistemas térmicos, LEST, para establecer un formato adecuado a las señales para que sean captadas por el PLC. Una imagen de nuestro banco experimental es mostrada en la figura 1 y 2.

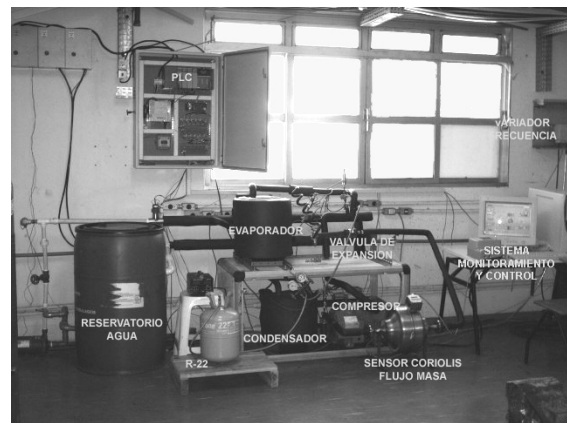


Figura 2. Banco Experimental con aislante térmico.

En el caso del acondicionamiento de las señales de los sensores de presión se utilizó un circuito integrado INA111 [3] como amplificador de instrumentación de entrada tipo FET de excelente rendimiento. Para las señales de temperaturas su acondicionamiento fue proyectado a través del circuito instrumentación INA125. [2]

3. Ecuaciones Utilizadas

Para el agua

$$\dot{Q} = \dot{m}_w (h_{w,ex} - h_{w,su}) = \dot{m}_w C p_w (T_{w,ex} - T_{w,su})$$

\dot{Q} = Flujo calórico en, (Kw)

\dot{m}_w = Flujo masico de agua, en (Kg/s)

$h_{w,ex}$ = Entalpia del agua a la salida, en (Kj/Kg)

$h_{w,su}$ = Entalpia del agua a la entrada, en (Kj/Kg)

$C p_w$ = Calor especifico del agua, en (Kj / (Kg * °C))

$T_{w,ex}$ = Temperatura del agua a la salida, en °C

$T_{w,su}$ = temperatura del agua a la entrada, en °C

Para el Refrigerante

$$\dot{Q} = \dot{m}_{ref} (h_{ref,ex} - h_{ref,su})$$

\dot{m}_{ref} = Flujo masico de refrigerante, en (Kg/s)

$h_{ref,ex}$ = Entalpia del refrigerante a la salida del evaporador, en (Kj/Kg)

$h_{ref,su}$ = Entalpia del refrigerante a la entrada, en (Kj/Kg)

$$COP = \frac{\text{Efecto util}}{\text{Trabajo necesario}} = \frac{\dot{Q}_{ev}}{\dot{W}}$$

\dot{Q}_{ev} = Flujo calórico en el evaporador, en (KW).

\dot{W} = Potencia consumida en el compresor, en (KW).

4. Resultados Experimentales

Para obtener los resultados experimentales se realizaron los siguientes procedimientos:

4.1 Conocimiento de las condiciones iniciales de la bancada experimental.

En estas condiciones se tuvo un primer contacto con el comportamiento del sistema en función de la variación de la frecuencia del compresor [6], manteniendo constante los flujos máxicos de agua en el condensador, evaporador, de R-22 en el circuito y la temperatura de

entrada del agua al evaporador, tratando de mantener una diferencia máxima de temperatura en el evaporador mediante la variación de la frecuencia, encontrando un mejor comportamiento en el sistema para frecuencias comprendidas entre el rango de 35-60 Hz..

4.2 Apertura de la válvula de expansión.

Para determinar la influencia de la válvula de expansión en el rendimiento del ciclo de refrigeración se vario esta por diferentes posiciones angulares obteniendo los mejores resultados a partir de las posiciones 0°, 45°,90°,135° y 180° de apertura de la válvula, se llamo 0° a la posición de la válvula totalmente cerrada.

4.3 Carga de Refrigerante.

Para determinar la influencia de la carga de refrigerante en el rendimiento del sistema de refrigeración se adicionó 350 gramos de refrigerante R-22, variándose la frecuencia y la posición de la válvula de expansión se observó el comportamiento del ciclo.

Como medida de control del sistema de refrigeración se establecieron las temperaturas de sub-enfriamiento del refrigerante a la salida del condensador y supercalentamiento a la entrada del compresor, superiores a 10°C.

En la figura 3 podemos apreciar la variación del coeficiente de operación (COP) con la frecuencia del compresor, en ella se aprecia que para frecuencias por debajo de 60Hz que es la frecuencias normal de operación de los compresores en nuestro país se obtuvieron los menores valores del COP y para frecuencias inferiores se encontraron los mayores valores, lo que implica un consumo de energía eléctrica menor.

El incremento del COP logrado al disminuir la frecuencia de 60 Hz a 35 es superior al 25 %, lo que hace necesario trabajar en propuestas tendientes a disminuir la frecuencia de operación, de los compresores utilizados en sistemas de refrigeración y aire acondicionado. Por otra parte al variar el ángulo de rotación de la válvula de expansión para una misma frecuencia el COP disminuye para frecuencias de 40,50 y 60 Hz, mientras que para la frecuencia de 35,45 y 55 Hz se incrementa hasta unos grados de rotación de la válvula, siendo este el valor máximo obtenido y luego decrece.

Según el estudio es necesario involucrar en los equipos de refrigeración existentes compresores que operen con frecuencias variables, y además con un posicionamiento adecuado de la apertura o cierre de la válvula de expansión, tratando de operarlos con aquella frecuencia que además de proporcionar las condiciones de refrigeración necesarias conlleve a consumir menos energía, o implementar nuevos sistemas de control que

permitan modificar la apertura de la válvula de expansión y la frecuencia de rotación de los compresores.

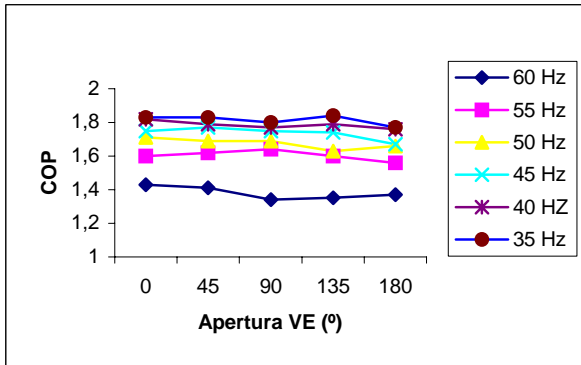


Figura 3. Variación del COP en función de la frecuencia del compresor y la apertura de la válvula de expansión.

En la figura 4, observamos como se incrementa la potencia del compresor en la medida en que aumentamos la frecuencia, obteniendo la más alta 3,3 Kw para una frecuencia de 60Hz y la más baja 1,6 Kw para 35 Hz, lo que quiere decir que al operar el sistema de refrigeración con una frecuencia de 35 Hz estamos obteniendo un ahorro en el consumo de energía de más del 50%, esto puede ser posible para aplicarlo en aquellos sistemas de refrigeración domiciliarios en donde después de haber logrado las condiciones de confort del producto, el sistema solo necesita sostener las pérdidas de calor debida al ambiente, si en lugar de utilizar un sistema on-off, se utiliza uno de frecuencia variable con sus respectivos controles, se pueden lograr ahorros de energía considerables.

En la figura 5, se observa un incremento de la carga térmica cuando la frecuencia es alta y una disminución en sentido contrario, se obtuvo la mayor carga 4,7 Kw con la frecuencia de 60 Hz y la menor 3,0 Kw con la de 35, lográndose una reducción en la capacidad de refrigeración del 36% al trabajar con la frecuencia de 35 Hz, al abrir la válvula de expansión la carga térmica disminuye, conservando la relación que se debe

mantener entre la frecuencia y la apertura de la válvula de expansión, es decir para aumentar la capacidad de refrigeración del sistema se debe incrementar la frecuencia y cerrar la válvula de expansión y para disminuirla lo contrario.

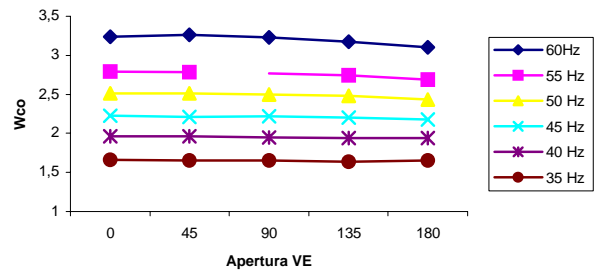


Figura 4. Variación del trabajo del compresor en función de la frecuencia del compresor y la apertura de la válvula de expansión.

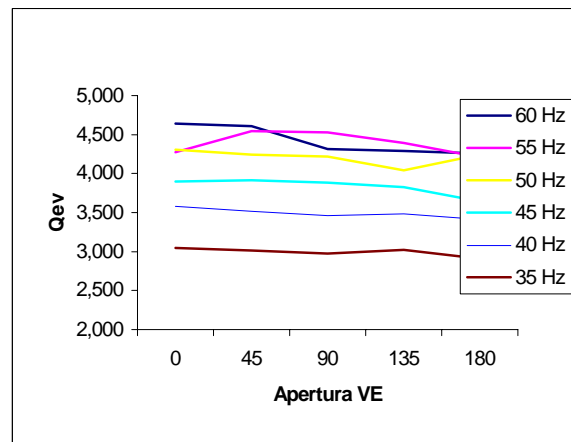


Figura 5. Variación de la carga térmica del evaporador en función de la frecuencia del compresor y la apertura de la válvula de expansión.

Con respecto a la temperatura de sobrecalentamiento en la figura 6, apreciamos que esta se incrementa al abrir la válvula de expansión y disminuye al disminuir la frecuencia de rotación del compresor, la temperatura de sobre calentamiento es la protección que tiene el compresor para la bancada experimental, y para el experimento en mención siempre fue superior a los 6°C.

Sin embargo cuando al sistema lo cargamos con 350 gramos de R 22 realizando los mismos ensayos encontramos algunos comportamientos similares a los anteriores.

En la figura 7, se puede apreciar como al adicionar carga de refrigerante al sistema, el COP se incrementó 16% con respecto del anterior, con lo cual se demuestra que si

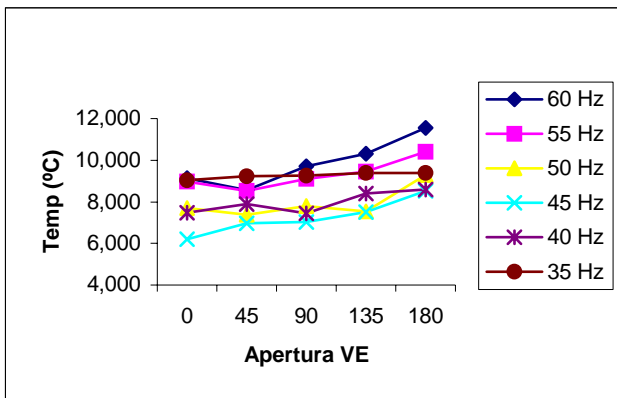


Figura 6. Variación de la temperatura de supercalentamiento en función de la frecuencia del compresor y la apertura de la válvula de expansión.

bien la aplicación de técnicas de control en los sistemas de refrigeración es importante en el incremento de la eficiencia la carga de refrigerante también se debe tener en cuenta debido a que existe una relación directa entre está y el COP.

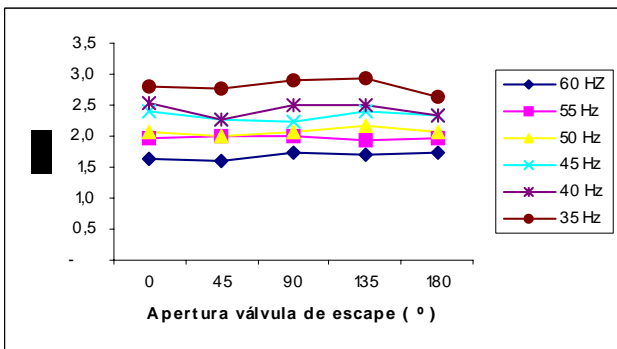


Figura 7. Frecuencia Vs cop con 350 gramos de R 22

En la figura 8, la masa de refrigerante proporciona un cambio en el trabajo del compresor, pasando de un valor máximo a 60 Hz de 3,25 a 3,65 lo que representa un incremento del 10% del valor inicial, sin embargo aunque el trabajo se ve incrementado la razón de incremento en el evaporador es mucho mayor lo que hace que el COP se vea aumentado.

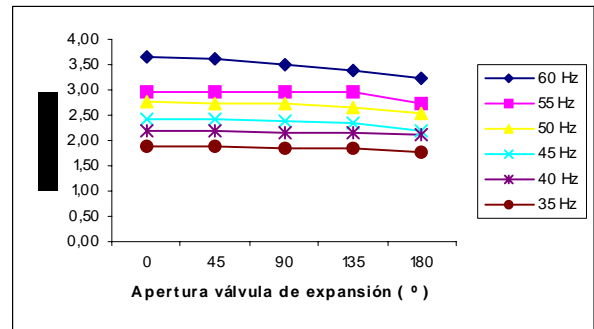


Figura 8. Potencia del compresor Vs Frecuencia con 350 gramos de R 22

5. CONCLUSIONES

Con la utilización de compresores de frecuencia variable operado por un buen sistema de control con un cambio en la velocidad del compresor, se permite que el sistema opere más confortable y adecuadamente a diferentes condiciones de trabajo incrementando el COP hasta en un 25%.

Con la utilización de un buen sistema de control de la frecuencia de rotación del compresor y la apertura de la válvula de expansión se pueden lograr ahorros de energía superiores al 22% en los sistemas de refrigeración y aire acondicionados residenciales y comerciales.

En los sistemas de refrigeración y aire acondicionado la carga de refrigerante contribuye al incremento o la disminución en el consumo de energía y el COP.

Finalmente, el hecho de aplicar variador de frecuencia en estos sistemas como herramienta de automatización, permite una economía de energía eléctrica, reducción de costos y mayor confiabilidad en relación al uso de estos sistemas.

6. RECONOCIMIENTOS

Los autores gustaría de expresar su agradecimiento a la CNPQ (Consejo nacional de desarrollo científico y tecnológico BRASIL) por el apoyo financiero y a COLCIENCIAS por el apoyo brindado para el desplazamiento del investigador.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Allan Bradley, (1994). "Instruction set reference PLC-5 programming software", Allan Bradley Company Inc, Cat. 6200-6.4.11
 - [2] Burn-Brown, (2005) DataSheet "Instrumentation amplifier precision INA125", Texas Instruments Incorporated, pág 10.
 - [3] Burn-Brown, (2005) DataSheet "High speed FET-Input instrumentation amplifier precision INA111", Texas Instruments Incorporated, 7p.
 - [4] Cardenas N. Israel, (2002). Uso de Controladores Fuzzy Adaptativos implementados em microcontroladores, en el controle de vibraciones de sistemas mecanicos. 250 pp. Teses Mestrado en Ingenieria Mecanica - Universidad Federal de Uberlândia.
 - [5] Da Silva F.V, Junior V.S. (2001) Controle fuzzy da temperatura de condensação de um sistema de resfriamento chiller. XVI Congresso Brasileiro de engenharia mecânica COBEM 2001/ABCM, Vol. 5, p189-195.
 - [6] Garstang, S. W, 1990, Variable frequency speed control of refrigeration compressors. International Congress of Refrigeration, Australia.
- Silva Roberto M. (2004) "Revista da Associação Brasileira de Refrigeração e Ar condicionado, Ventilação e Aquecimento, ABRAVA", No. revista 213, p26.
- Wylen G. J; Borgnakke C (2003) Fundamentos da Termodinâmica. Editorial Edgard Blucher Ltda. São Paulo, Brasil.