

PROCEDIMIENTO DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE CIRCULACIÓN DE AGUA DE SUBSUELO EN EL CONDENSADOR DE UN SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR

R. Vázquez*, R. Spotorno, J. Pochettino, F. García

GITEA - Grupo de Investigación en Tecnologías Energéticas Apropriadas
Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Resistencia
French 414. 3500 Resistencia-Chaco. República Argentina

Tel: +54 3722 432928. / Fax: +54 3722 432683/ email: ray_vazquez_2005@hotmail.com

*GUDA-Grupo Universitario de Automatización-Facultad Regional Resistencia

Recibido 10/08/16, aceptado 06/10/16

RESUMEN: En el presente trabajo se expone un procedimiento para realizar la automatización y control del caudal de agua de subsuelo que circula por el condensador de un sistema de climatización por compresión de vapor. La innovación realizada permite conseguir una reducción del consumo de agua de subsuelo. La implementación del sistema de automatización logra un control autónomo del caudal de agua empleando un dispositivo genérico. El tiempo y esfuerzo utilizado es bajo y los conocimientos necesarios por parte del investigador son mínimos. La regulación del caudal de agua en función de la temperatura ambiente se implementa utilizando lógica difusa articulada con un programa matemático denominado MatLab. El software de automatización perteneciente al firmware del microcontrolador se desarrolló en un simulador denominado MPLAB que facilita la puesta a punto del hardware del dispositivo genérico.

Palabras clave: climatización, agua de subsuelo, automatización y control.

INTRODUCCIÓN

El acondicionamiento de aire y la refrigeración es un problema ambiental, tanto por la contaminación como por el consumo de energía eléctrica, el cual puede ser en algunos casos hasta de un 40% del consumo energético total de la industria. En el caso específico de los supermercados, un 50% de la energía eléctrica es usada anualmente en refrigeración y un 15% en acondicionamiento de aire, (Builes et al., 2004).

En las regiones subtropicales húmedas como la del Nordeste Argentino, es necesario instalar sistemas de climatización por compresión de vapor para reducir las temperaturas y humedades relativas elevadas. Además durante los meses de invierno, si bien las temperaturas no son relativamente bajas, se requiere en ciertas horas diarias calefaccionar los ambientes de los hogares y laborales. Estas características hacen que el acondicionamiento ambiental, en especial la refrigeración, sea una necesidad para lograr confort térmico, ya sea a nivel residencial, industrial y/o comercial, (Spotorno et al., 2013).

La utilización de agua de subsuelo en sistemas de climatización por compresión de vapor para reducir el consumo de energía eléctrica se encuentra divulgado en los artículos de (Spotorno et al., 2014) y (Spotorno et al., 2015).

El control automático ha desempeñado un papel vital en el avance de la ingeniería y la ciencia. El automatismo se ha convertido en una parte importante e integral de los procesos modernos o industriales y de fabricación permitiendo aumentar la eficiencia, y en el ámbito residencial o doméstico la automatización y control realiza grandes avances en el modo de implementar técnicas de ahorro y racionalización de energía. En la práctica todo sistema de control automático busca mejorar la

productividad, simplificar el trabajo de muchas operaciones manuales repetitivas, rutinarias o peligrosas.

En el presente trabajo se expone un procedimiento destinado al proceso de automatización y control del caudal de agua de subsuelo que circula por el condensador de un sistema de climatización por compresión de vapor.

MATERIALES Y MÉTODOS

La figura 1 muestra un esquema funcional general del sistema de climatización empleado cuando se utiliza agua de subsuelo en el condensador del equipo. En el mismo se identifican los diferentes componentes: habitación, bomba sumergible, tanque de almacenamiento de agua de subsuelo, aire acondicionado (Split).

Los ensayos de refrigeración y/o calefacción según la temporada del año tenían una hora de duración y consistían en lo siguiente:

En primera instancia se efectuaron los ensayos de refrigeración y/o calefacción utilizando aire en el condensador del equipo. A continuación se realizaron los mismos ensayos con la particularidad de utilizar agua de subsuelo. Para la realización del mismo se impulsaba agua a un tanque elevado y térmicamente aislado con capacidad de 1 m³, por medio de una bomba sumergible. La alimentación del condensador del sistema de climatización se efectuó simplemente por gravedad, mediante una manguera transparente de PVC con una serie de orificios de diámetros reducidos que permitiera que el agua caiga en forma de llovizna. La regulación del caudal de agua que circulaba por el condensador del equipo se realizaba manualmente mediante una válvula globo.

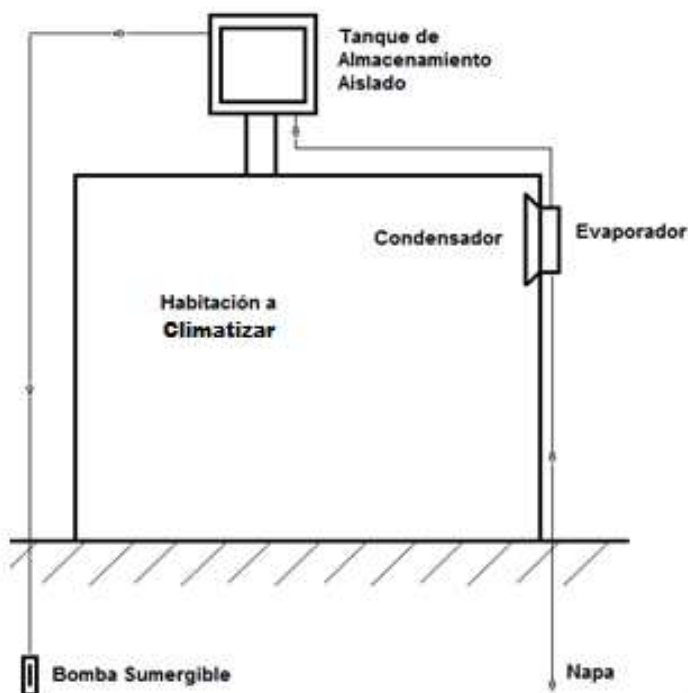


Figura 1: Esquema funcional general empleado

El sistema de climatización por compresión de vapor con la adaptación correspondiente para utilizar el agua de subsuelo en forma de llovizna se visualiza en la fotografía de la figura 2.

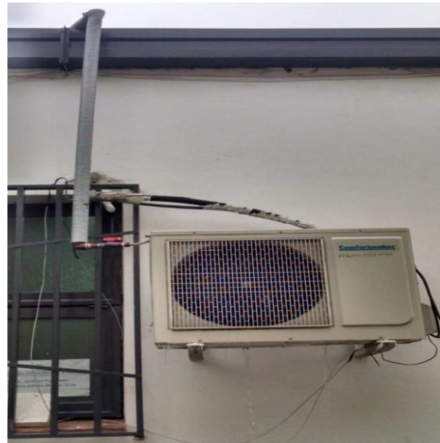


Figura 2: Fotografía del sistema de climatización y adaptación del recurso geotérmico

Con la finalidad de regular el caudal de agua de subsuelo que circulaba por el condensador del sistema de climatización en función de la temperatura ambiente a fin de reducir el consumo de agua acorde a la necesidad, se plantea realizar un procedimiento de automatización y control utilizando lógica difusa y un dispositivo genérico.

Dispositivo genérico utilizado en tareas de automatización

El hardware elegido en la experiencia se denomina Student Full mostrado en la figura 3. El mencionado hardware, puede medir magnitudes físicas mediante sensores conectados a convertidores analógicos-digitales de 10 bits como lo detallan (Saravia et al., 2010). El software utilizado permite realizar medidas analógicas y tareas de comunicación entre periféricos (notebook, PC, datalogger, etc.). Generalmente los fabricantes de dispositivos genéricos proporcionan proyectos con software de alto nivel que facilitan el manejo del hardware requiriendo solo conocimientos elementales de programación y electrónica.



Figura 3: Student Full y grabador de microcontroladores PICkit 3

En este trabajo de investigación se desarrolló un proyecto utilizando un simulador MPLAB de la empresa Microchip. Para tales fines se configuró el dispositivo genérico para medir estados de temperaturas utilizando un sensor. Luego se asoció dichos estados con un periférico del microcontrolador denominado PWM (Pulse Width Modulation). El control por PWM es ampliamente utilizado en los sistemas de regulación de velocidad, disipadores de calor, reguladores de caudal, electroválvulas, etc.

El trabajo de regulación lo realizaba una señal eléctrica, como se muestra en la figura 4. El caso (a) representa la salida a 0 voltios. En el caso (b) la tensión es de 5 voltios y dura un 20% del período. En el caso (c) la tensión se activa un 50% del período, en el caso (d) la tensión aplicada dura solo un 90% y finalmente en el caso (e) la salida es del 100%.

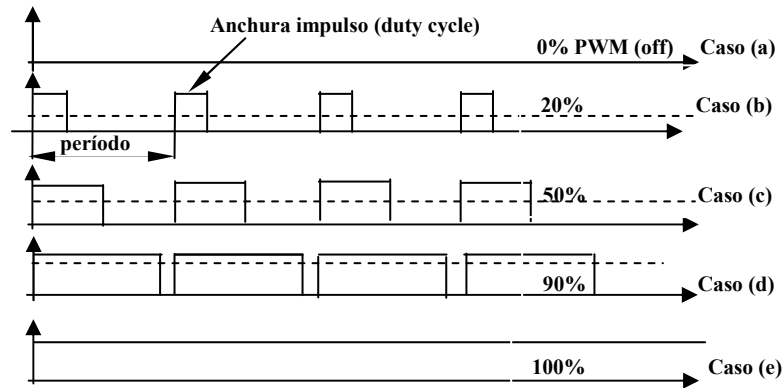


Figura 4: Control de velocidad utilizando PWM

Es decir, variando el ciclo de trabajo (duty cycle) se logra el control en la apertura o cierre de la electroválvula.

La regulación PWM proporciona un eficaz método mediante la utilización de una simple señal digital de control. De esta manera la duración del tiempo en la línea de salida del microcontrolador regula el caudal mediante las electroválvulas.

Los dispositivos electrónicos, como una PC o microcontroladores, no pueden manejar artefactos de potencia directamente. Es preciso utilizar un adaptador entre el dispositivo y las electroválvulas.

En la figura 5 se sugiere un esquema electrónico que puede realizar dicho proceso. El integrado ULM 2003 tiene una serie de entradas digitales, cuyas tensiones no superan los 5 voltios, y las corrientes son menores a 0,125 amperes. En la salida se puede obtener en forma estable, tensiones que van desde 9 voltios hasta 35 voltios, con una corriente máxima de 1 amper por canal. En la izquierda de la figura 5, se encuentra la característica del chip, y a la derecha, un ejemplo de configuración de conexión de un dispositivo como por ejemplo un motor paso a paso.

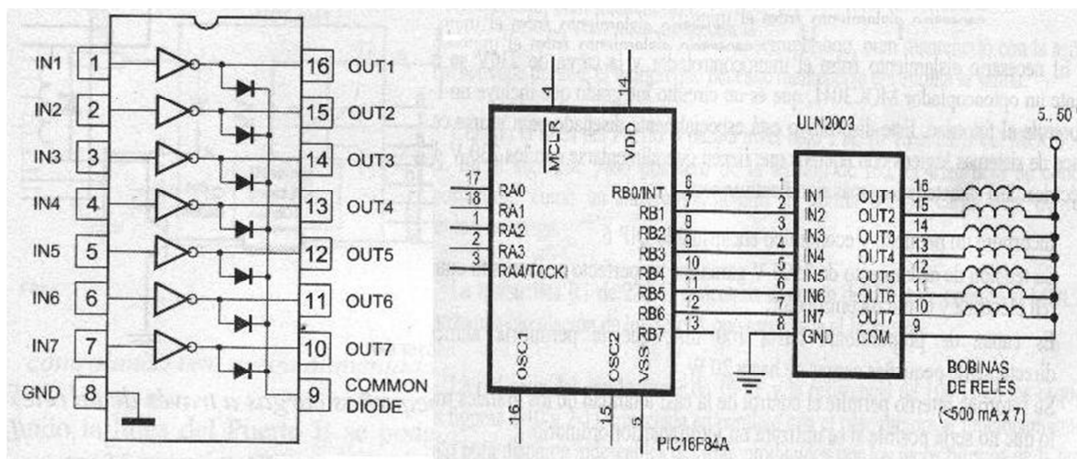


Figura 5: Esquema representativo de un bloque PWM conectado a un microcontrolador

Existen funciones dentro de los microcontroladores que determinan el ancho de pulso y el tiempo a nivel alto (5 volt) o bajo (0 volt). En la figura 6, se establece una relación del caudal con los parámetros de configuración del PWM.

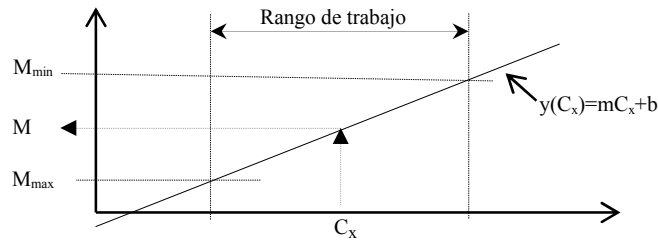


Figura 6: Determinación del valor de PWM a partir de los datos del sensor

Como el período es constante, los valores M_{\max} y M_{\min} representan el porcentaje en la anchura del pulso. La expresión adimensional C_{\min} y C_{\max} son respectivamente valores que representan el mínimo y el máximo caudal que debe circular por la electroválvula. Por ejemplo: C_{\min} puede valer 0,4 y representa 0,4 kg/seg. En nuestro caso M_{\min} es de 20% (duty cycle). Si se elige un período de un segundo y el caudal obtenido en una primera aproximación es de 0,1 kg/seg, solo hay que conectar cuatro electroválvulas en paralelo para alcanzar 0,4 kg/seg. Generalmente C_{\max} es igual a uno y representa la electroválvula normalmente abierta. El C_x es un valor intermedio de caudal que define un coeficiente M a través de la recta.

La ecuación de la recta de la figura 6 se obtiene mediante la ecuación proporcionada por (Spiegelp, 2010). El software utilizado es el lenguaje C, y la implementación de lógica condicional permite fijar criterios para establecer reglas de control. El inconveniente que puede suscitar en este tipo de programación tradicional (utilizando lógica Booleana) es determinar demarcaciones estrictas para encontrar pertenencia a un sets de reglas que describan al sistema de control. La lógica difusa es una extensión de la lógica tradicional que utiliza conceptos de pertenencia de sets de reglas más similares a la manera de pensar del ser humano.

Automatización utilizando lógica difusa

El lenguaje natural es una de las maneras más eficientes de comunicarnos ya que además podemos transmitir conocimientos basados en información imprecisa o ambigua. En ese sentido la lógica difusa permite manejar de manera eficiente tal tipo de conocimientos (Wang et al., 1992). La lógica permite entre otras cosas:

- Representar el lenguaje natural de una manera acorde.
- No reemplaza a la lógica.
- Posibilita diseños ingenieriles flexibles.
- Mejora la performance de un modelo.
- Es simple de implementar.

En el esquema de la figura 7, se muestra un esquema representativo del sistema de control vinculando la temperatura con el caudal.

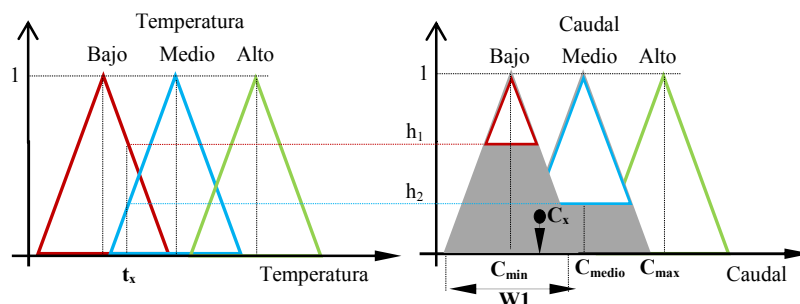


Figura 7: Determinación del valor C_x en función de t_x

Las formulas (1) y (2) representan el área debajo de h_1 y h_2 . La fórmula (4) obtiene el valor de C_x .

$$\Omega_1 = w_1 \cdot \left[h_1 - \frac{(h_1)^2}{2} \right] \quad (1)$$

$$\Omega_2 = w_2 \cdot \left[h_2 - \frac{(h_2)^2}{2} \right] \quad (2)$$

$$\Omega_T = \Omega_1 + \Omega_2 \quad (3)$$

$$C_x = \frac{C_{\min} \cdot \Omega_1 + C_{\text{medio}} \cdot \Omega_2}{\Omega_T} \quad (4)$$

Mediante la utilización de una herramienta que se visualiza en la figura 8, se ajustan y se verifican resultados obtenidos. Para tales fines se utiliza el programa MatLab mediante el comando fuzzy.

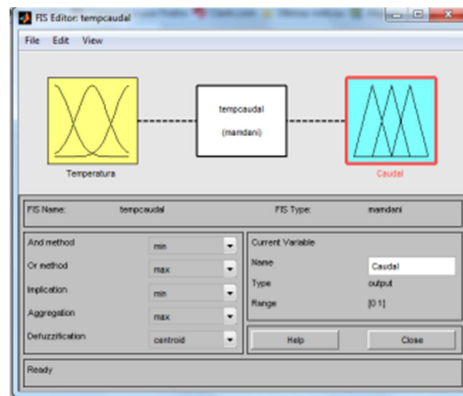


Figura 8: Herramienta de cálculo en lógica difusa

La herramienta de simulación y de cálculo de la figura 8 se puede dividir en tres partes. El primero representa el proceso de Fuzzificación denominado Temperatura (bloque color amarillo). En el rectángulo de color blanco se alojan las reglas. El rectángulo de color celeste calcula el caudal mediante la Defuzzificación. La figura 9 muestra los bloques utilizados en la experiencia.

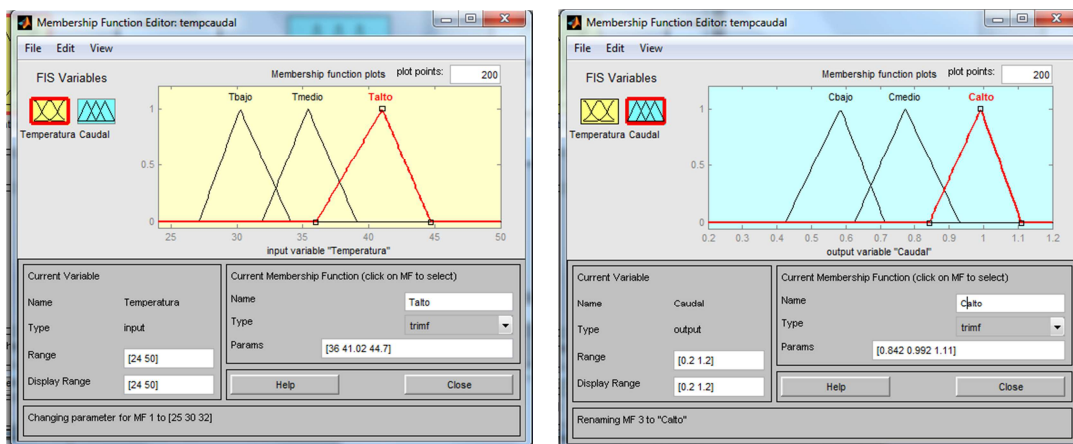


Figura 9: Bloque de Fuzzificación y Defuzzificación del MatLab

La figura 10 muestra la configuración de las reglas para lograr la Defuzzificación.

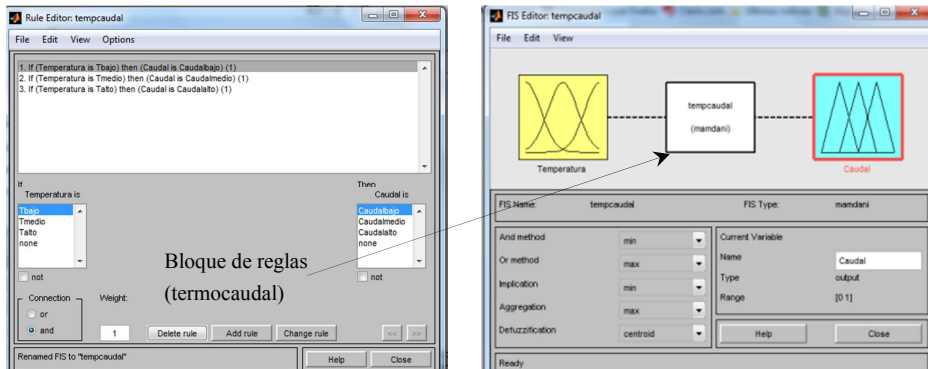


Figura 10: Bloque de reglas

La figura 11 muestra los valores de C en función de los posibles estados de la temperatura ambiente. Se visualizan tres casos representativos. Luego los resultados son mostrados en tiempo real en la pantalla.

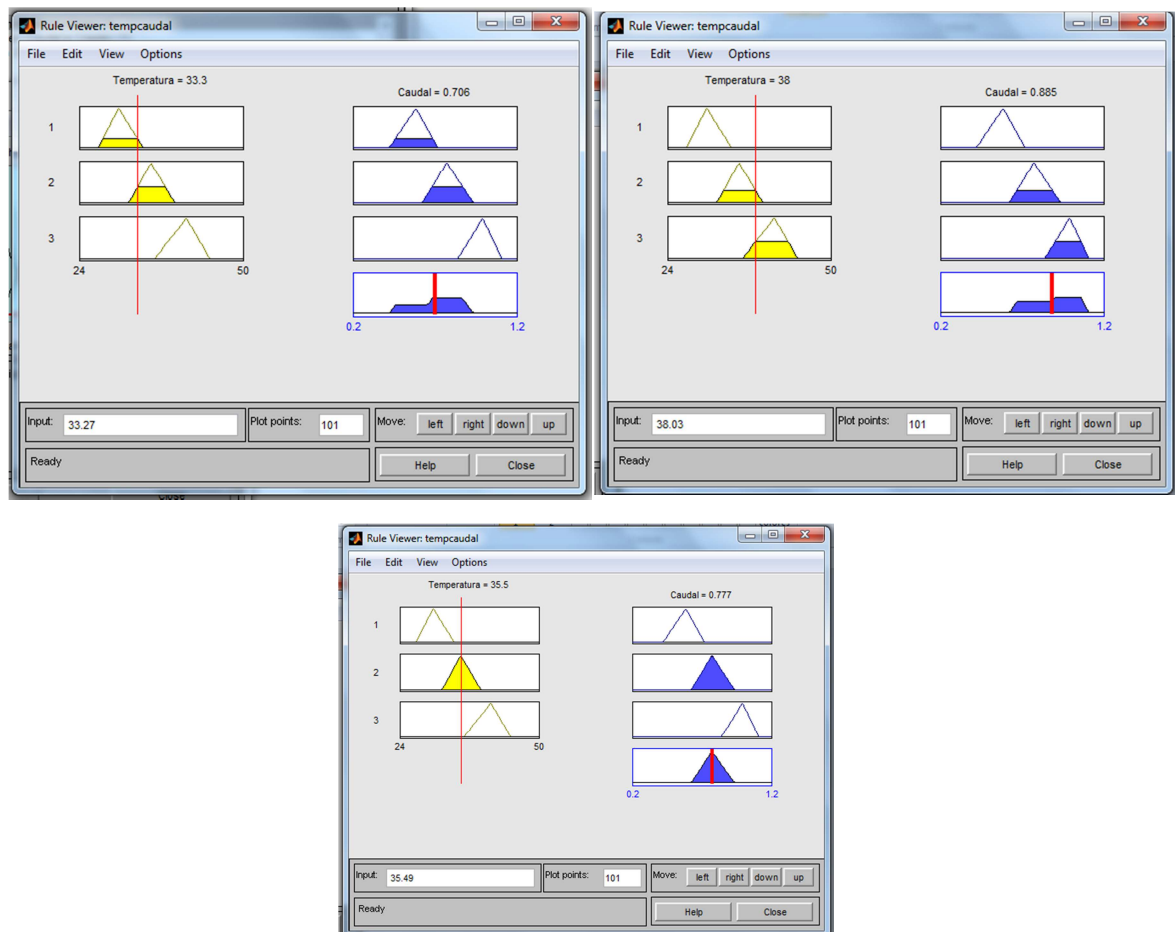


Figura 11: Ventana de cálculo del caudal de agua en función de la temperatura

Seguidamente se establece un algoritmo de alto nivel empleando técnicas y fundamentos de programación como lo desarrollan (Santos et al., 2005). Seguidamente se emplean librerías matemáticas para relacionar la temperatura con el caudal utilizando las ecuaciones (1), (2), (3) y (4) ajustada con la herramienta denominada fuzzy del MatLab como muestra la figura 11. Finalmente se determina el ancho de pulso asociado al caudal de agua como se observa en la figura 6.

Implementación del algoritmo de control

Mediante el empleo del simulador MPLAB se construye un proyecto encargado de realizar mediciones de temperatura ambiente mediante un sensor conectado a un conversor analógico digital como lo detallan (Saravia et al., 2011). Se establece el período del PWM. Se obtienen los valores de M_{\max} y M_{\min} según las especificaciones del microcontrolador. En este caso se necesita un caudal de prueba de 1,6 kg/min. La electroválvula elegida arroja un caudal de 0,4 kg/min cuando se encuentra totalmente abierta. Por ese motivo se combinan cuatro electroválvulas en paralelo. Luego se establece el valor de M_{\min} para obtener un caudal de 0,32 kg/min. En la figura 12 se muestra un algoritmo que permite relacionar el ancho de pulso del módulo PWM con el caudal C_x en función de la temperatura t_x .

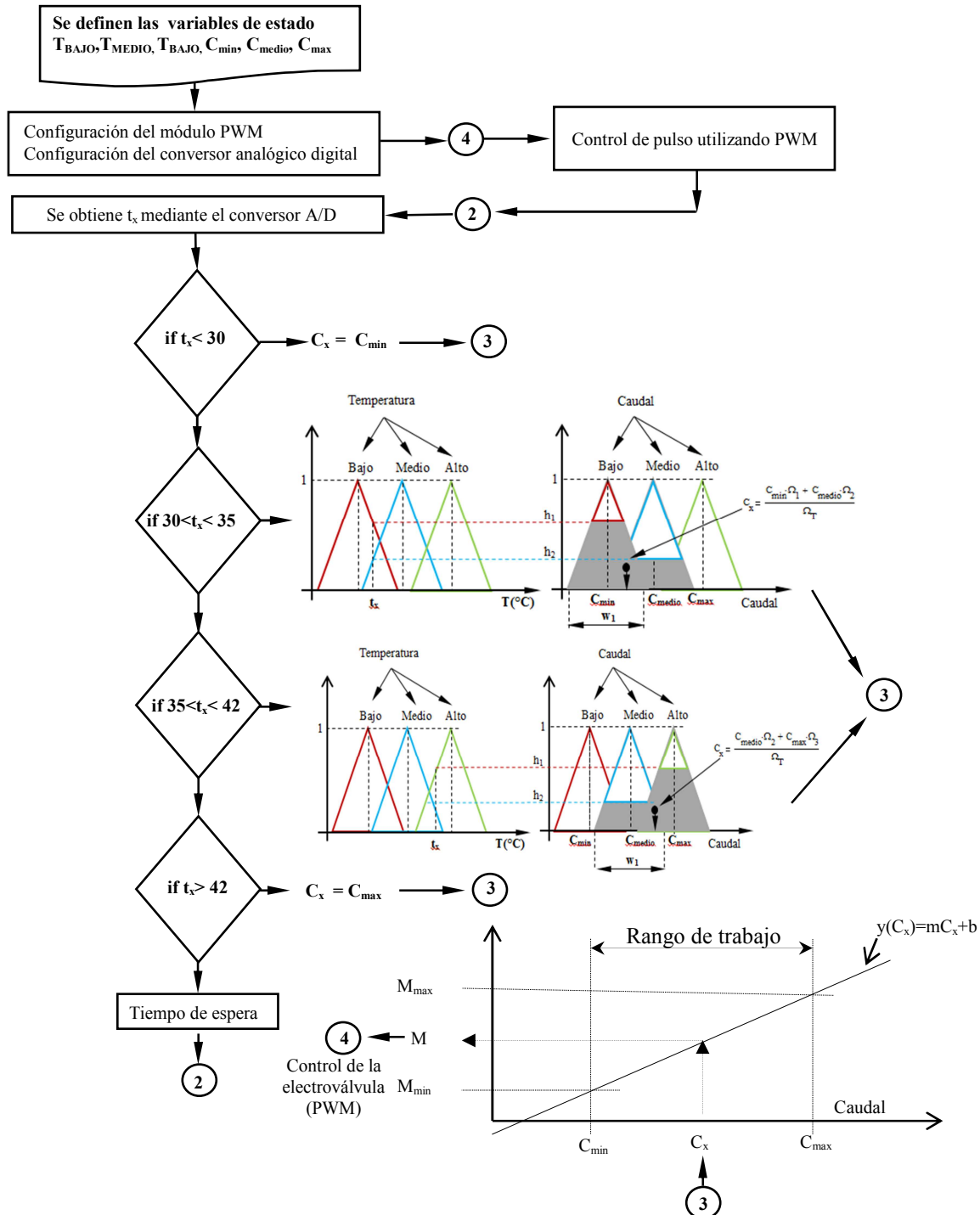


Figura 12: Algoritmo simplificado

El algoritmo define las variables de estados. Luego se configuran los periféricos PWM y el convertor analógico digital. El sensor mide la temperatura y un organigrama utiliza reglas para obtener C_x según el valor de t_x . Seguidamente se estima el coeficiente M . El ciclo de trabajo vuelve a empezar con la medición de un nuevo valor de t_x .

El algoritmo de la figura 12 se implementa en un proyecto utilizando el simulador MPLAB. Finalmente se debe compilar el proyecto y grabar el programa de automatización y control en el microcontrolador.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un procedimiento para realizar la automatización y control del caudal de agua de subsuelo que circula por el condensador de un sistema de climatización por compresión de vapor. La innovación realizada permite conseguir una reducción del consumo de agua de subsuelo que circulaba por el condensador del equipo. La implementación del sistema logra un control automático del caudal, empleando un dispositivo genérico. El tiempo y esfuerzo utilizado es bajo y los conocimientos necesarios por parte del investigador son mínimos. La regulación del caudal de agua se realizó en función de la temperatura ambiente utilizando lógica difusa articulada con un programa matemático denominado MatLab. El firmware de automatización del microcontrolador se desarrolló en un simulador denominado MPLAB que facilitó la puesta a punto del hardware del dispositivo genérico.

REFERENCIAS

- Builes D., Chejne F. (2004). Acondicionamiento de aire utilizando ruedas deshumidificadoras. Instituto de Energía y Termodinámica. Universidad Pontificia Bolivariana. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Jornadas Iberoamericanas sobre el enfriamiento solar. CYTED. Cartagena de Indias, Colombia.
- Santos M., Patiño I., Carrasco R. Fundamentos de Programación. Editorial AlfaomegaRa-Ma. Cap 2. pp16. Primera Edición 2005. México. México.
- Saravia B., Andrés R., Ariel C. Arquitectura y Programación de Microcontroladores PIC. Editorial MC electronic. Cap 22. pp 265. Primera Edición 2010. Buenos Aires. Argentina.
- Spiegelp Murray. (2010) Manual de Fórmulas y Tablas Matemática. Editorial Mc-Graw Hill. Cap 10. pp34. Quinta Edición. New York. U.S.A.
- Spotorno R., Busso A., Pochettino J., Figueredo G., García F., Benítez F. (2013). Estudios termodinámicos en la mejora de sistemas de climatización por compresión de vapor mediante la incorporación del recurso geotérmico (agua de subsuelo). Acta de la XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. I 06.43-50.
- Spotorno R., Busso A., Pochettino J., Figueredo G., García F., Benítez F. (2014). Ensayos experimentales y simulación de un sistema de climatización por compresión de vapor con la incorporación del recurso geotérmico (agua de subsuelo). Acta de la XXXVII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 2. pp. 06.71-78.
- Spotorno R., Busso A., Campbell C., Pochettino J., Figueredo G., García F. (2015). Estudios y ensayos de calefacción de sistemas de climatización por compresión de vapor con la incorporación de agua de subsuelo en el evaporador. Acta de la XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 3. pp. 06. 47-57.
- Wang Li-Win., Jerry M., Mendel M., Generating Fuzzy Rules by Learning from Examples. IEEE Transactions on Systems, Man, And Cyberneting, Vol 22, N° 6, November/December 1992.
- Saravia A., Coria A., Fiadio S., Aioldi A. MPLAB X Técnicas de Programación con Librerías de Microchip. Editorial MC electronic. Cap 1. pp 12. Primera Edición 2011. Buenos Aires. Argentina.

ABSTRACT

In this paper a method is disclosed for automation and control of the underground water flow circulating through the condenser of a vapor compression air conditioning system. Innovation made allows for achieving a reduction consumption of subsoiling water. The implementation of the

automation system achieves an autonomous control over the flow of water using a generic device. The time and effort used is low and knowledge needed by the research is minimal. The regulation of the water flow according to the ambient temperature is implemented using fuzzy logic articulated with a mathematical program called MatLab. Automation software belonging to the microcontroller firmware was developed in a simulator called MPLAB that facilitates tuning the generic hardware device.

Keywords: air conditioning, underground water, automation and control