

AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE UNA PLANTA PILOTO DE CLIMATIZACIÓN SOLAR POR ADSORCIÓN-HUMIDIFICACIÓN

R. Vázquez, R. Spotorno, J. Pochettino, F. Benítez

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/ e.mail: ray_vazquez_2005@hotmail.com

RESUMEN: En el presente trabajo se expone el procedimiento utilizado para automatizar y controlar una planta piloto de climatización solar por adsorción-humidificación, empleando un sistema de clasificación por lógica condicional. Para controlar la planta piloto, las magnitudes censadas son acondicionadas mediante compensadores denominados PID, con la finalidad de filtrar transitorios que puedan generar acciones de control no deseadas. El procedimiento se basó en la articulación del simulador MPLAB 8.33, un desarrollo electrónico denominado Student Full y la planta piloto de climatización solar. Se logró implementar la automatización y control en la planta piloto mediante un dispositivo de bajo costo, fácil manejo y actualización permanente.

Palabras clave: adsorción, regeneración, automatización, control, PID

INTRODUCCION

El acondicionamiento de aire y la refrigeración es un problema ambiental, tanto por la contaminación y los riesgos, como por el consumo de energía, el cual puede ser en algunos casos hasta un 40 % del consumo total de la energía en la industria. Los sistemas de acondicionamiento de aire más utilizados hoy, emplean los ciclos clásicos termodinámicos que por lo general utilizan sustancias como los CFC y HCFC, los cuales destruyen la capa de ozono. Por lo anterior, algunos de los procesos clásicos están siendo reemplazados por otros de menor consumo de energía y menor impacto ambiental, (Builes y Chejne, 2004).

Con el fin de innovar nuevos sistemas de climatización, durante los años 2006, 2007 y 2008 el Grupo de Investigación en Tecnologías Energéticas Apropriadas (G.I.T.E.A), de la Facultad Regional Resistencia, Chaco, desarrolló, construyó y realizó ensayos y estudios a una planta piloto de climatización solar por adsorción-humidificación que climatiza una habitación de 16 m². Cabe aclarar que la planta mencionada anteriormente consta de dos circuitos independientes que se detallan en (Spotorno et al., 2008). Los ensayos consistían en realizar simultáneamente el proceso de adsorción y regeneración, y aproximadamente cada hora y media girar 180° en forma manual mediante una manivela la unidad donde se aloja el elemento adsorbente, de manera tal que el sílica gel que se encontraba en el proceso de adsorción, al saturarse de humedad, pasaría al circuito de regeneración para el proceso de desorción, y el elemento regenerado al circuito de adsorción. De lo mencionado anteriormente surge la necesidad de automatizar y controlar la unidad donde se aloja el material adsorbente, a fin de obtener un funcionamiento automático de la planta piloto.

El control automático ha desempeñado un papel vital en el avance de la ingeniería y la ciencia, además de su gran importancia en los sistemas de vehículos espaciales, robóticos, mecanismos neumáticos e hidráulicos, etc. El control automático se ha convertido en una parte importante e integral de los procesos modernos 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.

Se puede destacar el trabajo de investigación realizado por (Fernández et al., 2001), cuyo objetivo de este estudio es la determinación experimental de las condiciones nominales de diseño, así como el análisis energético y exergético del funcionamiento de la planta para su optimización y poder establecer las condiciones de operación de referencia del comportamiento de una unidad de enfriamiento. También el trabajo de (Vidal Sanz, 2003), destaca una nueva mirada al concepto del control automático innovado a la lógica fuzzy. Se muestran muchas posibles soluciones a problemas reales dentro de la industria, permitiendo de este modo plantear nuevos horizontes en cuanto a innovadoras soluciones prácticas.

En el presente trabajo se expone un procedimiento para la automatización y control de una planta piloto de climatización solar por adsorción-humidificación empleando un dispositivo de bajo costo. Se logra dicho objetivo mediante la articulación de un simulador, un desarrollo electrónico denominado Student Full y un software de libre distribución. Es de carácter modular con la posibilidad de incorporar innovaciones y actualizaciones permanentes.

PLANTA PILOTO DE CLIMATIZACIÓN SOLAR Y AUTOMATIZACIÓN

El proceso de automatización y control se ejecutó a una planta piloto de climatización solar por adsorción-humidificación, cuyo funcionamiento se detalla a continuación:

La planta piloto consta de 2 circuitos principales: el de adsorción-humidificación y el de regeneración. En el circuito de adsorción-humidificación el aire sale de la habitación con un contenido elevado de humedad absoluta y una temperatura acorde con la carga térmica presente en la habitación a climatizar, y pasa a través de dos intercambiadores de calor con el fin de disminuir la temperatura del aire ya que el proceso de adsorción mejora a bajas temperaturas. El aire sale del panel que contiene el sílica gel regenerado con una humedad absoluta menor y una temperatura mayor que a la entrada, y pasa a través de dos intercambiadores de calor donde su temperatura desciende. A continuación el aire circula por el humidificador (panel relleno de viruta de madera), donde desciende aún más su temperatura y aumenta su humedad absoluta, para luego ingresar a la habitación a climatizar. Los intercambiadores de calor son alimentados por agua de subsuelo que se encuentra a una temperatura aproximada de 24°C, y que se impulsa mediante una bomba sumergible situada a 26 m de profundidad, a un tanque elevado térmicamente aislado con capacidad de 1 m³, para luego por gravedad alimentarlos. Con el fin de aumentar el caudal de agua por los intercambiadores, se enciende una bomba mediante un timer. El agua de subsuelo tiene el inconveniente que al contener sales de hierro y que al depositarse en los conductos de circulación del intercambiador provoca pérdidas de carga, con la consecuencia de que reiteradamente se debe realizar la limpieza de los mismos. El humidificador es alimentado por agua de red.

En lo que se refiere al funcionamiento del circuito de regeneración, el aire proveniente del colector solar de placa plana sale con una temperatura aproximada de 90°C, ingresa al cilindro que contiene el sílica gel saturado de humedad, para salir del mismo a una temperatura cercana a los 80°C absorbiendo la humedad retenida en el sílica gel, para luego ingresar al colector solar de placa plana. Para los días de baja radiación solar, como se observa en la figura 1, en el circuito de regeneración se instalaron tres resistencias eléctricas cuya potencia total es de 1200w, a fin de suministrar la energía adicional a la que aporta el colector solar. El estudio de la regeneración solar del sílica gel se detalla en (Busso et al., 2007).

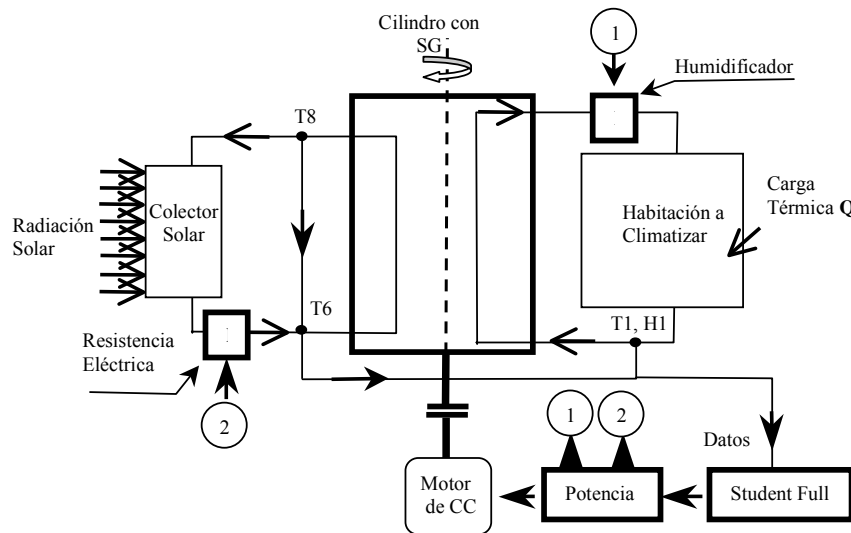


Figura 1: Esquema representativo de la automatización de la planta piloto de climatización solar.

AUTOMATIZACIÓN DE LA PLANTA PILOTO DE CLIMATIZACIÓN SOLAR

Se automatiza el sistema de climatización representado en la figura 1, mediante un desarrollo de control encargado de accionar el motor de corriente continua, activar la resistencia eléctrica, producir la apertura de la válvula del humidificador y medir las variables temperatura y humedad relativa en el interior de la habitación.

Las variables de estados del sistema son: T1 (temperatura del aire a la salida de la habitación), H1 (humedad relativa del aire a la salida de la habitación), T6 (temperatura del aire a la salida del colector solar) y T8 (temperatura del aire a la entrada del colector solar). El dispositivo encargado de realizar el proceso de automatización y control es un desarrollo embebido denominado Student Full.

Mediante un software escrito en C el dispositivo adquiere información analógica de los sensores y las compara con una serie de reglas lógicas.

Las inferencias obtenidas de dichas reglas, permiten realizar acciones de control a los diferentes dispositivos del sistema de climatización. Es decir, controlar los parámetros de temperatura y humedad relativa en el interior de la habitación, establecer el sentido de giro del motor (derecha figura 2), habilitar el humidificador, monitorear el estado de regeneración del sílica gel (izquierda figura 2).

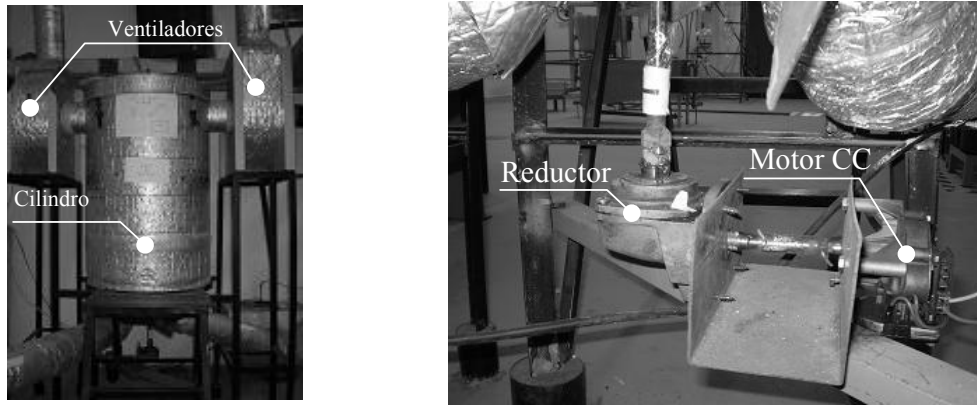


Figura 2: Fotografía de la unidad que contiene el sílica gel y acoplamiento del motor-reductor.

La forma de implementar la clasificación y la automatización se logra mediante el desarrollo de un algoritmo que represente el proceso del control.

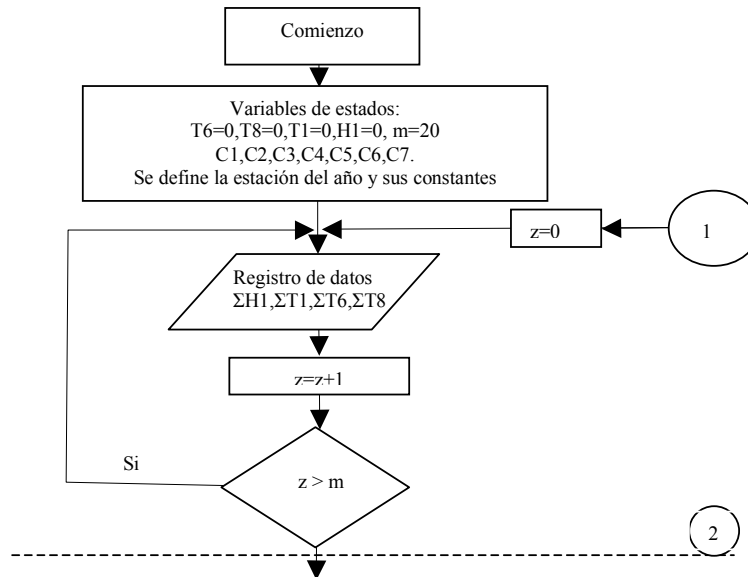
ALGORITMO DEL PROCESO DE CONTROL Y AUTOMATIZACION

La figura 3 facilita la interpretación del diagrama de flujo donde se desarrolla el algoritmo encargado de controlar un sistema de climatización solar por adsorción-humidificación.

Se definen las variables de estado que intervienen en el proceso T_6 , T_8 , T_1 , H_1 y las constantes de comparación C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 , m . Se realiza un muestreo de las variables mediante un loop con una cantidad $z < m$. Seguidamente se realiza una tabla lógica donde se pregunta el estado de las variables (clasificación). Por ejemplo: en la etapa de adsorción puede ocurrir que la humedad relativa del recinto a climatizar sea relativamente baja, y por ese motivo se tenga que recurrir a la apertura de una válvula que permita introducir agua al humidificador, o en el circuito de regeneración es posible que los valores de T_6 y T_8 se crucen y sea necesario encender la resistencia eléctrica como apoyo de energía auxiliar del colector solar.

Las reglas lógicas expresadas en el diagrama de flujo, no contempla la totalidad de los casos posibles. Para mejorar la eficiencia del control sólo se debe agregar más condiciones lógicas en la tabla de control principal.

Los dispositivos de control que se utilizan, son elementos mecánicos con posibilidad de fallas. Por ese motivo se emplea una rutina que verifica el estado de las variables. Si se cumple la acción deseada se deriva al inicio del programa, y el flujo de control empieza nuevamente. En caso contrario se contempla en el algoritmo la posibilidad de realizar un mensaje de error donde se expresa la posible falla mediante la función BEEP().



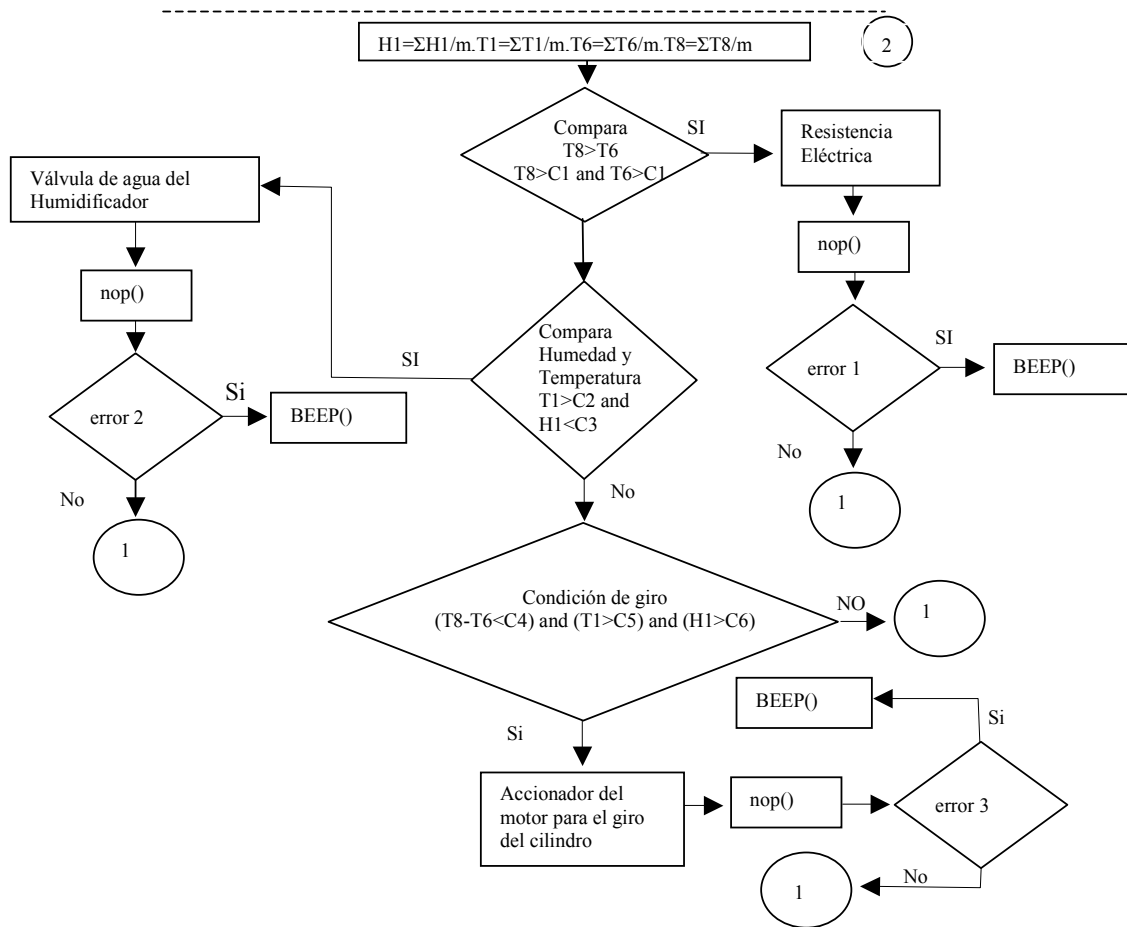


Figura 3: Diagrama de flujo que indica el proceso de automatización y control de una planta piloto de climatización solar por adsorción-humidificación.

En el siguiente ejemplo se detalla el proceso de clasificación de la regeneración mediante el colector solar y la condición de confort en la habitación, para realizar la acción de giro del cilindro en el sentido izquierda o derecha según corresponda.

```
//Condiciones lógicas analizadas de un bloque del proceso de automatización desarrollado en C.
if((C1>T8)&&(C1>T6)&&(ABS(T6-T8)<C2)) // Condición del estado de regeneración de la SG
{
//Si hay que climatizar
if(T1>C3)&&(H1>C4)
{
//Se analiza el estado de las variables T1 y H1
//si superan un rango C3 y C4 se habilita la condición
//de giro del cilindro, aplicando un alto lógico en out1
// u out 2 según corresponda, ver figura 4.
if (actuador_A==1)
{
giro_derecha();
//Si el fin de carrera A=1, implica que el actuador realizará
// un giro del cilindro a la derecha mediante la función
}
if (actuador_B==1)
{
giro_izquierda();
//giro_derecha(), si el B=1 se ejecutará el giro
//a la izquierda mediante la función giro_izquierda().
}
//Si no se acciona ninguna de las dos condiciones lógicas
//se establece una nueva condición que activa la alarma de error.
}
else {alarma(); }
}
}
///Tiempo de espera
Delay10KTCYx (250); //Genera un loop de espera o nop ();
}
```

Las variables obtenidas por el conversor analógico digital del Student Full, deben ser compensadas para eliminar posibles valores no deseados. Para cada variable medida se aplica un controlador denominado PID.

CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID)

El Controlador Proporcional Integral Derivativo tiene por finalidad compensar los valores obtenidos por los sensores Ogata (2002). Las fluctuaciones de las mediciones pueden afectar sensiblemente los valores de comparación y generar inferencias erróneas Areny (1994) en el sistema de control. Por ejemplo: se puede producir un falso encendido de la resistencia eléctrica. Se compensa el efecto realizando un promedio del muestreo de las variables. Por ejemplo I_n (1), representa el promedio de la variable T8, donde n es el número de muestreo y m es la población ($m=20$ figura 3).

Si se tiene en cuenta que cada muestra se realiza en intervalos de 30 segundos, los valores a comparar son cada 10 minutos. Por consiguiente la respuesta de control es lenta en relación a otros sistemas de climatización.

El promedio determina estabilidad a expensa de la velocidad de respuesta. Se podrá realizar muestreos cortos y los valores de T6-T8 pueden ser definidos según la formula (2), donde k es una constante de ajuste. En este caso se tendrá un control proporcional, cuya respuesta depende del valor de k. Un margen restringido de k, puede accionar varias veces un mecanismo de control, con el riesgo de activar en forma prematura el giro del cilindro. El factor derivativo se obtiene mediante la diferencia de los valores $I_n - I_{n-1}$ dividido el tiempo entre cada muestreo, que se lo expresa según la formula (3).

$$I_n = \frac{\sum_{x=0}^m T8_m}{m} \quad (1)$$

$$P = \left(\frac{\sum_{x=0}^m T6_m - T8_m}{m} \right) k \quad (2)$$

$$D_n = \frac{I_n - I_{n-1}}{\Delta t} \quad (3)$$

De esta manera un controlador proporcional integral derivativo contempla una relación de compromiso entre la velocidad y la estabilidad. El compensador o controlador posee el aporte de la parte proporcional, integral y derivativa conocido como PID, proporcionando una herramienta que estabiliza el comportamiento de las variables obtenidas.

Las ecuaciones (1), (2) y (3) se pueden representar mediante unos algoritmos implementados luego de la toma de datos en el conversor analógico digital. El PID acondiciona los valores de las variables obtenidas, y puede ser representado mediante un bloque antes del esquema de control.

ESQUEMA DE CONTROL

La figura 4 representa el sistema de automatización y control implementados mediante cuatro comparadores, tres compuertas lógicas AND y un actuador de cinco entradas y cuatro salidas digitales.

El actuador es el encargado de realizar el control del sentido giro del cilindro. El cilindro esta acoplado mecánicamente a un reductor de velocidad solidario a un motor de corriente continua (CC). La apertura o cierre de la válvula que alimenta el humidificador (H) se realiza mediante la excitación de un relé mecánico al igual que el encendido o apagado de la resistencia eléctrica (R).

En el esquema lógico de la figura 4 se contempla por ejemplo, la condición de cruce de T6 con T8. En ese caso la compuerta AND 1 genera un alto lógico en int 1 habilitando el actuador la salida out 4 que acciona el encendido de la resistencia (R).

Si en la habitación a climatizar la temperatura y humedad relativa supera el umbral 2 y umbral 3, los comparadores accionan la compuerta AND3 (la habitación no se encuentra en un estado de confort). Si se cumple T6=T8 (proceso de regeneración de la sílica gel finalizado) la compuerta AND2 genera un uno lógico, habilitando la entrada int2. En esta situación el actuador acciona el sentido de giro del motor de CC, según el estado lógico de los finales de carreras (giro a la izquierda o derecha).

Cuando la humedad relativa en la habitación a climatizar pasa por el valor del umbral 4, el comparador genera un uno lógico en int 3, de esta manera el actuador provoca una salida en out3, habilitando el humidificador (H) en un determinado tiempo.

CARACTERISTICAS DEL DESARROLLO EMBEBIDO STUDENT FULL

Para implementar físicamente el circuito representado en la figura 4, se puede recurrir a manuales especializados en el tema de técnicas digitales o acondicionadores de señales Areny (1994).

La forma del circuito y cantidad de componentes en el mismo, está relacionada con la experiencia y habilidad del proyectista. Con ésta consideración, se tendrá un desarrollo rígido sin posibilidad de incorporar nuevas innovaciones o mejoras (sin considerar el tiempo de construcción y su confiabilidad). Éste limitante, introduce al desarrollo embebido Student Full como una buena opción en el trabajo de automatización, debido a que todos los bloques en la figura 4, es representado en el lenguaje de programación denominado C de libre distribución.

La compilación del programa es realizado por una serie de simuladores que generan un archivo del tipo hex. El procedimiento que realiza dichas tareas es relativamente fácil de implementar y se requiere reducidos conocimientos de programación, debido al carácter intuitivo que poseen los simuladores y el lenguaje de programación.

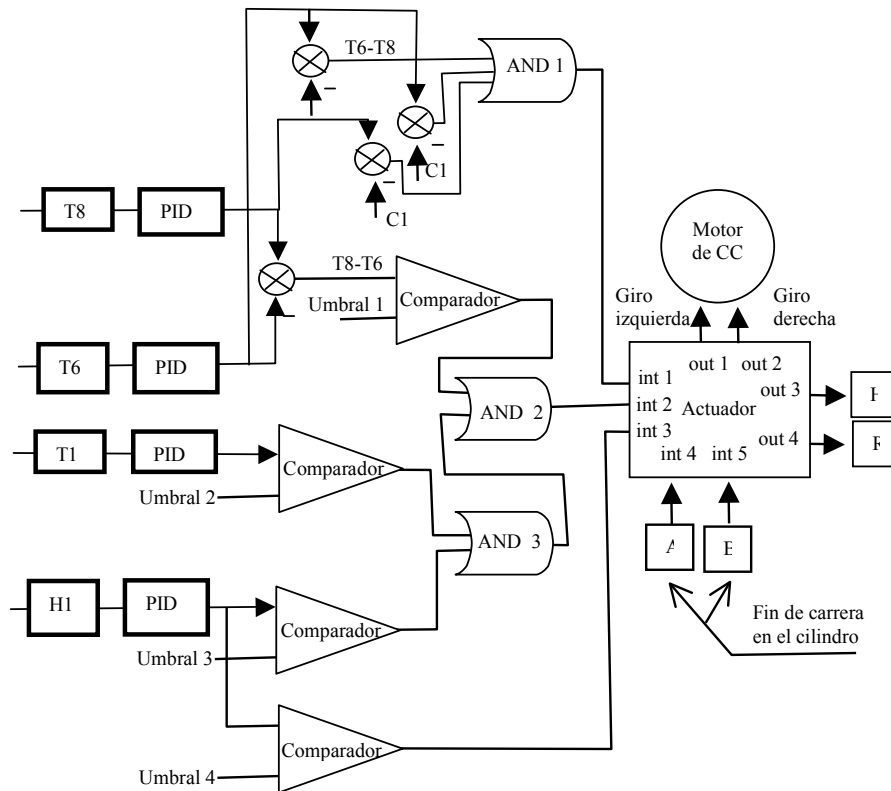


Figura 4: Representación gráfica del sistema de automatización y control de una planta piloto de climatización solar por adsorción-humidificación.

SIMULADOR

El algoritmo es de fácil implementación y el software requiere reducido conocimiento de programación. La herramienta de trabajo es un simulador denominado MPLAB IDE v8.36 (Usategui et al., 2006), de uso gratuito.

El programa de automatización y control, utiliza códigos de un proyecto desarrollado por la empresa Microchip.

El núcleo del Student Full es un microcontrolador de gama alta denominado PIC 18f620. Posee doce conversores analógicos de 10 bit, entradas con comparadores analógicos, cuatro temporizadores, comunicación UART (Universal Asíncrono Transmisión Recepción) y un bus de comunicación de entradas y salidas digitales.

El simulador MPLAB IDE v8.36 simula el proceso de automatización y control del sistema de climatización por adsorción humidificación representado por el software escrito en C.

Las entradas y salidas digitales son visualizadas en forma virtual en un panel de control y los valores son introducidos por el operario para evaluar posibles respuestas de control.

Una vez optimizado el algoritmo de control, se procede a la compilación y grabación del programa en el microcontrolador.

Para ello se utiliza un grabador denominado PIC Kit 2 in circuit debugger. Esto quiere decir, que en todo momento el Student Full, PIC Kit 2, el simulador junto con los sensores y actuadores están conectados eléctricamente.

De esta manera se tiene un procedimiento de optimización del algoritmo de control mediante el simulador para ser contrastado con la planta piloto en un solo paso.

Una vez realizado los ajustes necesarios para el comportamiento de la planta piloto en forma deseada, el Student Full se desconecta del grabador, para dejar actuar al dispositivo en forma automática.

La información relacionada para la implementación y conexiones del desarrollo son detallados por Microchip de forma gratuita. Todos los componentes en este trabajo son de fácil adquisición y de bajo costo. Los programas son de libre distribución con código abierto y reutilizable. El desarrollo representa una plataforma de carácter modular que posibilita la actualización permanente.

También brinda la posibilidad de contemplar en el software la utilización de otros tipos de clasificadores como por ejemplo lógica fuzzy o redes neuronales.

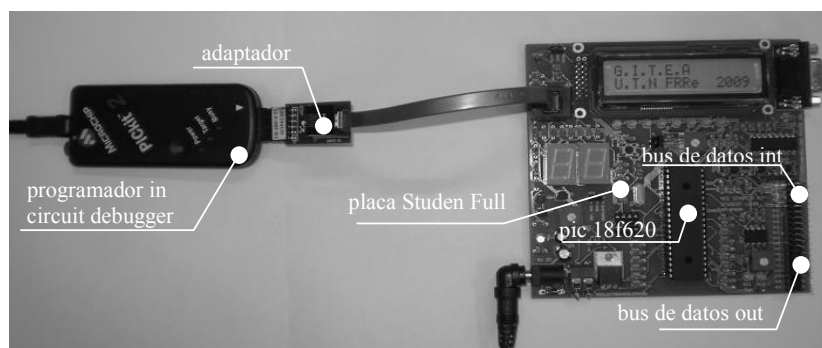


Figura 5: Fotografía del Student Full y el programador PIC kit 2.

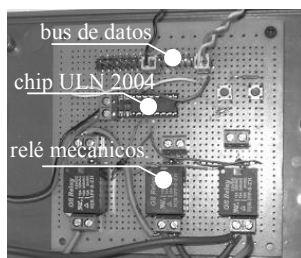


Figura 6: Fotografía del sistema de potencia que comanda el motor de CC.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un procedimiento para lograr el control y automatización de una planta piloto de climatización solar por adsorción- humidificación, empleando un sistema de clasificación mediante tablas lógicas.

Las variables comparadas en las tablas lógicas fueron compensadas mediante controladores denominados proporcionales integrales derivativos (PID).

La utilización del simulador MPLAB IDE v8.36 permite optimizar el algoritmo de automatización, visualizar la respuesta de control en forma virtual o real, permitiendo ahorro de tiempo y trabajo en forma significativa.

En el proceso de depuración en el sistema de automatización, el Student Full, PIC Kit 2, el simulador junto con los sensores y actuadores están conectados eléctricamente, permitiendo agilizar el proceso de control.

La elección del simulador MPLAB IDE v8.36 es debido a su fácil manejo, bajo costo y distribución libre .

REFERENCIAS

- Areny R. P. (1994). Sensores y Acondicionadores de señal. 1ª edición. Capítulo 1 pp 25. Editorial Marcombo, España.
- Builes D y 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.
- Busso A., Spotorno R., Pochettino J., Figueredo G., Benítez F. (2007). Regeneración solar de silica gel. Avances en energías renovables y medio ambiente. V 11 03.115-122.
- Fernández F, Pilatowsky Figueroa I., Ruíz Hernández V. (2001) Programa de Ensayos de una Planta de Enfriamiento Solar para el Acondicionamiento de Aire. Instituto Andaluz de Energías Renovables. Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla.
- Ogata Katsuhiko (2002). Ingeniería de Control Moderno. 5ª edición. Capítulo 10 p 682. Editorial Pearson Prentice Hall, Japón.
- Spotorno R., Masdeu N., Pochettino J., Figueredo G., Benítez F. (2008). Primeros resultados experimentales de la operación continua de una planta piloto de climatización solar. Avances en energías renovables y medio ambiente. V 12 03.39-45.
- Usategui. J. A. Zapirain B. G. Martínez Ignacio Angulo. Saez V. S. (2006). Microcontroladores Avanzados dsPIC. Controladores Digitales de Señales Arquitectura, programación y aplicaciones. 1ª edición. Capítulo 1 p33. Editorial Thomsom, España.
- Vidal Sanz N. (2003). Temperatura del sistema de laminación de la planta de granulado mediante lógica fuzzy. Universitat Rovira I Virgili. p 106.

ABSTRACT

This paper presents the method applied to automate and control a pilot plant of solar climatization by adsorption-humidification, using a using a conditional logic classification system. To control the pilot plant, the measured parameters are constrained by compensating devices named PID, to filtrate transients in order to avoid undesirable control actions. The process was developed by the MPLAB 8.33 simulator, an device electronic named Student Full and the solar climatization pilot plant. It was achieved to automate and control the pilot plant by a low cost, easy operation and permanent actualization device.

Keywords: adsorption, regeneration, automation, control, PID