



Diseño y construcción de una cámara de ensayos termoeléctricos

Design and building of a thermoelectric chamber test

Myriam Natalia Mendieta Reyes¹, Raul Ernesto Montaña Parra², Luis Antonio Noguera Vega³

Fecha de recepción: 14 de noviembre de 2015

Fecha de aceptación: 23 de agosto de 2016

Cómo citar: Mendieta Reyes, M. N., Montaña Parra, R. E., & Noguera Vega, L. A. (2016). Diseño y construcción de una cámara de ensayos termoeléctricos. *Revista Tecnura*, 20(Edición especial), 147-161. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.SE1.a11

RESUMEN

Contexto: La vida útil de los diferentes equipos eléctricos varía dependiendo de las condiciones de uso; por esta razón, es necesario hacer pruebas simulando las diferentes temperaturas a las cuales podría estar expuesto un equipo eléctrico. Para ello es necesario el uso de una cámara de ensayos termoeléctricos la cual, además de permitir la realización de pruebas estandarizadas a dichos equipos, permite el desarrollo de proyectos de investigación en el laboratorio de Ensayos Termoeléctricos de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.

Método: El desarrollo del proyecto se realizó mediante la implementación de la estructura y control de la cámara. Adicionalmente, con el fin de hacer más eficiente el calentamiento, se equipó un mecanismo de retroalimentación de aire y se estableció el sistema (que cuenta con un control PID, proporcional, integral, derivativo), lo que permite garantizar que la temperatura establecida por el usuario en el centro de la cámara sea estable en el menor tiempo posible.

Resultados: Mediante el método de sintonización Ziegler- Nichols, se obtuvo el tiempo de retardo (41,10 s) y la constante de tiempo (927,43 s), las cuales permitieron el cálculo de la función de transferencia que permitió el modelado de la plata en el Simulink de Matlab, con el fin de obtener los valores PID en su forma de tiempo ($k_p=27$, $T_i=82$ y $T_d=20$). Ingresando estos valores en el pirómetro, fue posible realizar una prueba a un interruptor termomagnético sometido a una temperatura de 75°C obteniendo como resultado una temperatura homogénea sobre la superficie, ideal para realizar pruebas a este tipo de equipos.

Conclusiones: Fue implementado el diseño de una cámara de ensayos termoeléctricos. Esta cámara permite la variación de temperatura entre temperatura ambiente y 120°C mediante un sistema de control PID, incluyendo sistemas de retroalimentación de aire y de enfriamiento.

Palabras Clave: Control de temperatura, Control PID, Pruebas termoeléctricas, sistema abierto, sistema cerrado, Transferencia de calor, Ziegler-Nichols

1 Tecnóloga en Electricidad, ingeniera Eléctrica. Ingeniera de proyectos de Senergysol. Bogotá, Colombia. Contacto: mnatalia.mendieta@outlook.com

2 Ingeniero Eléctrico. CPS Laboratorio de Tecnología en Electricidad Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: raermonpa@hotmail.com

3 Ingeniero en Distribución y Redes Eléctricas, especialista en Informática y Automática Industrial. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Miembro honorario de la Cámara Colombiana de la Energía – CCENERGIA. Bogotá, Colombia. Contacto: lanoguerv@udistrital.edu.co

ABSTRACT

Context: The shelf life of the different electrical equipment varies depending on the conditions of use, so it is necessary to test simulating different temperatures at which can be exposed, this requires the use of a thermoelectric chamber test, which also allows standardized testing and enables the development of research projects in the Laboratory of Thermoelectric Tests of the Technological Faculty of the Francisco José de Caldas District University, Bogotá, Colombia.

Method: Implementing the structure and control of the chamber was main part of this project. In addition, in order to make heating more efficient, we equipped an air feedback mechanism and established the system (which has a PID, proportional, integral and derivative control), which ensures the temperature set by the user in the center of the chamber is stable in the shortest possible time.

Results: Using Ziegler-Nichols tuning method, we obtained the delay time (41.10 s) and the constant time (927.43 s), which allowed us to calculate the transfer function for modeling the system plant in Matlab Simulink in order to find the PID values in form of time ($k_p = 27$, $T_i = 82$ and $T_d = 20$). By entering these values in the pyrometer, it was possible to test a thermomagnetic switch subjected to a temperature of 75 ° C resulting in a homogeneous temperature on the surface, ideal for testing this type of equipment.

Conclusions: We implemented the design of a thermoelectric test chamber. This chamber allows the temperature variation between ambient temperature and 120 ° C by a PID control system, including air feedback and cooling systems.

Keywords: Temperature control, PID Control, Thermoelectric tests, Open system, Close system, Heat transfer, Ziegler-Nichols.

INTRODUCCIÓN

En la física de materiales la mayoría presenta variaciones en su comportamiento frente a cambios de temperatura, debido a la vibración de las moléculas, las cuales transfieren energía unas a otras al chocar entre sí (Incropera & De Witt, 1999). La resistividad de un conductor, por ejemplo, crece a medida que lo hace la temperatura, ya que los átomos aumentan su frecuencia de vibración, dificultando el movimiento de los electrones libres en el material (Carmona, 2006). Por ello el comportamiento de los diferentes dispositivos eléctricos varía dependiendo de las condiciones ambientales en que se encuentren; por tanto, deben ser sometidos a pruebas que simulen temperaturas extremas a las que podrían estar expuestos, garantizando un correcto funcionamiento y una vida útil para el entorno en el cual deba instalarse el equipo.

Con el fin de observar el comportamiento de los dispositivos eléctricos mediante la variación de temperatura, y teniendo en cuenta que

algunos de ellos por norma deben ser sometidos a pruebas con duración específica a diferentes temperaturas, como es el caso de los interruptores termomagnéticos, los cuales deben someterse a pruebas estipuladas en la NTC 2116: Interruptores para protección contra sobrecorriente en instalaciones domésticas y similares, y la IEC 947, se diseña y construye una cámara de ensayos termoelectricos que permite crear diferentes temperaturas controladas y tiempos establecidos por el usuario.

El presente artículo describe el proceso de diseño y construcción de una cámara de ensayos termoelectricos para la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica, el cual se inicia con un marco teórico que condensa la información preliminar requerida. Posteriormente al marco teórico se plantea una metodología, que describe un análisis de diseño y construcción, tanto la parte constructiva de la estructura de la cámara como el modelado de la planta y su posterior implementación de un control de temperatura

mediante un sistema de control PID. Finalmente se exponen los resultados del proceso de diseño y construcción de la cámara, los cuales permitieron plantear conclusiones sólidas y de impacto para este tipo de proyectos.

MARCO TEÓRICO

Los diferentes equipos eléctricos requieren ciertas pruebas, las cuales permiten verificar su comportamiento a diferentes temperaturas. Estas se efectúan mediante equipos llamados cámaras de ensayos térmicos que realizan pruebas ambientales, con las que se comprueba el funcionamiento y la vida útil de estos (Boustens Mexico, s.f.) El principio de funcionamiento de estos equipos se basa en la implementación de un sistema de control que permita la variación de ciertas propiedades mediante aplicación de principios de termodinámica; en este caso se trabajará sobre un sistema cerrado, el cual se refiere a un sistema con una frontera por donde no puede haber transferencia de masa (Moran & Shapiro, 2004), que no cambiará de estado a sistema abierto, es decir, la materia entrará y saldrá del volumen de control por conductos establecidos, de manera que en su interior hay un constante proceso de renovación (Zamora, 1998) dependiendo de los cambios de temperatura.

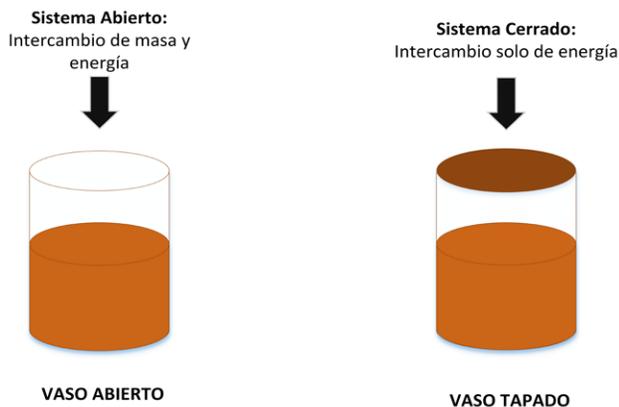


Figura 1. Sistemas termodinámicos.

Fuente: elaboración propia.

Un sistema de control es una interconexión de elementos capaz de relacionar la entrada y la salida de una planta (refiriéndose a planta como el conjunto de dispositivos que realizan una operación determinada y que debe ser controlada), y así mismo se desarrollan con el fin de operar máquinas o efectuar procesos que reduzcan errores, obteniendo un resultado deseado (Camargo Castro y Villamizar Rivera, 2008); la entrada del sistema puede ser de tipo escalón, rampa o impulso (Figura 2).

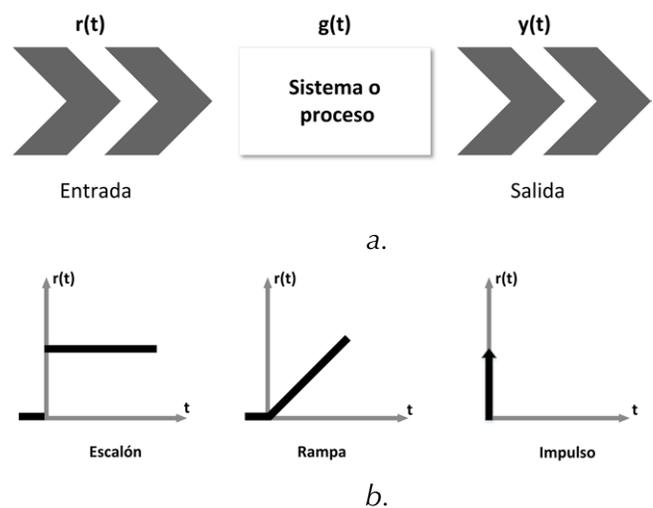


Figura 2. a) Diagrama de bloques de un sistema de control. b) Tipos de entrada.

Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta que la temperatura es la propiedad que mide la intensidad de la transferencia de energía que se presenta entre dos sistemas (Roller & Blum, 1986), puede ser controlada mediante la incorporación de un termistor, un dispositivo que permite la medición de esta propiedad mediante el uso de un circuito formado por dos conductores diferentes y entre cuyas uniones hay una diferencia de temperatura, lo cual genera una fuerza electromotriz (Hernández Gaviño, 2010), (Figura 3); es posible realizar un control PID sobre un sistema de variación de temperatura con base en conceptos de transferencia de calor, como lo son la convección, que transfiere energía entre una superficie y un fluido que se mueve dentro de

esta (Incropera & De Witt, 1999), y la radiación, en donde el calor hace una transferencia de un cuerpo por medio de su temperatura, sin intervención de medio alguno (Kreith, Manglik, & Bohn, 2012).

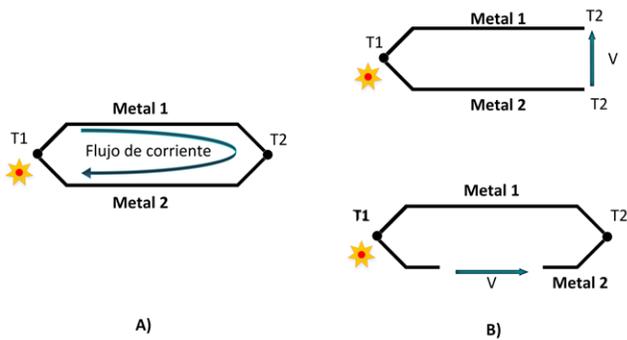


Figura 3. Efecto Seebeck.

Fuente: elaboración propia.

En la figura 3 se puede observar que se genera una diferencia de potencial entre las terminales de los dos metales, que está dada por la ecuación (1).

$$V = \alpha(T_1 \cdot T_2) \quad (1)$$

Donde α es el coeficiente de Seebeck [$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$].

El control PID es uno de los sistemas de control más utilizados debido a la cantidad de sistemas en los que puede aplicarse y la robustez de sus soluciones. Para ser implementado se deben encontrar las ganancias, de tal forma que se pueda dar una respuesta en el tiempo, definidos al inicio del diseño (sintonización). Cada letra del control corresponde a un concepto: P es la ganancia proporcional al error, I proporcional a la integral del error y D a la tasa de cambio del error. La sintonización es un método basado en la relación entre la ubicación de polos y la respuesta del sistema en el tiempo (figura 4), (Rairán Antolines, 2007).

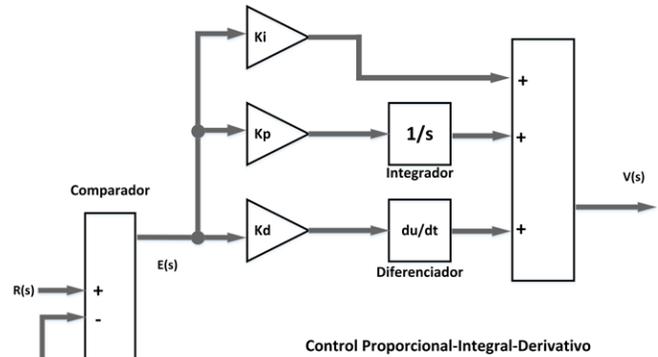


Figura 4. Representación en bloques de un control PID.

Fuente: elaboración propia.

METODOLOGÍA

Con el fin de realizar el diseño y construcción de la cámara de ensayos termoelectricos se establecieron los lineamientos que se observan en la figura 5, los cuales permitieron obtener los mejores resultados dando cumplimiento a los objetivos establecidos.

Diseño y construcción

En el trabajo de grado “Diseño de una cámara de ensayos térmicos” se establecieron algunos parámetros constructivos, los cuales se obtuvieron a partir de simulaciones e investigación sobre materiales y equipos que fueran ideales para garantizar el cumplimiento de las especificaciones requeridas para el funcionamiento de la cámara; por esto fue necesario hacer nuevamente un estudio para cambiar algunas características, debido a que algunos materiales y equipos sugeridos en el trabajo de grado antes mencionado eran muy costosos para el presupuesto con que se contaba o demasiado grandes para el espacio del laboratorio, además de la dificultad de fabricación.

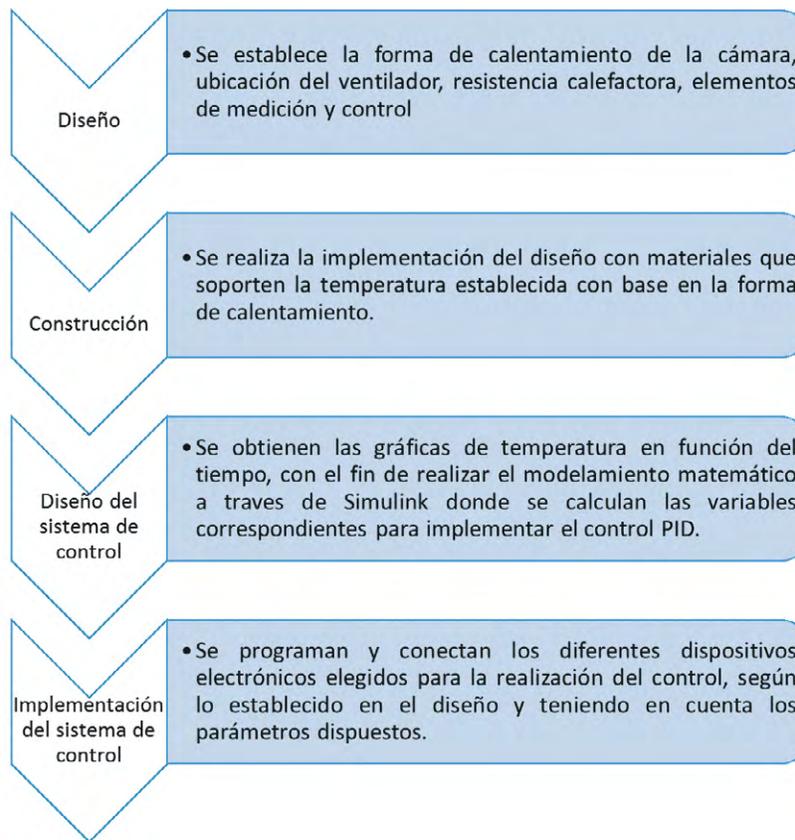


Figura 5. Metodología para el diseño y la construcción de una cámara de ensayos termoelectrónicos.

Fuente: elaboración propia.

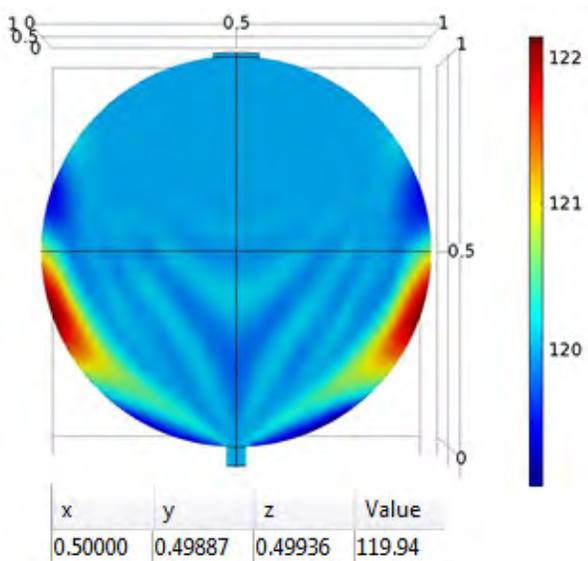


Figura 6. Geometría con distribución homogénea.

Fuente: Mendieta Reyes, Montaña Parra y Noguera Vega (2012).

En la figura 6 se observa la geometría que por su diseño mostró la mejor distribución de temperatura en el interior de la cámara, por lo cual se hizo una construcción tratando de mantenerla. Debido a que el tamaño era muy pequeño y era necesario un molde que era mucho más costoso, no fue posible apegarse exactamente al diseño esférico; sin embargo, se construyó una geometría aproximada, la cual tiene un diámetro interno de 60 cm y así, teniendo en cuenta que el modelo alterno fue construido por partes, este cuenta con una puerta en una de sus caras, la cual tiene un cierre hermético que evita pérdidas de calor y de flujo de aire. Aun así, en las especificaciones constructivas de la cámara se mantienen los rangos de temperatura que se estipularon en el diseño sobre el cual se basó el proyecto; este rango se mantiene entre la temperatura ambiente y 120 °C.

Por otra parte, en el diseño del proyecto antes mencionado se establece que es ideal el uso de un aislante térmico de fibra de vidrio con el fin de evitar la transferencia de calor al exterior por las paredes de la cámara. Debido a que la manta de fibra de vidrio es bastante difícil de adherir a las paredes y que el material utilizado para su construcción era costoso, se optó por la opción de utilizar acero inoxidable calibre 12 en vez de aluminio; el espesor del material aumenta la resistencia térmica del acero, lo que disminuye la transferencia de temperatura al exterior, volviendo innecesario el uso de manta con el fin de evitar quemaduras por contacto con la cámara; así mismo se aplicó pintura aislante térmica, que permite una mejor distribución de temperatura dentro de esta, al igual que disminuye la temperatura sobre el área de contacto.

Al hacer la construcción se implementaron elementos que permiten alcanzar la temperatura deseada por el usuario y que facilitan la distribución del flujo de aire dentro de la cámara. Para ello el sistema cuenta con una resistencia calefactora de aire de 850 W, cuya potencia fue establecida por el fabricante, teniendo en cuenta que la cámara debía llegar a una temperatura de 120 °C en el menor tiempo posible, sin afectar el sistema eléctrico con que cuenta el laboratorio.



Figura 7. Módulo de calentamiento.

Fuente: elaboración propia.

El módulo de calentamiento en el que se encuentra la resistencia calefactora (figura 7) permite un aumento de temperatura en el interior de la cámara por convección forzada a medida que el flujo de aire pasa por el ducto; así mismo, al iniciar el proceso de enfriamiento la temperatura de la resistencia disminuye de acuerdo con el control realizado y el aire sale de la cámara por medio del módulo de retroalimentación, tal como se muestra en figura 8.

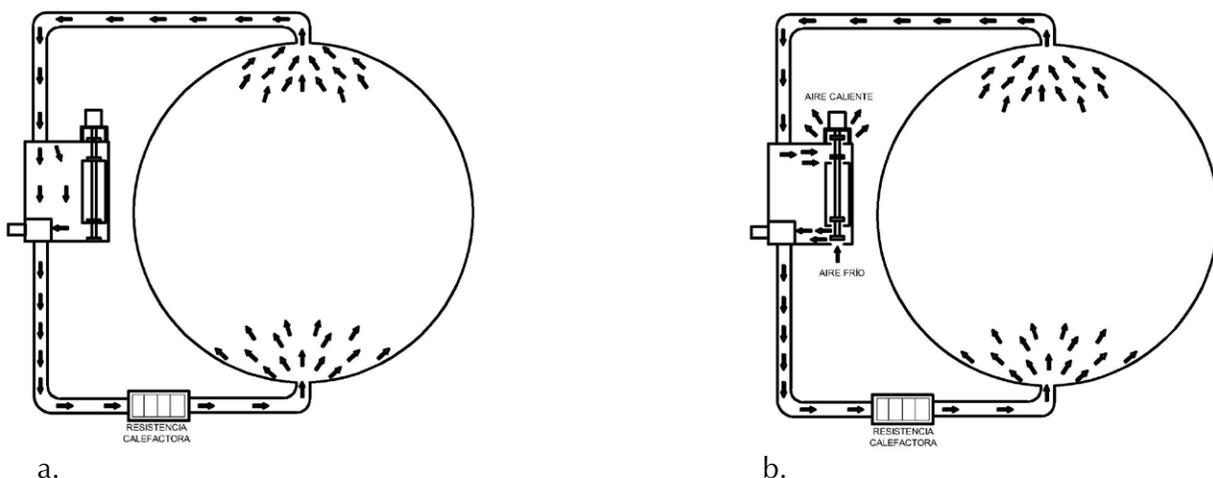


Figura 8. Ciclo de calentamiento y enfriamiento de la cámara. a) calentamiento b) enfriamiento.

Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, el flujo de aire que ingresa a la cámara será distribuido gracias al uso de un difusor construido con aluminio, el cual cuenta con pequeños agujeros en diferentes ángulos (figura 9).

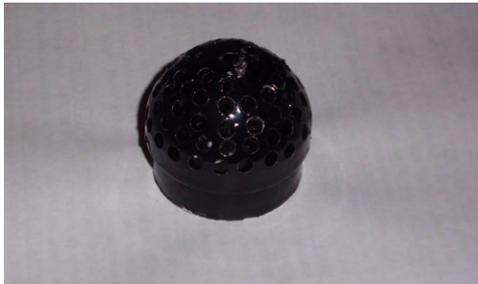


Figura 9. Difusor de aire.

Fuente: elaboración propia.

Para realizar el diseño y modelado del sistema es necesario utilizar equipos que permitan una correcta medición; por ello se efectuaron pruebas con diferentes sensores de temperatura teniendo en cuenta tanto precisión como facilidad para su implementación dentro de la cámara. En la figura 10 se observa la gráfica que muestra la diferencia de temperatura al hacer la medición con una termocupla de aire de tipo k y una termocupla de tipo j. Dentro de las características técnicas de la termocupla de aire cabe notar que entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $293\text{ }^{\circ}\text{C}$ se tiene una incertidumbre de $\pm 2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo cual dentro de la diferencia que se nota en la gráfica es necesario tener en cuenta dicha variación.

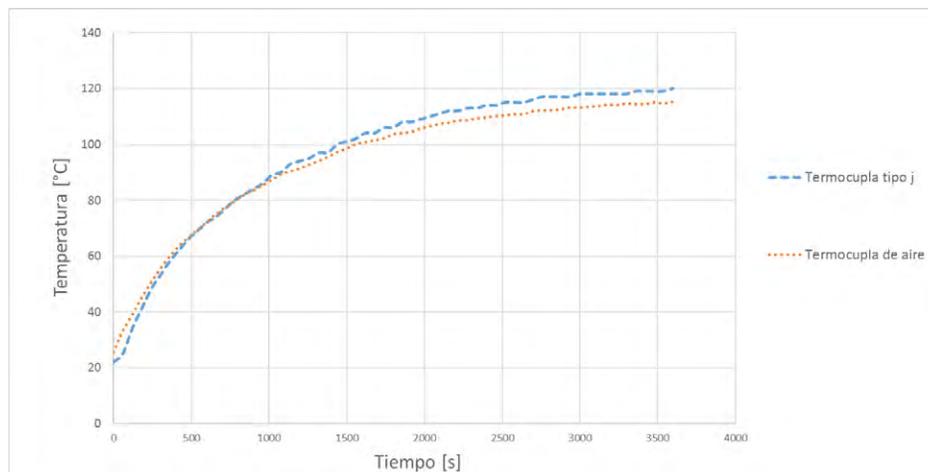


Figura 10. Gráfica de la medición de temperatura con termocupla de aire y termocupla de tipo J.

Fuente: elaboración propia.

En la figura 11 es posible notar que la termocupla de aire es mucho más difícil de poner y no es posible situarla exactamente en el centro de la cámara, lugar en donde se hace la medición sobre el equipo bajo prueba; por ello se hizo la medición en el mismo punto con el fin de verificar qué tan alta es la diferencia entre las dos termocuplas, por lo cual se elige el uso de la termocupla de tipo j.

Debido a que se contaba con un equipo controlador de temperatura y que el desarrollo de un

controlador implicaba mayor inversión de dinero y tiempo, se optó por efectuar el modelo matemático y de control PID para ingresar las variables requeridas por el pirómetro con el fin de garantizar el valor de temperatura solicitada por el usuario. Para ello se usó la termocupla previamente seleccionada (tipo J), la cual funciona como sensor de temperatura en el interior de la cámara y el relé de estado sólido que efectúa el control del sistema, cuyo esquema eléctrico se muestra en la figura 12.



Figura 11. Ubicación de las termocuplas dentro la cámara.

Fuente: Elaboración propia.

Los equipos antes mencionados cuentan con las características que se especifican en la tabla 1.

Por otra parte, la cámara cuenta con un sistema retroalimentado que permite la recirculación de aire dentro de la planta; este modelo se integró con el fin de disminuir las pérdidas de calor y volver más eficiente el calentamiento en el interior. Para ello se implementó un ventilador centrífugo con palas alabeadas metálicas que puedan resistir altas temperaturas, el cual impulsa el aire dentro del módulo de recirculación hacia la cámara; este dispositivo opera a un voltaje de 24 VDC, como lo muestra el esquema eléctrico de la figura 13. Así mismo, con el fin de hacer el enfriamiento del sistema se cuenta con una electroválvula conectada a 120 V, la cual tiene un sistema electromagnético que controla un émbolo que abre o cierra un juego de válvulas diseñadas y construidas para este

Tabla 1. Características técnicas.

Parámetro	Pirómetro	Relé de estado sólido
Referencia	Autonics TC4Y-14R	HFS15
Tensión de operación	120-240 VAC	110 VAC
Tensión de carga	-	240 VAC
Corriente máxima de carga	-	15 A
Rango de operación	19–130 °C	-

Fuente: elaboración propia.

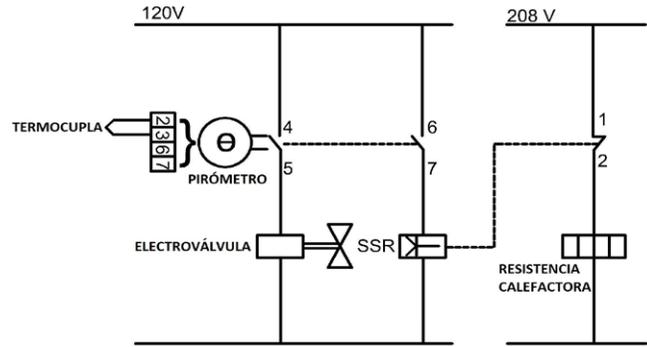


Figura 12. Esquema eléctrico de la planta.

Fuente: elaboración propia.

proyecto, permitiendo la salida de aire caliente del interior del sistema. Las válvulas se abren o cierran mediante la implementación de un control ON/OFF en el pirómetro.

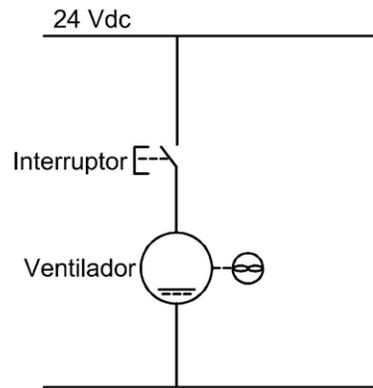


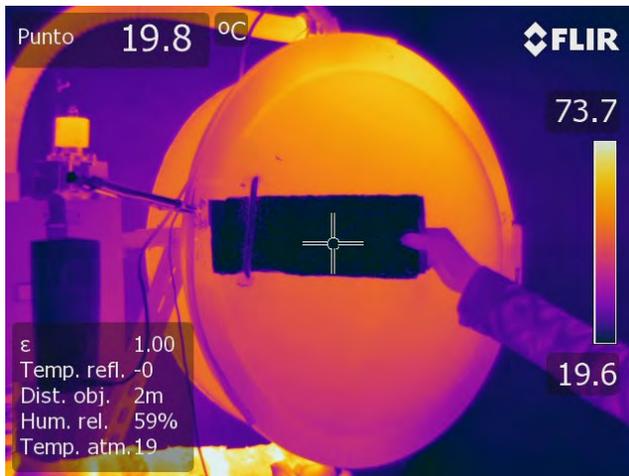
Figura 13. Esquema del ventilador.

Fuente: elaboración propia.

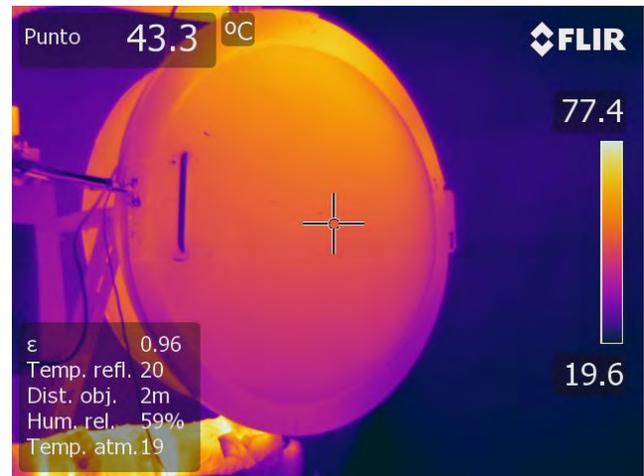
Teniendo en cuenta que el equipo trabaja entre temperatura ambiente y 120 °C, es necesario disminuir la transferencia de calor en el material de la cámara hacia el exterior; por esto, con el fin de mitigar los riesgos ante una exposición a altas temperaturas se usó pintura aislante térmica.

Al hacer la medición sobre la cámara de ensayos termoeléctricos con la cámara termográfica fue

necesario calcular los valores de emisividad, factor que se refiere a la cantidad de radiación emitida por el objeto, comparada con un cuerpo negro a la misma temperatura y la temperatura reflejada, la cual se usa para compensar la radiación reflejada en el objeto (FLIR Systems, 2013).



a.



b.

Figura 14. Cálculo de emisividad y temperatura reflejada. a) Montaje para cálculo de temperatura reflejada. b) Montaje para cálculo de emisividad.

Fuente: elaboración propia.

En la figura 14a se observa el montaje efectuado para calcular la temperatura reflejada sobre la cámara, el cual se hizo midiendo la temperatura sobre papel aluminio arrugado, teniendo en cuenta que la emisividad es 1 para la realización de la prueba. En la figura 14b se presenta el montaje para obtener la emisividad del material, la cual se obtuvo tomando inicialmente la emisividad de la cinta aislante (puesta en el punto en el que se hizo la medición), para luego variar su valor con el fin de obtener la misma temperatura en la muestra en donde se hará la medición.

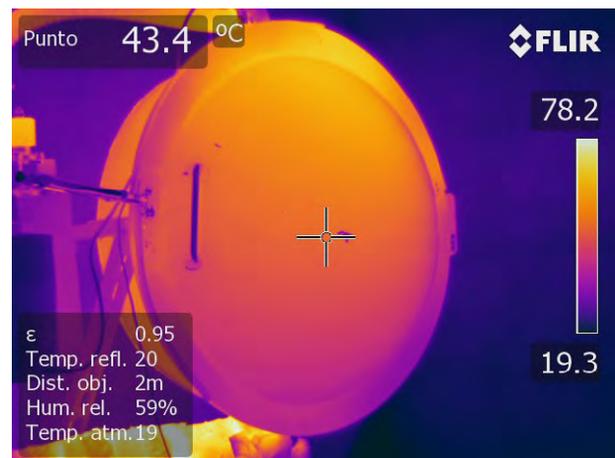


Figura 15. Imagen termográfica de la cámara.

Fuente: elaboración propia.

Luego de hacer estas pruebas se obtiene la temperatura sobre la superficie de la cámara. Tal como muestra la figura 15, la temperatura externa en un punto medio alcanzada por la cámara es de 43,4 °C aproximadamente, que en comparación con la temperatura interna que alcanza 120 °C es bastante menor y por ello no habrá daño en la piel debido al contacto, ya que la piel humana resiste sin dañarse temperaturas de hasta 44 °C. (Hermosa Torrado).

Finalmente, en la figura 16 se puede observar el diseño final de la cámara de ensayos termoeléctricos; es posible concluir que durante su construcción se realizaron cambios respecto al diseño hecho en el proyecto “Diseño de una Cámara de Ensayos Térmicos integrando un sistema de retroalimentación de aire y un módulo de calentamiento”.

Modelado del sistema

Considerando que el control PID es el adecuado para efectuar control de temperatura y uno de los más usados en la industria, se optó por la implementación de este sistema para el calentamiento de la cámara de ensayos termoeléctricos. Para su instauración fue necesario hacer el modelo del proceso, por lo cual se utilizaron técnicas de diseño que permitieron obtener los parámetros del



Figura 16. Cámara de ensayos termoeléctricos.

Fuente: elaboración propia.

controlador (Ogata, 2010); para la realización de este proyecto se utilizó el método de sintonización Ziegler-Nichols, debido a que permite la obtención del modelo matemático del sistema con mayor exactitud; para ello se obtuvo el comportamiento inicial del sistema (figura 17), teniendo en cuenta que la señal de entrada es la tensión nominal a la que se energiza la resistencia calefactora, y la salida es la temperatura que se registra en el interior de la cámara.

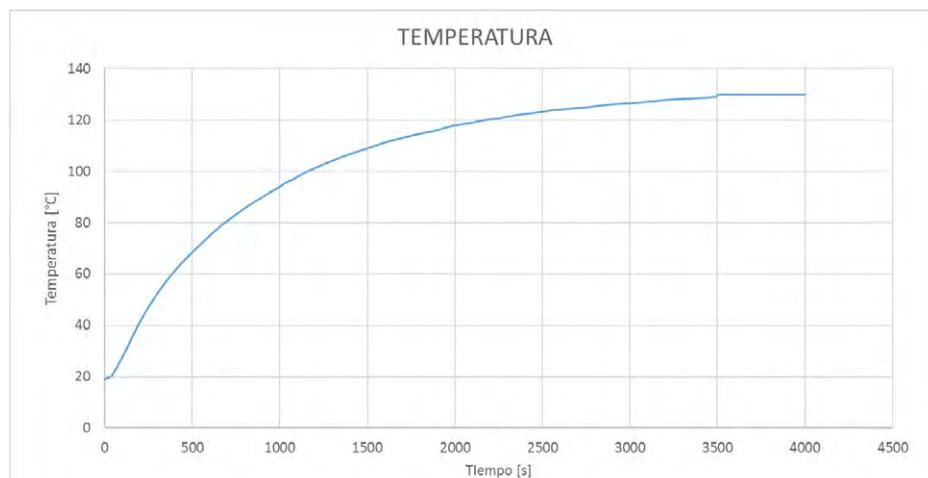


Figura 17. Comportamiento inicial del sistema.

Fuente: elaboración propia.

Al implementar la ecuación (2) se obtuvo las ganancias de cada bloque, mostradas en la tabla 2; estos datos se ingresaron en Matlab con el fin de calcular los valores de las constantes PID, los cuales permiten hacer el control del sistema de temperatura.

$$G(s) = \frac{\text{Rango de salida máx} - \text{Rango de salida min}}{\text{Rango de entrada máx} - \text{Rango de entrada min}} \quad (2)$$

Tabla 2. Rangos de salida y entrada.

Bloque	Entrada	Salida
Referencia		19-130 [°C]
Control PID	19-130[°C]	0-12 [VDC]
SSR	0-12 [VDC]	0-208 [VAC]
Planta	0-208 [VAC]	19- 130 [°C]
Sensor	19-130[°C]	0,967-6,907 [mV]
Ganancia adicional	0,967-6,907 [V]	19-130[°C]

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Ganancias del sistema.

Bloque	Ganancia
Control PID	1,08E-01
SSR	17,33
Planta	0,533
Sensor	5,35E-05
Ganancia adicional	17,8743

Fuente: elaboración propia.

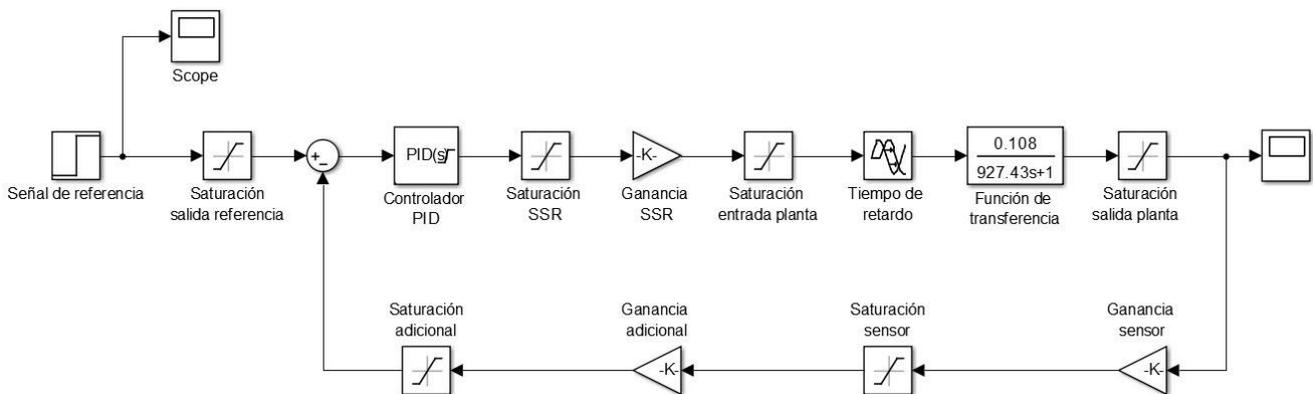


Figura 18. Modelo de la planta en Simulink.

Fuente: elaboración propia.

RESULTADOS

Siguiendo los parámetros establecidos en el método de sintonización Ziegler-Nichols, se obtuvo el tiempo de retardo y la constante de tiempo como se muestra en la tabla 4. Se puede observar que la constante de tiempo tiene un valor alto, debido a las características del material envolvente, por lo cual se puede analizar que la respuesta del sistema es lento, conforme se observa en la gráfica de comportamiento inicial (figura 17); así mismo el tiempo de retardo, es decir, la reacción del sistema a la función de entrada es relativamente pequeño.

Tabla 4. Parámetros de una respuesta en forma de S.

Tiempo de retardo (L)	41,1074 s
Constante de tiempo (T)	927,4319 s

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la función de transferencia establecida en el modelo de Ziegler-Nichols y los valores de ganancia del control PID, el tiempo de retardo (L) y la constante de tiempo (T), se calculó la función de transferencia que se muestra en la ecuación (3), a partir de la cual se realiza el modelado de la planta en Simulink de Matlab (figura 18).

$$H(s) = \frac{0,108e^{-41.10S}}{927,43S + 1} \quad (3)$$

Luego de integrar todos los bloques necesarios que intervienen en el sistema y sus respectivos parámetros, con la opción de sintonización del control PID se calculó los valores proporcional, integral y derivativos del sistema (tabla 5), en donde se puede observar que en la simulación no se tiene un valor derivativo del controlador, ya que el crecimiento de la temperatura es lento en función del tiempo, por lo cual se deduce que esta parte no es necesaria ya que teóricamente no existe un error de estado estacionario, es decir, no es necesaria la estabilidad en lazo cerrado.

Tabla 5. Ganancias del control PID.

Constante	Valor
P	795,5
I	2
D	0
Filtro	100

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Característica de la respuesta del bloque PID.

<i>Rise time [s]</i>	777
<i>Settling time [s]</i>	2,89E+03
<i>Overshoot [%]</i>	7,34

Fuente: elaboración propia.

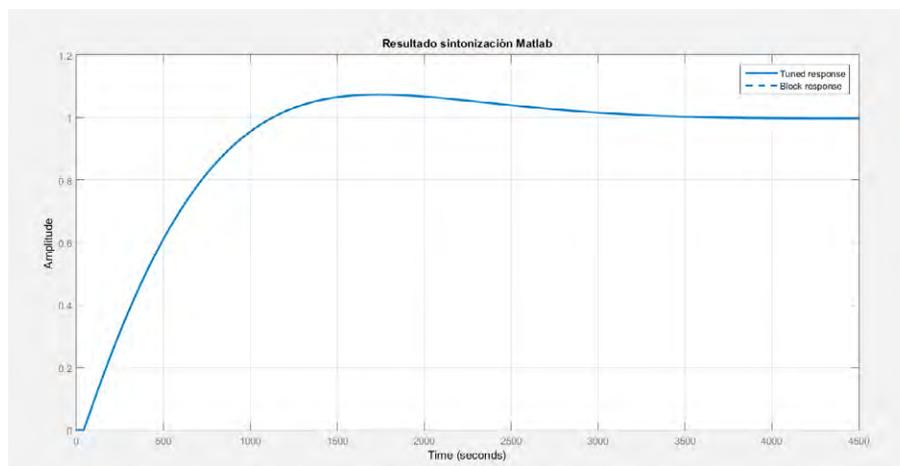


Figura 19. Respuesta de la planta.

Fuente: elaboración propia.

La figura 19 muestra la señal de respuesta del bloque de control PID que genera el Simulink de Matlab luego de la sintonización y obtención de los valores PID.

Debido a que la configuración del pirómetro requiere el ingreso de las variables PID en su forma de tiempo, fue necesario establecerlas teniendo en cuenta los resultados obtenidos mediante el modelado en Matlab (tabla 7); al ser configuradas en el sistema de control se logran las respuestas de la figura 20, en donde se alcanza un

tiempo de estabilización en función de la temperatura de trabajo máxima que se desea en el interior de la cámara.

Tabla 7. Constantes PID en el tiempo.

Kp	27
Ti	82
Td	20

Fuente: elaboración propia.

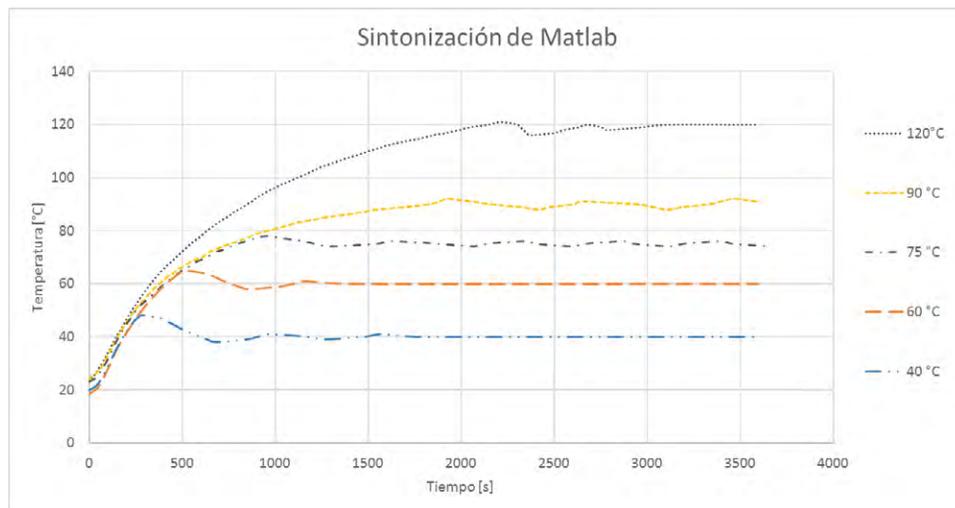


Figura 20. Respuesta de temperatura con las constantes de Matlab.

Fuente: elaboración propia.

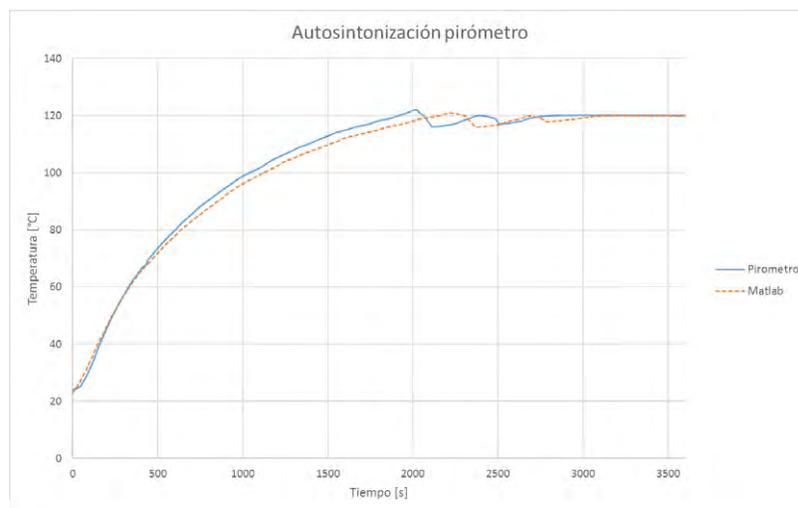


Figura 21. Respuesta de temperatura con autosintonización del pirómetro y Matlab.

Fuente: elaboración propia.

Asimismo, es posible hacer una autosintonización con el pirómetro para cualquier temperatura; en la figura 21 se observa la gráfica obtenida con el controlador y la arrojada al ingresar los datos de Matlab en el pirómetro para una temperatura de 120 °C; a partir de estos resultados es posible analizar que al hacer la sintonización con Matlab la temperatura se estabiliza en valores cercanos con

respecto a los datos del pirómetro y tiene menores oscilaciones.

Finalmente, se realizó una prueba a la cámara poniendo en su interior un interruptor termomagnético de tipo riel DIN con capacidad nominal de 20 A, el cual estuvo sometido a una prueba de dos horas bajo una temperatura de 75 °C, valor máximo de operación de estas protecciones. De esta

manera fue posible observar al tomar la foto con la cámara de termografía (figura 22), que la temperatura sobre la superficie del interruptor es homogénea, sin presentar sobrecalentamientos aislados, lo cual resulta apropiado para efectuar pruebas a este tipo de protecciones y además se comprobó que la cámara presenta una distribución de temperatura uniforme en su interior.

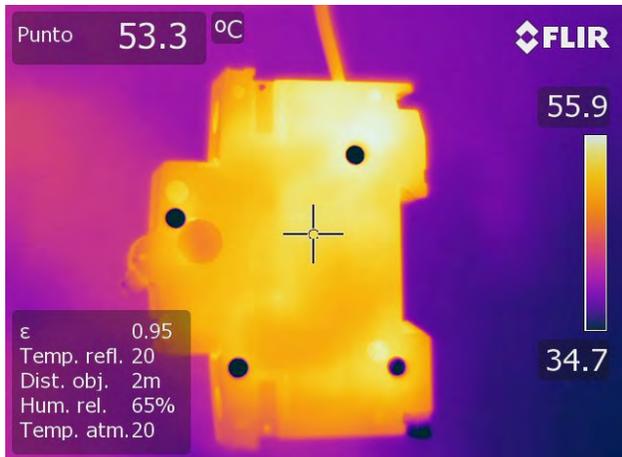


Figura 22. Temperatura del interruptor en prueba.

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Fue posible diseñar y construir un prototipo de una cámara de ensayos termoeléctricos que permite variar la temperatura del sistema entre la temperatura ambiente y 120 °C, incluyendo un sistema de retroalimentación de aire y un sistema de enfriamiento con una válvula que permite sacar aire caliente e ingresar aire frío, lo cual permite un calentamiento y enfriamiento más eficiente, al igual que la disminución de pérdidas de energía o saturación térmica de la cámara.

Con el diseño e incorporación de un difusor de aluminio para la entrada de aire a la cámara se logró obtener una distribución de aire en varias direcciones, lo cual permitió mantener mayor homogeneidad en la temperatura en el interior de la cámara y objetos de prueba, reduciendo la concentración de flujo de aire en una misma dirección.

Con la incorporación de pintura aislante térmica se evitó utilizar materiales aislantes de mayor tamaño, la cual presentó problemas de manipulación y una mayor complejidad en su instalación, además con la pintura se pudo reducir las pérdidas por transferencia térmica al exterior y redujo el tiempo de calentamiento de la cámara, lo cual significó un mejor comportamiento para el control.

El modelo de control obtenido en Matlab no tiene la respuesta esperada respecto al tiempo de estabilización de temperatura ya que se presentan leves oscilaciones antes de que la cámara tenga la estabilidad requerida, esto se debe a que en el programa se usa un polinomio de aproximación que es similar al comportamiento del sistema físico implementado, por lo cual se presentan variaciones en la planta y, por tanto, las constantes obtenidas hacen que se generen oscilaciones sobre la temperatura deseada.

Con la implementación de un sistema de control de temperatura PID se logró controlar la temperatura en el interior de la cámara, obteniendo resultados satisfactorios en la distribución homogénea de la temperatura en objetos de prueba; esto fue posible verificarlo con la medición de temperatura con una cámara infrarroja.

REFERENCIAS

- Boustens Mexico (s.f.) Obtenido de: <http://www.boustens.com/camara-climatica-temperatura-humedad-excal/>
- Camargo Castro, A. F., y Villamizar Rivera, E. J. (2008). *Control de temperatura de un horno por medio de logica difusa*. Bucaramanga.
- Carmona, A. G. (2006). Influencia de la temperatura en el comportamiento eléctrico de los materiales: análisis de su comprensión y dificultades de aprendizaje. *Investigações em Ensino*, 67-83.
- FLIR Systems, I. (2013). *User's manual Flir T6XX series*. Wilsonville.
- Hermosa Torrado, A. (s.f.) *Quemaduras. Cuando la piel es una urgencia*. Obtenido de: <http://www.urgenciasdonostia.org/Portals/0/DUE/Protocolos/Tecnicas/PROTOCOLO%20QUEMADURAS.pdf>

- Hernández Gaviño, R. (2010). *Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicaciones y simulación con Matlab*. México: Prentice Hall.
- IHMC Cmap Tools (s.f.) Recuperado el 1 de septiembre de 2015, de: <http://cmapspublic.ihmc.us/rid=1M6C3FZ8H-LZL593-2BHH/1M5NQT4B7IY-8Y402IBWlimage>
- Incropera, F., y De Witt, D. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor* (cuarta ed.) Juárez, México: Pearson.
- Kreith, F.; Manglik, R., y Bohn, M. (2012). *Principios de transferencia de calor* (séptima ed.) Monterrey, México: Cengage Learning.
- Mendieta Reyes, M. N.; Montaña Parra, R. E., y Noguera Vega, L. A. (octubre de 2012). Diseño de una cámara de ensayos termoeléctricos. *Tecnura*, 100–109.
- Moran, M., y Shapiro, H. (2004). *Fundamentos de termodinámica técnica*. Barcelona: Reverté.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* (quinta ed.) Madrid: Prentice Hall.
- Rairán Antolines, J. D. (2007). *Análisis de sistemas dinámicos y control PID*. Bogotá, D.C.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Roller, D., y Blum, R. (1986). *Física. Tomo I. Mecánica, ondas y Termodinámica*. San Francisco: Reverté.
- Zamora, M. (1998). *Termo I: Un estudio de los sistemas termodinámicos*. Sevilla: Egondi.

