

**PROPOSAL TO USE ADAPTIVE CONTROL IN WATER CHILLERS FOR USE  
IN VAPOR COMPRESSION REFRIGERATION SYSTEMS**

**PROPUESTA DE USO DE CONTROL ADAPTATIVO EN RESFRIADORES DE  
AGUA PARA USAR EN SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN POR  
COMPRESION DE VAPOR**

**PhD. Francisco Ernesto Moreno Garcia, PhD. Enio Pedone Bandarra Filho  
PhD. Oscar Saul Hernandez Mendoza**

**Universidade Federal de Uberlândia.**

Laboratório de Energia e Sistemas Térmicos, LEST, Faculdade de Engenharia Mecânica,  
Av. João Naves de Ávila, 2160, Santa Mônica, Bloco 1M, Uberlândia, MG, Brasil.  
E-mails: {femgarcia, bandarra.br, oscarhm}@mecanica.ufu.br

**Abstract:** The present work evaluates a self-contained air condition refrigeration unit (5 TR; 17.5 kW). In order to realize the experimental evaluation and analysis, evaporator is operated with water instead of humid air, as secondary fluid. Normally the self contained refrigeration unit uses “on-off” control and a fixed compressor rotation. This paper evaluates the possibility of using adaptative control, instead of on-off control, actuating on a Variable Speed Drive that operate the compressor, several experimental analysis were made, looking forward the selection of the best control strategy, with system operating in partial charge mostly; paper shows results obtained and future works to be realized.

**Resumen:** El presente trabajo evalúa unidad de aire de refrigeración autónoma (5 TR; 17,5 kW). El evaporador es operado con agua en lugar de aire húmedo, como fluido secundario con el fin de realizar la evaluación y análisis experimental. Normalmente, la unidad de refrigeración autónoma utiliza un control “on-off” y una rotación fija de compresores. También se evalúa la posibilidad de utilizar el control adaptativo, en lugar de control “on-off”, con el accionamiento de un variador de frecuencia que opera el compresor, fueron realizados una serie de análisis experimentales, atendiendo a la selección de la mejor estrategia de control, con el sistema operativo en carga parcial en su mayoría; el trabajo muestra los resultados obtenidos y los trabajos futuros a realizar.

**Keywords:** Control process, Fuzzy adaptive, Refrigeration system, Variable Speed Drive.

## 1. INTRODUCCION

En la ultima década, se han destacado las técnicas de control inteligente fuzzy o neural para controlar sistemas, fuertemente desarrolladas en aplicaciones de investigación e industria (Borja, T. J. A. 2006). 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 objetivo de este trabajo es aplicar la teoría adaptativa a plantas desconocidas, por sintonización parametrizadas heurísticamente. Primeramente, el control fuzzy como base describe a través de reglas (*if – then.*) una orientación humana para obtener un aprendizaje afianzado de los sistemas a partir de la

experiencia del proyector (Da Silva et al. 2001). Esta es la principal característica para desarrollar control a procesos envolviendo reglas lógicas reales. Sin embargo, investigadores cuestionan los sistemas que presentan modificaciones dinámicas, donde claramente es considerado prioridad la estabilidad del sistema. Un gran número de investigaciones por ejemplo (Ferreira A. et al. 1999) se han enfocado en tratar aquellas modificaciones en los procesos. Estas investigaciones generaron en los últimos tiempos justificación para el uso de los controladores fuzzy adaptativos. Son controladores que revelan alguna capacidad de modificar su comportamiento en respuesta a cambios dinámicos del proceso o perturbaciones. Paralelamente, la instrumentación va de la mano con el control como herramienta para automatizar y optimizar sistemas de aire acondicionado y de refrigeración. Permitiendo que el usuario pase a tener condiciones de controlar la operación a partir de una central, utilizando hardware y software apropiados. (Silva Roberto M, 2004). Este trabajo presenta la construcción, instrumentación, y desarrollo de un control fuzzy adaptativo aplicado a una banco experimental 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 el rendimiento (COP) del sistema para mantener apropiadamente las condiciones normales de operación en función de las principales variables del proceso.

## 2 CONCEPTOS BÁSICOS

El ciclo de refrigeración por compresión puede ser estudiado de acuerdo con las características termodinámicas de sus equipos y generalmente, es denominado ciclo saturado simple. Por intermedio de este podemos acompañar el desempeño y control del proceso. El ciclo usado puede ser visto según la figura 1.

Iniciando con el refrigerante que es comprimido en el compresor en estado de vapor, a una presión y temperatura alta, sigue directamente para el condensador. En este el calor ganado en el proceso de compresión es rechazado para un medio exterior, ocasionando así un cambio de fase vapor para líquido. Al dejar el condensador, el fluido refrigerante sigue para el dispositivo de expansión. Este dispositivo provoca una caída de presión, responsable también por la caída de temperatura. En seguida el refrigerante, entra en el evaporador, donde recibe calor del medio circundante,

cambiando de fase hasta su completa evaporación. En la secuencia, el fluido, en fase vapor, sigue para el compresor, iniciando nuevamente otro ciclo. (Wyllen G. J; Borgnakke C., 2003).

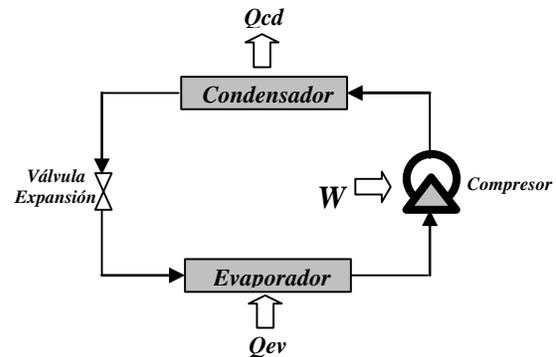


Fig 1. Ciclo de refrigeración por compresión

## 3. BANCO EXPERIMENTAL

El diseño de nuestro banco experimental como se muestra en la fig. 2, está compuesto primordialmente por un compresor semi-hermético, válvula de expansión termostática, intercambiadores de calor condensador y evaporador de tubos concéntricos. El fluido secundario, agua, para alimentación del condensador circula por una torre de resfriamiento. 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). Un variador de frecuencia tiene como función controlar la rotación del compresor de acuerdo a la lógica de control deseada para el sistema.

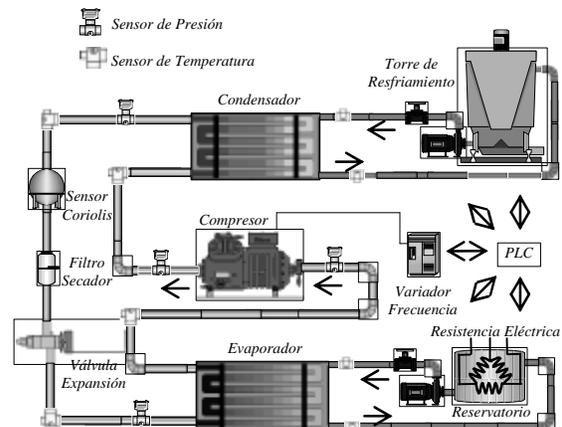


Fig 2. Representación esquemática del banco experimental

Un medidor de flujo másico tipo Coriolis fue utilizado para evaluar el flujo de masa del refrigerante R-22 del circuito principal. Las Temperaturas, presiones, flujo másico, son adquiridas a través del PLC y gerenciados a través desde un software implementado en Labview®. Una Imagen de nuestro banco experimental es mostrado en la figura 3.



Fig 3. Banco Experimental con aislante térmico

Los sensores de temperatura aplicados para el banco experimental fueron los dispositivos RTD de 3 hilos modelo PT100 con operación entre los  $-30^{\circ}\text{C}$  hasta  $100^{\circ}\text{C}$ . Fueron utilizados transductores 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 fornecer un formato adecuado a las señales para ser captadas por el PLC.

En el caso del acondicionamiento de las señales de los sensores de presión se utilizó un circuito integrado INA111 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.

#### 4. CONTROLADOR FUZZY ADAPTATIVO

Muchos de los procesos del mundo real que requieren control automático son de naturaleza no lineal, con parámetros dependientes de las condiciones de operación (Cardenas N. Israel, 2002). La necesidad de identificar estos cambios y de adaptarse a nuevas condiciones adiciona a los controladores fuzzy adaptativos dos componentes extras, que no están presentes en los controladores

fuzzy convencionales. El primer componente es el “monitor de procesos” que detecta los cambios en las características del proceso. Este monitoramiento puede ser hecho de dos maneras: midiendo el desempeño del sistema sobre el control o estimando continuamente algunos parámetros del modelo del proceso.

El segundo componente responsable es el “mecanismo de adaptación”. Este mecanismo puede modificar los parámetros del controlador, para mejorar el desempeño con base en las salidas del monitor de proceso. La figura 4 muestra el esquema general de un controlador fuzzy adaptativo tipo con sus componentes.

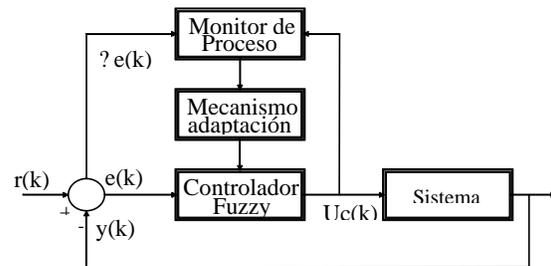


Fig 4. Controlador Fuzzy Adaptativo

Para realizar el control del sistema con base en la información anteriormente presentada, fue usado, inicialmente, un controlador *fuzzy* principal (convencional) y en seguida fue implementado un mecanismo *fuzzy* de adaptación de ganancia. El diagrama de bloques del controlador *fuzzy* principal (convencional) es mostrado en la figura 5.

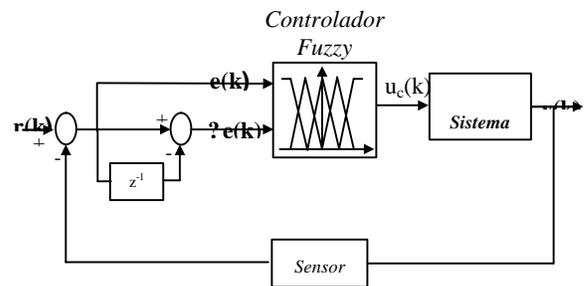


Fig 5. Controlador Fuzzy convencional

Fueron definidos para cada una de las entradas del controlador fuzzy principal tres funciones de pertinencia [(N)egativo, (Z)ero e (P)ositivo] del tipo triangular e igualmente espaciadas y definidas dentro de un universo del discurso sintonizados de forma heurística, conforme en la fig. 6.

La salida del controlador fuzzy es de tipo sugeno de orden cero, con valores “crisp” (N=-1.0, Z=0 y P=1.0) constantes. El mecanismo de inferencia utilizado fue el max-prod.

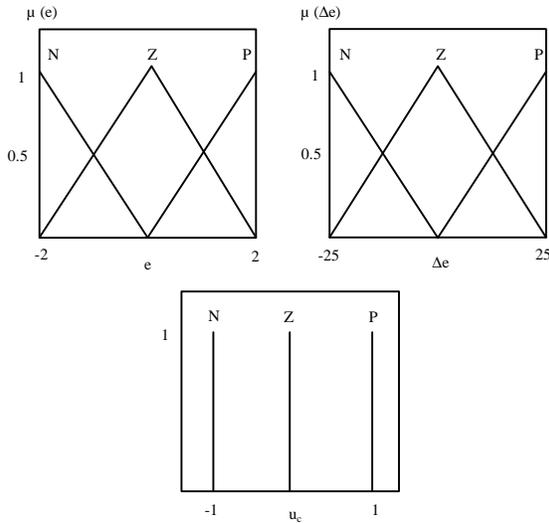


Fig 6. Funciones de pertinencia fuzzy de las variables de entrada y salida del controlador

La definición de las variables de entrada del controlador fuzzy es evaluada a partir de la señal de error y de la variación del error, así, definidas por las siguientes ecuaciones:

$$e(k) = r(k) - y(k) \quad (1)$$

$$\Delta e(k) = \frac{e(k) - e(k-1)}{\Delta t} \quad (2)$$

Donde \$k\$ y \$t\$ se refieren al instante \$e\$ al intervalo de tiempo utilizados, \$y(k)\$ es la lectura del sensor de temperatura.

Una vez proyectado el controlador principal, el segundo paso es la adición del mecanismo de adaptación. Para eso, el universo del discurso del controlador principal fue normalizado en un intervalo de -1 a 1, y acoplado al controlador fuzzy principal. El mecanismo fuzzy de adaptación de la ganancia conforme se muestra en la figura 7.

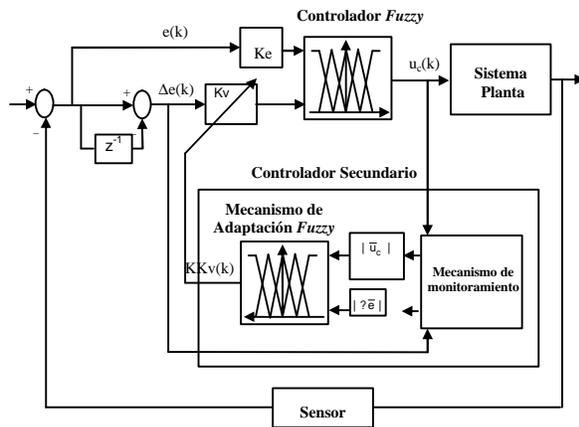


Fig 7. Controlador fuzzy adaptativo.

Cabe destacar que o sistema é monitorado a partir da média absoluta da derivada do erro \$|\Delta \bar{e}|\$ e da média absoluta da saída do controle \$|\bar{u}\_c|\$ observando os três últimos tempos de amostragem. Estes valores são calculados da seguinte forma:

$$|\Delta \bar{e}| = \frac{|\Delta e(k)| + |\Delta e(k-2)| + |\Delta e(k-3)|}{3} \quad (3)$$

$$|\bar{u}_c| = \frac{|u_c(k)| + |u_c(k-2)| + |u_c(k-3)|}{3} \quad (4)$$

De forma similar al controlador fuzzy, fueron definidos para cada una de las entradas del mecanismo fuzzy adaptación, tres funciones de pertinencia [(P-pequeño, (M-médío e (G-grande)] de tipo triangular, definidas dentro del universo de discurso de las variables de entrada y sintonizadas de forma heurística, como lo ilustra la figura 8. el mecanismo de inferencia fue *max-prod* y de salida de tipo sugeno de orden cero.

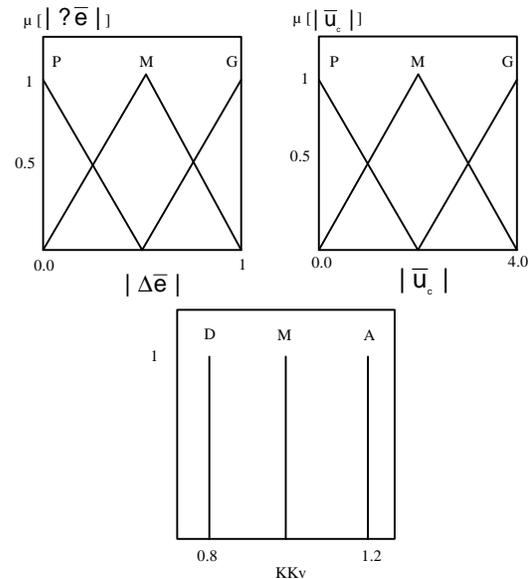


Fig 8. Funciones de pertinencia e intervalos fuzzy de las variables de entrada del mecanismo de adaptación.

#### 4.1 Avaliação del Sistema en malla Cerrada.

Para la realización de los ensayos, con el objetivo de evaluar el desempeño del controlador lógico difuso adaptativo, el sistema es operado inicialmente en malla abierta (sin control) trabajando en régimen permanente con condiciones impuestas al banco experimental, como temperatura del agua en la entrada del evaporador (T8) a 22 °C, temperatura del agua en la salida del evaporador (T5) a 14,6 °C y a frecuencia de 50 Hz.

En el momento en que el controlador es activado, este observa condiciones iniciales de altos errores y pequeña acción de controle, por tanto el controlador difuso se adapta por medio de su factor de escala  $K_v$  ajustado por la salida  $KK_v$  en el mecanismo interno de adaptación.

Con el transcurrir de tiempo, el valor de  $K_v$  elevado, el controlador queda más sensible al error, consecuentemente, un número mayor de reglas del controlador principal es utilizado, lo que mejora el desempeño del controlador. El valor inicial de  $K_v$  influencia, por tanto, el número de reglas envueltas en el controlador principal al iniciarse el proceso de control y la velocidad con que otras reglas son alcanzadas. Así el valor  $K_v$  asumido inicialmente afecta el tiempo de acomodación del sistema controlado. Como puede ser observado en la figura 9, el momento en que el controlador, con su máxima sensibilidad adaptada actúa en el sistema aumentando la frecuencia del compresor, ósea, un incremento inmediato en las presiones de alta, teniendo como objetivo llevar la temperatura del agua en la salida del evaporador (T5) hacia una temperatura previamente estipulada (setpoint) establecida en el controlador. En estas condiciones, se registro un tiempo transitorio de 25 segundos y tiempos de acomodación de 55 segundos.

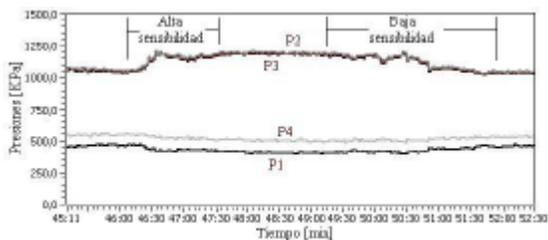
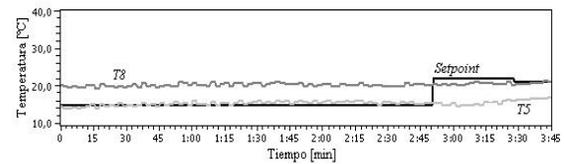


Fig 9. Comportamiento de las presiones del sistema con control lógico difuso Adaptativo.

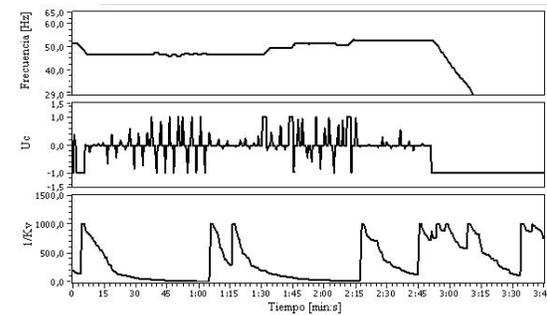
Cuando el sistema converge, se tiene una situación de bajas señales de entrada y bajas señales de control y un valor de  $K_v$  prácticamente constante ( $KK_v=1$ ). El controlador, una vez detectado una condición de equilibrio del proceso (caracterizado por  $KK_v$  próximo de la unidad durante un cierto tiempo), disminuye el valor del factor de escala, así, su sensibilidad queda robusta. Por tanto, un bajo valor de  $K_v$  implica un tiempo mayor de régimen transitorio.

Estos resultados estimularon más experimentos realizados sobre condiciones impuestas a nuestro banco experimental.

El comportamiento del controlador lógico difuso adaptativo puede ser observado en la figura 10. Para los 2 primeros minutos y 50 segundos el controlador mantiene la temperatura del agua en la entrada del evaporador (T5) referenciada a un *setpoint* (Sp), en este periodo el controlador detecta condiciones de equilibrio del proceso, generando bajas señales de salida ( $U_c$ ) que gradúan levemente la frecuencia adecuada del compresor, como puede ser observada en la figura 10b. Ese efecto con el controlador robusto presenta suaves tiempos transitorios en la evaluación de las presiones del sistema, ver figura 11.



(a)



(b)

Fig 10. Efectos del controlador lógico difuso adaptativo en el sistema. (a) evolución de las Temperaturas de control e de referencia del evaporador. (b) Sensibilidad ( $1/K_v$ ), señal de salida ( $U_c$ ) del controlador.

Después de los 2 minutos y 50 segundos, cuando en el sistema sufre una alteración significativa, por ejemplo, alteración en el *setpoint* (Sp) mostrada en la misma figura 10a, el controlador observando la condición inicial de elevados errores y de pequeño control, actúa de forma a aumentar su sensibilidad a través de su factor de mecanismo interno de adaptación. En las figuras 10b y 11 puede ser observado el momento en que el controlador con su máxima sensibilidad adaptada actúa en el sistema disminuyendo inmediatamente la frecuencia del compresor, o sea, un decremento inmediato en las presiones de alta, con objetivo de llevar la temperatura del agua en la salida del evaporador (T5) a una nueva temperatura de *setpoint* establecida en el controlador.

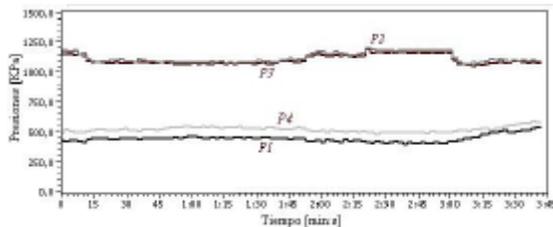


Fig 11. Evolución de las presiones del sistema con el controlador lógico difuso adaptativo.

## 5. CONCLUSIONES

Se implementada una estructura adecuada para el ciclo por compresión de vapor, controlando la velocidad de rotación del compresor en un banco de prueba experimental, que fue proyectado, construido e instrumentado. En el proyecto y montaje de los acondicionadores de señal fue llevado en consideración la implementación de amplificadores operacionales de instrumentación (INA125 e INA111), que presentaron un comportamiento lineal con la variable medida.

Pruebas experimentales realizadas adicionalmente con diferentes estrategias de control aplicadas a este tipo de sistema, se determinó una economía de energía y mejoramiento en el rendimiento (COP) del sistema representado por una baja demanda de potencia menores de 2.40 kW, obtenidos por parte del control adaptativo con un conjunto de reglas *fuzzy* que permitieron tratar de forma adecuada las variaciones de la carga térmica del ambiente en el transcurso de un día. Por otro lado, estrategias comunes encontradas en el mercado como el controlador *on-off*, no consiguió mantener el sistema estable. Su comportamiento represento oscilaciones en la variable condicionada, representando mayor deficiencia y comprometiendo el compresor al ser trabajado en modo directo *on - off* con demandas de potencia mayores a 2,90 kW. Evidentemente, el aporte al trabajar técnicas adaptativas, en este caso aplicado a la velocidad del compresor, permitió que el sistema de refrigeración por compresión a vapor, opere más estable y representa al consumidor economías de energía en el orden de los 17.2% bajo las condiciones de trabajo experimentadas.

Una proyección educacional e industrial hacia un futuro de este trabajo, coloca a disposición el aprendizaje y entrenamiento de las diferentes estrategias de control inteligentes multivariables actuando en válvulas de expansión y compresores semi-herméticos simultáneamente cuando más de una variable se desea controlar.

## 6. RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen a las empresas ACP Termotécnica, por la donación de los intercambiadores de calor y BITZER internacional Compresores por el compresor del sistema. A la FEMEC, Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Federal de Uberlândia y al CNPq (Consejo nacional de desarrollo científico y tecnológico BRASIL) por el apoyo financiero.

## REFERENCIAS

- Allan Bradley, (1994). "Instruction set reference PLC-5 programming software", Allan Bradley Company Inc, Cat. 6200-6.4.11
- Borja, T. J. A. (2006) Automatización y control inteligente on-line de sistemas de refrigeración utilizando redes neurales artificiales. 124 pp. Teses de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.
- Burn-Brown, (2005) DataSheet "Instrumentation amplifier precision INA125", Texas Instruments Incorporated, pág 10.
- Burn-Brown, (2005) DataSheet "High speed FET-Input instrumentation amplifier precision INA111", Texas Instruments Incorporated, 7p.
- Cardenas N. Israel, (2002). Uso de Controladores Fuzzy Adaptativos implementados em microcontroladores, en el controle de vibraciones de sistemas mecanicos. 250 pp. Teses Mestrado em Engenharia Mecânica - Universidad Federal de Uberlândia.
- 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.
- Ferreyra A, Fuentes R. 1999. Estudio comparativo entre control pid y difuso. SOMI XIII-Congreso de Instrumentación, Ensenda, Mex.
- Garstang, S. W, 1990, Variable frequency speed control of refrigeration compressors. International Congress of Refrigeration, Australia.
- Luigi, R. B., 2006, Automação de processos industriais e produtivos. Revista Climatização & Refrigeração - No 72, pág 45-50.
- 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.