

INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE UN BANCO DE PRUEBAS DE CALENTADORES SOLARES PLANOS

INSTRUMENTATION AND CONTROL OF A TEST BENCH FLAT PLATE COLLECTOR SOLAR HEATER

Rubén Dorantes Rodríguez

Universidad Autónoma Metropolitana, México
rjdr@azc.uam.mx

Jorge Miguel Jaimes Ponce

Universidad Autónoma Metropolitana, México
jjp@azc.uam.mx

Johan Gómez Vázquez

Universidad Autónoma Metropolitana, México
gomez.v.johan@gmail.com

Adán Nila Hernández

Universidad Autónoma Metropolitana, México
adannil@hotmail.com

Jonathan Tecpa Jiménez

Universidad Autónoma Metropolitana, México
tecpa_@hotmail.com

José Álvarez Sánchez

Universidad Autónoma Metropolitana, México
jose_alvasan@hotmail.com

Recepción: 2/noviembre/2021

Aceptación: 28/febrero/2022

Resumen

El consumo de energía a nivel mundial está aumentando muy rápidamente, y los recursos de energía renovable o alternativa son muy necesarios en los requerimientos de energía en el futuro. En este artículo se presenta la instrumentación y el diseño del control de un banco de pruebas con la finalidad de determinar el rendimiento térmico de colectores solares planos, para la evaluación y caracterización de estos, que permita comparar y dimensionar con certidumbre los requerimientos de diseño de colectores solares. Para el monitoreo y control se utiliza *LabVIEW* y la tarjeta *USB-6003*, termopares tipo *J*, un piranómetro *SP Lite2*,

y algunos elementos más. Una vez instrumentado el sistema, es implementado el control PID. Con este sistema se han hecho pruebas diversas de caracterización de diferentes colectores solares planos para calentamiento de agua, que están fabricados con diferentes recubrimientos, y así haber obtenido principalmente sus curvas características de eficiencia térmica.

Palabras Clave: Calentadores solares, instrumentación y control, renovable, solar.

Abstract

Energy consumption worldwide is increasing very rapidly, and renewable or alternative energy resources are badly needed in future energy requirements. This article presents the instrumentation and the design of the control of a test bench in order to determine the thermal performance of solar collectors, for the evaluation and characterization of these, that allows to compare and size with certainty the design requirements of solar collectors. For monitoring and control, LabVIEW and the USB-6003 board, type J thermocouples, a SP Lite2 pyranometer, and some other elements are used. Once the system is instrumented, the PID control is implemented. With this system, various characterization tests have been carried out on different plate collector solar heater, which are manufactured with different coatings, and thus have mainly obtained their characteristic thermal efficiency curves.

Keywords: *Instrumentation and control, solar, solar heaters, renewable.*

1. Introducción

Un colector solar plano es una tecnología que transforma la radiación solar en calor. Los colectores solares planos o de placa plana con cubierta de vidrio pueden ser diseñados para aplicaciones que requieran entrega de energía a temperaturas moderadas, hasta temperaturas del orden de 100 °C por encima de la temperatura ambiente. Usan radiación solar tanto de directa como difusa y requieren de poco mantenimiento.

En los últimos años, el mercado de los colectores solares térmicos en México se ha visto inundado por tecnología de calentamiento solar proveniente de China, que es

fundamentalmente del tipo de tubo evacuado, la cual ha dejado casi fuera de competencia a las tecnologías mexicanas. Esto principalmente debido a que en la mayoría de las empresas nacionales no han implementado mejoras en sus tecnologías, para obtener colectores más eficientes. Otro factor en la intrusión de los colectores térmicos chinos, son los bajos precios que ofrecen al mercado, porque en la mayoría de las ocasiones no cumplen con alta calidad y resistencia mecánica, y ofrecen sus productos a precios muy atractivos.

El rendimiento de un colector solar plano con cubierta de vidrio de la figura 1 está determinado por tres aspectos: desarrollo de superficies selectivas de alto rendimiento, uso de cubiertas de vidrio selectivo de alta calidad y alta calidad de la manufactura de su construcción final. También son importantes las condiciones de operación, principalmente de la correcta irrigación de agua y esto determina que tan bien opere el colector solar plano. Desde hace varias décadas, se realizan estudios para mejorar las superficies selectivas y cubiertas de vidrio y se han creado normatividades y laboratorios de certificación, para determinar el rendimiento de los colectores solares planos.

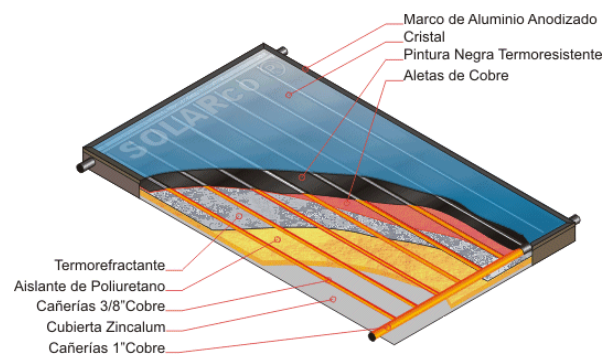


Figura 1 Partes de colector solar plano con cubierta de cristal [Álvarez, 2019].

El desarrollo de superficies selectivas, que son superficies que tienen una alta absorptividad ($\alpha = 90$ a 95%) de la radiación solar de onda corta y que tienen una baja emisividad en longitudes de onda larga ($\varepsilon = 3$ a 7%), los avances logrados son muy importantes. La selectividad (α/ε) puede ser optimizada seleccionando adecuadamente los componentes de los recubrimientos, espesores, concentración del metal, tamaño de partícula, morfología y orientación. También es posible mejorar

el desempeño del recubrimiento depositando capas de películas antirreflejantes (en base a conductores transparentes) sobre ella. Ejemplos son películas en base a los óxidos metálicos (por ejemplo, TiO₂, ZrO₂, MgO) y metales nobles tales como Au, Pt, Ag y Pd. Por ejemplo, la película Au/TiO₂, fabricada por sol-gel, tienen buena selectividad α/ε (400 °C) = 0.80/0.01 y estabilidad térmica (> 500 °C en aire) [Morales, 1999]. Los de Au/MgO depositados por RF sputtering sobre acero inoxidable recubierto de Mo dan α/ε (100 °C) = 0.91/0.07 y estabilidad térmica (> 400 °C) [Fan, 1982], [Fan, 1984]. También el desarrollo de superficies absorbedoras a base de pinturas comerciales de alta temperatura de óxidos metálicos y polímeros, con los cuales se pueden obtener selectividades del orden de 1.3, elevada durabilidad y con alta facilidad de manufactura tecnológica y bajo costo, son una realidad en México [Trejos, 2014].

Este trabajo, es parte del proyecto “Estudio Experimental Comparativo de Recubrimientos de Alta Absortividad y Baja Emisividad Sobre Sustratos Metálicos Utilizados como Absorbedores en Calentadores Solares”, financiado por el Fondo de Sustentabilidad Energética CONACYT-SENER, participando la UAM-A, el Centro de Investigación en Materiales Avanzados de Chihuahua (CIMAV), y la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia y donde uno de sus objetivos principales fue desarrollar superficies selectivas de alta absortividad en el infrarrojo cercano y visible, y de baja emisividad en el infrarrojo lejano, que se desarrollaron en las etapas 1 a 3. Por lo que éste trabajo formó parte de la cuarta etapa. En las etapas anteriores (1, 2 y 3) se trabajó para desarrollar dos tipos de superficies absorbedoras: una de alta absortividad utilizando óxidos metálicos y la segunda de selectividad moderada utilizando pinturas comerciales de alta temperatura y tratamiento superficial, y construyendo dos calentadores solares planos con cubierta, que fueron probados en un banco de pruebas desarrollado en la UAM-A, en esta etapa 4, que se muestra a continuación.

2. Métodos

Para el diseño del banco de pruebas, se utilizó la norma NMX-ES-001-NORMEX-2005 [NORMEX, 2019], [Comité Consultivo Nacional de Normalización para la

Preservación y Uso Racional de los Recursos Energéticos, 2018] en la determinación del rendimiento térmico de un calentador solar plano. Además de forma adicional, es posible hacer una determinación experimental indirecta de la evaluación de la irrigación de agua dentro del colector y determinar, por termografía infrarroja, las principales pérdidas de calor del colector solar.

La instrumentación y el control del banco de pruebas, en la figura 2, se aprecia el esquema general de diseño, operación y control del banco de pruebas, operando en estado permanente, principalmente con el control del flujo másico del agua de recirculación a la entrada del colector solar y también de su temperatura. Por otra parte, la irradiación solar puede ser natural o artificial, y por razones de tipo económico, se eligió la primera.

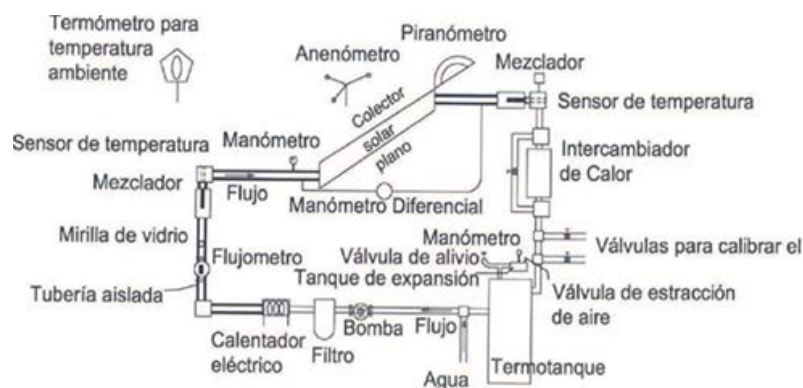


Figura 2 Esquema del banco de pruebas de un calentador solar plano [NORMEX, 2019].

De los elementos que se utilizan para el monitoreo de variables físicas, tales como la radiación solar y temperatura en diferentes puntos, se utiliza un piranómetro SP Lite2 y termopares tipo J respectivamente, y los elementos que se controlan son el Calentador eléctrico que se utiliza para controlar la temperatura del agua de recirculación a la entrada del calentador solar, y el motor eléctrico del ventilador del Intercambiador de calor que se usa para reducir la temperatura de recirculación del agua de salida del calentador solar, con su control PID [Ogata, 2010] correspondiente, figura 3 [Álvarez, 2019]. Con base en lo anterior, el sistema de monitoreo de temperatura, además del control electrónico del calentador eléctrico y del motor eléctrico del ventilador del intercambiador de calor, están dentro de un

gabinete metálico, incluyendo la tarjeta de adquisición de datos USB-6003 y la electrónica diseñada.

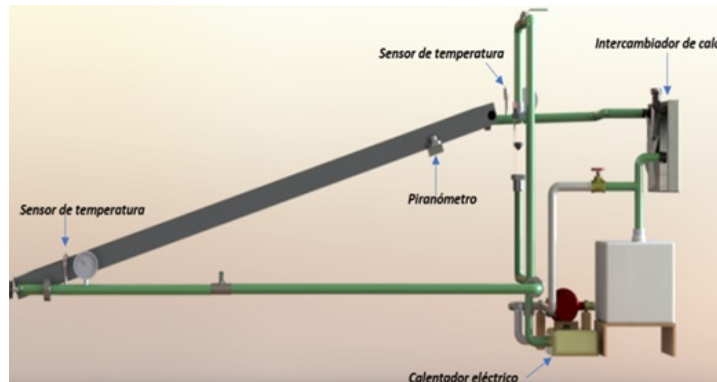


Figura 3 Diseño térmico del banco de pruebas.

Termopar

Los termopares son transductores para medir la temperatura, compuestos de dos metales distintos unidos en un extremo. Cuando la unión de los dos metales se calienta o enfría, se produce una tensión que es proporcional a la diferencia de temperatura entre las uniones (efecto termoeléctrico), así se pueden medir temperaturas superiores a los 2000 °C e inferiores a los -250 °C, dependiendo los materiales con los que se fabrique.

Existen distintos tipos que se distinguen por los rangos de temperatura que pueden detectar, el material de los metales que los componen y el tipo de aplicación que se le dará. Comúnmente se encuentra el tipo J y el tipo K. El termopar tipo J utiliza una combinación de cables de hierro y Constantán. El tipo K se fabrica con cables de Cromel (aleación de níquel y cromo) y Alumel (aleación de níquel y aluminio), tabla 1. El termopar utilizado en este proyecto es de tipo J.

Tabla 1 Termopares comunes, así como sus rangos de temperatura.

Termopar Tipo	Elemento Positivo	Elemento Negativo	Rango de temperatura común
T	Cobre	Constantan	0 a 0 °C
J	Hierro	Constantan	0 a 760 °C
E	Cromel	Constantan	0 a 870 °C
K	Cromel	Alumel	0 a 1260 °C
N	Nicrosil	Nisil	0 a 1260 °C

Dado que el banco de pruebas está en un lugar con amplia insolación, y el sistema de medición y control se puede ubicar en un lugar alejado bajo la sombra, se utiliza un acondicionador de señal de termopares TxBlock-USB, para enviar la medición de temperatura, por medio de un loop de corriente.

El TxBlock-USB es un transmisor de temperatura de tipo 4-20 mA de dos hilos, este se alimenta por un loop de corriente en el cual se conecta una fuente de voltaje en serie con una resistencia. Para el circuito de loop resistencia-fuente, el voltaje en la resistencia de carga es el voltaje adquirido por la tarjeta, en el rango de 1 a 5 V. Para lo cual se propuso una fuente de alimentación de 12 V; utilizando un simple cálculo con ley de Ohm, se obtuvo el valor de la resistencia.

$$R = \frac{5 V}{20 mA} = 250 \Omega$$

Con este dato, se diseñó la tarjeta para convertir la corriente a voltaje [Gómez, 2019], y conectarse a la tarjeta de adquisición de datos USB-6003, figura 4. Hecho lo anterior se configura transmisor para el tipo de termopar utilizado, tipo J.

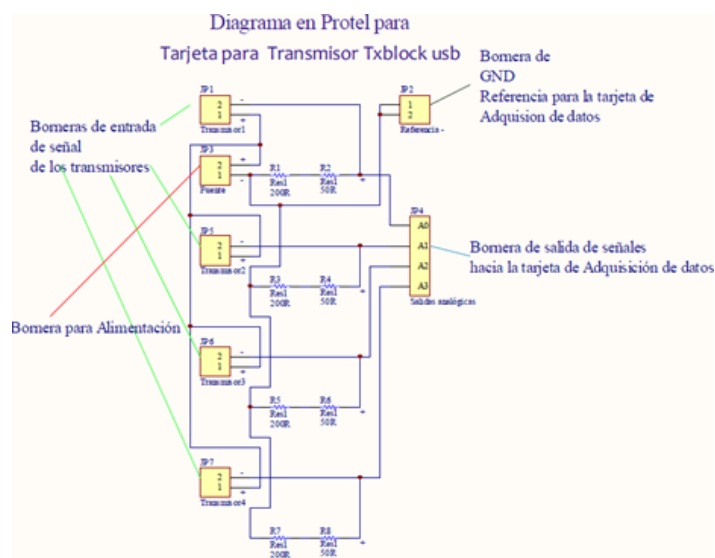


Figura 4 Diagrama del circuito de loop resistencia fuente, hecho en Protel.

Posteriormente se procede a medir la temperatura con cada uno de los termopares, observando que su comportamiento no fue idéntico, realizando una serie de calibraciones utilizando el termopozo marca Fluke modelo Mail stop 141F, y así

establecer la ecuación característica de cada termopar. Las mediciones de temperatura se realizaron en el rango de -10 a 110 °C, dando como resultado la gráfica de la figura 5, en condiciones ideales.

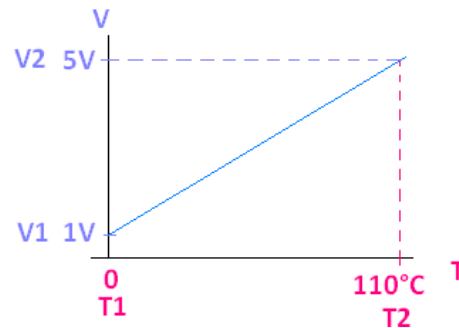


Figura 5 Gráfica correspondiente al termopar 1.

Para la figura 5, se tiene la ecuación 1, donde $y = Voltaje = V$ y $x = Temperatura = T$, ecuación 1.

$$V = mT + b \quad (1)$$

Y la pendiente es $m = 0.03636$. Ahora despejando la temperatura y factorizando se tiene la ecuación 2.

$$T = 27.5 (V - 1) \quad (2)$$

De esta manera se tiene en condiciones ideales, una ecuación con la cual se puede determinar la temperatura en todo momento en un rango de 0 a 110 °C.

Piranómetro SP Lite2

El *SP Lite2* es un piranómetro de uso común, y de gran calidad. El sensor recibe energía solar de todo el hemisferio de vista y produce una pequeña salida de voltaje que puede ser convertido en la irradiancia en vatios por metro cuadrado (W / m^2). Es ideal para medir la energía disponible en aplicaciones para la energía solar. El *SP Lite 2* utiliza un fotodiodo detector, que genera un voltaje de salida proporcional a la radiación que recibe. Además, debido al diseño único del difusor, su sensibilidad es proporcional al coseno del ángulo de incidencia de la radiación recibida, lo que permite mediciones precisas y constantes.

La irradiancia es una magnitud representada por el cociente entre el voltaje de salida, ecuación 3.

$$E_{solar} = \frac{U_{emf}}{S} \quad (3)$$

Donde:

$$S \left[\frac{\mu V}{W/m^2} \right] = \text{Sensibilidad}$$

$$E_{solar} \left[W/m^2 \right] = \text{Irradiación}$$

$$U_{emf} [\mu V] = \text{Voltaje de Salida}$$

De manera más específica y precisa utilizamos la sensibilidad indicada en la etiqueta del Piranómetro, sensibilidad de $79.17 \mu V/W/m^2$, figura 6.



Figura 6 Foto propia del Piranómetro mostrando sus características.

Debido a las necesidades del proyecto es necesario amplificar la señal del piranómetro la cual está comprendida en el rango de 0-150 mV, esto debido a que la tarjeta de adquisición tiene un rango de 0 a 5 V de entrada. Para este propósito se propuso el uso del amplificador AD620 [Gómez, 2019].

El AD620 es un amplificador de instrumentación de bajo costo y alta precisión que requiere solo una resistencia externa para establecer ganancias de 1 a 10,000. Además, el AD620 cuenta con un encapsulado SOIC y DIP de 8 terminales que es más pequeño que los diseños con componentes discretos y ofrece una potencia más baja, solo 1.3 mA de corriente de suministro máximo, lo que lo hace ideal para aplicaciones portátiles o remotas con alimentación por batería.

La ganancia del AD620 se establece con la resistencia R_G , entre los pines 1 y 8. El AD620 está diseñado para ofrecer ganancias precisas usando resistencias con un porcentaje de error del 0.1 a 1%.

Para cualquier ganancia arbitraria, R_G se puede calcular mediante la ecuación 4.

$$R_G = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{G - 1} \quad (4)$$

Con base en la formula anterior proponemos una ganancia de 33, la cual, ahora se sustituye en la ecuación de R_G , obteniendo:

$$R_G = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{33 - 1} = 1543.75 \Omega \approx 1.5 \text{ k}\Omega$$

Ahora si multiplicamos el máximo voltaje de salida que entrega el Piranómetro, que es de 150 mV por la ganancia que se propuso de 33, obtenemos un valor máximo de 4.95 V, figura 7.

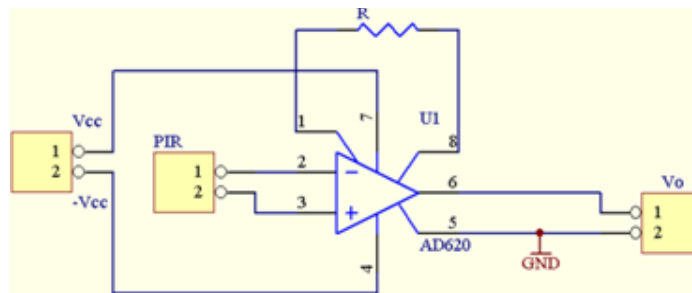


Figura 7 Diagrama esquemático del amplificador para el Piranómetro.

Calentador eléctrico

El calentador eléctrico de agua controla en todo momento durante el periodo de prueba, la temperatura del agua que entra al colector solar dentro del valor de prueba deseado. Para calentar el agua se hace uso de un calentador eléctrico de agua Atmor, por lo que se requiere de un circuito que permita controlar la temperatura, figura 8

Dado que el calentador trabaja con 120 VCA, fue necesario aislar eléctricamente la tarjeta de adquisición de datos. Para esto se envía una señal PWM con niveles de voltaje TTL, figura 9 y 10 por medio de un opto acoplador, que activa un triac, y este último controla un relevador de estado sólido A2475 para un voltaje a la salida de

90-280 VCA y una corriente de 75 A. La señal PWM es de un periodo de un segundo, al cual se le aplicó con un control PID que se implementó en LabVIEW.

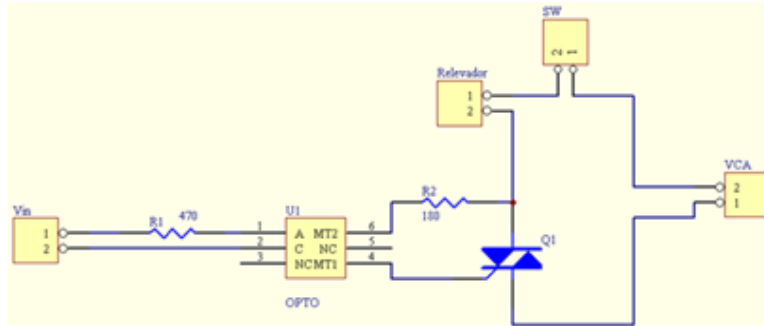


Figura 8 Circuito de acoplamiento para controlar el calentador eléctrico.

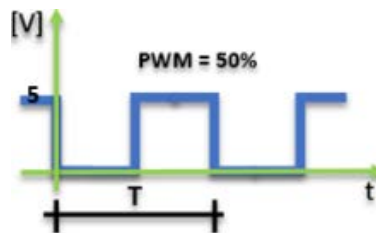
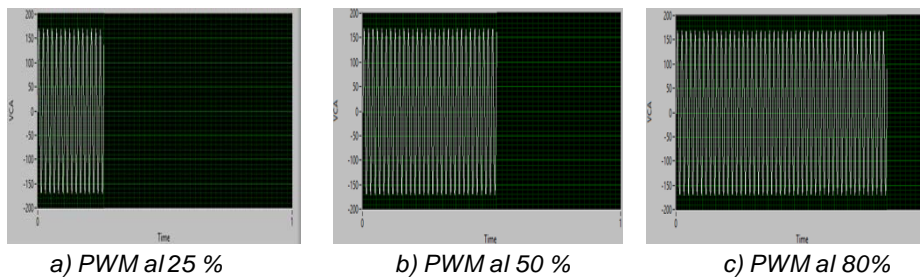


Figura 9 Señal modulada por ancho de pulso (PWM).



a) PWM al 25 %

b) PWM al 50 %

c) PWM al 80%

Figura 10 Ciclo de trabajo para diferentes anchos de pulso.

Con base en la figura 10, se aplica cierto porcentaje de energía a la resistencia calefactora, permitiendo por ejemplo 120 semiciclos en un segundo, para el 100% de ancho de pulso, y así sucesivamente para cada porcentaje de PWM. Dadas las características de inercia térmica del agua, el hecho de que, al tener un pequeño incremento en el ancho del pulso, y el cambio sea de más-menos un semiciclo, no es significativo en la exactitud del control PID. Es un concepto distinto al control por fase, que proporciona excelentes resultados dadas las características del sistema.

Intercambiador de calor

Por ser un circuito de recirculación de agua, a la salida del calentador solar se instaló un intercambiador de calor (radiador de auto) que enfría el agua de salida, antes de volver a su punto de entrada en el calentador solar.

Este radiador fue de auto con moto-ventilador modelo DS60004F. De igual forma como sucedió con el calentador eléctrico, se aplica un voltaje PWM, $T = 2.5$ ms, con un control PID para variar la velocidad del motor, y en consecuencia variar el flujo de aire a través del radiador. El motor es de 12 V a una corriente nominal de 7 A, magnitud de corriente eléctrica que no puede proporcionar la tarjeta de adquisición de datos USB-6003, por lo que se diseña una etapa de potencia conformada con transistores en modo de corte y saturación. El circuito diseñado se muestra en la figura 11.

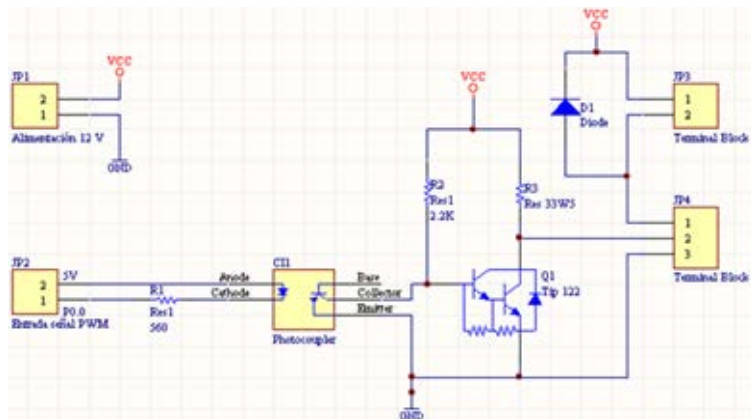


Figura 11 Circuito de acoplamiento para controlar el intercambiador de calor.

Control PID

El control PID [Ogata, 2010] se puede implementar de diferentes formas, siendo por software la más sencilla y que en este proyecto es la forma ideal. Como se sabe teóricamente el control PID está conformado por una parte proporcional, una integral y una derivativa, ecuación 5, a partir de la cual se puede obtener la función de transferencia, ecuación 6.

$$C(t) = K_p \left[\varepsilon(t) + \frac{1}{T_I \int_0^t \varepsilon(t) dt + T_D \frac{d \varepsilon(t)}{dt} \right] \quad (5)$$

$$T(s) = K_p \left\{ \frac{1 + T_I s + T_D s^2}{T_I s} \right\} \quad (6)$$

Así mismo la ecuación que define un control PID, se puede representar en tiempo discreto por ecuación de diferencias, ecuación 7, la cual se muestra codificada en una estructura *Formula Node* de *LabVIEW*.

$$u(t_k) = K_p \left\{ e(t_k) + T K_I \sum_{k=1}^n e(t_k) + \frac{e(t_k) - e(t_{k-1})}{T} \right\} \quad (7)$$

Como se puede observar en la figura 12 se implementó en *Formula Node*, el control *PID*, que proporciona una solución adecuada tanto para controlar el calentador eléctrico, cómo la velocidad del motor del ventilador del intercambiador de calor.

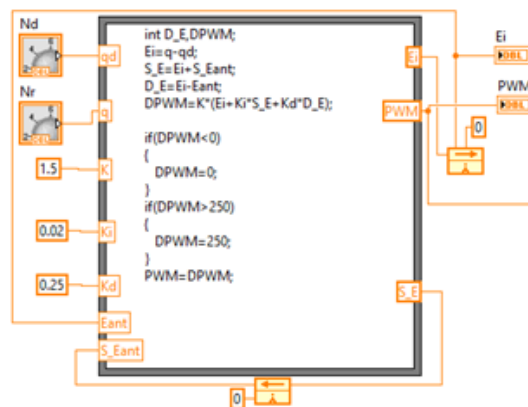


Figura 12 Implementación de un control PID en LabVIEW.

3. Resultados

Calibración de los termopares

Dado que el banco de pruebas debe tener un alto grado de precisión para lograr la caracterización óptima de cualquier colector solar, se procedió a calibrar cada uno de los termopares haciendo uso de un equipo de calibración, tipo termopozo marca Fluke modelo Mail stop 141F, figura 13. Los resultados obtenidos son los mostrados en la tabla 2. Una vez adquiriendo una serie de valores de temperatura, se obtuvo una gráfica correspondiente para cada termopar, figura 14, obteniendo el ajuste adecuado, el cual sirve para lograr una temperatura real o precisa al momento de realizar los cálculos.



Figura 13 Termopozo Fluke Mail stop 141F.

Tabla 2 Valores obtenidos en la calibración de los termopares.

T. Patrón	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)
0	0.5253	-0.1106	-0.5169	0.8868
60	60.11	59.36	59.52	59
65	64.79	63.96	64.54	63.8
70	70.12	69.67	69.53	68.9
75	75.21	75.29	74.92	73.77
80	80.01	80.35	79.7	78.51
85	85.22	85.16	84.87	83.64
90	89.88	89.43	90.04	87.97
95	94.10	93.57	93.95	93.35

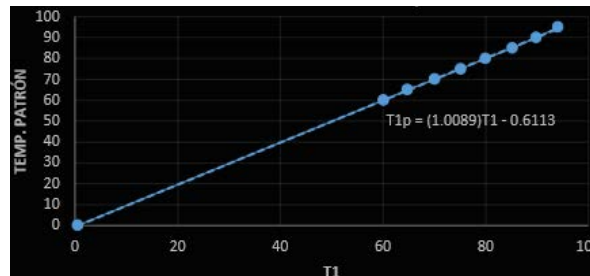


Figura 14 Grafica de la calibración del termopar número 1.

Calibración del piranómetro

De igual forma, para la calibración del piranómetro se utilizaron dos piranómetros de referencia ya calibrados, uno que se encuentra ubicado en la estación meteorológica de la UAM-A y uno más que fue proporcionado por el CINVESTAV. Las mediciones obtenidas se muestran en la tabla 3. Las pruebas se realizaron en una zona sin sombras y altamente insolado, figura 15. Como se observa en la tabla 3, las medidas de irradiación del piranómetro KIPP son muy similares al del piranómetro del CINVESTAV, que se utilizó como patrón de medición y el del banco de pruebas, por lo que se considera que no hay necesidad de realizar el ajuste de

la calibración de fábrica, dado que la diferencia es pequeña y no es significativa en los resultados finales.

Tabla 3 Comparación de la irradiación solar de tres piranómetros.

Irradiación global (W/m ²)		
Piranómetro KIPP (banco de pruebas)	Piranómetro CINVESTAV	Piranómetro Estación Meteorológica
625	643	606
657	658	631
676	674	645
692	689	662
770	763	734



Figura 15 Calibración del piranómetro, utilizando otro de referencia.

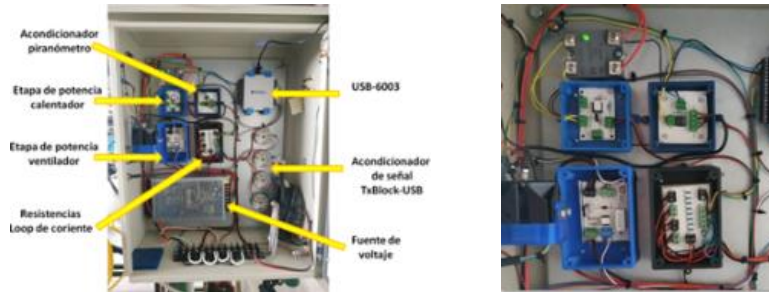
Módulos electrónicos

Los módulos electrónicos desarrollados, incluyendo la tarjeta de adquisición de datos, USB-6003, fuente de alimentación, y acondicionador de señal TxBlock-USB, se montaron en un gabinete metálico para su protección y adecuada conexión, figura 16a. Los módulos electrónicos desarrollados para medición y control del banco de pruebas fueron:

- Módulo de resistencias para el loop de corriente, de los termopares.
- Acondicionador de la señal entregada por el piranómetro.
- Etapa de potencia para controlar el calentador.
- Etapa de potencia para controlar el intercambiador de calor.

Dentro del gabinete también se montó la fuente de alimentación, que es una fuente conmutada de 12 a 20 A, la cual alimenta la circuitería desarrollada, los módulos transmisores TxBlock-USB, así como también el circuito de control del

motoventilador. En la figura 16b, se muestra un acercamiento de los módulos desarrollados, en donde se aprecia en la parte superior el relevador de estado sólido para controlar el calefactor eléctrico.



a) Gabinete con módulos electrónicos b) Acercamiento a módulos electrónicos
Figura 16 Gabinete con los sistemas electrónicos del banco de pruebas.

Programa en LabVIEW

El software para monitorear las variables físicas y realizar el control, es LabVIEW [Taqi, 2007], que proporcionó un ambiente muy amigable para la caracterización y evaluación de los calentadores solares planos. En el VI desarrollado se implementa para cada termopar la ecuación de calibración que los definen, y así poder realizar mediciones precisas, de igual forma para el piranómetro. El panel frontal se muestra en la figura 17 [Gómez, 2019], en donde se tienen los indicadores numéricos necesarios, y los controles para el calefactor y el intercambiador de calor.

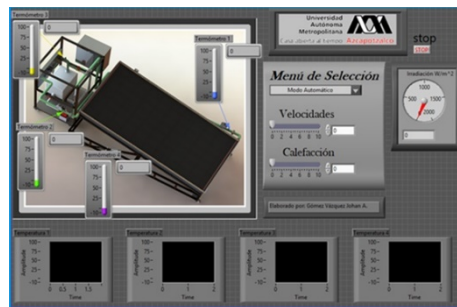


Figura 17 Panel frontal del VI desarrollado en LabVIEW.

En la figura 18 [Gómez, 2019] se muestra una sección del diagrama a bloques en LabVIEW. En la figura 19 [Álvarez, 2019], se muestra el banco de pruebas para evaluar el comportamiento térmico de calentadores solares planos, el cual está en

operación desde mediados del año 2020 y con el que se han realizado diversas caracterizaciones de varios calentadores solares planos, algunos desarrollados en la institución y otros de tipo comercial para obtener curvas de rendimiento térmico que se han comparado con las que proporcionan los propios fabricantes.

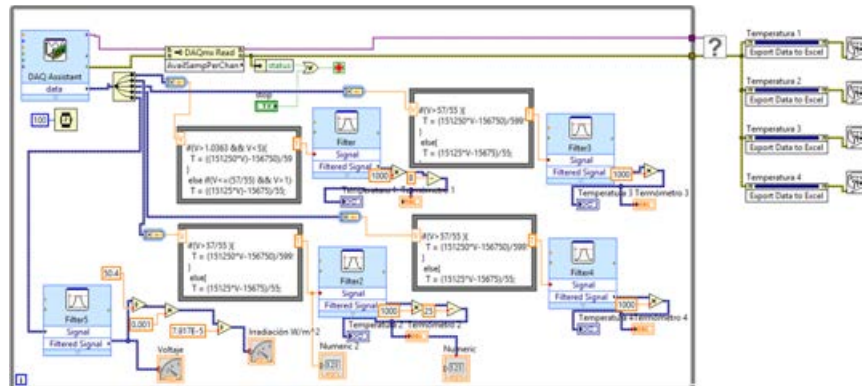


Figura 18 Parte del programa desarrollado en LabVIEW.

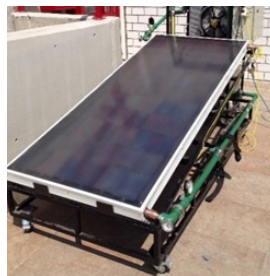


Figura 19 Vista final del Banco de pruebas en operación.

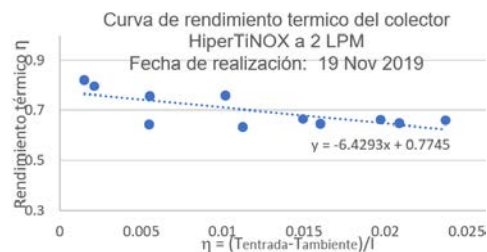
Determinación experimental del rendimiento térmico del Colector solar plano con cubierta de vidrio con placa absorbadora con recubrimiento selectivo de HiperTiNOX

Este colector comercial fue fabricado por una empresa mexicana y el colector cuenta con un área de colección de 1.73 m². La placa absorbadora es de la marca TiNOx, con una alta absorptividad y una baja emisividad debido al recubrimiento de oxinitruo de titanio. Este colector se nombró como colector HiperTiNOX, figura 20a, y se probó para calibrar y dar certidumbre al banco de pruebas, así mismo a las pruebas experimentales. En la figura 20b se presentan los resultados gráficos de las pruebas, a partir de datos de la temperatura de entrada y salida ya calibradas,

del cálculo del rendimiento térmico en función de la típica relación ($\eta = (T_{entrada} - T_{ambiente})/I$), donde I es la radiación solar global en W/m^2 . La grafica muestra la dispersión de puntos, así como la línea de tendencia obtenida por método de mínimos cuadrados y un valor aproximado de rendimiento óptico de 0.85, cuando $\eta = 0$. También se muestra en la figura 21 la curva de rendimiento térmico de uno de los dos calentadores solares planos construidos en la UAM-A, el denominado COMEX de selectividad moderada, que utiliza una pintura comercial de alta temperatura depositada sobre lámina de cobre y tratamiento superficial. La gráfica muestra la dispersión de puntos, así como la línea de tendencia obtenida por método de mínimos cuadrados y un valor aproximado de rendimiento óptico de 0.72, cuando $\eta = 0$.



a) Colector HiperTiNOX

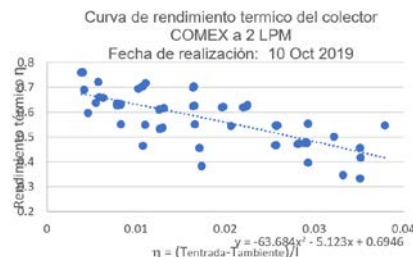


b) Curva de rendimiento térmico

Figura 20 Datos obtenidos y la línea de tendencia, colector HiperTiNOX a 2 LPM.



a) Colector COMEX



b) Línea de tendencia

Figura 21 Datos obtenidos y línea de tendencia, colector COMEX.

4. Discusión

Las primeras pruebas para la medición de la temperatura se hacen con termopares tipo J, programando el termopozo Fluke modelo Mail stop 141F, para diversos valores de temperatura con una duración de cinco minutos entre una lectura y otra, tabla 4.

Tabla 4 Resultados para una primera prueba con termopares J.

T. Patrón	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)
20	20.98	19.26	17.68	19.16
40	39.995	38.09	38.2	38.95
60	59.14	58.5	54.4	58.59
80	73.13	72.05	71.41	72.68
100	30	40	40	80

Como se puede apreciar en la tabla 4 para temperaturas bajas e incluso medianamente altas en el rango en que se está trabajando, se tiene una precisión muy cercana con la temperatura del termopozo, empezando a tener problemas con temperaturas más elevadas, en donde incluso a una temperatura de 100 °C las mediciones hechas fallaron drásticamente. Sin embargo, el rango de temperaturas utilizado para probar dos calentadores solares de manufactura propia fue para temperaturas de salida del agua del orden de 65 °C, lo que nos permitió usar sin restricción alguna el banco de pruebas hasta ahora. Estos datos fueron tomados antes de la calibración en la lectura de cada termopar. Para el control de velocidad del motor del ventilador, se utiliza una frecuencia de 40 Hz ($T = 2.5 \text{ ms}$) en el PWM, con lo cual se tiene un control suave y por lo tanto una excelente respuesta en el control de velocidad. De forma similar, para controlar el calentador eléctrico, se estableció una frecuencia de 1 Hz, o sea un periodo $T = 1 \text{ s}$. La magnitud de este periodo se selecciona de dicho valor para evitar el utilizar un control por fase, típico en el control de temperatura con resistencias eléctricas, obteniendo el mismo resultado. De ser necesario el calentar el agua rápidamente, el control PID genera un ancho de pulso del 100%, y conforme el agua se va acercando a la temperatura establecida, se va reduciendo el ancho del pulso, y por lo tanto bajando potencia consumida por el calentador eléctrico, y en consecuencia controlando la temperatura del agua.

5. Conclusiones

El proceso de desarrollo del banco de pruebas de calentadores solares planos es muy extenso, en donde previamente se ha diseñado la parte estructural y la parte termo-hidráulica [Álvarez, 2019] que no se trata en este artículo, sin embargo, que

son muy importantes para lograr una adecuada instrumentación del sistema. Después de varias etapas de diseño y rediseño se ha logrado desarrollar este banco de pruebas que cumple con las especificaciones necesarias para lograr la caracterización y obtención de los parámetros indicados con base en la norma *NMX-ES-001-NORMEX-2005* [NORMEX, 2019]. Es importante mencionar que al tener cómo referencia dicha norma, al desarrollar el banco de pruebas se acota el alcance del proyecto, lo cual hace más claro el desarrollo de un sistema como este. Sin embargo, con el control desarrollado hasta ahora ha sido posible controlar con una precisión de 0.5 °C, la temperatura de entrada del agua al colector solar, lo cual es bastante aceptable, y además haberla podido controlar desde 20 hasta 65 °C, que son valores un tanto extremos en la operación de un colector solar plano, y el rango típico de operación. Es importante mencionar que en este proyecto dadas las características que se exigen en su desarrollo, se tuvo la necesidad de diseñar sistemas electrónicos tanto analógicos, como digitales y de potencia, además de implementación de controles PID, ya que se debía gobernar, por ejemplo, el calentador eléctrico controlando la cantidad de energía proporcionada desde la línea de 120 VCA, lo cual no se puede directamente con la tarjeta de adquisición de datos USB-6003. Un aspecto muy importante en este proyecto es la implementación de los controladores PID programados en LabVIEW, para el calentador eléctrico y el motor del ventilador del intercambiador de calor, que es un control que favorece en la toma de mediciones más finas, y por lo tanto un estudio más confiable. Con lo anteriormente expuesto se manifiesta que, para el desarrollo de este proyecto, es indispensable un conjunto de conocimientos multidisciplinarios para el desarrollo óptimo de este banco experimental de pruebas.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Álvarez, J., (2019). Diseño, construcción y puesta en marcha de un banco de pruebas para evaluar la eficiencia térmica de calentadores solares planos para aplicaciones de baja temperatura, Proyecto de integración de Ingeniería Mecánica Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, Ciudad de México.

- [2] Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y Uso Racional de los Recursos Energéticos, (2018). Norma Oficial Mexicana NOM-027-ener / scfi-2018, rendimiento térmico, ahorro de gas y requisitos de seguridad de los calentadores de agua solares y de los calentadores de agua solares con respaldo de un calentador de agua que utiliza como gas combustible lp o gas natural. Especificaciones, métodos de prueba y etiquetado, Diario Oficial de la Federación, Ciudad de México.
- [3] Fan J. C. C., U.S. Patent No. 4,312,915, 26 January 1982.
- [4] Fan J. C. C., U.S. Patent No. 4,442,166, 10 April 1984.
- [5] Gómez, V., (2019). Diseño e implementación del control electrónico de un banco de pruebas de calentadores solares planos. Proyecto de integración de Ingeniería Electrónica, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Ciudad de México.
- [6] Morales Á. and Ajona J. I., Durability, performance and scalability of sol-gel front surface mirrors and selective absorbers, *J. Phys. IV France*, 9, 3, 513, 1999.
- [7] NORMEX, Sociedad Mexicana de Normalización y Certificación, (2019). NMX-ES-001-NORMEX-2005 Energía solar - rendimiento térmico y funcionalidad de colectores solares para calentamiento de agua de métodos de prueba y etiqueta., NORMEX, Estado de México.
- [8] Ogata, (2010). Ingeniería de Control Moderna, 5ª Edición, PEARSON Prentice Hall. ISBN 978-84-8322-660-5.
- [9] Taqi Mohiuddin, Rick Bitter, Matt Nawrocki, (2007). *LabVIEW Advanced Programming Techniques*, Second Edition, CRC Press, ISBN: 978-0-8493-3325-5.
- [10] Trejos Moncada M. L., Cruz Muñoz B., Miki Yoshida M., Dorantes Rodriguez R., (2014). Comparative experimental study of new coatings absorvent surface of flat solar heaters. *Energy Procedia* 57, pp. 2131 – 2138. ISSN:1876-6102.