

SISTEMA DE CONTROL DIFUSO PARA UN COMPRESOR DE FRECUENCIA VARIABLE UTILIZANDO ARDUINO

Donato Hernández¹, Sergio Ledesma¹, Rogelio Castro¹, Juan Manuel Belman¹ y David Alejandro Rodríguez¹

¹ Universidad de Guanajuato
División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca
Carretera Salamanca-Valle de Santiago km 3.5+1.8

e-mail: donato@ugto.mx, selo@ugto.mx, castro@ugto.mx, jfbelman@ugto.mx y davidalejandrory@gmail.com

RESUMEN

Hoy en día los sistemas de refrigeración domésticos son los dispositivos que consumen la mayor cantidad de energía en los hogares. Sin embargo, los sistemas de control que se utilizan mayoritariamente por los fabricantes siguen siendo los controles tradicionales PID (Proporcional, Integral y Derivativo) junto con compresores que operan a un valor de frecuencia fija. En esta investigación se busca obtener un sistema de control para un compresor de frecuencia variable utilizando algoritmos de Lógica Difusa y la implementación mediante un microcontrolador de la familia Arduino. Posteriormente se analizaron los datos obtenidos tanto de la variación de la temperatura de las diferentes zonas de un refrigerador comercial, así como el consumo de energía y se compararon contra el uso del sistema de control tradicional del refrigerador.

Palabras clave: refrigeración, compresor, lógica difusa.

ABSTRACT

Today, domestic refrigeration systems are the devices that consume the most energy in homes. However, the control systems that are mostly used by the manufacturers are still the traditional PID controls (Proportional, Integral and Derivative) together with the compressors that operate at a fixed frequency value. This research seeks to obtain a control system for a variable frequency compressor using the Fuzzy Logic algorithms and the implementation through a microcontroller of the Arduino family. Subsequently, the data obtained was analyzed both from the variation of the temperature of the different zones of a commercial refrigerator, as well as the energy consumption and are compared against the use of the traditional control system of the refrigerator.

Keywords: refrigeration, compressor, fuzzy logic.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de refrigeración domésticos presentan un alto consumo de energía, durante el proceso de intercambio de calor que se realiza durante el tiempo que le lleva al compresor llegar al estado de estabilidad térmica. Estos sistemas representan alrededor un 17% de la energía total demandada a nivel mundial [1]. Además, la refrigeración doméstica basada en la

compresión de vapor presenta un impacto considerable al medio ambiente por el uso de ciertos fluidos refrigerantes [2].

Es decir que, si se logra disminuir la duración del tiempo en el que se presenta la estabilidad térmica, mediante el uso de compresores más eficientes y el control adecuado, se tendrá como consecuencia una disminución en el consumo de energía y en el impacto al medio ambiente. Una vez que se ha llegado al estado de estabilidad térmica, es necesario mantener la temperatura de los compartimientos del refrigerador dentro de los límites preestablecidos, mediante la operación del compresor a una frecuencia mínima. Cuidando que el consumo de energía sea el mínimo necesario para seguir conservando ese estado de equilibrio térmico, llegando el compresor incluso al estado de apagado, ya que el proceso de intercambio de calor es mínimo.

Entre los fabricantes de los refrigeradores comerciales es común observar que muchos de ellos promocionan sus productos con un consumo muy bajo de energía, pero muy pocos son los que han cambiado el diseño de sus productos, para incluir los compresores de frecuencia variable. Dichos compresores de frecuencia variable requieren un sistema de control diferente a los tradicionales On-Off que se utilizan en los compresores que opera a una sola frecuencia.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera. La sección 2 presenta algunos trabajos relacionados en el campo de la refrigeración doméstica y la Lógica Difusa. La sección 3 presenta la configuración experimental y el refrigerador utilizado para la realización de las pruebas. En la sección 4 se presentan los resultados experimentales. Finalmente, la sección 5 indica las principales aportaciones y algunas orientaciones de trabajo futuro.

2. TRABAJO RELACIONADO

El beneficio principal de la teoría de los sistemas difusos es la de aproximar el comportamiento de los sistemas donde las funciones analíticas o las relaciones numéricas no existen o son demasiado complejas para deducirlas.

Alternativamente, la teoría de los sistemas difusos puede ser útil para evaluar algunos de los sistemas convencionales, menos complejos. Por ejemplo, para algunos problemas, las soluciones exactas no siempre son necesarias, una solución aproximada, pero rápida, puede ser útil para hacer una evaluación preliminar y tomar las decisiones de diseño o como una estimación inicial en una técnica numérica más precisa y ahorrar así en costos computacionales, también en las situaciones donde las entradas a un problema son ambiguas o desconocidas en absoluto.

Varias fuentes han demostrado que los sistemas difusos son aproximaciones universales [3]. La teoría de los sistemas difusos descansa en el teorema fundamental del análisis real en álgebra conocido como el Teorema de Stone-Weierstrass, desarrollado por primera vez en el siglo XIX por [4] y después simplificado por [5].

A continuación, se presenta la estructura de un sistema de control usando lógica difusa.

2.1. ESTRUCTURA DE UN SISTEMA DIFUSO

La estructura de un sistema difuso comprende una implicación entre acciones y conclusiones de ambas entidades (álgebra y sistemas difusos) e implican un mapeo entre los elementos de dos o más dominios. Al igual que una función algebraica realiza el mapeo de una variable de entrada a una variable de salida, en un sistema difuso se asigna un grupo de valores de entrada a un grupo de salida.

Los pasos involucrados para la realización de un sistema de control difuso son los siguientes:

- Convertir las variables de entrada (Crispy) en variables de verdad (Fuzzification).
- Calcular los valores de verdad de las variables de salida mediante la aplicación de reglas (Rule evaluation).
- Transferir los valores de verdad a las variables de salida (Defuzzification).

Cada uno de estos pasos involucra una serie de operaciones y transformaciones necesarias para convertir las variables de entrada a variables de verdad o membresía, que nos sirven para calcular las variables de salida. A continuación, van a ser explicados algunos conceptos necesarios para la implementación de los sistemas difusos.

2.2. CONJUNTO DE VARIABLES DIFUSAS

Un conjunto difuso de variables es un conjunto que contiene elementos que tienen diversos grados de membresía en el conjunto. Esta idea es contraria con los conjuntos clásicos, porque los miembros de un conjunto no serían miembros a menos que su membresía esté completa, en ese conjunto (es

decir, la membresía tiene un valor de 1.0). En los elementos de un conjunto difuso, no es necesario que sea completo, también pueden ser miembros de otros conjuntos difusos en el mismo universo. Los elementos de un conjunto difuso se asignan a un universo de valores de membresía usando la forma de una función teórica. Las funciones teóricas pueden ser del tipo lineal, logarítmica, exponencial, etc.

A este proceso se le conoce como Fuzzification y es el primer paso para realizar cualquier sistema de control difuso.

Como se puede apreciar en la Figura 1, la cual corresponde a la representación de la variable de entrada Temperatura con sus correspondientes valores de tres variables difusas Frio, Normal y Caliente. En este caso se utilizaron las funciones del tipo lineal. En la Figura 1 se puede observar que por ejemplo para una temperatura de 40, se obtienen los valores de 0.5, 0.5 y 0.0 para las variables difusas Frio, Normal y Caliente respectivamente. Así como también puede ser visto que para una temperatura de 50 los valores que se obtienen son 0.0, 1.0 y 0.0 para Frio, Normal y Caliente.

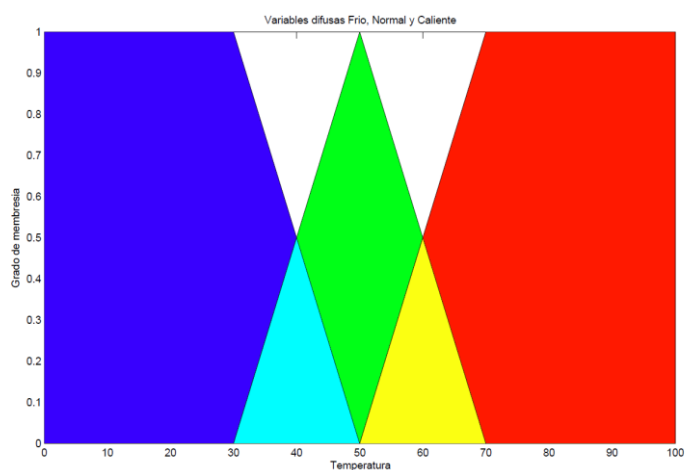


Figura 1.- Fuzzification

También se puede observar a partir de la Figura 1 que existen ciertos rangos de la variable de entrada Temperatura, para los cuales solo una de las variables difusas tiene un valor de 1.0, por ejemplo, para el rango de 0 a 30 los valores de las variables difusas Frio, Normal y Caliente son 1.0, 0.0 y 0.0 respectivamente. Este tipo de valores son muy comunes en las variables difusas y nos ayudan para realizar un mejor control en los sistemas de control difusos.

Enseguida se establecerán las bases para la realización de las operaciones con las variables de los conjuntos de la lógica difusa.

2.3. OPERACIONES CON LOS CONJUNTOS DIFUSOS

Los conjuntos de variables difusas permiten la realización de varias operaciones [6], algunas de ellas son muy parecidas a las operaciones lógicas, es decir las operaciones definidas para los conjuntos de variables lógicas (Unión, Intersección y Complemento). Con estas operaciones se pueden realizar combinaciones para obtener expresiones más complejas.

Las operaciones que se encuentran definidas cuando tenemos dos conjuntos de variables difusas son las siguientes:

- Unión $((R \cup S) = \max(R, S))$ Está definida como el valor máximo de las dos variables difusas.
- Intersección $((R \cap S) = \min(R, S))$ Está definida como el valor mínimo de las dos variables difusas.
- Complemento $(\bar{R} = 1 - R)$ Está definida como lo que le falta a la variable difusa para ser 1.

2.3.1. REGLAS DE INFERENCIA

Las reglas de inferencia en la Lógica difusa siguen el comportamiento de las condiciones de la lógica formal, es decir:

if (condición 1) and (condición 2) Then (acción 1)

Por ejemplo:

if (temperatura = caliente) Then (ventilador = On)

La diferencia principal con la lógica formal es que ahora la evaluación de las condiciones y los resultados obtenidos de la aplicación de las reglas estarán en el rango de valores de 0.0 a 1.0, en otras palabras, se obtiene un valor en el resultado que contiene, una cierta cantidad de verdad o membresía, dependiendo de los valores de verdad de las variables difusas de entrada.

Por ejemplo, si la variable de salida fuera la velocidad de un ventilador, que permita controlar la temperatura de una habitación. Con la aplicación de las reglas de la lógica difusa, ahora es posible obtener diferentes valores de la velocidad, donde 0.0 equivale a tener el ventilador apagado y un valor de 1.0 es equivalente a tener el ventilador a una velocidad máxima. También un valor de 0.5 es equivalente a tener el ventilador a una velocidad intermedia.

Se dice que la lógica difusa trata de replicar la forma de pensar del ser humano, es decir que normalmente se piensa que si hace frío se apaga el ventilador, si está caliente se prende el ventilador a una velocidad máxima, pero si la temperatura es normal se pone a una velocidad media. Logrando de esta

manera controlar la temperatura de una habitación, pero sin que importe saber el valor exacto de la temperatura.

A continuación, se establece como se obtienen las variables de salida en función de la aplicación de las reglas de inferencia a los valores de membresía de las variables de entrada.

2.4. VARIABLES DE SALIDA

Las variables de salida de un sistema de control difuso requieren ser calculadas a partir de los resultados de la aplicación de las reglas de inferencia sobre las variables difusas de entrada. Para la obtención de los valores es necesario realizar los siguientes pasos:

- Determinar un conjunto de reglas de inferencia difusa.
- Fuzzifying las entradas usando las funciones de membresía de entrada.
- Combinar las entradas difusas de acuerdo con las reglas de inferencia difusa para establecer una fuerza de regla.
- Encontrar la consecuencia de la regla combinando la fuerza de la regla y la función de membresía de salida.
- Combinar las consecuencias para obtener una distribución de salida.
- Defuzzifying la distribución de la variable de salida (Este paso se aplica solo si la salida es del tipo único).

Regresando al ejemplo de controlar la temperatura de una habitación por medio de un ventilador. Se pueden definir dos variables difusas de salida (Lento y Rápido) de acuerdo a la representación de la Figura 2.

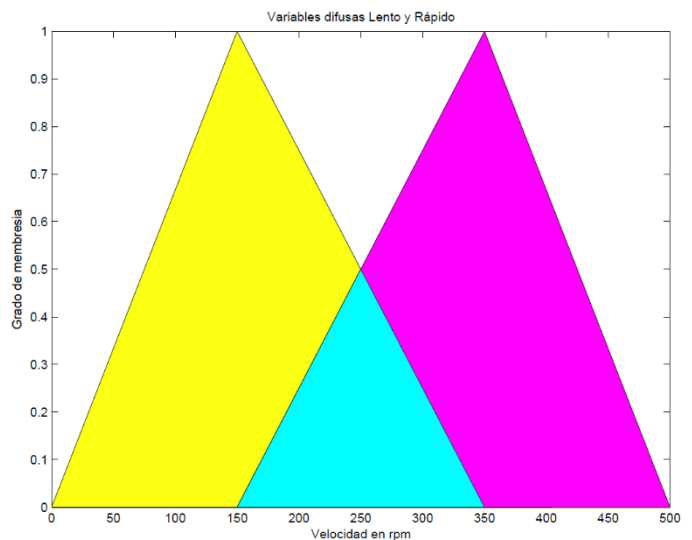


Figura 2.- Velocidad del ventilador

Los valores de las dos variables difusas de salida están en el rango de 0.0 a 1.0 en correspondencia a la velocidad del ventilador que se expresa en revoluciones por minuto (rpm).

Ahora por otra parte si se supone un valor de la temperatura de entrada igual a 60 grados. Se obtiene que los valores de las variables de entrada serían 0.0, 0.5 y 0.5 para Frío, Normal y Caliente respectivamente.

Teniendo en cuenta la regla 1 que dice lo siguiente:

if (Caliente) Then (Rápido)

Los valores que se obtendrían después de la aplicación de la regla para las variables de salida Lento y Rápido, serían los que aparecen en la Figura 3.

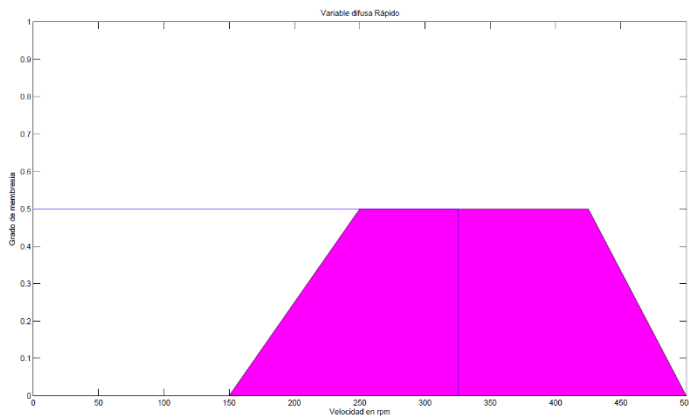


Figura 3.- Aplicación de la Regla 1

Como se puede observar de la Figura 3 el resultado que proporciona es nuevamente un conjunto de valores de membresía para la variable de salida Rápido. La determinación de un valor de salida único, para la velocidad del ventilador es necesario realizar el proceso de Defuzzification. Este proceso consiste en encontrar el centroide de la figura resultante, mediante la evaluación de la Ecuación:

$$velocidad_{ventilador} = \frac{\int(x * f(x))}{\int f(x)}$$

Esta ecuación proporciona el valor de velocidad adecuado para el ventilador y controlar de esta manera la temperatura.

En la ecuación del centroide la variable x representa los valores de la temperatura y la función $f(x)$ corresponde a los valores de verdad o membresía para la variable de salida Rápido. El valor aproximado de velocidad que se obtiene para el ejemplo mencionado es de 325 rpm.

Si se toman en cuenta más reglas para el control de la temperatura de un cuarto, realizando mediciones de otras variables como la humedad, el tiempo, etc. se tendrían que combinar todos los valores de verdad obtenidos para la variable de salida Rápido mediante la operación *OR*, para finalmente

obtener un valor de la velocidad del ventilador, que corresponda al centroide la figura resultante.

El controlador que se implementó para las pruebas consiste en un control PWM (Modulación de Ancho de Pulso), que se aplica al compresor de frecuencia variable, de acuerdo al valor obtenido por la aplicación de las reglas de inferencia. En la figura 4 se puede observar el diagrama a bloques de la representación del controlador de lógica difusa y sus etapas para obtener el valor de la frecuencia del compresor y lograr de esta forma la temperatura fijada en el set-point.

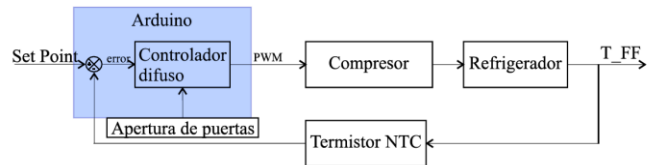


Figura 4.- Diagrama a bloques del sistema de control difuso.

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos con la implementación del sistema de control usando lógica difusa.

3. RESULTADOS

Los valores obtenidos para el consumo de energía, después de varias pruebas con el sistema de control difuso en comparación con el control original del refrigerador están representados en la figura 5.

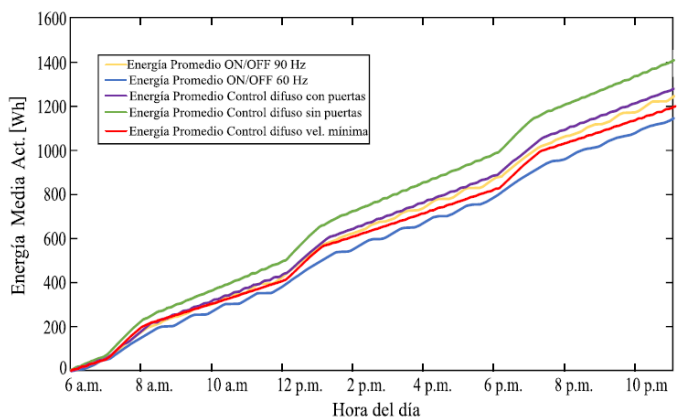


Figura 5.- Consumo de Energía con diferentes sistemas de control.

Como se puede apreciar en la Figura 5, el ahorro de la energía consumida es del orden de un 3% menor comparada contra el control *ON-OFF* (Rojo contra Amarillo), lo cual significa que, si es posible controlar la velocidad del compresor mediante el uso de un control de lógica difusa, manteniendo los mismos valores de temperatura en los compartimientos del refrigerador.

También es posible observar a partir de la figura 5, que el consumo de energía para el control *ON-OFF* a 60 HZ de velocidad del compresor es todavía menor, solo que en este caso no se logra llegar al estado de estabilidad térmica, es decir que la temperatura de los compartimientos del refrigerador no se mantiene en el valor adecuado.

En la figura 6 se presenta el comportamiento de la temperatura del refrigerador, una vez que se ha alcanzado el equilibrio térmico a la temperatura deseada, para los diferentes casos de la frecuencia aplicada al compresor.

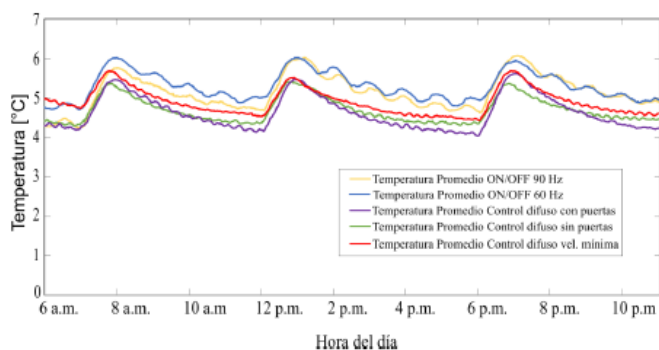


Figura 6.- Temperatura promedio del Refrigerador

En la figura 6 se puede observar que la variación de la temperatura es menor cuando se aplica el sistema de control difuso ($\pm 0.5^\circ\text{C}$) que para los otros casos donde se mantiene un valor fijo de frecuencia en el compresor. En otras palabras, el control es más fino logrando con esto una mejor conservación de los alimentos, frutas y bebidas, durante el tiempo que permanezcan dentro del refrigerador.

También se incluyeron las graficas con aperturas programadas de las puertas, en este caso se apaga el compresor durante el tiempo que dure abierta la puerta y en el otro caso, no se toma en cuenta el estado de las puertas, se deja el compresor funcionando.

4. CONCLUSIONES

Las conclusiones que se pueden obtener después de haber realizado estas pruebas son las siguientes:

- Se implementó un sistema de control difuso para la velocidad del compresor.
- Se logró un ahorro del 3% en el consumo de energía.
- Se mantuvieron los mismos valores de temperatura en el refrigerador.
- Se probaron las reglas de la lógica difusa y su aplicación en el sistema de control.

Como parte de los trabajos pendientes se pretende implementar más reglas de control para determinar si existe o no algún ahorro de la energía que se consume para llegar al equilibrio térmico. También se pretende incorporar alguna regla que contemple el estatus de las puertas, es decir si está cerrada o abierta y variar con esto la frecuencia el compresor.

5. REFERENCIAS

- [1] Coulomb, D., Dupont, J.L., Pichard, A. (2015). *29th Informatory note on refrigeration technologies*. The role of refrigeration in the global economy. IIR document.
- [2] Risto Ciconkov. *Refrigerants: There is still no vision for sustainable solutions*. International Journal of Refrigeration 2018; 86: pp. 441- 448.
- [3] Stone, M.H. (1937) *Applications of the theory of Boolean rings to general topology*. Trans. Am.Math. Soc., 41, 375-481, 453-481.
- [4] Weierstrass, K. (1885) *Mathematische Werke, Band 3, Abhandlungen III*, 1-37, esp. p. 5, Sitzungsber. königlichen preuss. Akad. Wiss., July 9 and July 30.
- [5] Kosko, B. (1994) *Fuzzy systems as universal approximators*. Transactions on Computation, 43 (11), 1329-1333.
- [6] Belohlavek, R., Klir, G., Lewis, H., and Way, E. (2002) *On the capability of fuzzy set theory to represent concepts*. Int. J. Gen. Syst., 31, 569-585.