

Sistema basado en PLC para control, monitoreo y almacenamiento de datos de temperatura de un colector solar paraboloide compuesto

Recibido para evaluación: 27 de Jul de 2005
Aceptación: 26 de Sept de 2005
Entrega de versión final: 01 de Dic de 2005

John Byron Buitrago Paniagua¹
Hernán Darío Hernández Paniagua²
Gildardo Posada Botero³
Sergio Agudelo Flórez⁴

RESUMEN

Se muestran el diseño, implementación y resultados de un sistema de control, monitoreo y almacenamiento de datos de temperatura de un colector solar paraboloide compuesto. La temperatura de un fluido que circula por el tubo receptor del colector es sensada en puntos distintos con termocuplas tipo J cuyas señales fueron amplificadas a niveles de voltaje compatibles con el rango de voltaje de entrada de un conversor A/D residente en un módulo de entradas análogas de un PLC. La CPU del PLC calcula la temperatura que sensa cada termocupla y ejecuta un algoritmo de control que mantiene la temperatura del fluido, a la salida del colector, en un valor de setpoint configurable mediante un teclado matricial y una pantalla de cristal líquido. El control se logra variando, por medio de una electroválvula, el caudal del fluido, compensando de esta forma las perturbaciones de la planta. Adicionalmente se implementó un módulo basado en un microcontrolador MCHC908GP32 de Freescale que permite almacenar datos de temperatura en una memoria Flash EEPROM, los cuales son descargados a un PC por medio de una aplicación gráfica.

PALABRAS CLAVES: CPC (Colector Solar Paraboloide Compuesto), termocupla, PLC (Controlador Lógico Programable), μ C (microcontrolador), AD594, control.

ABSTRACT

The design, implementation and results of a control, monitoring and storage system for the parabolic compound solar collector temperature data are shown. A fluid's temperature that circulates through the collector's receptor tube is sensed in different points with type J thermocouples whose signals were amplified to voltage levels that are compatible with the input voltage range of an A/D converter residing in a PLC's analog input module. The CPU of the PLC calculates the temperature sensed by each thermocouple and executes a control algorithm which holds the temperature of the fluid, at the collector's output, in a setpoint value configurable through a matricial keyboard and a liquid crystal display. The control is achieved varying, with an electrovalve, the flow so that the plant's disturbances are compensated. Additionally, a module based on a Freescale MCHC908GP32 microcontroller that allows to store temperature data in an EEPROM flash memory was implemented. The stored temperature data are downloaded to a PC through a graphic application.

KEYWORDS: CPC (Parabolic Compound Solar Collector), thermocouple, PLC (Programmable Logic Controller), μ C (microcontroller), AD594, control.

^{1, 2, 3} Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Electrónica.
¹ Estudiante. Email: ejbbp436@udea.edu.co
² Estudiante. Email: ehdhp544@udea.edu.co
³ Docente. Email: gposada@udea.edu.co
⁴ Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica. Coordinador Grupo de Energía Alternativa. Email: seragude@udea.edu.co. Calle 67 N° 53•108 - Apartado Aéreo 1226. Bloque 19

1. INTRODUCCIÓN

El Sol es una fuente de energía limpia y prácticamente inagotable. Las tecnologías para el aprovechamiento de la Energía Solar requieren poco mantenimiento, no utilizan combustibles fósiles y con un adecuado apoyo financiero podrán competir directamente con las energías convencionales. Tales atributos hacen de la Energía Solar una alternativa para satisfacer muchas necesidades energéticas presentes y futuras. Uno de los sistemas más utilizados para el aprovechamiento de este recurso es el colector solar térmico el cual convierte la luz del Sol en calor. Los colectores planos producen calor a temperaturas relativamente bajas (27-60 °C) y son generalmente utilizados para calentar aire o agua en la climatización de espacios o el secado de productos agrícolas [1]. Los colectores de concentración, entre los que se encuentra el colector paraboloide compuesto o CPC, alcanzan temperaturas más altas utilizando un reflector que dirige los rayos de sol que caen sobre un área grande hacia un área receptora más pequeña que generalmente es un tubo. Un fluido circula por el receptor donde es calentado y luego enviado a un sistema de almacenamiento o utilizado directamente [1]. La Figura 1 muestra el funcionamiento de un colector solar paraboloide.

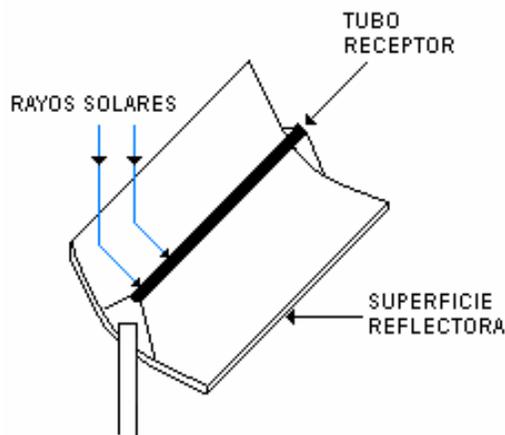


Figura 1. Colector solar paraboloide

Como consecuencia del avance de la tecnología solar surge la necesidad de diseñar e implementar sistemas electrónicos que permitan la automatización y optimización de los procesos que involucran la transformación de la Energía Solar en calor o en electricidad.

Concientes de esta necesidad el Grupo de Energía Alternativa, con el apoyo y financiamiento del CODI de la Universidad de Antioquia, ha desarrollado un sistema que controla la temperatura de salida de un fluido que circula por un colector solar paraboloide compuesto y además permite almacenar datos del comportamiento de esta variable, los cuales pueden ser visualizados en una interfaz gráfica por el usuario del sistema.

2. REQUERIMIENTOS GENERALES DEL SISTEMA

Medición de temperatura

El sistema debe medir la temperatura de un fluido a lo largo del tubo receptor de un colector solar paraboloide compuesto o CPC. Los sensores que convierten esta variable física en señales de voltaje o corriente deben garantizar operabilidad y confiabilidad en todo el rango dinámico de la temperatura, la cual puede alcanzar valores de 200 °C.

Sistema computacional

El sistema debe contar con un módulo que reciba las señales de los sensores y realice el cálculo de la temperatura del fluido del colector. Este módulo generalmente consiste en un conversor análogo-digital que se encarga de transformar las señales análogas de los sensores en cantidades binarias, y en una CPU que realiza cálculos y operaciones sobre éstas. El sistema computacional también se encarga de ejecutar un algoritmo de control que permite mantener la temperatura de salida del fluido en un valor constante. Debido a que este sistema realiza operaciones cuyos resultados afectan directamente el comportamiento de la variable controlada, la confiabilidad es una de las características que éste debe poseer. Por tal razón se utilizó un PLC Fanuc General Electric el cual es un dispositivo robusto e ideal para operar en ambientes industriales.

Visualización y almacenamiento

Debe existir un sistema que permita almacenar los datos de temperatura durante varios días de operación del CPC. Los datos almacenados son graficados mediante una aplicación para PC donde el usuario puede observar el comportamiento del sistema durante los días en que fueron almacenados los datos. Adicionalmente debe existir la posibilidad de que un usuario visualice el valor actual de la temperatura del sistema.

Modularidad y escalabilidad

Debido a las características del sistema, la solución debe ser modular, que permita fácil adaptabilidad a las condiciones donde los dispositivos van a ser instalados, y el diseño escalable, donde una nueva necesidad no implique rediseñar completamente el sistema.

3. SENSORES DE TEMPERATURA

La medición de la temperatura implica el uso de transductores, los cuales convierten este fenómeno físico en otro, como el voltaje o la corriente [3]. El transductor utilizado fue el termopar o termocupla, el cual es un dispositivo ampliamente utilizado en la industria debido a su robustez, bajo precio y a que puede operar en un rango de temperaturas muy amplio [3]. Tales características hacen de la termocupla el sensor ideal para esta aplicación, en la que la temperatura de salida del fluido puede superar los 200 °C y el colector solar se encuentra a la intemperie.

Dentro de las desventajas de este sensor está: la señal de voltaje generada es del orden de los microvoltios (fácilmente perturbadas por ruidos externos), las termocuplas parásitas que se crean cuando los cables del termopar entran en contacto con los terminales, generalmente de cobre, de un sistema de adquisición de datos, y la alinealidad en la respuesta en este tipo de sensores. Estos problemas son tratados a continuación.

4. ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES

El voltaje de salida de la termocupla tipo J, además de ser muy pequeño y susceptible al ruido, cambia aproximadamente 50µV por cada grado centígrado de variación de la temperatura [5].

El mínimo cambio de voltaje que un conversor A/D puede detectar o resolver se halla mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Mínimo_cambio} = \frac{V_{in_Max}}{\text{Ganancia} \times 2^{\#_bits_resolución}} \quad (1)$$

El módulo de entradas análogas estándares del PLC acepta señales

de voltaje de entrada en el rango de 0 a 10 voltios, tiene una resolución de 12 bits y una ganancia unitaria. Reemplazando estos valores en la Ecuación 1 se obtiene que el mínimo cambio de voltaje detectable por el módulo es de 2.5mV y le sería imposible detectar un cambio de voltaje tan pequeño como 50μV.

Existen módulos especiales de entradas análogas, compatibles con el PLC que se utilizó en el proyecto, que acondicionan las señales de la termocupla tipo J y pueden detectar los pequeños cambios de voltaje de este sensor. Los módulos especiales son costosos y sólo disponen de 4 entradas para termocuplas [8] por lo cual sería necesario utilizar tres módulos de este tipo para el acondicionamiento de las señales de 10 termocuplas.

Debido al costo elevado que representa un sistema de acondicionamiento basado en módulos de PLC para termocuplas, se implementó una etapa de acondicionamiento de señales que permitiera utilizar los módulos de entradas análogas estándares (0-10 voltios). Para lograr esto fue necesario amplificar la señal de la termocupla antes de que ingresara al módulo. Es usual que la amplificación de las señales de un sensor se lleve a cabo utilizando amplificadores de instrumentación los cuales tienen la característica de rechazar las señales de ruido de igual magnitud presentes en ambos terminales de la termocupla (Pallas-Areny y Webster, 2000). En el diseño se utilizó el amplificador AD594 el cual además de ser un amplificador de instrumentación elimina del voltaje medido el error introducido por termocuplas parásitas [6]. El AD594 tiene una ganancia de 193.4. Con esta ganancia se tiene, a la salida del amplificador, la siguiente razón de cambio de voltaje con respecto a la temperatura:

$$\Delta V_{out} = (50\mu V/^{\circ}C) \times (193.4) \cong 10mV/^{\circ}C \quad (2)$$

Este cambio de voltaje de 10mV por cada grado centígrado de variación de temperatura puede ser detectado fácilmente por el módulo de entradas análogas del PLC.

5. CÁLCULO DE LA TEMPERATURA

Debido a que la termocupla es un dispositivo no lineal, el cálculo de la temperatura se realiza consultando las tablas de la NIST o utilizando polinomios estándares para la conversión de voltaje a temperatura [5]. El método de los polinomios consiste en expresar a T, la temperatura de la junta, como una función polinómica del voltaje termoelectrónico.

$$T = \sum_{i=0}^n a_i \times V^i \quad (3)$$

Donde es el valor del voltaje termoelectrónico antes de ser amplificado por el AD594, es un coeficiente polinomial real cuyo valor depende del tipo de termocupla y n es número de coeficientes presentes en la sumatoria del cual depende la precisión de la conversión.

6. COMUNICACIÓN PLC-μC

El PLC Fanuc General Electric (CPU001) es un dispositivo utilizado en la automatización y control de procesos, especialmente en entornos industriales. Con este PLC es posible que variables como la temperatura sean monitoreadas y su valor almacenado en bases de datos utilizando software SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition).

La CPU del PLC sólo cuenta con dos puertos seriales a través de los cuales la aplicación SCADA que corre en un computador podría

obtener los datos de temperatura que calcula la CPU. Esta característica de la CPU implica la conexión permanente entre ésta y un computador para que sea posible monitorear la temperatura y almacenar los datos.

Aunque el software SCADA es una opción que satisface los requerimientos de visualización y almacenamiento, el sistema que se desarrolló implementa una solución de menor costo utilizando el microcontrolador MC68HC08GP32 de Freescale. Debido a que uno de los puertos de comunicaciones seriales del PLC es compatible con el estándar RS-232, éste se utiliza para transmitir los datos de temperatura y las acciones de control al microcontrolador. Antes de ser enviados, los datos de temperatura son convertidos a formato ASCII lo que permite obtener una representación de los datos estándar y fácilmente comprensible para cualquier sistema computacional e incluso para cualquier persona.

Cada dato de temperatura es representado por 5 caracteres ASCII, donde los tres primeros son las cifras enteras, el cuarto es un punto y el último es la cifra decimal significativa. El formato de los datos se muestra en la Figura 2.

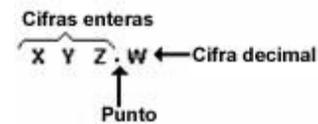


Figura 2. Formato de los datos de temperatura

El PLC concatena los datos de temperatura de las 10 termocuplas y forma una cadena de caracteres de mayor tamaño. A la trama se le adiciona un carácter especial que tiene la función de encabezado y le permite al microcontrolador reconocer que los datos recibidos provienen del PLC y deben ser almacenados en la memoria EEPROM. La Figura 3 muestra la estructura de la trama que envía el PLC.

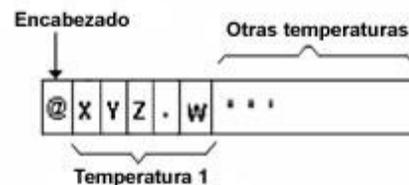


Figura 3. Formato de la trama

Además de transmitir datos de las temperaturas, el PLC envía un dato de control al microcontrolador que indica el cambio en la apertura de la electroválvula, lo cual permitirá que el caudal varíe y de esta forma se logre mantener la temperatura en el valor deseado. Esto se hace debido a que el PLC no cuenta con módulos de salidas que permitan accionar directamente la electroválvula y por consiguiente el microcontrolador actúa como interfaz entre el PLC y el actuador de la planta.

7. ALMACENAMIENTO Y VISUALIZACIÓN DE DATOS

Almacenamiento de datos

Los datos, una vez son capturados por el microcontrolador, deben ser almacenados de manera segura hasta que el sistema descarga la información en un PC, esto implica el uso de memorias no volátiles para guardar todos los datos recolectados. En el mercado, las memorias más económicas y de mejores prestaciones son las pertenecientes a la familia 24xx de Microchip.

La memoria EEPROM utiliza el protocolo serial I2C para recibir y entregar datos. Por lo tanto, se implementó sobre dos pines del microcontrolador un bus I2C [7]. Además de la temperatura se almacenan la fecha y la hora en que el PLC hace el reporte. Estos datos los obtiene el microcontrolador consultando, por medio del protocolo I2C, un reloj de tiempo real DS1307 de la Dallas Semiconductor. La ventaja de este dispositivo es que los datos de la hora y la fecha no se pierden cuando hay una falla en la alimentación del sistema ya que cuenta con una batería de respaldo que le permite al reloj seguir funcionando durante un largo período de tiempo.

El bus I2C consta de una línea de reloj y de una línea de datos [7]. A estas líneas pueden conectarse varios dispositivos que funcionan con este protocolo, como la memoria EEPROM y el reloj de tiempo real, lo cual representa un ahorro de pines de salida del microcontrolador pues no es necesario utilizar líneas de reloj y de datos distintas para cada dispositivo I2C. La Figura 4 muestra la conexión entre el microcontrolador y los dispositivos I2C.

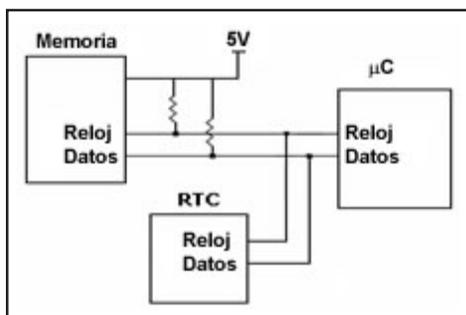


Figura 4. Conexión entre el microcontrolador y los dispositivos I2C

Visualización

Los datos de temperatura son mostrados en una pantalla de cristal líquido y se actualizan cada vez que el PLC envía un reporte al microcontrolador. La pantalla también despliega un menú de opciones, a las cuales se accede por medio de un teclado matricial, que le permiten al usuario configurar parámetros como la hora y la fecha del reloj, el intervalo de tiempo entre reportes de datos provenientes del PLC (mínimo tres minutos), el intervalo de tiempo entre acciones de control y el setpoint.

El funcionamiento de ambos dispositivos, teclado y LCD, es administrado por el microcontrolador. La Figura 5 ilustra la arquitectura del módulo de almacenamiento y visualización de datos.

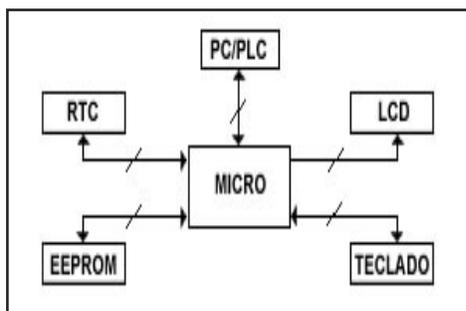


Figura 5. Arquitectura del módulo de almacenamiento y visualización

8. ESTRATEGIA DE CONTROL

El objetivo del control de un colector solar paraboloide compuesto es mantener la temperatura de salida del fluido que circula por el tubo receptor en un valor preestablecido por el usuario.

Los sistemas lineales y aquellos que pueden aproximarse a lineales son fácilmente controlables por medio de acciones de control clásicas como la proporcional o la PID (proporcional-integral-derivativa). El colector solar paraboloide compuesto es un sistema con una dinámica no lineal y especialmente sensible a perturbaciones como cambios en la radiación solar, presencia de nubes, cambios en la temperatura ambiente, variación de la reflectividad de los espejos entre otros [2][9], lo que conlleva a variaciones significativas en las características dinámicas del sistema tales como la rata de respuesta y el tiempo de retardo, lo cual plantea la necesidad de implementar una estrategia de control diferente a las técnicas clásicas ya mencionadas, y además resultados obtenidos con diferentes aproximaciones de control muestran que muy buenos resultados pueden ser obtenidos usando controladores de lógica difusa[9].

El control basado en lógica difusa es una técnica de control inteligente utilizada en plantas no lineales [1]. Se implementa cuando el proceso tiene algunas características de operación generales, el funcionamiento detallado del mismo es desconocido o su modelamiento resulta demasiado complejo. La capacidad de capturar cualitativamente los atributos de un sistema de control basado en fenómenos observables y de modelar las alinealidades del proceso son las principales características del controlador difuso. La habilidad de este controlador de expresar cualitativamente la dinámica del sistema y de ejecutar este esquema cualitativo en una situación de tiempo real es una característica atractiva para los sistemas de control de temperatura [4][9].

Además como el sistema tiene como fuente de energía principal la radiación solar, la cual no puede ser manipulada, se recurre a controlar el flujo del fluido que circula en el colector, como manera indirecta de controlar la temperatura[9].

El diagrama de bloques del sistema de control de temperatura del CPC utilizando lógica difusa se muestra en la Figura 6.

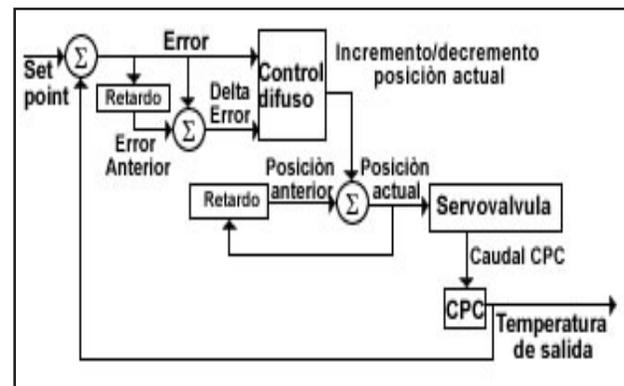


Figura 6. Diagrama de bloques del controlador

Implementación del control difuso en el PLC

El colector solar que se utilizó tiene un factor de concentración de 1.3 por lo que la temperatura de salida del fluido no supera los 200°C. Las entradas del controlador que se utilizaron fueron el error de temperatura y su derivada, las ecuaciones que se utilizan para obtener los valores de estas variables se muestran a continuación.

$$error = Temp_Deseada - Temp_Actual \quad (4)$$

$$delta_error = error_actual - error_anterior \quad (5)$$

Teniendo en cuenta el máximo valor de temperatura se determina que el rango de valores de las variables de entrada, el error y la derivada del error, varía de -200 a 200°C y de -400 a 400°C respectivamente.

El algoritmo de control sólo acepta variables de entrada con valores de 0 a 255 por lo cual los rangos del error y del delta de error deben ser convertidos a esta escala. Una vez realizado el mapeo las variables de entrada son fusificadas utilizando las 5 funciones de membresía mostradas en la Figura 7. (Para mas detalles sobre sistemas de lógica difusa y diseño de controladores difusos ver [4] [10] y [11]).

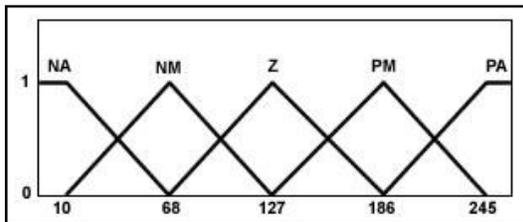


Figura7. Funciones de pertenencia para las variables error y delta de error

Las abreviaciones para los conjuntos de entrada significan: PA= positivo alto, PM= positivo medio, Z= cero, NM= negativo medio, NA= negativo alto.

Una vez realizada la fusificación de las variables de entrada es necesario ejecutar las reglas de control difusas que generan un conjunto de acciones de control expresadas de forma lingüística, estas reglas de control difusa se definieron bajo el conocimiento experimental del comportamiento del CPC y aproximando la respuesta de este al de un sistema de segundo orden subamortiguado. Las acciones de control forman un conjunto de salida difuso que es representado mediante 7 funciones de pertenencia tipo singleton las cuales se muestran en la Figura 8.

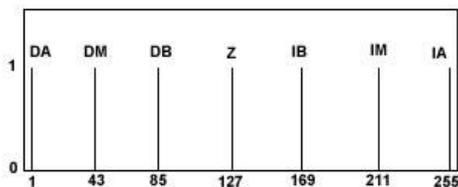


Figura 8. Funciones de pertenencia de las acciones de control

Las abreviaciones para las acciones de control significan: DM= decremento medio; DA= decremento alto; DB= decremento bajo; IM= incremento medio; IB= incremento bajo; IA= incremento alto; Z= cero.

Resultados de la implementación del controlador

En la Figura 9 se muestra la respuesta del sistema controlado. El fluido se encontraba a una temperatura inicial de 30° y la temperatura deseada o setpoint eran 47°C. En la gráfica se observa que el tiempo de subida de la respuesta es de aproximadamente 5 minutos y el sobreimpulso porcentual de la respuesta es de 2.3% (1.1°C). El controlador tiene una resolución de 1°C, lo cual implica

que en estado estacionario una diferencia menor o igual a 1°C entre la temperatura de salida y la temperatura deseada no será interpretada por el controlador como un error y por lo tanto no se realizarán acciones de control. Los datos se obtuvieron mediante la interfaz gráfica que se comunica con el microcontrolador para que éste lea de la memoria EEPROM los datos de temperatura almacenados.

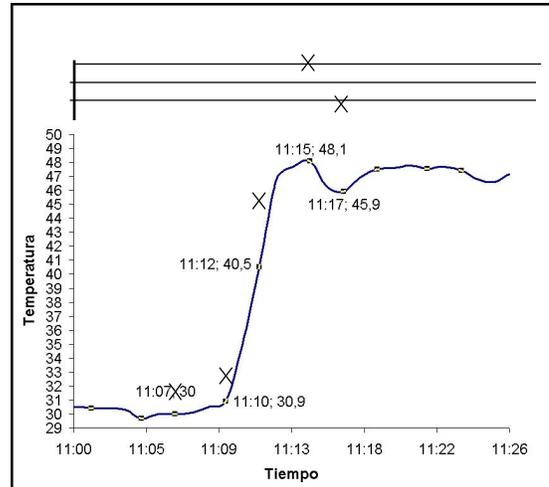


Figura 9. Respuesta del controlador

9. RESULTADOS Y LIMITACIONES

* Se implementó una etapa de acondicionamiento de señales de termocuplas de bajo costo y buen funcionamiento utilizando los amplificadores AD594, por lo cual no fue necesario invertir en la compra de módulos especiales de PLC para termocuplas. El módulo obtenido es una solución económica para medir la temperatura con termocuplas y es compatible con cualquier sistema que cuente con conversores análogo-digital y una CPU como un PLC, un microcontrolador o un computador.

* Se logró que dispositivos como el PLC Fanuc y un microcontrolador pudieran comunicarse entre sí. Esto permitió que los datos de temperatura obtenidos por el PLC fueran almacenados en una memoria y visualizados en una pantalla de cristal líquido. Además, gracias a esta comunicación, es posible que el usuario ajuste en cualquier momento el intervalo de tiempo en que el PLC envía datos al microcontrolador y los parámetros de control (Setpoint, periodo de control).

* Se cumplió con los requerimientos de almacenamiento y visualización de datos utilizando dispositivos de bajo costo como un microcontrolador, una memoria EEPROM y un display de cristal líquido. Gracias a esta solución no fue necesario utilizar software SCADA y no se requiere de un computador continuamente conectado al PLC.

* La memoria tiene una capacidad de almacenamiento máxima de tres días para un intervalo de tiempo entre transmisión de datos del PLC de 3 minutos. Esta capacidad puede aumentar adicionando más dispositivos de almacenamiento al bus I2C aunque la cantidad de éstos conectados al mismo bus no debe exceder el máximo establecido en la especificación técnica del protocolo I2C [6].

CONCLUSIONES

El proyecto constituye un aporte útil a las tecnologías de aprovechamiento de la Energía Solar como los colectores térmicos. Se logró una arquitectura de hardware y software eficiente y escalable que puede ser fácilmente modificada para futuras mejoras. Una de las principales ventajas que ofrece este sistema es un costo muy bajo en comparación con los disponibles comercialmente. Además, la mayoría de los componentes empleados en la elaboración del proyecto son dispositivos cuyo funcionamiento y estructura son fáciles de comprender por lo cual es posible que otras personas realicen modificaciones al sistema original.

REFERENCIAS

- [1]. Cetiner Cuma, Halici Fethi, Cacut Hamir y Taimaz Imdat. Generating hot water by solar energy, an application of neural network. En: Applied Thermal Engineering, no 25 (2005), p. 1337-1348.
- [2]. Cirra, Cristina M., Valenzuela, Loreto., Berenguer, Manuel y Camacho, Eduardo F. Control de plantas solares con generación automática de consignas. En: Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, no 1 (2004), p. 21-24
- [3]. Pallás-Areny Ramón y Webster J. G. Sensors and Signals Conditioning. New Jersey: John Wiley & Sons, 2000, 625 p.
- [4]. Sanchez López, A., Arroyo Figueroa, G. y Villavicencio Ramirez, A. Advanced control algorithms for steam temperature regulation of thermal power plants. En: Electrical Power and Energy Systems, Vol 26 (2004), p. 779-785.
- [5]. NIST ITS-90 Thermocouple Database <http://srdata.nist.gov/its90/men.html>
- [6]. Monolithic Thermocouple Amplifiers with Cold Junction compensation AD594/AD595 http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/421725987AD594.pdf
- [7]. The I2C bus specification <http://www.semiconductors.philips.com/i2c>
- [8]. VersaMax PLC User's Manual GFK-1503 <http://manuales.elo.utfsm.cl/lci/infolink/manuals/gfk1503.pdf>
- [9]. Rubio, Francisco R., Berenguel, Manuel y Camacho, Eduardo F. Fuzzy Logic Control of a Solar Power Plant. En: IEEE transaction on fuzzy Systems, vol3, no 4 (1995), p. 459-468
- [10]. Berenguel, Manuel, Rubio, Francisco R., Camacho, Eduardo F. y Gordillo, Francisco. Techniques and Applications of Fuzzy Logic Control of Solar Power Plants. En: Fuzzy Theory Systems: Techniques and Applications, Vol. 2 (1999), p. 717-745
- [11]. Mendel, Jerry M. Fuzzy Logic Systems for Engineering: A Tutorial. En: Proceeding of the IEEE, Vol. 83, No. 3 (1995), p. 342-377