



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA
CÁMARA DE TEMPERATURA CONTROLADA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

P R E S E N T A:

JUAN PEDRO RUIZ MÁRQUEZ



**DI RECTOR DE TESIS:
DR. FRANCISCO JAVIER SOLORIO ORDAZ**

Ciudad Universitaria, Cd. Mx. Noviembre 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado:

PRESIDENTE:

SECRETARIO:

VOCAL:

1ER. SUPLENTE:

2DO. SUPLENTE:

Lugar o lugares donde se realizó la tesis

Los experimentos para este trabajo se realizaron en el laboratorio de Termofluidos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Francisco Javier Solorio Ordaz

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Hipólito y Dolores:

Por ser un ejemplo de constancia y por su apoyo incondicional.

A la Universidad Nacional Autónoma de México:

Por la formación académica que me ha proporcionado durante el transcurso de mi carrera profesional.

A mis hermanos Ignacio e Hipólito:

Por sus consejos y su apoyo incondicional.

A mis tíos Antonio y Graciela:

Por su apoyo a lo largo de mi desarrollo profesional.

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico DGAPA

Por haber patrocinado por medio del proyecto PAPIIT IN114216 el desarrollo de este trabajo.

A mis familiares:

Por compartir sus experiencias y proporcionarme consejos durante el transcurso de mi carrera.

Al Dr. Francisco Solorio:

Por compartir sus conocimientos.

Al Dr. Rafael Chávez:

Por compartir sus conocimientos, los cuales me ayudaron a desarrollar la tesis.

A mis amigos:

Por su comprensión, apoyo y solidaridad a lo largo de mi vida.

ÍNDICE GENERAL

<i>Nomenclatura</i> ·····	v
<i>Resumen</i> ·····	vi

INTRODUCCIÓN

Objetivos ·····	1
Objetivo general ·····	1
Objetivos específicos ·····	1
Alcances de la tesis ·····	1
Formulación del problema y justificación ·····	2
Necesidades ·····	2
Estructura de la tesis ·····	2

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1.1 Equipos de temperatura controlada actuales ·····	3
1.2 Modos de transferencia de calor ·····	5
1.3 Método de parámetros concentrados o resistencia interna despreciable ·····	7
1.4 Teoría de control ·····	8

CAPÍTULO 2

MODELADO MATEMÁTICO

2.1 Definición general del problema ·····	9
2.2 Consideraciones para el modelo ·····	10
2.3 Resistencia térmica equivalente ·····	12
2.4 Solución teórica del problema y sustituciones numéricas ·····	14

CAPÍTULO 3

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL

3.1 Desarrollo mecánico ·····	17
3.1.1 Descripción de los componentes de la cámara de temperatura ·····	20
3.1.2 Descripción del dispositivo calefactor ·····	24
3.2 Sistema de control de temperatura ·····	29
3.2.1 Etapa de potencia ·····	29
3.2.2 Fuente de alimentación externa ·····	32
3.2.3 Descripción del equipo de adquisición de datos ·····	34
3.3 Construcción del modelo experimental ·····	35
3.4 Efecto del espesor de las paredes en la pérdida de calor ·····	37
3.5 Monitoreo de la temperatura ·····	39
3.6 Programación del sistema de control On-Off ·····	40
3.7 Calibración de termopares ·····	42
3.8 Descripción de las pruebas experimentales ·····	43

3.9 Comportamiento teórico de la temperatura en el interior de la cámara ·····	45
--	----

**CAPÍTULO 4
PRUEBAS Y RESULTADOS**

4.1 Mediciones de temperatura en el laboratorio ·····	48
4.2 Resultados del funcionamiento de los dispositivos calefactores ·····	50
4.3 Resultados de la prueba de control de temperatura en la maqueta prototipo ·····	51
4.4 Resultados de la prueba de control de temperatura en la cámara ·····	52
4.5 Resultados del comportamiento teórico de la temperatura en la cámara ·····	55
4.6 Criterio de comparación ·····	56
4.7 Comparación de la curva teórica y la experimental ·····	59

**CAPÍTULO 5
CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO ·····**

61

APÉNDICE A

Tabla A-1 Datos técnicos del aislante ·····	63
Tabla A-2 Datos técnicos del acrílico ·····	64
Tabla A-3 Datos técnicos del soporte de polímero ·····	65
Tabla A-4 Valores comerciales para la resistencia de nicromel ·····	66
A-5 Datos técnicos de la abrazadera de palanca ·····	67

APÉNDICE B

Energía debido a la radiación de las paredes de la cámara ·····	68
--	-----------

Referencias ·····	69
--------------------------	-----------

NOMENCLATURA

A	área, m^2
A_c	área de la sección transversal, m^2
c	calor específico, $J/kg \cdot K$
\dot{E}_g	generación de energía, W
\dot{E}_{ent}	transferencia de energía que entra a un volumen de control, W
\dot{E}_{sale}	transferencia de energía que sale de un volumen de control, W
\dot{E}_{alm}	incremento de la energía almacenada dentro de un volumen de control, W
h	coeficiente de transferencia de calor por convección $W/m^2 \cdot K$
I	corriente eléctrica, A
k	conductividad térmica, $W/m \cdot K$
L	longitud característica, m
q	transferencia de calor, W
R_t	resistencia térmica, K/W
T	temperatura, K
t	tiempo, s
V	volumen, m^3

Letras griegas

ε	emisividad
θ	diferencia de temperaturas, K
ρ	densidad de masa, kg/m^3
σ	constante de Stefan – Boltzman

Subíndices

alr	alrededores
b	cuerpo negro
c	sección transversal
$cond$	conducción
$conv$	convección
ext	externo
i	inicial
int	interno
rad	radiación
s	condiciones de superficie
∞	condiciones de corriente libre

RESUMEN

Se diseñó y construyó una cámara de temperatura controlada para el laboratorio de Termofluidos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, esta cámara tiene una estructura hecha de acrílico y está cubierta en su interior con un aislante térmico para disminuir la pérdida de calor de las paredes hacia el exterior. Es capaz de mantener la temperatura en su interior dentro de un rango de temperatura, especificado por el usuario, mediante un sistema de control On-Off, el cual controla el encendido y apagado de cuatro dispositivos calefactores. Cada uno de estos dispositivos está compuesto de una resistencia de nicromel que calienta el aire y un ventilador que sirve para distribuir el aire y uniformizar su temperatura.

A partir de un análisis de necesidades y especificaciones, así como de las condiciones de operación de las cámaras de temperatura comerciales se generaron varios conceptos. Se realizó un ensamble virtual con las herramientas de un software de diseño mecánico donde se modelaron todos los componentes de la cámara, a partir de ahí se seleccionó el mejor concepto para fabricar. La cámara consta de dos sistemas; el sistema mecánico con diez elementos principales, y el sistema de control de temperatura de tipo On-Off el cual incluye una etapa de potencia para acondicionar las señales de control y sensores para la medición de temperatura, este control se programó en LabVIEW y cuenta con un panel de manejo de fácil comprensión.

Los dispositivos calefactores fueron probados en una maqueta prototipo durante una hora y 10 minutos para verificar su correcto funcionamiento. Los termopares utilizados durante las pruebas fueron calibrados para reducir los errores en la exactitud de las lecturas de temperatura. Se realizó una prueba donde se monitoreó la temperatura en el interior de la cámara, a partir de los resultados de esta prueba se comparó el comportamiento experimental de la temperatura con los resultados del modelo teórico, el cual fue generado en un programa de Mathematica que resuelve la ecuación resultante del análisis de parámetros concentrados.

Al comparar los resultados se encuentra que la curva teórica presenta más ciclos de calefacción y enfriamiento que la experimental para el mismo periodo de tiempo, aproximadamente *tres* veces más, esto se debe a la incertidumbre en los valores del coeficiente convectivo interno y externo y que se desprecia el valor de la resistencia térmica de contacto entre los materiales que conforman las paredes de la cámara.

Finalmente, se entregó el dispositivo al laboratorio de Termofluidos para su uso.

INTRODUCCIÓN

Objetivos

Objetivo general

- Diseñar y construir una cámara de temperatura controlada y un sistema de control de temperatura On-Off, que logre mantener al interior de la cámara un nivel de temperatura deseado, definido por un usuario, y necesario para llevar a cabo en su interior experimentos de sincronización térmica entre dos cavidades adyacentes.

Objetivos específicos

- Construir una maqueta prototipo para hacer pruebas experimentales preliminares.
- Seleccionar los materiales necesarios para la manufactura de la cámara.
- Aprender el uso del equipo de adquisición de datos de la compañía National Instruments, necesario para la adquisición de datos y control de la temperatura de la cámara.
- Diseñar y construir dispositivos calefactores que sean capaces de elevar la temperatura dentro de la cámara.
- Diseñar y construir la etapa de potencia, necesaria para controlar los dispositivos calefactores.
- Realización de pruebas de temperatura y de operación.

Alcances de la tesis

En el presente trabajo se usará control On-Off debido a la sencillez de su programación en el software LabVIEW y a la relativamente fácil construcción de circuitos electrónicos.

El sistema de control fue diseñado para calentar el aire, no cuenta con un sistema de refrigeración. Debido a esto, la temperatura mínima que el usuario puede definir en la interfaz del programa de control corresponde a la temperatura ambiente.

Por otro lado, esta tesis contempla un análisis simplificado del comportamiento de la temperatura dentro de la cámara, el cual será comparado con el comportamiento experimental una vez que la cámara sea construida y puesta en marcha.

Al término de este trabajo, se tendrá un cámara de temperatura controlada capaz de ser utilizada no solo para experimentos de sincronización térmica sino también para estudios en los que se requiera minimizar los efectos de la variación de la temperatura ambiente.

Formulación del problema y justificación

Esta tesis surge debido a la necesidad de tener un ambiente cerrado con temperatura controlada, el cual albergará un dispositivo experimental para estudiar el fenómeno de sincronización térmica en el laboratorio de Termofluidos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Para satisfacer esta necesidad, se encontraron varias cámaras comerciales, sin embargo, éstas cuentan con sistemas de control avanzado que elevan su costo. Por lo tanto, este trabajo consiste en el diseño y construcción de un cámara de temperatura controlada especializada, que suministre las condiciones de temperatura *específicas* para el desarrollo de experimentos en el laboratorio de Termofluidos. Cabe destacar que para la realización de este trabajo se empleó una gran cantidad de conocimientos para el diseño mecánico, la construcción o manufactura, así como la instrumentación de los circuitos de control.

Necesidades

El laboratorio de Termofluidos requiere una cámara de temperatura controlada con una capacidad similar a la de las cámaras comerciales, para el desarrollo de sus experimentos. Este trabajo comprende tanto el diseño como la construcción de una cámara de temperatura controlada la cual se *adaptará* a las condiciones de infraestructura del laboratorio de Termofluidos, como son; las dimensiones, conexiones, área de trabajo, y control. Será robusta para uso continuo de los estudiantes, de mantenimiento sencillo y de fácil operación.

Estructura de la tesis

El desarrollo de la presente tesis contempla los siguientes capítulos.

Capítulo 1.- Presenta el panorama general de las cámaras de temperatura controlada comerciales y una breve descripción de su funcionamiento.

Capítulo 2.- Contiene los antecedentes teóricos necesarios para entender el contexto de este proyecto.

Capítulo 3. – Describe como se diseñó y construyó la cámara de temperatura controlada, las dimensiones que fueron seleccionadas, los materiales usados, además de la programación para el control On-Off y la construcción del circuito eléctrico-electrónico necesario para su funcionamiento.

Capítulo 4.- Se muestran las pruebas realizadas y los resultados que se han obtenido de éstas.

Capítulo 5. – Presenta las conclusiones que surgen al analizar los resultados de las pruebas del control de temperatura realizadas al dispositivo calefactor, a la maqueta prototipo y a la cámara.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1.1 Equipos de temperatura controlada actuales

Los equipos de temperatura controlada son dispositivos donde se recrea un clima combinando los valores de temperatura y humedad relativa; en una cámara de temperatura controlada estos parámetros se distribuyen de forma homogénea en el interior. La humedad relativa es obtenida por medio de un generador de vapor, algunas cámaras, además, cuentan con un sistema de refrigeración que permite el control de temperaturas por debajo de la temperatura ambiente. Para garantizar que no existan zonas frías o calientes en el interior de la cámara y que se tenga una temperatura y humedad homogéneas, el flujo de aire debe ser forzado por un ventilador.

La mayoría de las cámaras están fabricadas de aluminio y acero inoxidable para evitar la corrosión, en la puerta deben tener un sello hermético para conservar las condiciones en su interior mientras que en el exterior cuentan con un panel de control de programación con lectura digital que monitorea y controla todo el tiempo las condiciones de temperatura y humedad. En el mercado existen varios diseños de cámaras como los que se muestran en la Figura 1.1, que se adaptan a la necesidad específica del cliente en cuanto a tamaño, rango de temperatura necesario, tipo de control, etc. Además, cuentan con diferentes tecnologías, como iluminación LED, alarmas, etc.

Las cámaras de temperatura y humedad controlada pueden ser utilizadas en una gran variedad de aplicaciones, incluyendo estudios de alimentos, pruebas de envejecimiento acelerado, estudios de genética, investigaciones virales, estudios del medio ambiente, bioquímica, estudios de crecimiento, y para usos generales de laboratorio donde se requiera un ambiente de temperatura y humedad controlada.

En la actualidad existen cámaras de temperatura que incorporan la tecnología Peltier que está especialmente adaptada, ya que realiza en un solo sistema sin transiciones los procesos de calentamiento y refrigeración prácticamente sin vibraciones y de forma muy silenciosa. De este modo, no solo colaboran con la protección del medioambiente, sino que además suponen hasta un ahorro de un 90 % en los gastos de operación con respecto a los sistemas por compresor [1].

Desventajas:

- Si se presenta una falla en alguna de estas cámaras de temperatura, el mantenimiento puede provocar gastos elevados para el laboratorio.
- El precio de una cámara de temperatura es muy elevado.
- En términos de tamaño, es difícil encontrar un equipo que se adapte a las necesidades de espacio del laboratorio.
- No se puede realizar ninguna modificación, ya que perdería la garantía.

En la Tabla 1.1, se muestran algunas marcas comerciales existentes con sus capacidades, rango de temperatura, dimensiones y peso.



Fig. 1.1. Cámaras de temperatura actuales.

Tabla 1.1. Comparación de cámaras de temperatura controlada

	MARCA	MODELO	RANGO TEMPERATURA	CAPACIDAD (PIES CÚBICOS/m ³)	DIMENSIONES INT/EXT (cm)	PESO KG
1	[2] MAYASA	CEHT12000	Ambiente + 6 °C- 50 °C	12/0.339	60X65X85/74X74X165	135
2	[2] MAYASA	CEHT24000	Ambiente + 6 °C- 50 °C	24/0.679	70X70X140/80X88X202	185
3	[1] memmert	HPP260	0-70 °C	9/0.254	64X80X50/82.4X118.3X77.4	122
4	[1] memmert	HPP750	0-70 °C	26/0.736	104X120X60/122.4X172.6X87.4	208
5	[3] Prendo	CA-294	10-70 °C	9/0.254	50X50X102/60X64X165	-
6	[3] Prendo	CA-850	10-70 °C	30/0.849	78X70X160/88X82X215	-

1.2 Modos de transferencia de calor

Conducción

La conducción es un fenómeno que consiste en la propagación de calor entre dos cuerpos a diferente temperatura debido a la agitación térmica de las moléculas, no existiendo un desplazamiento real de éstas. Para calcular la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo se utiliza la *ley de Fourier*, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$q_{cond} = -kA \frac{(T_2 - T_1)}{L} \text{----- Ec. 1.1}$$

donde q_{cond} es la transferencia de calor por conducción (W), k es la conductividad térmica ($\frac{W}{mK}$) y es una característica del material de la pared, A es el área por donde se transfiere el calor, $T_2 - T_1$ ($^{\circ}C$) es la diferencia de temperaturas entre la superficie de mayor temperatura T_2 y la de menor temperatura T_1 , L es la longitud que existe entre la superficie que está a temperatura T_2 y la que está a temperatura T_1 .

Convección

La convección es la transmisión de calor desde un sólido hacia un fluido en movimiento. El movimiento de los elementos de fluido puede deberse a la diferencia de densidades generada cerca de la pared (convección natural) o a la ayuda de ventiladores, bombas, etc. (convección forzada)

Para la *convección*, la ecuación utilizada se conoce se conoce como la ley de enfriamiento de Newton, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$q_{conv} = hA(T_s - T_{\infty}) \text{----- Ec. 1.2}$$

donde q_{conv} es la transferencia de calor por convección (W), es proporcional a la diferencia de temperaturas de la superficie y el fluido, T_s y T_{∞} respectivamente. A es el área donde se transfiere el calor, y h ($\frac{W}{m^2K}$) es el coeficiente de transferencia de calor por convección.

Radiación

La radiación es una forma de emisión de ondas electromagnéticas que emana todo cuerpo que esté a mayor temperatura que el *cero absoluto*.

Radiación absorbida. Es la cantidad de radiación que incide en un cuerpo y queda retenida en él, como energía interna. Aquellos cuerpos que absorben toda la energía incidente de la radiación térmica, se denominan cuerpos negros.

Radiación reflejada. Fracción de la radiación incidente reflejada por la materia.

Radiación transmitida. Es la fracción de la energía radiante incidente que atraviesa un cuerpo.

La asociación mutua de los procesos de emisión, absorción, reflexión y transmisión de energía radiante por diferentes sistemas de cuerpos se conoce como intercambio de energía radiante. [1]

Para la *radiación*, la ecuación o modelo se conoce como ley de *Stefan-Boltzmann*, que se expresa de la siguiente manera:

$$E_b = \sigma T_s^4 \text{ ----- Ec. 1.3a}$$

Donde T_s es la temperatura absoluta (K) de la superficie, σ es la constante de *Stefan-Boltzmann* $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$. Dicha superficie se llama radiador ideal o cuerpo negro, sin embargo, el flujo de calor emitido por una superficie real es menor que el de un cuerpo negro a la misma temperatura y está dado por:

$$E_b = \varepsilon \sigma T_s^4 \text{ ----- Ec. 1.3b}$$

Donde ε es una propiedad de la superficie denominada *emisividad*. Con valores en el rango $0 \leq \varepsilon \leq 1$, esta propiedad es una medida de la eficiencia con que una superficie emite energía en relación con un cuerpo negro. Este depende del material del acabado superficial, entre otras cosas.

La ecuación que modela el intercambio de radiación térmica entre una superficie pequeña a una temperatura T_s y su entorno, que se encuentra a una temperatura T_{alr} es la siguiente:

$$q_{rad} = \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_{alr}^4) \text{ ----- Ec. 1.4}$$

Esta expresión proporciona la diferencia entre la energía térmica que se libera debido a la emisión por radiación y la que se gana debido a la absorción de radiación. [4]

En la Figura 1.2 se ejemplifican los tres modos de transferencia de calor

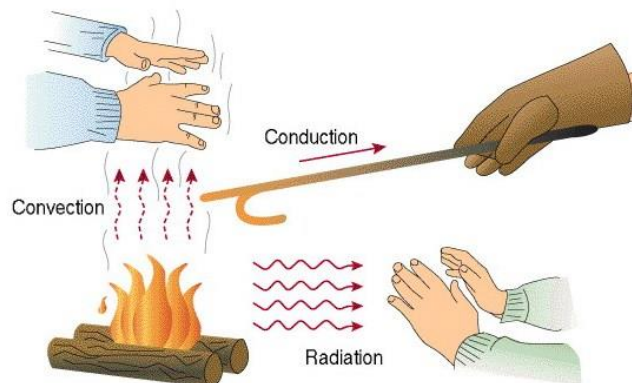


Fig. 1.2. Modos de transferencia de calor.

1.3 Método de parámetros concentrados o resistencia interna despreciable

Se trata de resolver un problema de transferencia de calor que depende del tiempo, es decir no permanente o transitorio, el cual surge cuando cambian las condiciones de frontera en un sistema. Por ejemplo, si se altera la temperatura superficial de un sistema debido a los cambios de temperatura en el medio ambiente, la temperatura en cada punto del sistema también comenzara a cambiar. Los cambios de temperatura continuarán hasta que se alcance una distribución de temperaturas de estado permanente. Estos efectos ocurren en procesos de calentamiento y enfriamiento.

Para determinar la dependencia temporal de la distribución de temperaturas dentro de un sólido durante un proceso transitorio se comienza por resolver la forma apropiada de la ecuación de conducción de calor, la cual va a depender de la geometría. Sin embargo, para condiciones en las que los *gradientes de temperatura son pequeños* se utiliza un método más sencillo, denominado resistencia interna despreciable o de la capacitancia concentrada.

La esencia del método es la suposición de que la temperatura del sólido es espacialmente uniforme en cualquier instante durante el proceso transitorio. Esta suposición implica que los gradientes de temperatura son muy pequeños.

De acuerdo con la ley de Fourier, la conducción de calor en ausencia de un gradiente de temperatura implica la existencia de una conductividad térmica infinita. Esta condición es imposible. Sin embargo, aunque la condición nunca se satisface de forma exacta, se acerca mucho a ello si la resistencia a la conducción dentro del sólido es pequeña comparada con la resistencia a la transferencia de calor entre el sólido y sus alrededores.

Al no tomar en cuenta los gradientes de temperatura dentro del sólido, ya no es posible considerar el problema desde el marco de la difusión de calor. En su lugar, la respuesta de temperatura transitoria se determina realizando el *balance global de energía en el sólido*. Este balance debe relacionar la velocidad de pérdida de calor en la superficie con la rapidez de cambio de la energía interna. [4]

Ventajas

- Este modelo es sencillo y conveniente para resolver problemas de conducción transitoria.
- Buena aproximación con la realidad.

1.4 Teoría de control

Sistema de control. - Un sistema de control es aquel que compara la salida real retroalimentada con el valor que se requiere y ajusta su salida de acuerdo con el resultado. El termino retroalimentación se usa porque las señales se retroalimentan desde la salida para modificar la entrada.

Existen dos tipos básicos de sistemas de control: el de lazo abierto y el de lazo cerrado. En un sistema de lazo abierto, la salida del sistema no tiene efecto en la señal de entrada. En un sistema de control de lazo cerrado, la salida sí tiene efecto en la señal de entrada, modificándola para mantener la señal de salida en el valor requerido.

Los sistemas de lazo abierto tienen la ventaja de ser relativamente sencillos, por lo que su costo es bajo y en general su confiabilidad es buena. Sin embargo, con frecuencia son imprecisos ya que no hay corrección de errores. Los sistemas de lazo cerrado tienen la ventaja de ser bastante precisos para igualar el valor real y el deseado. Pero son más complejos y, por lo tanto, más costosos y con mayor probabilidad de descomposturas debido a la mayor cantidad de componentes. [5]

Elementos básicos de un sistema en lazo cerrado se observan en la Figura 1.3 y se describen a continuación:

- 1 Elemento de comparación. - Compara el valor deseado o de referencia de la condición variable que se controla con el valor medido de lo que se produce y genera una señal de error.
- 2 Elemento de control. - En cuanto se recibe una señal de error, el elemento de control decide que acción llevar a cabo, dicha acción que puede ser programable.
- 3 Elemento de corrección. - El elemento de corrección produce un cambio en el proceso a fin de corregir o modificar la condición controlada. El termino actuador designa al elemento de una unidad de corrección que proporciona la energía para realizar la acción de control.
- 4 Elementos del proceso. - El proceso es aquello que se está controlando.
- 5 Elemento de medición. - El elemento de medición produce una señal relacionada con el estado de la variable del proceso que se controla.

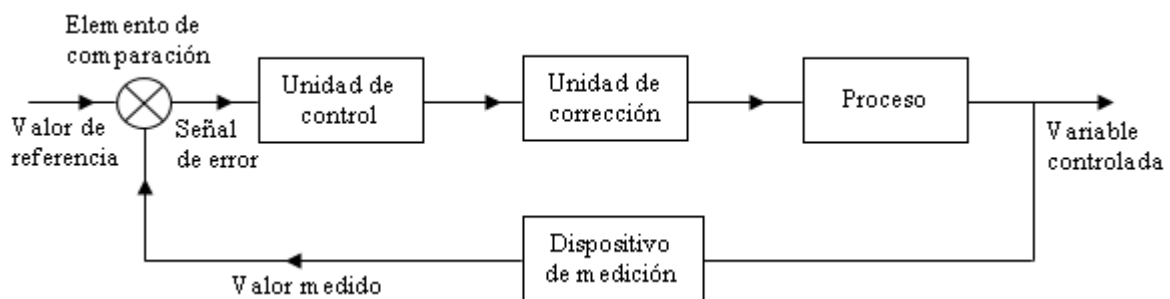


Fig. 1.3. Elementos de un sistema de control.

CAPÍTULO 2

MODELADO MATEMÁTICO

2.1 Definición general del problema

Se analizará el comportamiento de la temperatura en el tiempo dentro de la cámara de temperatura controlada que se va a construir, por lo tanto, es necesario abordar el problema desde un punto de vista del volumen de control, dicho volumen está definido por el aire que se encuentra en el interior de la cámara.

En esta sección se hará un breve resumen en el que se explica cómo se resuelven las ecuaciones que definen al problema. Como se mencionó anteriormente, la respuesta de temperatura transitoria se determina realizando un *balance global de energía*.

Para este análisis, considere, por ahora, un modelo simplificado de la cámara de temperatura real como el que se muestra en la Figura 2.1, que tiene las siguientes características:

- Las paredes están constituidas de *dos materiales*, acrílico como carcasa externa representada con color gris y poliestireno extruido al interior como material de aislamiento representado con color verde.
- Consta de un sistema calefactor conformado por cuatro dispositivos de calentamiento.

Como se mencionó anteriormente, el balance de energía debe relacionar la velocidad de pérdida de calor en la superficie con la rapidez de cambio de la energía interna del aire que se encuentra en el interior de la cámara.

$$\boxed{\dot{E}_{ent} + \dot{E}_g - \dot{E}_{sale} = \dot{E}_{alm}} \text{----- Ec. 2.1}$$

donde:

\dot{E}_{ent} = Energía que entra al sistema.

\dot{E}_g = Energía que se genera dentro del sistema.

\dot{E}_{sale} = Energía que sale del sistema.

\dot{E}_{alm} = Energía que se almacena.

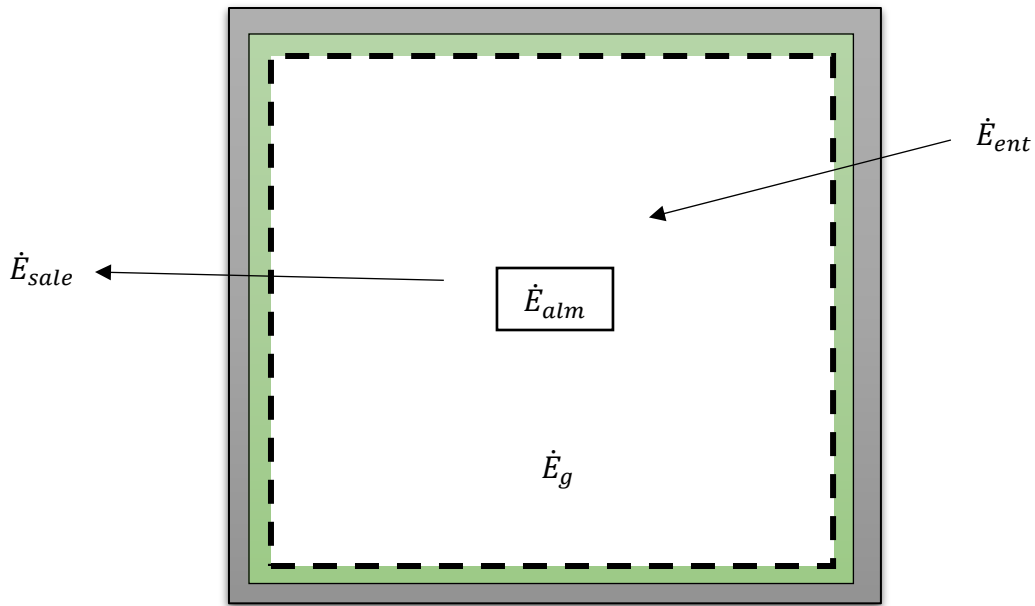


Fig. 2.1. Balance de energía para la cámara de temperatura.

2.2 Consideraciones para el modelo

- Se considera que no entra energía en forma de conducción ya que la cámara no está en *contacto* con objetos que alteren su temperatura por este medio.
- Si existe transferencia de calor por radiación, pero se puede despreciar debido a que la radiación que emiten las paredes de la cámara es de magnitud parecida a la radiación que recibe de los alrededores, es decir, la temperatura exterior de las paredes es similar a la de su entorno, los detalles de este cálculo se pueden consultar en el Apéndice B.
- La temperatura en el interior de la cámara se considera uniforme, es decir, es la misma en todos sus puntos para un instante de tiempo dado.
- Se desprecia el valor de la resistencia térmica de contacto entre los materiales que forman las paredes de la cámara.

Una vez definidas las consideraciones que se toman en cuenta para resolver el problema se procede a explicar cómo se calcula cada uno de los términos de la Ecuación 2.1.

La fuente de energía térmica presente en la cámara corresponde a la conversión de energía eléctrica a energía térmica por efecto Joule, y se obtiene de la siguiente forma:

$$\dot{E}_g = VI \text{ ----- Ec. 2.2}$$

De la termodinámica se obtiene la energía que puede almacenar un cuerpo, en este caso la masa de aire en el interior de la cámara, es la siguiente:

$$\dot{E}_{alm} = \rho V c \frac{dT}{dt} \text{ ----- Ec. 2.3}$$

La energía que sale del volumen de control se debe a la convección que se presenta debido al movimiento del aire en el exterior de la cámara.

$$\dot{E}_{sale} = q_{sale} = \frac{(T - T_{\infty})}{R_t} \text{ ----- Ec. 2.4}$$

Es muy importante *el cálculo de la resistencia térmica equivalente* R_t , ya que no solo existe resistencia de convección en la superficie interior y exterior de la placa de acrílico, sino que también existe resistencia a la conducción debido al material que se forma al unir acrílico con poliestireno, para esto, se realiza un circuito térmico del sistema en el cual se considera la pared de la Figura 2.2 para el análisis.

2.3 Resistencia térmica equivalente

Los valores utilizados a continuación sirven para *ejemplificar* la metodología que se utilizó para calcular la pérdida de calor teórica de la cámara. Como se mencionó anteriormente se consideran paredes compuestas de acrílico y poliestireno extruido.

El circuito térmico equivalente se observa en la Figura 2.3.

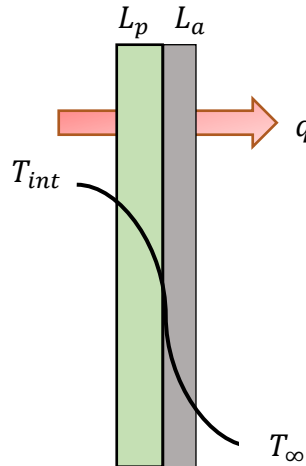


Fig. 2.2. Pared de la cámara de temperatura.

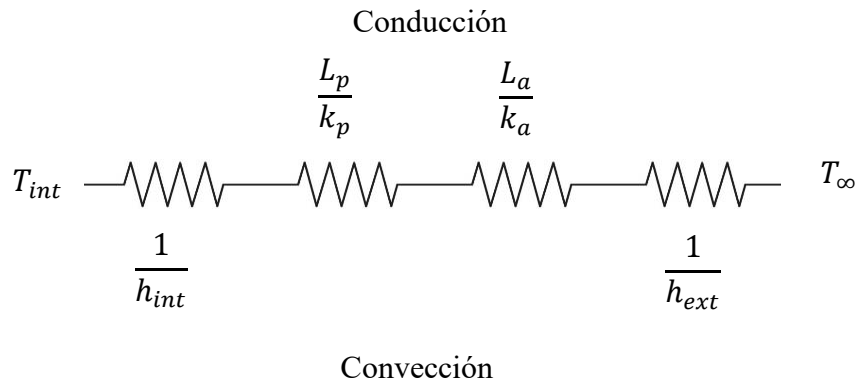


Figura 2.3. Circuito térmico equivalente.

donde q es la transferencia de calor (W), T_{∞} es la temperatura ambiente, T_{int} es la temperatura en el interior de la cámara, h_{int} es el coeficiente convectivo interior, h_{ext} es el coeficiente convectivo exterior, k_p es la conductividad del aislante, k_a es la conductividad del acrílico, L_p representa el espesor del aislante, L_a es el espesor del acrílico, A_s es el área de contacto.

La resistencia térmica equivalente queda de la siguiente forma:

$$R_t = \left(\frac{1}{A_{s\text{wall}}} \right) \left(\frac{1}{h_{\text{int}}} + \frac{L_p}{k_p} + \frac{L_a}{k_a} + \frac{1}{h_{\text{ext}}} \right) \text{----- Ec. 2.5}$$

donde *wall* representa el número de paredes de la cámara.

El primer término corresponde a la resistencia térmica que presenta el aire en el interior de la cámara para conducir el calor hacia las paredes, los siguientes dos términos representan la contribución de resistencia térmica tanto del aislante (poliestireno extruido) como del acrílico, mientras que el último término se debe al movimiento del aire que se encuentra en el ambiente.

Es importante mencionar que los valores de los coeficientes convectivos h_{int} y h_{ext} dependen de la geometría de la *superficie*, la naturaleza del movimiento del fluido y una variedad de propiedades termodinámicas del fluido. En el caso de los coeficientes de conducción k_p y k_a , se usan los valores reportados en las hojas de especificaciones proporcionados por los proveedores.

Los valores *propuestos* para ejemplificar el comportamiento de la temperatura se resumen en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Valores propuestos para el cálculo de la resistencia térmica equivalente.

Temperaturas			Espesores		
T_∞	23	°C	L_p	51	mm
T_i	25.5	°C	L_a	6	mm
Convección					
h_{int}	5	$\frac{W}{m^2K}$	Área		
h_{ext}	5	$\frac{W}{m^2K}$	$A_p = A_a$	0.8^2	m^2
Conducción			Energía generada		
k_p	0.0288	$\frac{W}{mK}$	\dot{E}_g	25	W
k_a	0.21	$\frac{W}{mK}$	Considerando $T = 22^\circ\text{C}$ y $P = 78,000 \text{ Pa}$		
Propiedades					
C	1012	$\left(\frac{J}{kg^\circ K} \right)$			
ρ	0.9	$\left(\frac{kg}{m^3} \right)$			

Una vez calculada la resistencia térmica equivalente del sistema se sustituye cada término en la ecuación diferencial (Ec. 2.1).

2.4 Solución teórica del problema y sustituciones numéricas

Al aplicar la Ecuación 2.2,2.3,2.4 a la Ecuación 2.1 se obtiene:

$$\overset{0}{\dot{E}_m + \dot{E}_g - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st}} \text{----- Ec. 2.6a}$$

Sustituyendo se obtiene la *ecuación diferencial* que modela el comportamiento transitorio de la temperatura dentro del sistema:

$$\dot{E}_g - \frac{(T - T_\infty)}{R_t} = \rho V c \frac{dT}{dt} \text{----- Ec. 2.6b}$$

La *ecuación diferencial sin generación de energía* se presenta cuando se *apagan* los dispositivos calefactores (resistencias eléctricas), y queda de la siguiente forma:

$$-\frac{(T - T_\infty)}{R_t} = \rho V c \frac{dT}{dt} \text{----- Ec. 2.7}$$

La solución de esta ecuación con la condición inicial, en $t = 0, T = T_i = T_{inicial}$ es la siguiente:

$$(\rho V c) R_t \ln \frac{(T_i - T_\infty)}{(T - T_\infty)} = t \text{----- Ec. 2.8}$$

La *Ecuación 2.8* sirve para determinar el tiempo que requiere un cuerpo para alcanzar alguna temperatura T.

Para ver el desarrollo a *detalle* de esta solución puede consultar a Frank P. Incropera [4].

Sustituciones numéricas

Al despejar la temperatura de la solución de la ecuación diferencial del sistema para cuando no existe generación de energía (*Ecuación 2.8*), para que sea función del tiempo, se obtiene la siguiente ecuación:

$$T = (T_i - T_\infty) e^{\left[-\left(\frac{1}{(\rho V c) R_t}\right)t\right]} + T_\infty \text{----- Ec. 2.9}$$

A partir de la Ecuación 2.9 y de los valores propuestos para el cálculo de la resistencia térmica equivalente de la Tabla 2.1 se obtuvo la gráfica de la Figura 2.4. Esta gráfica indica que para pasar de una temperatura inicial de 25.5 °C a 23.8 °C en un ambiente a 23 °C debe transcurrir un tiempo de 500 segundos (8.33 minutos) aproximadamente.

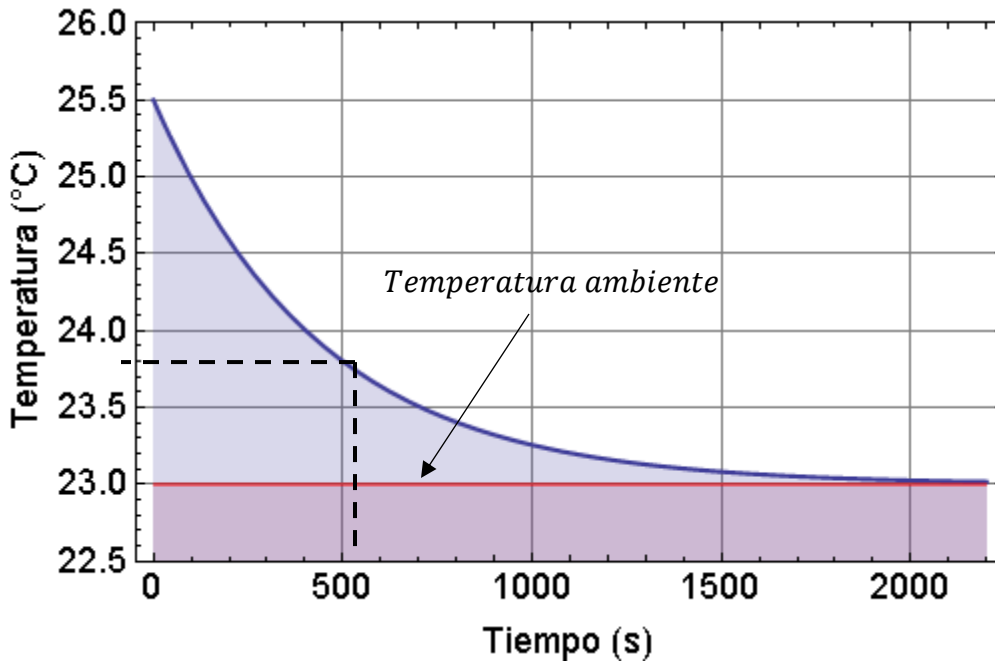


Fig. 2.4. Comportamiento transitorio de la temperatura sin generación de energía.

La solución de la ecuación diferencial del sistema para cuando si existe generación de energía (Ecuación 2.6b) es la siguiente:

Se introduce un *cambio de variable*

$$\theta = T - T_{\infty} \quad \text{----- Ec. 2.10}$$

Por lo tanto

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{dT}{dt}$$

Si además $C_1 = \dot{E}_g R_t$ y $C_2 = (\rho V c) R_t$

$$C_1 - \theta = C_2 \frac{d\theta}{dt}$$

Separando variables e integrando desde la condición inicial, en $t=0$

$$\left. \begin{array}{l} T = T_i = T_{inicial} \\ \therefore \theta_i = T_i - T_{\infty} \end{array} \right\}$$

$$C_2 \int_{\theta}^{\theta_i} \frac{d\theta}{(C_1 - \theta)} = \int_0^t dt$$

Al evaluar las integrales se tiene:

$$C_2 \ln \left(\frac{C_1 - \theta_i}{C_1 - \theta} \right) = t \quad \text{----- Ecuación 2.11}$$

La Ecuación 2.11 también sirve para determinar el tiempo que requiere el sólido para alcanzar alguna temperatura T.

De la solución de la ecuación diferencial del sistema para cuando sí existe generación de energía (Ecuación 2.11) se despeja la temperatura para que sea función del tiempo:

$$T = (T_i - T_{\infty} - C_1) e^{-\left(\frac{1}{(\rho V c) R_t}\right)t} + T_{\infty} + C_1 \quad \text{----- Ec. 2.12}$$

A partir de la Ecuación 2.12 y de los valores *propuestos* para el cálculo de la resistencia térmica equivalente de la Tabla 2.1 se obtuvo la gráfica de la Figura 2.5. la cual muestra la temperatura máxima que se puede alcanzar suministrando 25 W de energía al sistema.

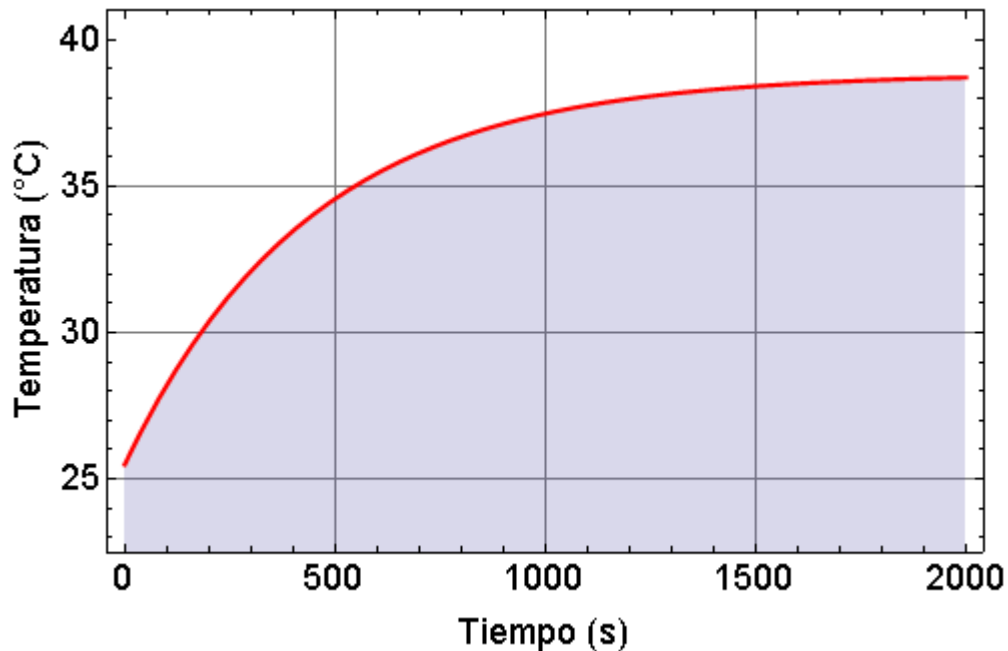


Fig. 2.5. Comportamiento transitorio de la temperatura con generación de energía.

CAPÍTULO 3

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL

En este capítulo se abordarán a detalle todos los elementos que componen la cámara de temperatura controlada. Se describirán sus características físicas, dimensiones; de igual forma se justificará el uso de los materiales seleccionados y se explicará cómo se manufacturó cada parte de la etapa de potencia y de los dispositivos calefactores.

Recordando los requerimientos que se deben cumplir:

- La cámara debe ser más barata que los equipos comerciales.
- Debe ser eficiente y sencilla de construir.
- El sistema de control debe ser fácil de operar.
- Debe tener el volumen suficiente para albergar los experimentos de sincronización térmica.

Para buscar la funcionalidad, operación y eficiencia de la cámara, ésta fue desarrollada en dos partes: mecánica y eléctrica-electrónica. El diseño de cada elemento fue realizado con ayuda de un software de diseño mecánico con el objetivo de generar prototipos que aporten información necesaria para las mejoras del diseño final. Se contempla que las partes diseñadas se manufacturen con la máquina de corte laser que está ubicada en el laboratorio de Termofluidos.

3.1 Desarrollo mecánico

El diseño mecánico contiene 10 elementos principales, los cuales se enlistan en la Tabla 3.1 y se presentan gráficamente en la Figura 3.1. La cámara tiene una capacidad de $0.4745 m^3$.

Tabla 3.1 Partes mecánicas de la cámara de temperatura.

Número de elemento	Nombre	Material
1	Base de la cámara	Compuesto de acrílico y poliestireno extruido (XPS)
2	Pared lateral izquierda	
3	Pared lateral derecha	
4	Pared posterior	
5	Pared superior	
6	Puerta frontal	
7	Ventana	
8	Elemento de sujeción	Acrílico, metal.
9	Calefactor	MDF/ Nicromel
10	Soporte	Polímero

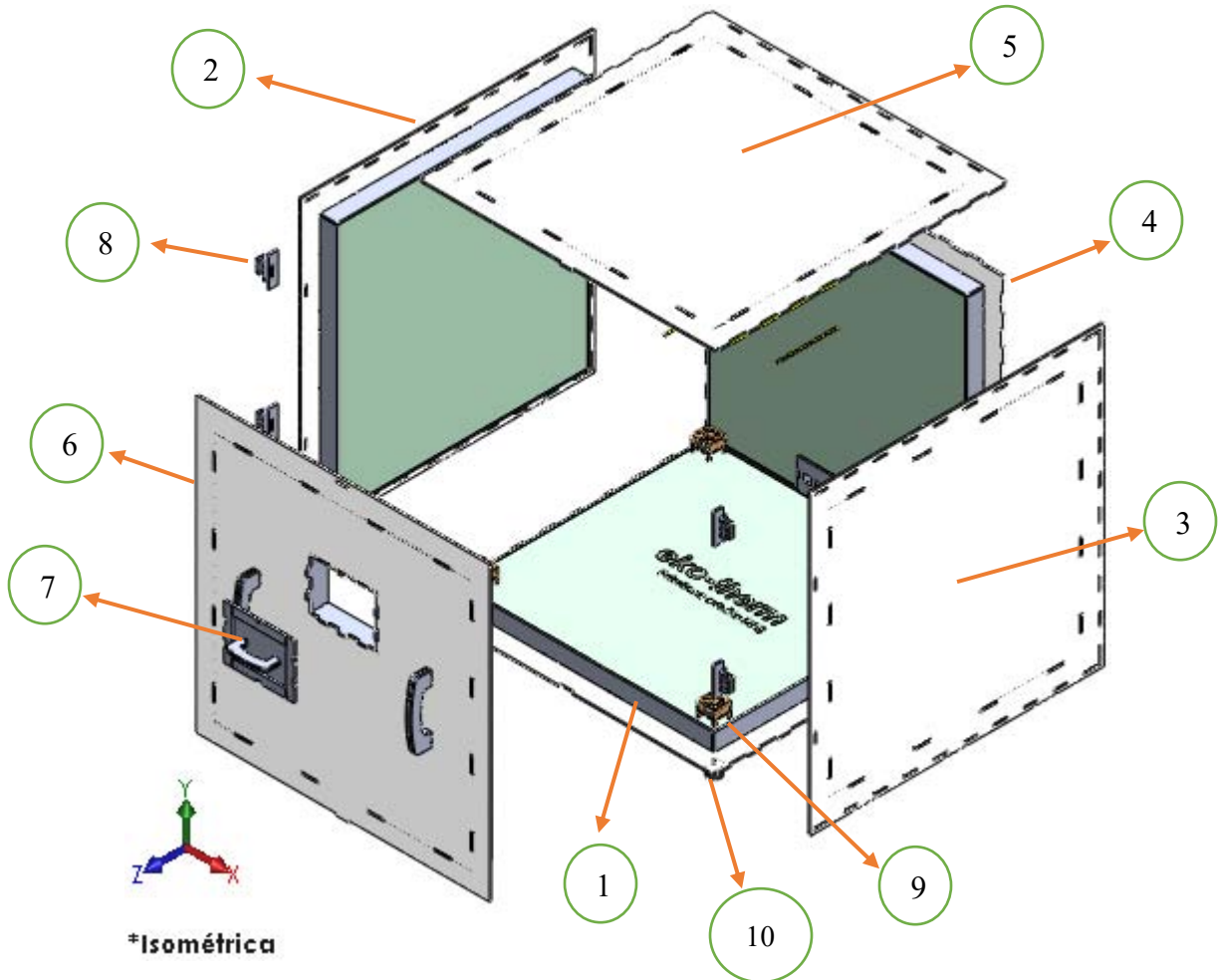


Fig. 3.1. Explosivo mecánico.

La Figura 3.2 muestra el arreglo experimental utilizado en las pruebas de control. Se puede observar que está formado por las siguientes partes:

- Cámara de temperatura controlada. - La cual hecha con acrílico y poliestireno extruido e instrumentada con termopares para las lecturas de temperatura.
- Equipo de adquisición de datos. - El cual está compuesto por una computadora de escritorio y un sistema de adquisición de datos de la compañía National Instruments, integrado por un chasis y tarjetas de adquisición de datos.
- Sensores de temperatura. - Se utilizaron termopares tipo K.
- Dispositivos calefactores. - Se fabricaron cuatro dispositivos calefactores, cada uno está conformado por un arreglo de una resistencia y un ventilador para elevar y homogeneizar la temperatura y el interior de la cámara, respectivamente.
- La etapa de potencia. - Se fabricó un circuito impreso en una placa fenólica que recibe las señales digitales de control y activa los dispositivos calefactores.

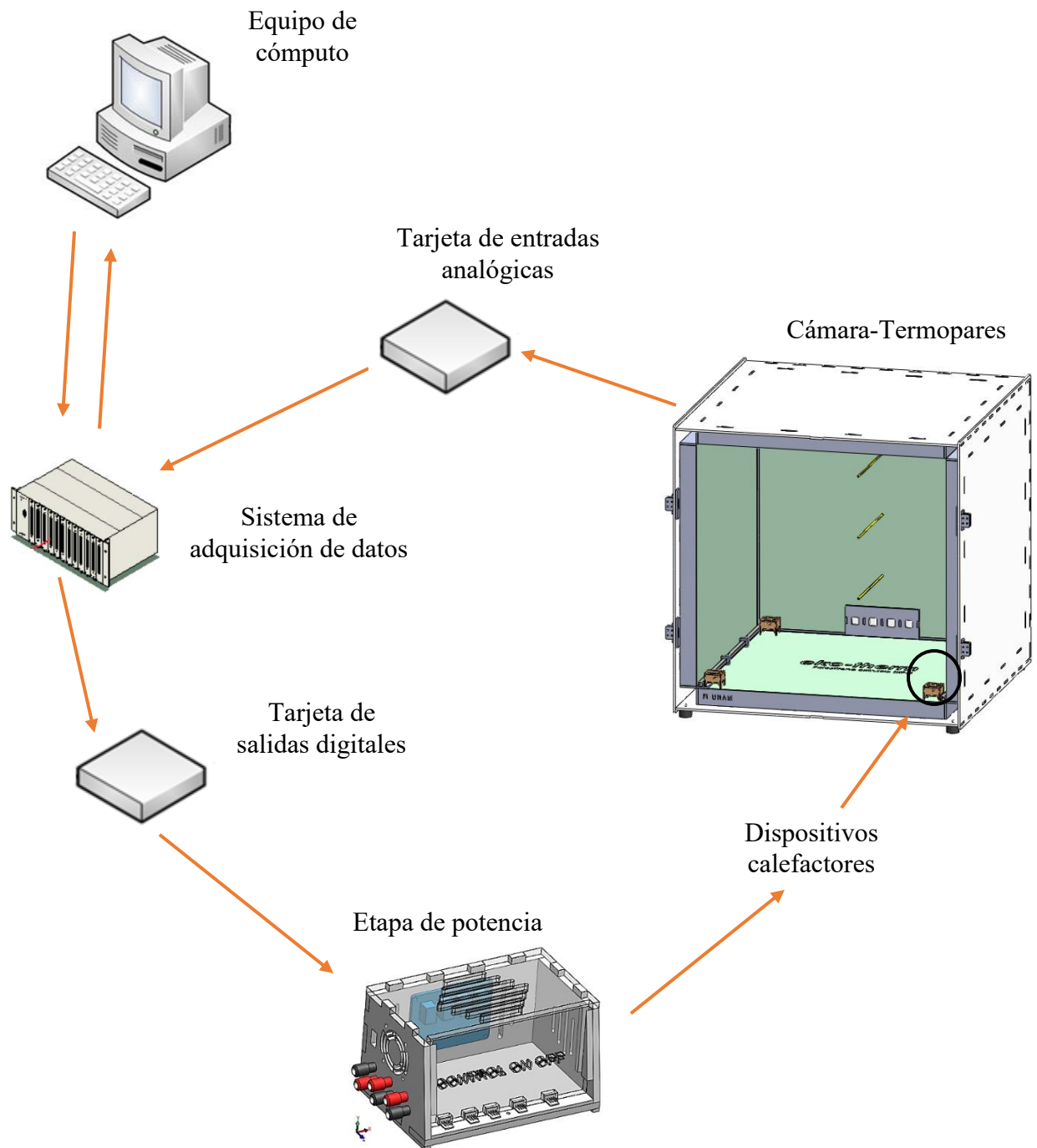


Fig. 3.2. Arreglo experimental utilizado para las pruebas de control.

3.1.1 Descripción de los componentes de la cámara de temperatura

El modelo experimental consiste en un espacio de geometría cúbica de 77 cm por lado, el cual se muestra en la Figura 3.3, está construido de acrílico translúcido y recubierto en su interior con aislante térmico e instrumentado con sensores de temperatura. Cuenta con una abertura en la pared posterior, que inicialmente servirá para introducir mangueras con líquido de enfriamiento del experimento de sincronización térmica; así como otros aditamentos.

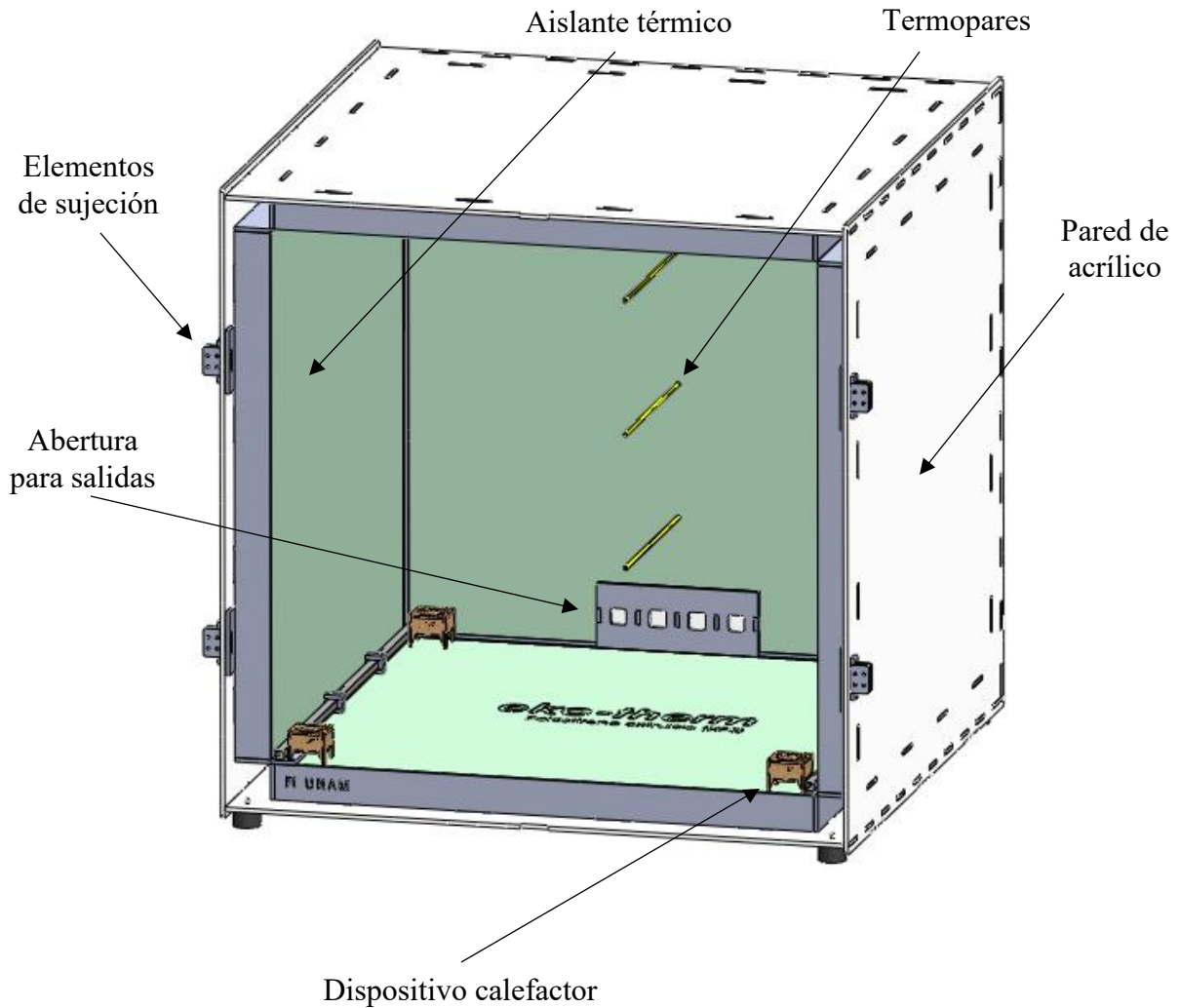


Fig. 3.3. Diseño CAD de la cámara de temperatura controlada.

La apariencia exterior se puede observar en la Figura 3.4. La pared frontal se puede desacoplar mediante dos agarraderas, en esta pared se maquinó una ventana que sirve para poder observar el interior de la cámara.

En la parte inferior (base) hay cuatro soportes de polímero [6] que sostienen la cámara a la vez que reducen las vibraciones, las especificaciones de este soporte se pueden consultar en el Apéndice A3.

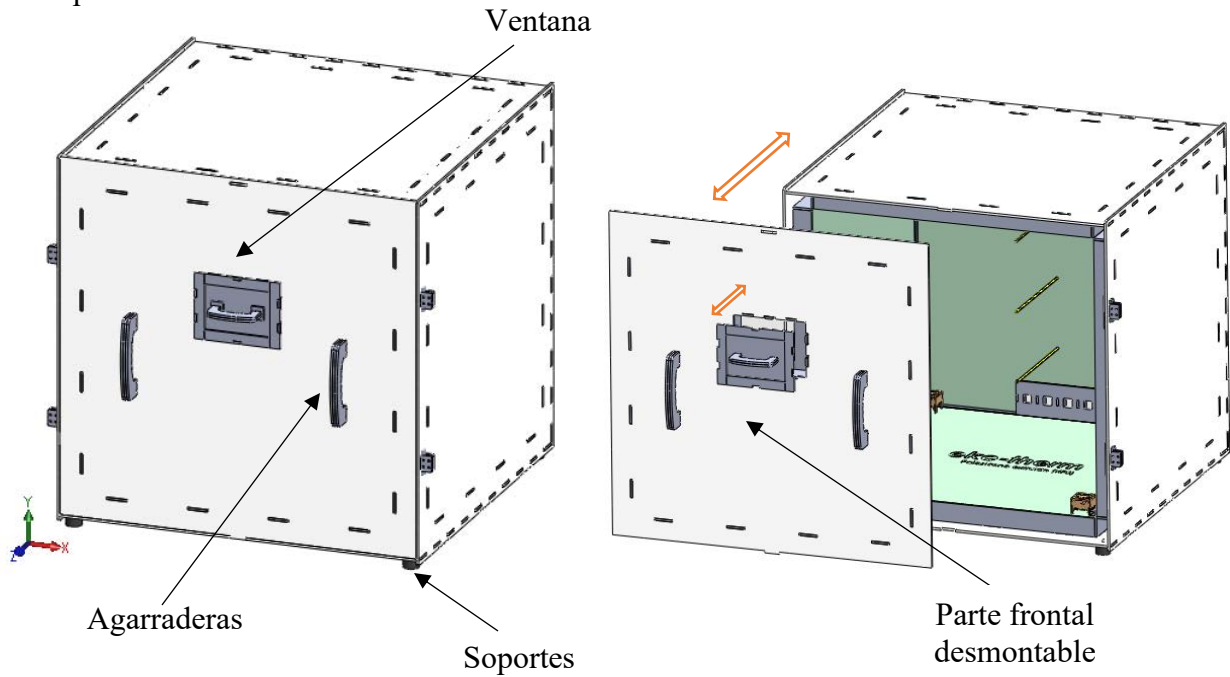


Fig. 3.4. Vista exterior de la cámara de temperatura controlada.

Además, para fijar la pared frontal a la cámara se emplearon cuatro abrazaderas de palanca como elementos de sujeción como se observa en la Figura 3.5.

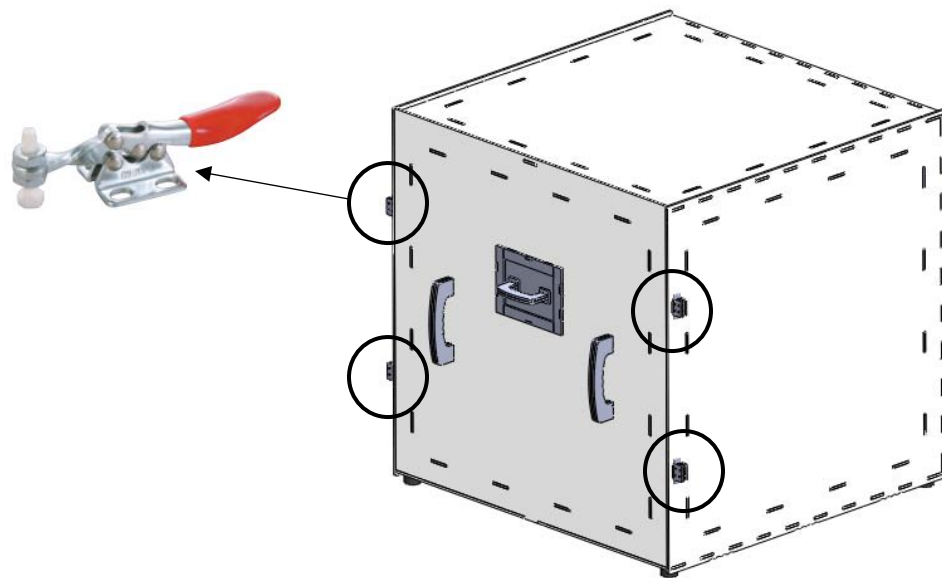


Fig. 3.5 Abrazadera tipo palanca.

Dimensiones

Para fabricar esta estructura se usó acrílico de 6 mm de espesor, las dimensiones exteriores e interiores se muestran en las Figuras 3.6a y 3.6b, respectivamente. Las unidades están en centímetros.

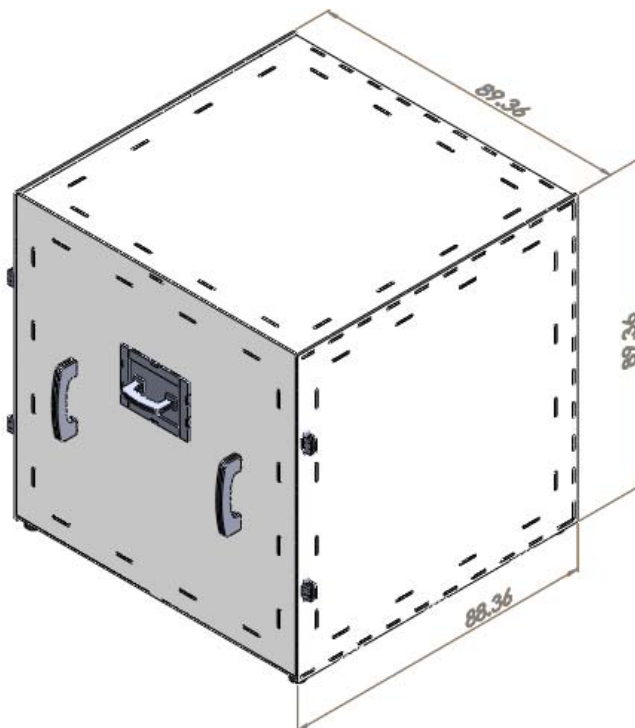


Fig. 3.6a. Dimensiones exteriores de la cámara de temperatura controlada.

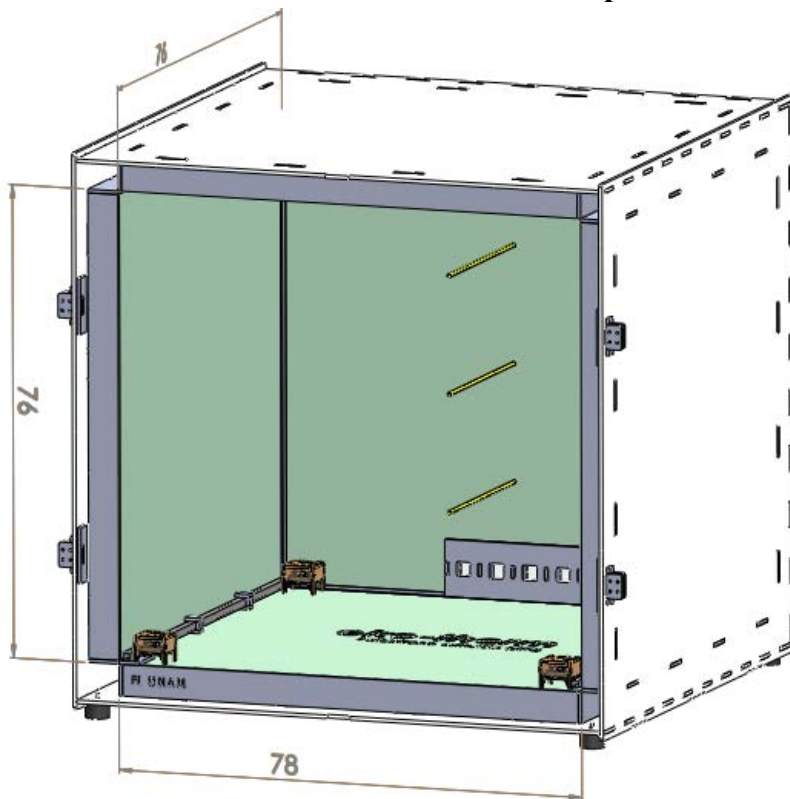


Fig. 3.6b. Dimensiones interiores de la cámara de temperatura controlada.

La apariencia real de la cámara se puede observar en la Figura 3.7.



Fig. 3.7. Apariencia final de la cámara de temperatura

La placa inferior estará expuesta a cargas debido a que en ella se colocará el dispositivo para realizar los experimentos de sincronización térmica. Por esta razón debe ser capaz de soportar el peso de estos componentes sin flexionarse demasiado. Se realizó un análisis de elemento finito en un software de diseño mecánico a la base de la cámara sin considerar el aislante térmico para una serie de pesos aproximados que se podrían colocar en el interior, que van desde 5 kg hasta 25 kg, y que serán ubicados en el centro de dicha base con un radio de 20 cm. Uno de los resultados de este análisis puede observarse en la Figura 3.8, en el que se consideró una carga de 20 kg y se obtuvo un desplazamiento debido a la deformación del acrílico de 1.568 cm. La Tabla 3.2 muestra el desplazamiento de la pared inferior en función del peso colocado.

Tabla 3.2. Peso vs desplazamiento.

Peso (kg)	Desplazamiento (cm)
5	0.3919
10	0.7839
15	1.176
20	1.568
25	1.96

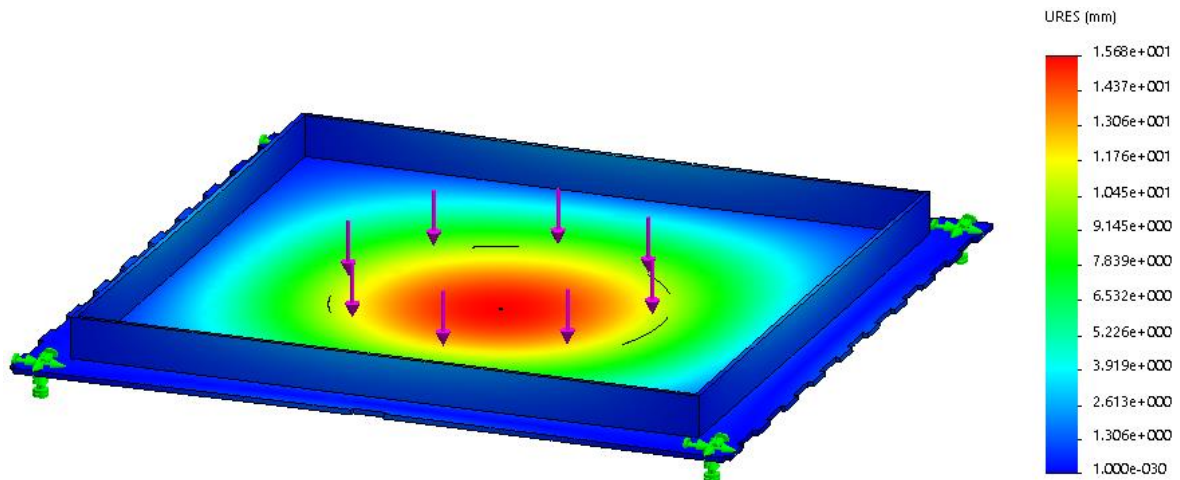


Fig. 3.8. Análisis de la base de la cámara.

3.1.2 Descripción del dispositivo calefactor

Dado que se tiene que alcanzar una temperatura por encima de la temperatura ambiente es necesaria una fuente de calor. Para este propósito se construyeron *cuatro dispositivos calefactores*. Debido a la simetría que presenta la cámara se decidió colocar estos dispositivos en cada una de las esquinas de la base para dejar mayor espacio a los experimentos.

La estructura de cada dispositivo calefactor se observa en la Figura 3.9, y está compuesto de una resistencia eléctrica de nicromel enrollada en forma de espiral acoplada a un pequeño ventilador, cuya función es mover el aire caliente para uniformizar la temperatura dentro de la cámara. Ambos están contenidos en una carcasa construida de MDF y manufacturada en corte laser cuya geometría permite que el flujo de aire generado por los ventiladores tenga *mayor* contacto con la resistencia. Las dimensiones de esta carcasa son 5.2 cm por lado y 4.5 cm de altura.

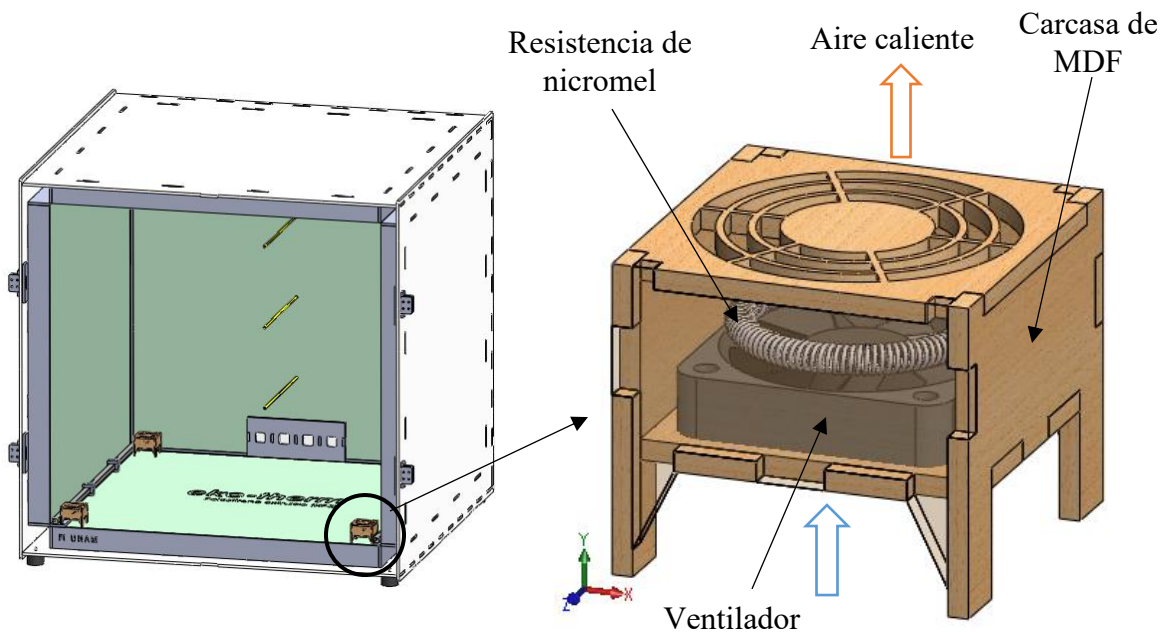


Fig. 3.9. Dispositivo calefactor.

Ventiladores de CD. – Los ventiladores que se usan para mover el aire caliente son de 5 V y de 0.32 A, y fueron seleccionados debido a su pequeño tamaño y bajo consumo de energía.

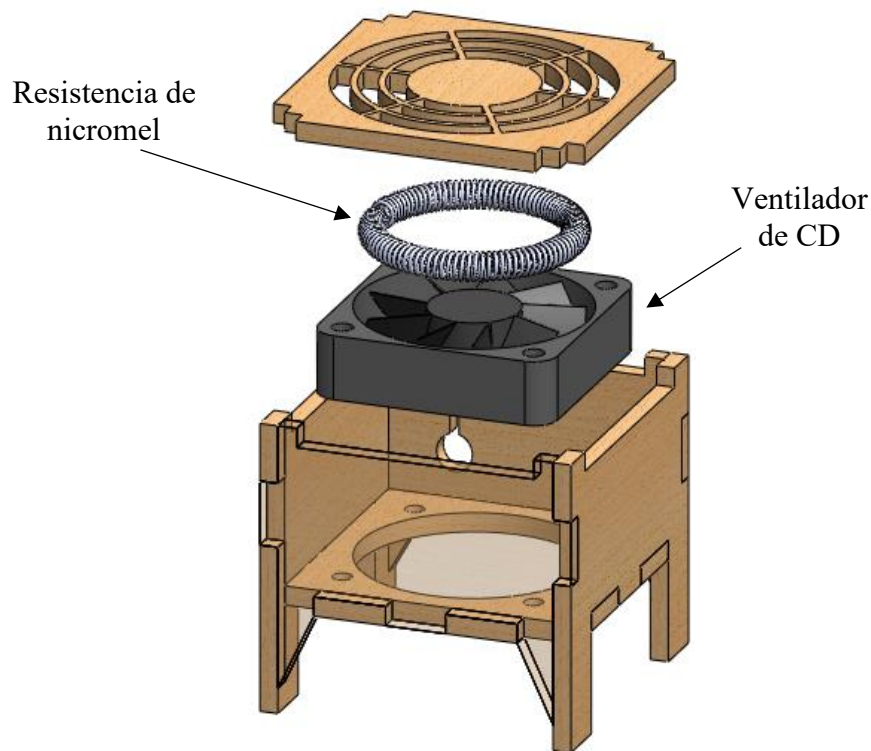


Fig. 3.10. Elementos del dispositivo calefactor.

Resistencias eléctricas de nicromel. – El nicromel es una aleación de níquel y cromo resistente a la corrosión y con un punto de fusión cercano a los 1400 °C. La aleación utilizada está compuesta de un 80% de níquel y un 20% de cromo. Se eligió este material debido a su gran resistividad y su difícil oxidación a altas temperaturas.

La cantidad de calor que genera la resistencia depende de la potencia eléctrica suministrada. Para determinar *la longitud y diámetro de la resistencia* se consideró un caso extremo en el que la cámara de temperatura se encuentra a 25°C y la temperatura del laboratorio es de 12°C. Condiciones para las cuales es necesario suministrar calor para mantener dicha temperatura.

Se realiza un análisis considerando condiciones permanentes de temperatura para obtener el valor de la transferencia de calor teórica que ocurre a través de las paredes de la cámara. El circuito térmico equivalente se observa en la Figura 3.11.

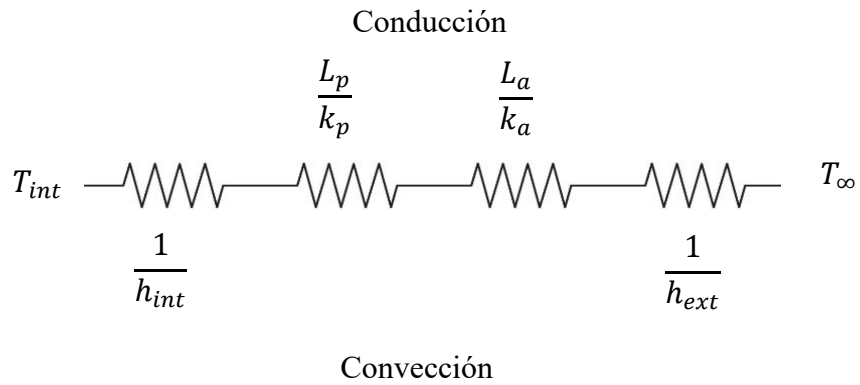


Fig. 3.11. Circuito térmico equivalente.

Para estas condiciones la pérdida de calor de la cámara está determinada por la ecuación:

$$q = \frac{(T - T_{\infty})}{R_t}$$

donde R_t está definida como:

$$R_t = \left(\frac{1}{A_{s\text{wall}}} \right) \left(\frac{1}{h_{int}} + \frac{L_p}{k_p} + \frac{L_a}{k_a} + \frac{1}{h_{ext}} \right)$$

Los valores considerados se resumen en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Valores para calcular la resistencia térmica equivalente.

Temperaturas				
T_{∞}	12	°C	285.15	K
T_{int}	25	°C	298.15	K
Convección				
h_{int}	20	$\frac{W}{m^2K}$	Forzada	
h_{ext}	5	$\frac{W}{m^2K}$	Natural	
Conducción				
k_p	0.0288	$\frac{W}{mK}$		
k_a	0.21	$\frac{W}{mK}$		
Espesores				
L_p	51	mm		
L_a	6	mm		
Área				
$A_p = A_a$	0.77^2	m^2		

Despejando los valores de las variables se obtiene que para mantener la temperatura dentro de la cámara se necesitan suministrar:

$$q = \frac{(T - T_{\infty})}{R_t} = \frac{(25 - 12)}{0.691315} = 18.8(W)$$

Este valor representa la *energía mínima* que se tendría que suministrar al interior de la cámara para compensar la energía que se pierde debido a la diferencia de temperaturas. Por esta razón se decide *fabricar cuatro* resistencias eléctricas de nicromel, cada una que sea capaz de suministrar al menos 5 W para sumar un total de 20 W.

Para determinar la longitud de la resistencia se utilizan las fórmulas de electricidad siguientes:

Ley de ohm $V=RI$

Potencia disipada $P=VI$

Resistencia $R = \rho \frac{l}{A_c}$

Resistividad ρ

$$\rho_{nicromel} = 1.1 \frac{\Omega mm^2}{m}$$

Para obtener la longitud del alambre necesario para disipar 5 W de potencia es necesario *fixar* un calibre por conveniencia, en este caso se eligió calibre 23 (0.51 mm). En el Apéndice A4 se muestra una tabla de calibres comerciales para alambre de nicromel.

El voltaje suministrado corresponde al voltaje de la fuente de alimentación externa del laboratorio que es de 5 V.

La longitud se despeja de la fórmula de resistencia, mientras que el área transversal es:

$$A_c = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi(0.51)^2}{4} = 0.204 mm^2$$

$$l = \frac{RA}{\rho} = \frac{(V/I) * A_c}{\rho} = \frac{\left(\frac{V}{(P/V)}\right) * A_c}{\rho} = \frac{(V^2/P) * A_c}{\rho} = \frac{(5^2/5) * 0.204}{1.1} = \mathbf{0.927 m}$$

Este valor de 0.927 m es la longitud mínima que debe tener el alambre de nicromel de diámetro 0.51 mm para poder disipar 5 W de potencia a aplicarse una diferencia de potencial en sus extremos de 5 V, sin embargo, para la fabricación se considera una longitud cerrada de 1 m.

El alambre de nicromel se enrolló en forma de espiral para que ocupe menos espacio y se pueda introducir en el interior de la carcasa de MDF como se muestra en la Figura 3.9.

Una vez que se conoce la longitud de la resistencia de nicromel, es importante determinar la temperatura aproximada que alcanzará al aplicarse un voltaje en sus extremos.

Para determinar la temperatura máxima que puede alcanzar esta resistencia, se realizó un análisis en COMSOL, considerando un voltaje de 5 V en sus extremos. La geometría del alambre se generó en un software de diseño mecánico y se exportó a COMSOL. El resultado de la simulación en el estado permanente se observa en la Figura 3.12. La temperatura máxima obtenida es de 227 °C lo cual es aceptable, además, nunca alcanzará esta temperatura debido a que funcionará acoplado con el ventilador.

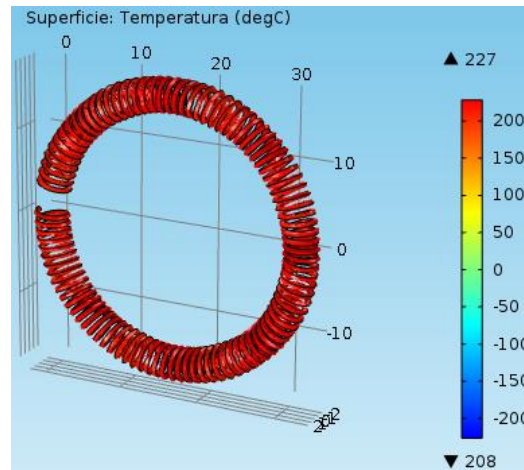


Tabla 3.12 Simulación para obtener la temperatura de la resistencia de nicromel.

La apariencia real del dispositivo calefactor se puede observar en la Figura 3.13.

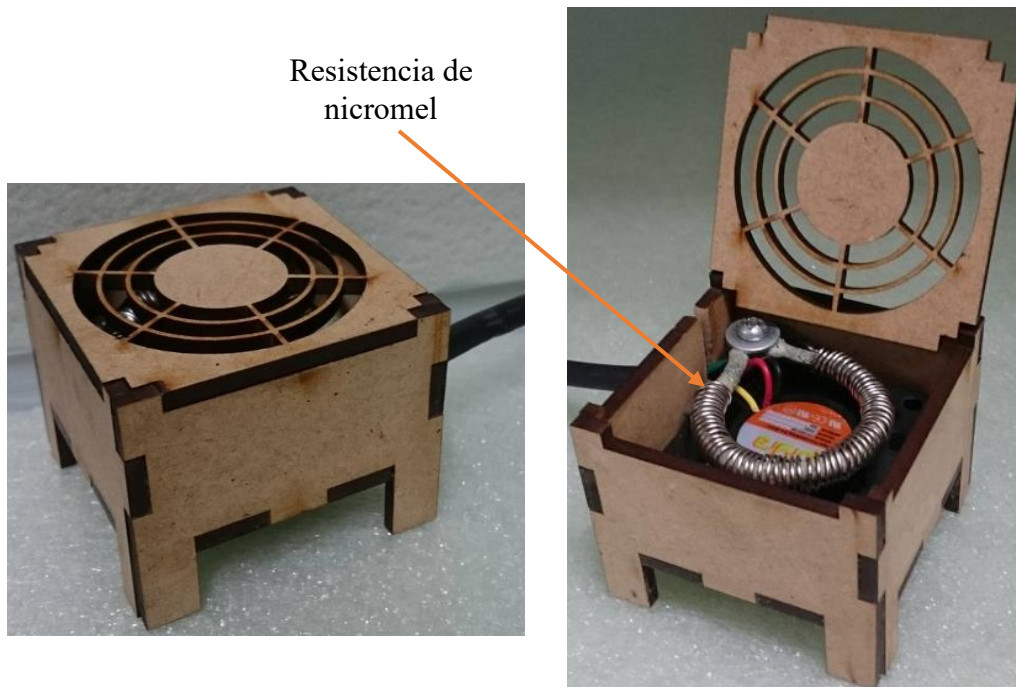


Fig. 3.13. Dispositivo calefactor.

3.2 Sistema de control de temperatura

El control de temperatura dentro de la cámara se realiza por medio de un control termostático de lazo cerrado, el cual está conformado por: (a) una etapa de potencia, (b) una fuente de alimentación externa y (c) un equipo de adquisición de datos de National Instruments que se encarga de adquirir la señal de temperatura y enviar la señal de control digital para encender y apagar los dispositivos calefactores.

3.2.1 Etapa de potencia

La etapa de potencia está contenida en una *carcasa de acrílico* para proteger los componentes y que puedan estar de una forma más compacta como se puede ver en Figura 3.14. Esta carcasa también fue manufacturada con la cortadora laser.

Se fabricó un circuito impreso en una placa fenólica que contiene todas las *conexiones* necesarias para el control. Cuenta con 5 conectores de tipo molex para evitar errores en las conexiones como se muestra en la Figura 3.15. Uno de ellos recibe dos señales de control del equipo de NI, una señal es para el encendido y apagado de las resistencias y la otra permite activar o desactivar los ventiladores. Cada uno de los conectores molex restantes son salidas que controlan un dispositivo calefactor. Además, la carcasa tiene una entrada de aire para evitar el sobrecalentamiento de los componentes electrónicos. Se instalaron conectores tipo banana para realizar las conexiones pertinentes con la fuente de alimentación externa. Las dimensiones externas de la carcasa se observan en la Figura 3.15. El dispositivo terminado se puede observar en la Figura 3.16.

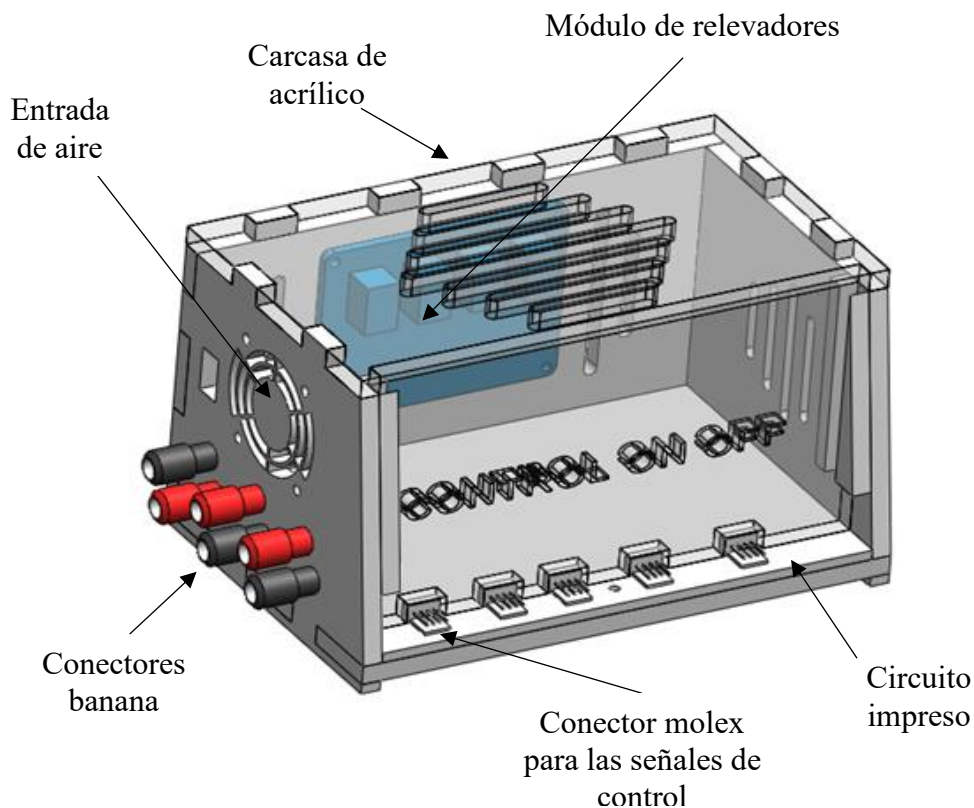


Fig. 3.14. Carcasa para la etapa de potencia.

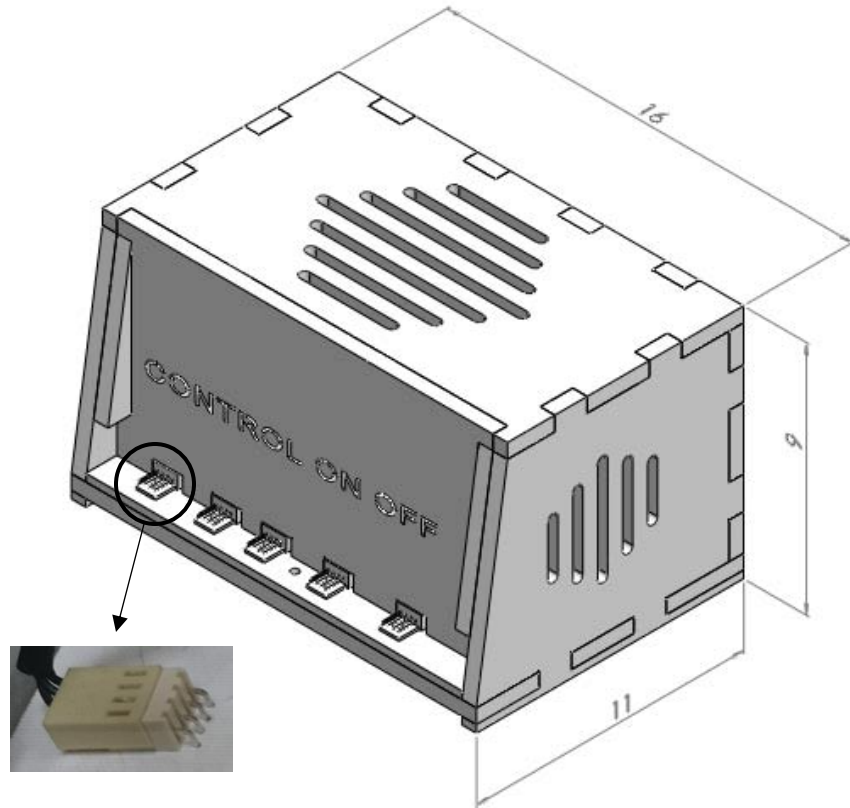


Fig. 3.15. Dimensiones de la carcasa para la etapa de potencia, unidades en centímetros.

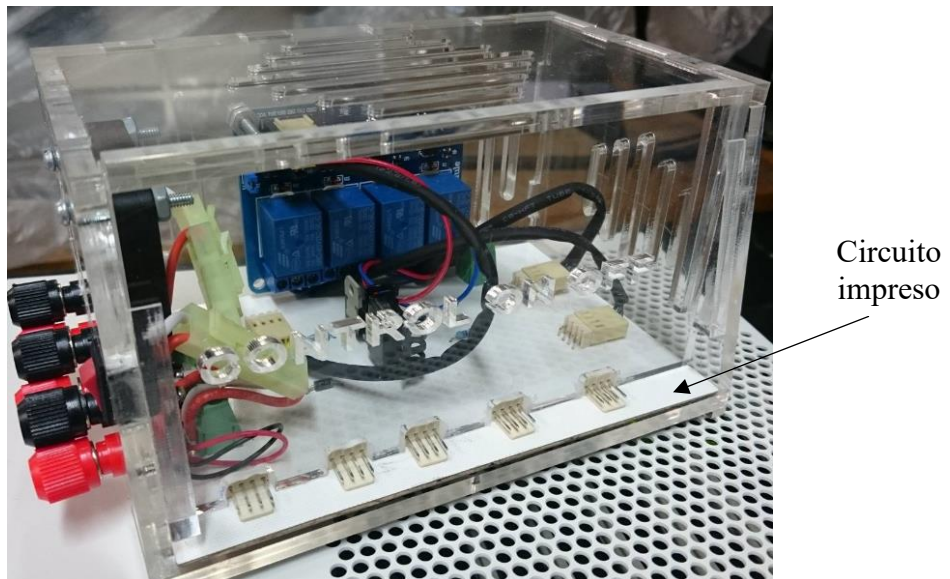


Fig. 3.16. Apariencia final de la carcasa para la etapa de potencia.

Circuito impreso

Al interior de la carcasa de la etapa de potencia se encuentra un circuito impreso como se puede ver en la Figura 3.16, cuyo objetivo es acondicionar las señales de control provenientes de la tarjeta de adquisición de datos, la cual funciona con un voltaje digital de 5 V a 20 mA, esta corriente es insuficiente para activar los dispositivos calefactores, por esta razón, se emplearon transistores TIP32 como el mostrado en la Figura 3.17 para amplificar la corriente de la señal de control. El circuito impreso se puede observar la Figura 3.18.

Para encender y apagar las resistencias eléctricas se utilizó un módulo de cuatro relevadores como el mostrado en la Figura 3.19, el cual toma directamente la corriente de la fuente de alimentación externa.



Fig. 3.17. Transistor TIP32.

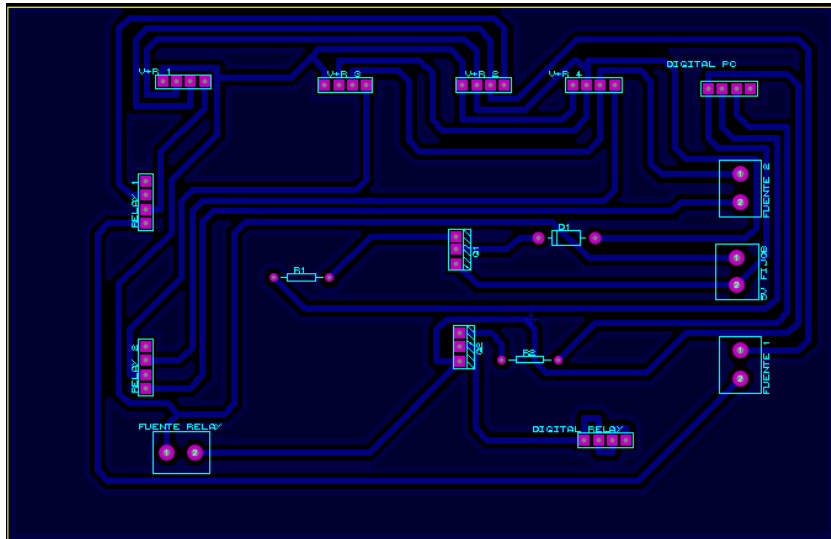


Fig. 3.18. Circuito Impreso del control On Off.

Las características de este circuito impreso son las siguientes:

- Está construido en una placa fenólica.
- Se puede comunicar con el sistema de adquisición de datos por medio de un puerto principal tipo molex que puede recibir dos señales digitales de control, una para los ventiladores y otra para las resistencias eléctricas.
- Es capaz de soportar corrientes de hasta 4 A.

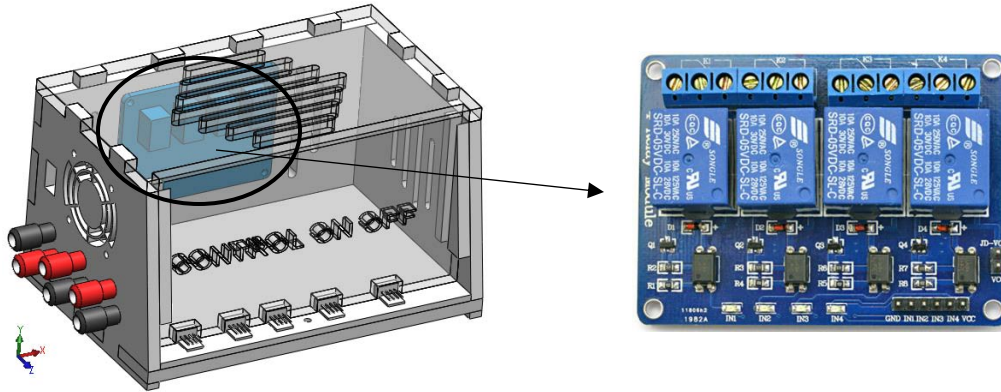


Fig. 3.19. Módulo de 4 relevadores.

3.2.2 Fuente de alimentación externa

La fuente de alimentación externa utilizada se muestra en la Figura 3.20. Es una fuente dual de voltaje variable de 0 V a 30 V y una corriente máxima de 5 A. También cuenta con una tercera salida de voltaje fija de 5 V y una corriente máxima de 3 A.



Fig. 3.20. Fuente de voltaje Insteak GP1850D.

En la Figura 3.21. se muestra un diagrama que ejemplifica la conexión realizada entre el control On-Off y los dispositivos calefactores.

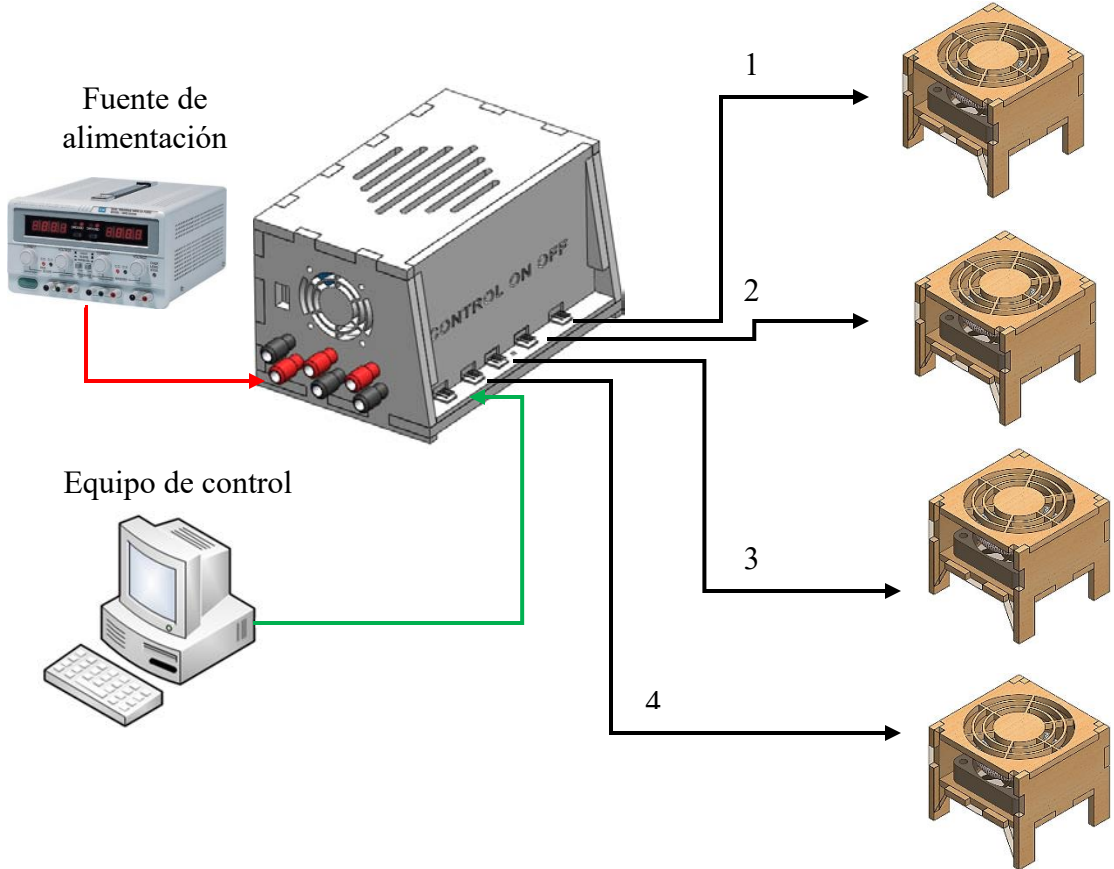


Fig. 3.21. Diagrama de conexiones entre la etapa de potencia y las cargas.

3.2.3 Descripción del equipo de adquisición de datos

El equipo utilizado es un chasis PXIe-1073 de National Instruments el cual tiene instaladas las siguientes tarjetas: (a) Una tarjeta NI PXIe-4353 para la conexión de hasta 32 termopares y (b) una tarjeta NI PXI-6528 de entradas y salidas digitales. Las conexiones de estas tarjetas se realizan por medio de los bloques de conexión NI TB-4353 y SCB-100, respectivamente. El chasis está conectado a una computadora de escritorio.

Para entender cómo se utilizaron los elementos antes mencionados se muestra un esquema donde se visualiza como están conectados en la Figura 3.22.

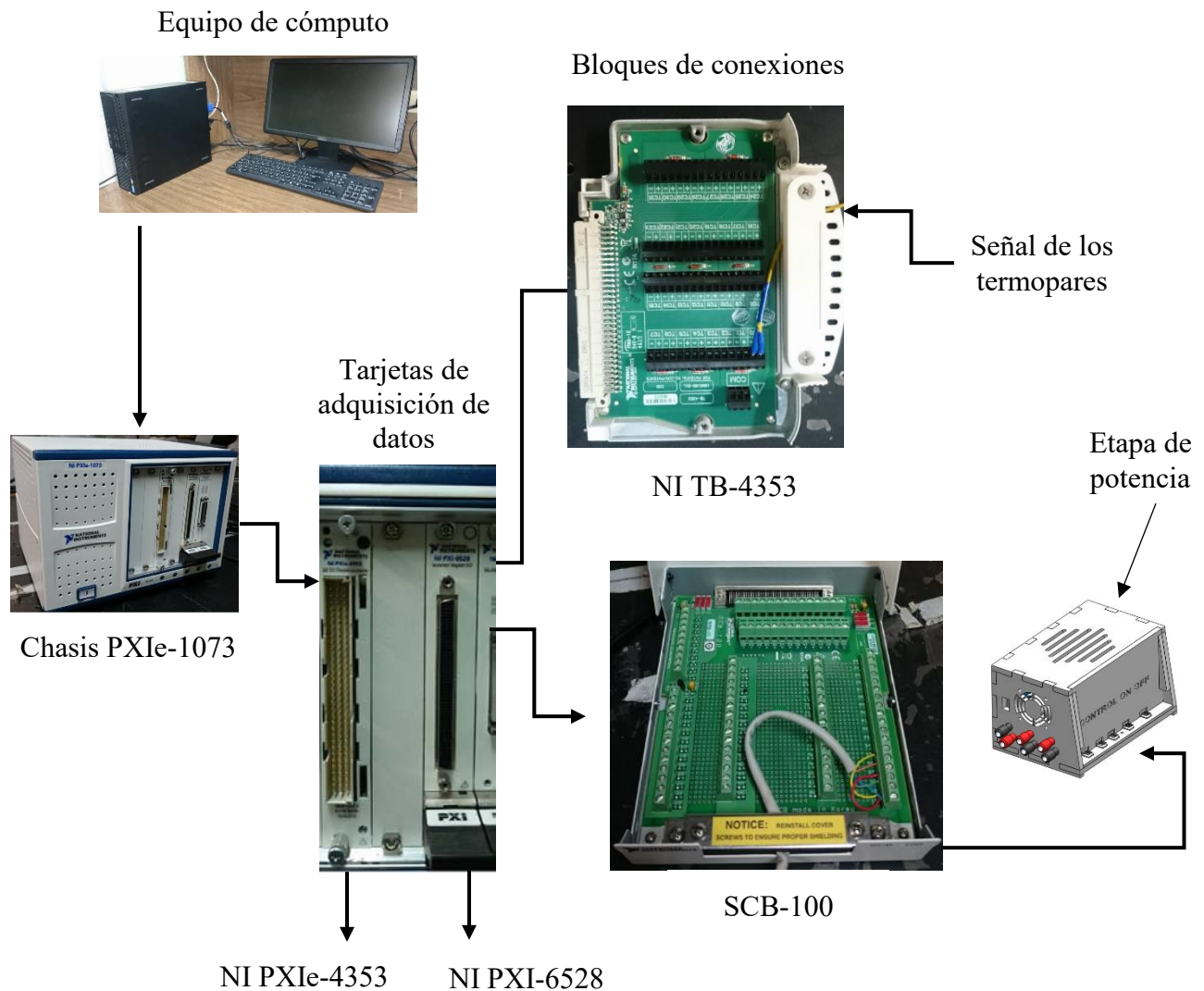


Fig. 3.22. Esquema de conexiones del equipo de NI.

3.3 Construcción del modelo experimental

Después de elegir la geometría y las dimensiones finales de la cámara, se comenzó con la fabricación de la carcasa o estructura. Para ello, se generó un archivo de corte para cada pieza de la cámara a partir del diseño virtual como se muestra en la Figura 3.23. La manufactura de estas piezas se realizó en la máquina de corte laser del laboratorio de Termofluidos. Las primeras piezas en ser cortadas fueron las placas que forman las paredes de la cámara, posteriormente las barras laterales que delimitan el espacio en el que se va a colocar el aislante térmico. El ensamble de estas piezas se muestra en la Figura 3.24. Se utilizó pegacril para unir todas las piezas.

El material que se utilizó para la fabricación de las paredes de la cámara es Polimetilmetracrilato (PMMA), mejor conocido como acrílico. Los datos técnicos se encuentran en el Apéndice A2.

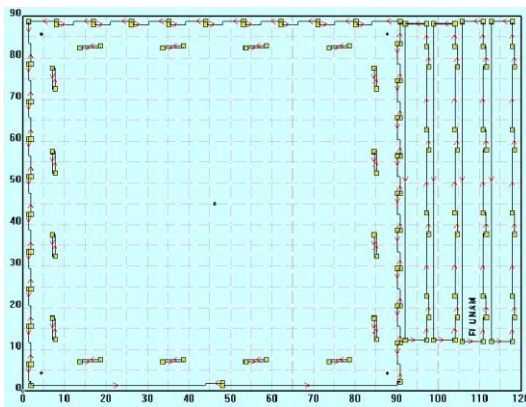


Fig. 3.23 Ejemplo de archivos de corte.



Fig. 3.24 Paredes de la cámara.

Se eligió este material debido a sus propiedades, entre las cuales destacan:

- Alta *resistencia al impacto*, de diez a veinte veces la del vidrio.
- Resistente a la intemperie y a los rayos ultravioleta. No hay un envejecimiento apreciable en diez años de exposición exterior.
- Excelente *aislante térmico* y acústico.
- Ligero en comparación con el vidrio, con una densidad de 1180 kg/m³.
- De dureza similar a la del aluminio.
- Inerte a sustancias corrosivas.
- Transparente, rígido, y de fácil limpieza.

Se empleó como aislante la espuma de poliestireno extruido (XPS) en forma de placas que tienen una superficie lisa y una estructura de celdas cerradas, estas fueron ubicadas en cada una de las seis paredes como se muestra en la Figura 3.25. Para cortar este material se utilizó un perfil metálico como guía y una sierra para cortar, ver Figura 3.26.

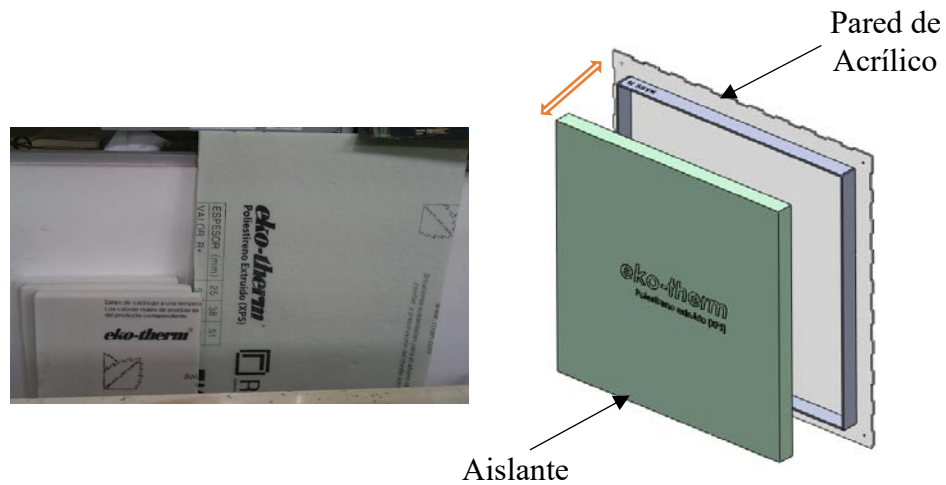


Fig. 3.25. Poliestireno extruido (XPS).



Fig. 3.26. Corte del aislante térmico.

Se *eligió* este material debido a su baja conductividad térmica ($k=0.0288 \frac{W}{mk}$) y excelentes propiedades mecánicas como por ejemplo alta resistencia a la compresión 276 kPa. La ficha técnica puede ser consultada en el Apéndice A1. Las especificaciones finales de la cámara de temperatura controlada se observan en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Especificaciones de la cámara de temperatura controlada

RANGO TEMPERATURA	CAPACIDAD (m ³)	DIMENSIONES INT/EXT (cm)	PESO KG
T _{amb} - T _{amb} + 8 °C	0.45	76X76X78/89X89X88	40

3.4 Efecto del espesor de las paredes en la pérdida de calor

Para determinar el *espesor* de los materiales se realizó un análisis transferencia de calor en el estado permanente para *una pared de la cámara*, como el presentado en Capítulo 2. Donde se obtuvo la siguiente ecuación:

$$q_{sale} = \frac{(T_{int} - T_{\infty})}{R_t}$$

donde R_t está definida como

$$R_t = \left(\frac{1}{A_{s\,wall}} \right) \left(\frac{1}{h_{int}} + \frac{L_p}{k_p} + \frac{L_a}{k_a} + \frac{1}{h_{ext}} \right)$$

Como primer caso se consideró fijo el valor del espesor del poliestireno extruido $L_p = 51\text{mm}$ (espesor comercial), mientras que el espesor del acrílico se consideró desde 1 mm hasta 100 mm, estas longitudes se usaron solo para observar el comportamiento, los resultados se muestran en la Figura 3.27. Como era de esperar, se observa que entre mayor es el espesor del material, disminuye la transferencia de calor desde el interior hacia el exterior de la cámara.

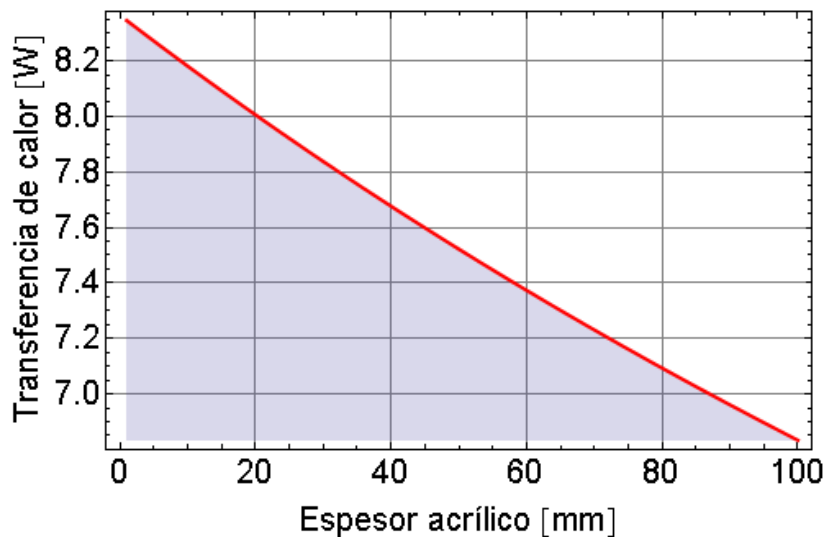


Fig. 3.27. Comportamiento de la transferencia de calor variando el espesor del acrílico.

En la Figura 3.27 se observa que entre mayor es el espesor del acrílico no disminuye significativamente la transferencia de calor. La diferencia entre la pérdida de calor con espesores muy pequeños y un espesor de 100 mm es de 1.2 W aproximadamente.

Como segundo caso se consideró fijo el valor del espesor del acrílico $L_a = 6\text{mm}$ (espesor comercial), mientras que el espesor del poliestireno se consideró desde 1 mm hasta 100 mm, los resultados se muestran en la Figura 3.28 donde se observa que entre mayor es el espesor del poliestireno disminuye significativamente la transferencia de calor. Para espesores mayores a 40 mm la pérdida de calor es menor a 10 W.

Por esta razón se decidió utilizar un aislante que tuviera un espesor mayor a 40 mm. El espesor comercial máximo disponible es de 51mm.

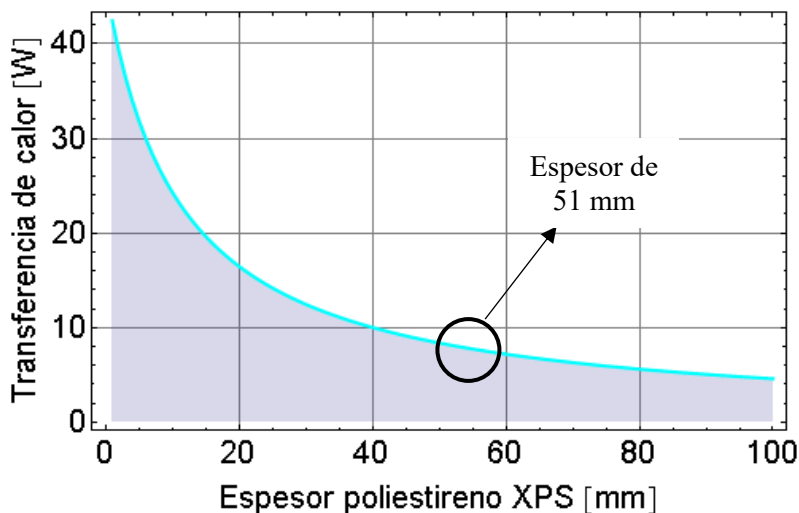


Fig. 3.28. Comportamiento de la transferencia de calor variando el espesor del poliestireno.

Debido al comportamiento lineal de la variación del espesor del acrílico en relación con la transferencia de calor se usó otro criterio mediante una tabla de decisión para elegir el espesor.

Una tabla de decisión es una herramienta que combina condiciones y acciones y que puede trabajarse con criterios matemáticos.

La Tabla 3.4, muestra los parámetros contemplados *elegir* el espesor del acrílico; tomando a 1 como poco y 5 como mucho. El resultado es que se *selecciona* acrílico de 6 mm de espesor.

Tabla 3.4 Tabla de decisión para elegir el espesor del acrílico

Parámetros	Espesor del material		
	3 mm	6 mm	9 mm
Peso	1	2	4
Costo	1	2	4
Flexión de pared	4	2	1
Total	6	6	8

Parámetros	Espesor del material	
	3 mm	6 mm
Capacidad aislante	1	3
Total	1	3

3.5 Monitoreo de temperatura

La temperatura dentro de la cámara fue monitoreada con tres termopares tipo K. Los cuales se conectaron a la tarjeta PXIe-4353, con una tasa de muestreo de 1 lectura por segundo. Debido a la simetría de la cámara los termopares fueron posicionados en la pared posterior y espaciados uniformemente con respecto a la altura de la cámara, como se observa en la Figura 3.29.

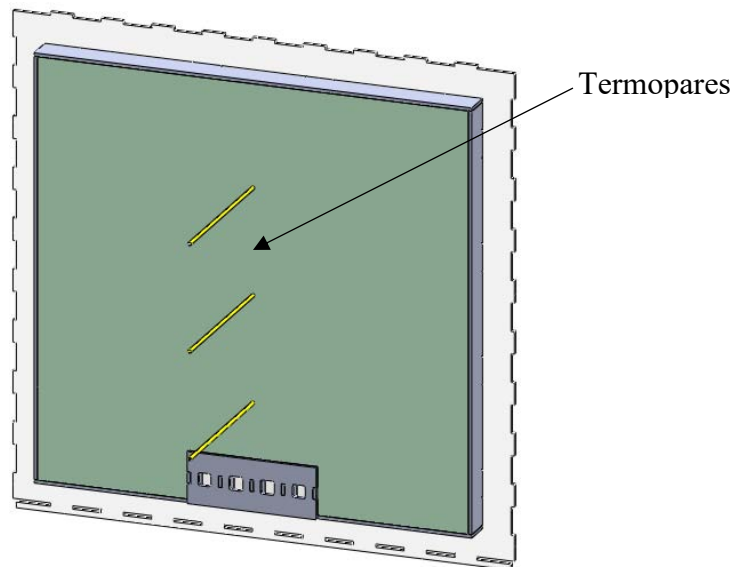


Fig. 3.29. Ubicación de los termopares.

3.6 Programación del sistema de control de temperatura On-Off

LabVIEW es un entorno de desarrollo integrado y diseñado específicamente para ingenieros y científicos que desarrollan sistemas de medidas y control. Los programas desarrollados con este software se llaman Instrumentos Virtuales, o VIs.

El programa de control de temperatura fue desarrollado para ser simple y amigable con el usuario, ya que muestra en pantalla el comportamiento de la temperatura en la cámara. El usuario puede definir previamente los valores máximo y mínimo de temperatura con los que quiere realizar su control. Por default estos valores se encuentran definidos para mantener la temperatura a 25 °C. El programa está configurado para que los ventiladores *siempre* estén activados, con el propósito de mantener un movimiento continuo del aire dentro la cámara, logrando una distribución de temperatura lo más uniforme y homogénea posible.

El diagrama de bloques del programa se observa en la Figura 3.30, este hace la comparación entre la temperatura dentro de la cámara y la temperatura máxima y mínima que introduce el usuario. Si la temperatura en el interior de la cámara es mayor a la temperatura máxima se manda una señal de control para desactivar los dispositivos calefactores. Si la temperatura en el interior de la cámara es menor a la temperatura mínima se manda una señal de control para activar los dispositivos calefactores. Opcionalmente, todos los datos de temperatura de cada sensor y de la señal de control pueden ser guardados en un archivo de texto.

La Figura 3.31 muestra el panel frontal del programa, este panel tiene dos controles para seleccionar las temperaturas máxima y mínima, también existen indicadores que muestran la temperatura ambiente y la temperatura en el interior de la cámara. Los ventiladores se pueden encender y apagar por medio de un interruptor virtual de palanca, al activar estos dispositivos se inicia una animación que sirve como indicador de que están funcionando.

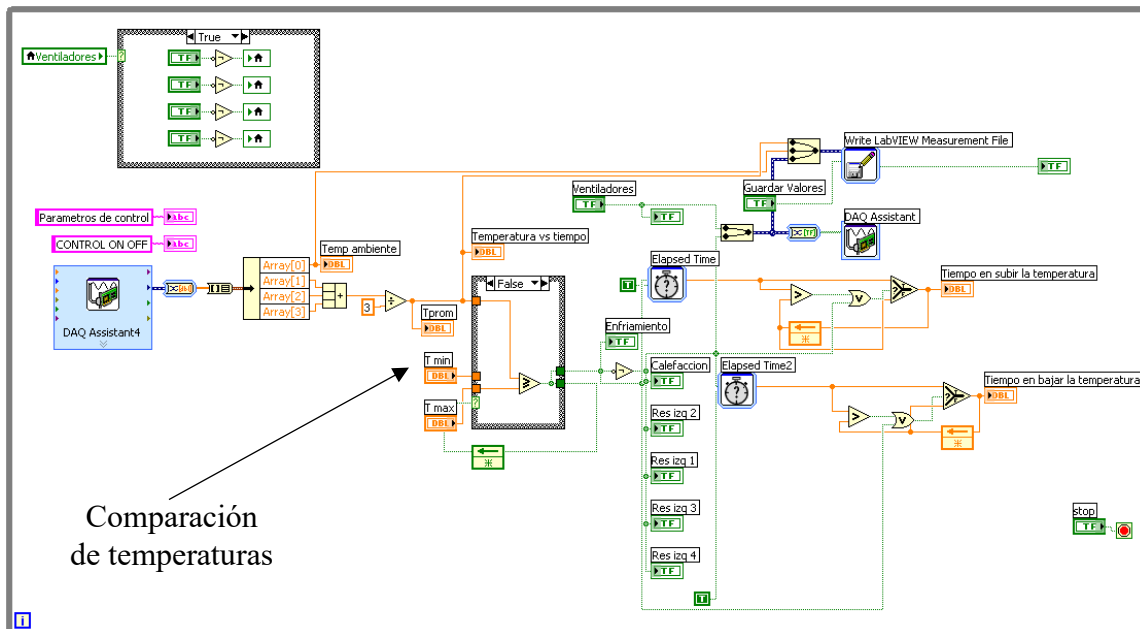


Fig. 3.30. Diagrama de bloques del programa del sistema de control On Off.

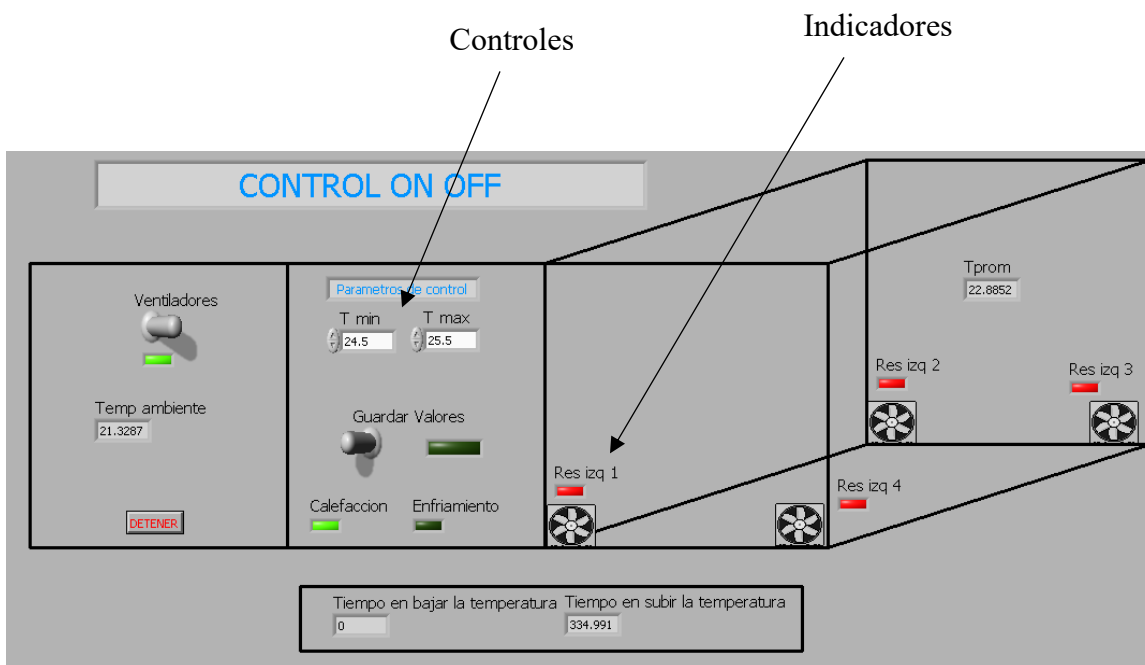


Fig. 3.31. Panel frontal del programa del sistema de control On Off.

3.7 Calibración de termopares

Un termopar es un sensor para medir la temperatura. Se compone de dos metales diferentes unidos en un extremo. Cuando la unión de los dos metales se calienta o enfría se produce un voltaje que es proporcional a la temperatura (efecto Seebeck). Las aleaciones de termopar están comúnmente disponibles como alambre. Para termopares tipo K el error en las lecturas de temperatura es de $2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ [7]. Para mejorar la exactitud fue necesario calibrar cada sensor.

Para calibrar los termopares se utilizó una placa de cobre que tiene en su parte posterior un tubo por el cual circula líquido proveniente de un baño térmico, el cual sirve para controlar su temperatura. Los termopares se fijaron a esta placa por medio de cinta adhesiva y aplicando pasta de alta conductividad para minimizar los efectos de la resistencia térmica de contacto. Tanto la placa como los termopares fueron aislados térmicamente del ambiente con bloques de poliestireno extruido. De igual forma se fijó a la placa de cobre un sensor de platino con una precisión de $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ que sirve como temperatura de referencia.

El software de LabVIEW tiene una función que ayuda a calibrar diferentes tipos de termopar. En esta función se especifica la temperatura de referencia y el software compara este valor con las lecturas de los termopares a calibrar. Este proceso se realizó para temperaturas desde $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, con incrementos de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Una vez que el proceso finaliza el software realiza las correcciones pertinentes para cada termopar. La Figura 3.32 muestra la configuración utilizada para calibrar los termopares

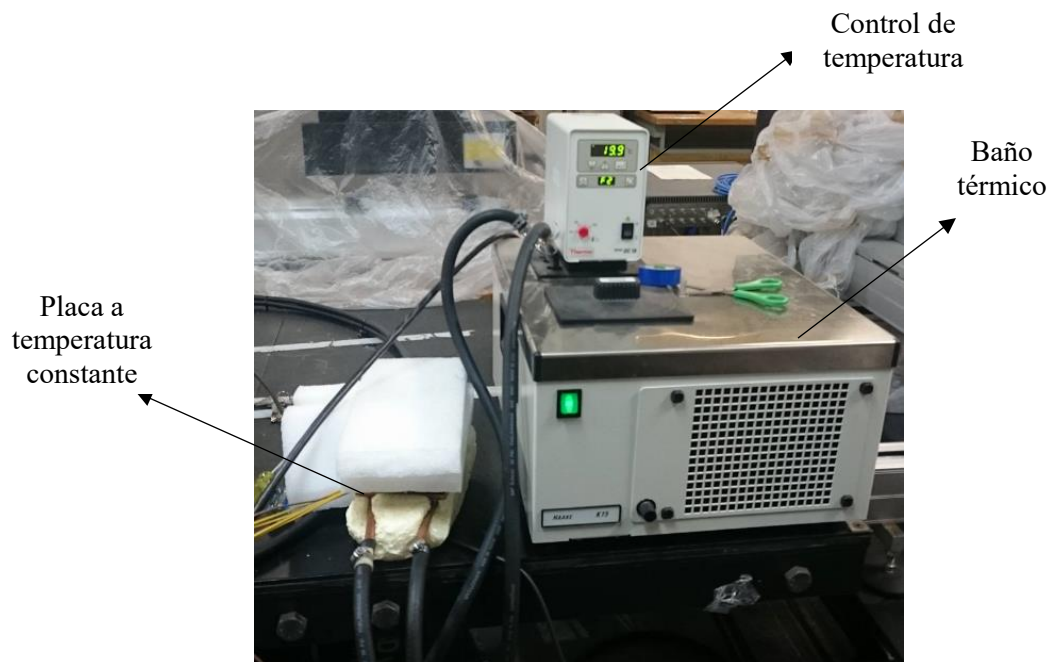


Fig. 3.32. Equipo utilizado para la calibración de los termopares.

3.8 Descripción de las pruebas experimentales

A continuación, se describirán todas las pruebas hechas para caracterizar el funcionamiento de la cámara y el sistema de control, se explicará en que consistieron y porqué se llevaron a cabo.

Prueba 1. - Para probar el correcto funcionamiento de los dispositivos calefactores y comprobar que su uso cotidiano es seguro se instaló un termopar en el interior de la carcasa del dispositivo calefactor para medir la temperatura *cerca* de la resistencia de nicromel, pero no en la superficie de ésta. Se realizaron pruebas bajo las siguientes condiciones:

- Resistencia encendida y ventilador apagado durante 1 hora, posteriormente se enciende el ventilador durante otra hora.
- Resistencia encendida y ventilador encendido durante 1 hora.

Prueba 2. – Con el propósito de probar el comportamiento de los dispositivos calefactores y el funcionamiento del sistema de control On-Off, se colocaron los cuatro dispositivos en una maqueta prototipo que consiste en una caja de cartón de 0.6 m de lado y 3 mm de espesor, el arreglo se puede observar en la Figura 3.33.



Fig. 3.33. Maqueta prototipo para pruebas preliminares.

La prueba en la maqueta prototipo se realizó bajo las siguientes condiciones:

- Duración de 1 hora con 10 minutos.
- Los ventiladores estuvieron funcionando todo el tiempo con el objetivo de uniformizar la temperatura del aire, mientras que las resistencias eléctricas se encendían o apagaban de acuerdo al control de temperatura.
- Se estableció como temperatura máxima 25.5 °C y como temperatura mínima 24.5 °C.

- Cada dispositivo calefactor se ubicó en una esquina de la base de la maqueta prototipo como se muestra en la Figura 3.34.
- Tres termopares realizaron las lecturas de temperatura cada segundo, estos fueron ubicados en la parte posterior de la caja y espaciados uniformemente con respecto a la altura.



Fig. 3.34. Ubicación de los calefactores en la maqueta prototipo.

Prueba 3. – Una vez que se probaron los dispositivos calefactores y el sistema de control, se realizó una prueba de *todos los sistemas* que conforman la cámara de temperatura controlada bajo las siguientes condiciones:

- Duración de 70.6 horas.
- Los ventiladores estuvieron funcionando todo el tiempo con el objetivo de uniformizar la temperatura del aire, mientras que las resistencias eléctricas se encendían o apagaban de acuerdo al control de temperatura.
- Se estableció como temperatura máxima 25.5 °C y como temperatura mínima 24.5 °C.
- Cada dispositivo calefactor se ubicó en una esquina de la base de la cámara como se muestra en la Figura 3.35.
- Tres termopares realizaron las lecturas de temperatura cada segundo, estos fueron ubicados en la parte posterior de la cámara y espaciados uniformemente con respecto a la altura.



Fig. 3.35. Ubicación de los calefactores dentro de la cámara.

3.9 Comportamiento teórico de la temperatura en el interior la cámara

Para obtener el comportamiento teórico de la temperatura en la cámara, se utilizó el software Mathematica para programar el modelo teórico obtenido en el Capítulo 2 bajo las siguientes condiciones:

- Duración de 1 hora.
- La gráfica generada modela el comportamiento de la temperatura en el interior de la cámara cuando las resistencias están encendidas, este comportamiento corresponde a la solución de la ecuación diferencial con generación de energía (Ec. 2.12), también modela el comportamiento de la cámara cuando las resistencias están apagadas y corresponde a la solución de la ecuación diferencial sin generación de energía (Ec. 2.9).
- La temperatura ambiente se considera de 22.22 °C, este valor proviene de los resultados de temperatura ambiente promedio que se obtienen del comportamiento experimental.
- El programa grafica la Ecuación 2.12 cuando la temperatura mínima es alcanzada y grafica la Ecuación 2.9 cuando la temperatura máxima es alcanzada.

Para entender las gráficas que se presentarán en el capítulo de resultados es necesario definir los siguientes conceptos:

- *Banda muerta.* – El termino de banda muerta se refiere al rango de temperatura comprendido entre los valores de encendido y apagado, es decir temperatura mínima y la temperatura máxima, respectivamente. Para todas las pruebas se eligió un ancho de banda muerta de 1 °C.
- *Sobrepaso.* - Es el valor pico máximo medido en porcentaje de la curva de respuesta, que excede a la temperatura máxima.
- *Periodo Total.* – Es el tiempo que transcurre entre valle y valle de la gráfica de temperatura.

Para poder *analizar* el comportamiento de las gráficas de temperatura fue necesario determinar *el tiempo que permanecen encendidos o apagados los dispositivos calefactores*, para esto se desarrolló un programa en Mathematica. A continuación, se describe el procedimiento *para ejemplificar* la obtención de estos tiempos. Para el comienzo del experimento se observa en la Figura 3.36 que la temperatura va aumentando, esto significa que la calefacción está encendida; llamaremos *periodo de calefacción* al lapso de tiempo desde que se enciende la calefacción hasta que se apaga. De acuerdo con la gráfica de la Figura 3.38, el primer periodo representa el *tiempo* que tardó el sistema en alcanzar la temperatura máxima por primera vez, el cual es de 301 segundos. Posteriormente pasa a un periodo de enfriamiento, ver Figura 3.37, donde se apaga la calefacción y comienza a disminuir la temperatura hasta que el sistema llega a la temperatura mínima, esto se logra en 530 segundos. En ese momento se vuelve a encender la calefacción la cual tiene una duración *diferente* a cuando se inició el control.

Para la gráfica de los periodos de calefacción, se puede observar que el primer periodo de tiempo es mayor que los demás, esto se debe a que cuando se inicia el control se parte de un estado en equilibrio, es decir, la temperatura de la cámara es prácticamente igual a la temperatura ambiente como se observa en la Figura 3.36. A la suma del periodo de calefacción y enfriamiento se le llamará periodo total.

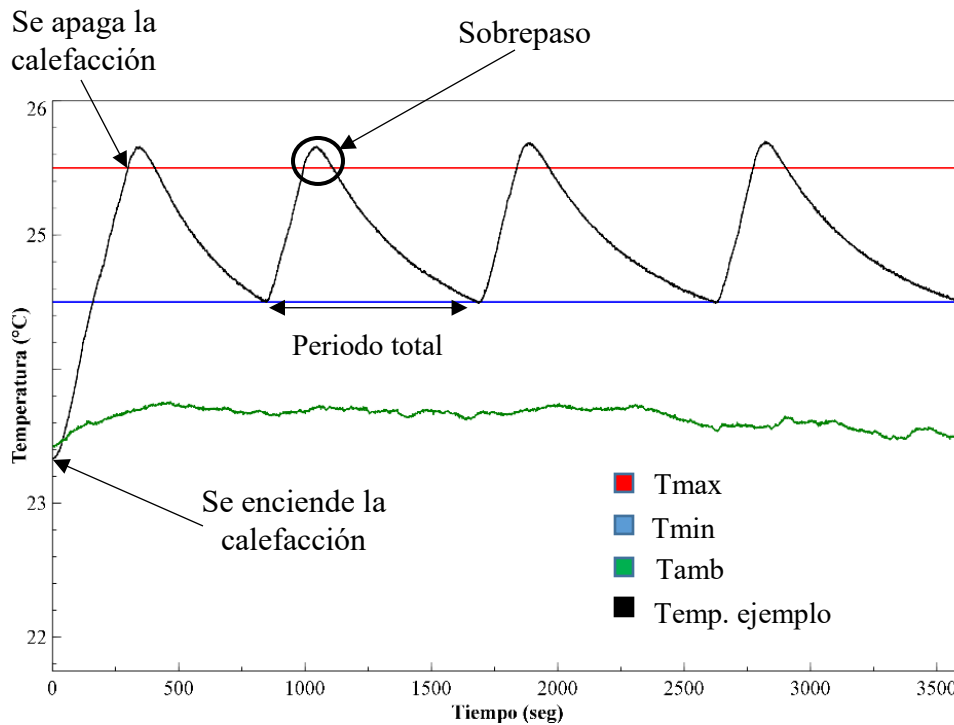


Fig. 3.36. Ejemplo del comportamiento de la temperatura en algún sistema.

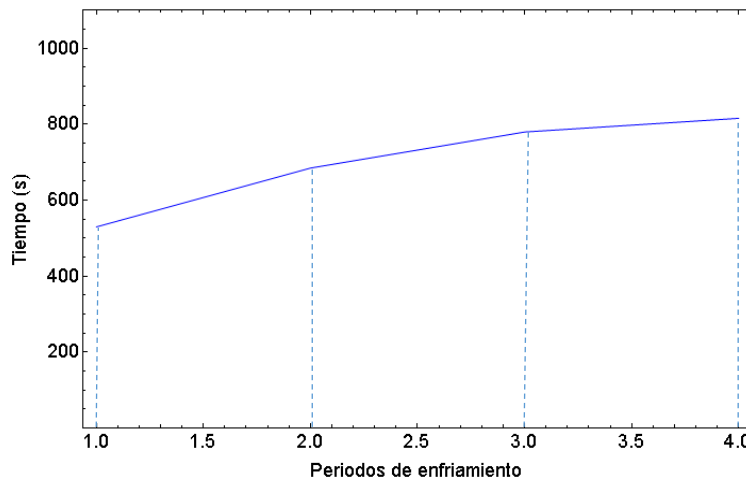


Fig. 3.37. Periodos de enfriamiento.

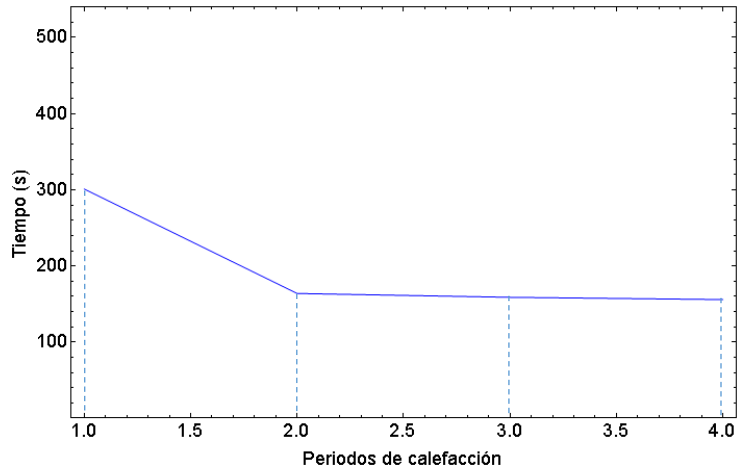


Fig. 3.38. Periodo de calefacción.

Finalmente, para calcular la duración del periodo de oscilación de la temperatura en el interior de la cámara se generó un programa en Mathematica que calcula la transformada rápida de Fourier.

CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas descritas en las secciones 3.8 y 3.9. Este capítulo se divide en cuatro partes principales.

- **Resultados de la medición de temperatura en el laboratorio.** Con el objetivo de conocer la temperatura promedio del lugar donde estará funcionando la cámara.
- **Resultados del funcionamiento de los dispositivos calefactores**
- **Resultados de la prueba del control de temperatura en la maqueta prototipo.**
- **Resultados de la prueba del control de temperatura en la cámara de temperatura controlada.**

4.1 Medición de temperatura en el laboratorio

Se realizaron dos pruebas para conocer el comportamiento de la temperatura dentro del laboratorio. En cada prueba se realizaron mediciones durante más de dos días con un termopar tipo K, ubicado en la región del laboratorio donde va a ser utilizada la cámara de temperatura controlada. Las gráficas que se obtuvieron se presentan en la Figura 4.1a y 4.1b. Se puede observar que la variación máxima de temperatura es de un grado centígrado y dos grados centígrados, respectivamente.

La variación de temperatura durante un día no es significativa, sin embargo, se observa que en el mes de abril se presenta una temperatura máxima de 25.2 °C, la cual desciende a 23.7 °C en el mes de septiembre, esta disminución afectaría a las condiciones bajo las cuales se desarrollarían los experimentos.

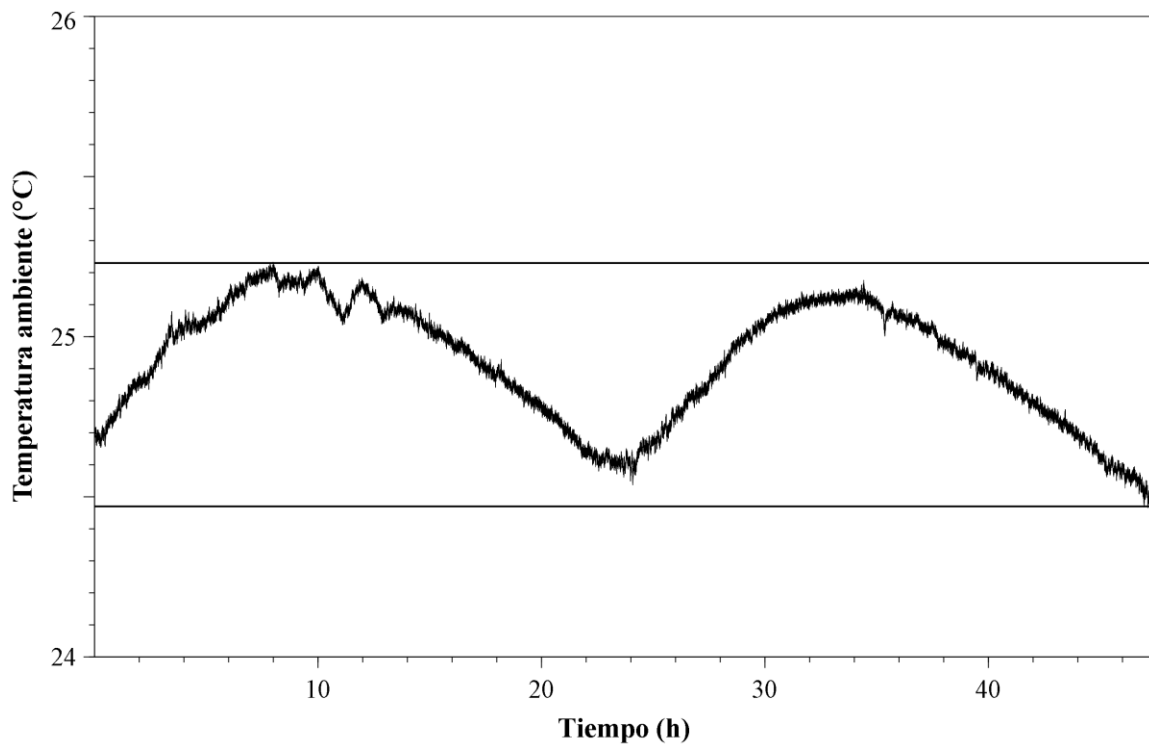


Fig. 4.1a. Temperatura dentro del laboratorio de termofluidos, inicio 18/abril/16.

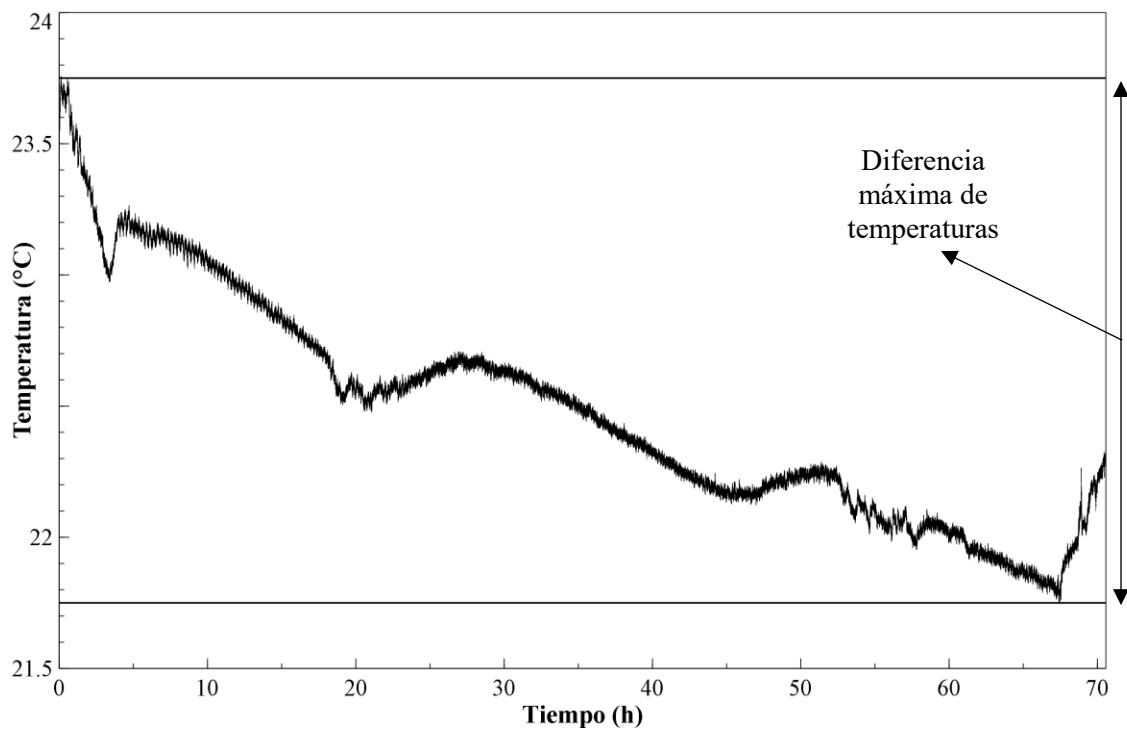


Fig. 4.1b. Temperatura dentro del laboratorio de termofluidos, inicio 5/septiembre/16.

4.2 Resultados del funcionamiento de los dispositivos calefactores.

Cuando los ventiladores están desactivados se presenta una temperatura máxima de $76.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cuando se encienden los ventiladores la temperatura máxima es de $27.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que la temperatura ambiente promedio es de $19.4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Los resultados para ambos casos se muestran en la Figura 4.2a.

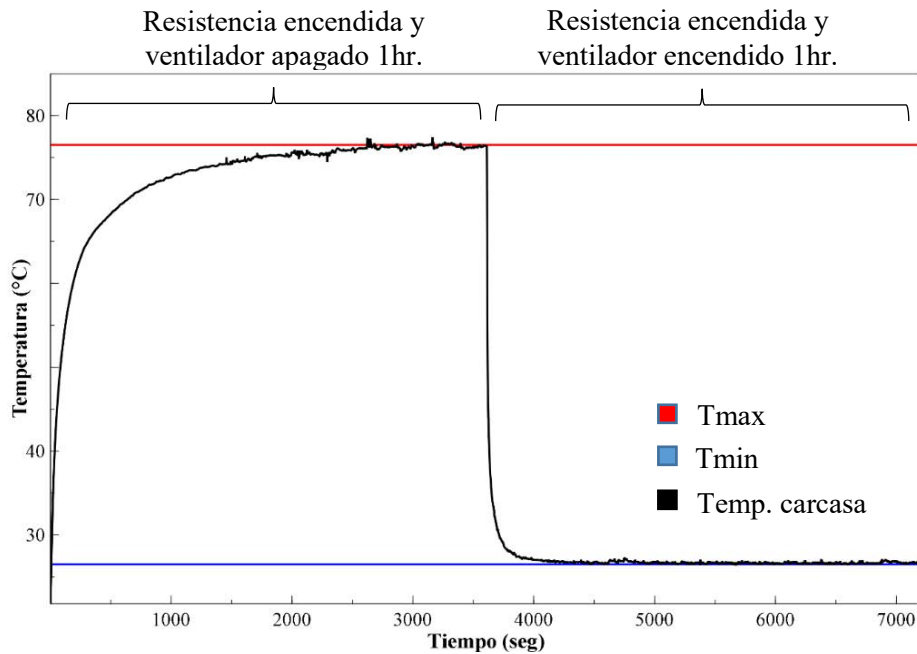


Fig. 4.2a. Comportamiento de la temperatura vs tiempo

Cuando los ventiladores están encendidos y se comienza el experimento de un estado de equilibrio, es decir, a partir de la temperatura ambiente ($21.5\text{ }^{\circ}\text{C}$), se presenta una temperatura máxima de $29.6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Los resultados se muestran en la Figura 4.2b. Se observa que la temperatura se estabiliza hasta que pasa el transitorio tanto de la resistencia eléctrica como del ventilador.

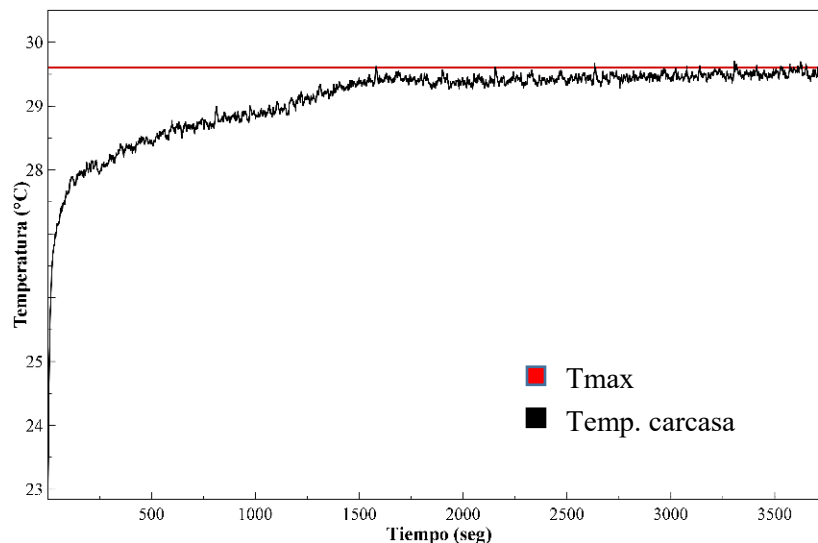


Fig. 4.2b. Comportamiento de la temperatura vs tiempo

4.3 Resultados de la prueba de control de temperatura en la maqueta prototipo

La Figura 4.3 muestra el comportamiento de la temperatura al interior de la maqueta prototipo, como se puede observar la temperatura se encuentra dentro del rango definido por el usuario. Como peculiaridad se observó que la temperatura máxima promedio es de 25.55 °C. Lo que significa un sobrepaso de 0.05 °C. Esto se debe a la inercia térmica de los componentes del dispositivo calefactor. La temperatura dentro de la caja de cartón es la temperatura promedio de los tres termopares.

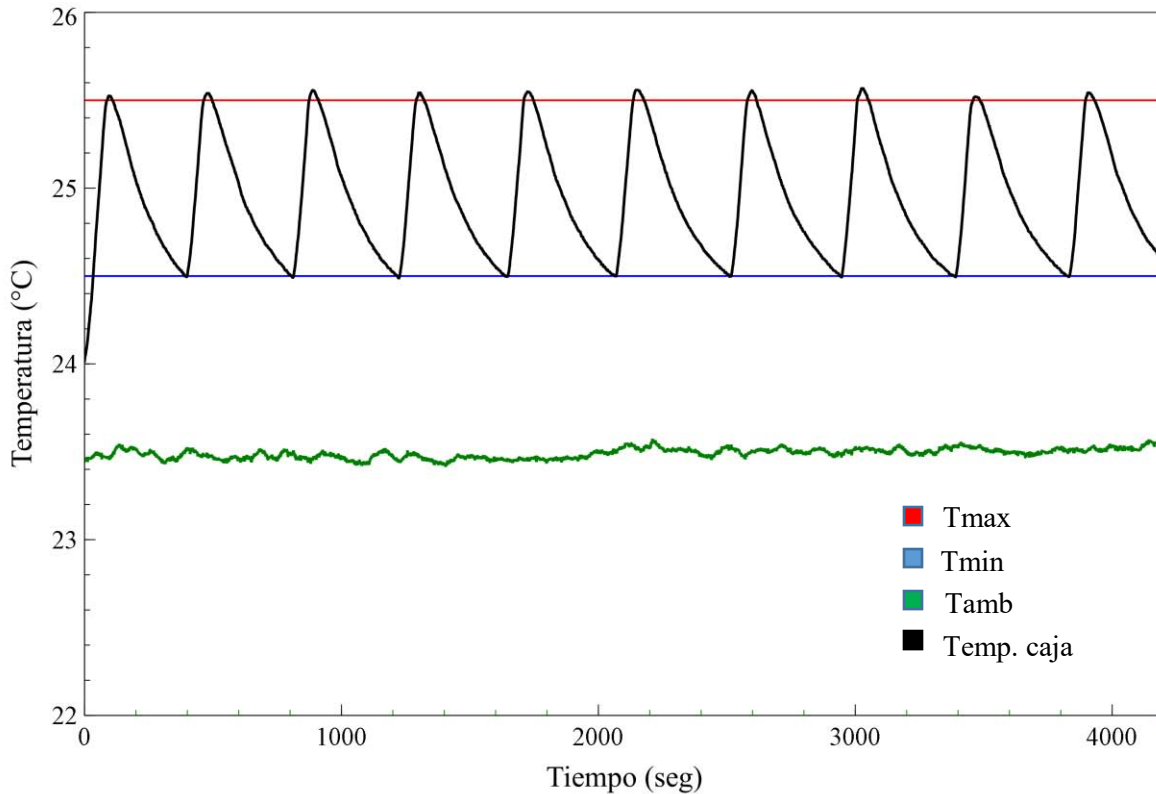


Fig. 4.3. Control de temperatura en la maqueta prototipo

Para esta gráfica:

- El periodo de oscilación promedio de la temperatura es de 428 segundos (*7.13 minutos*)
- La temperatura ambiente promedio es de 23.49 °C.

4.4 Resultados de la prueba de control de temperatura en la cámara

La Figura 4.4 muestra el comportamiento de la temperatura en la cámara durante 70.56 horas.

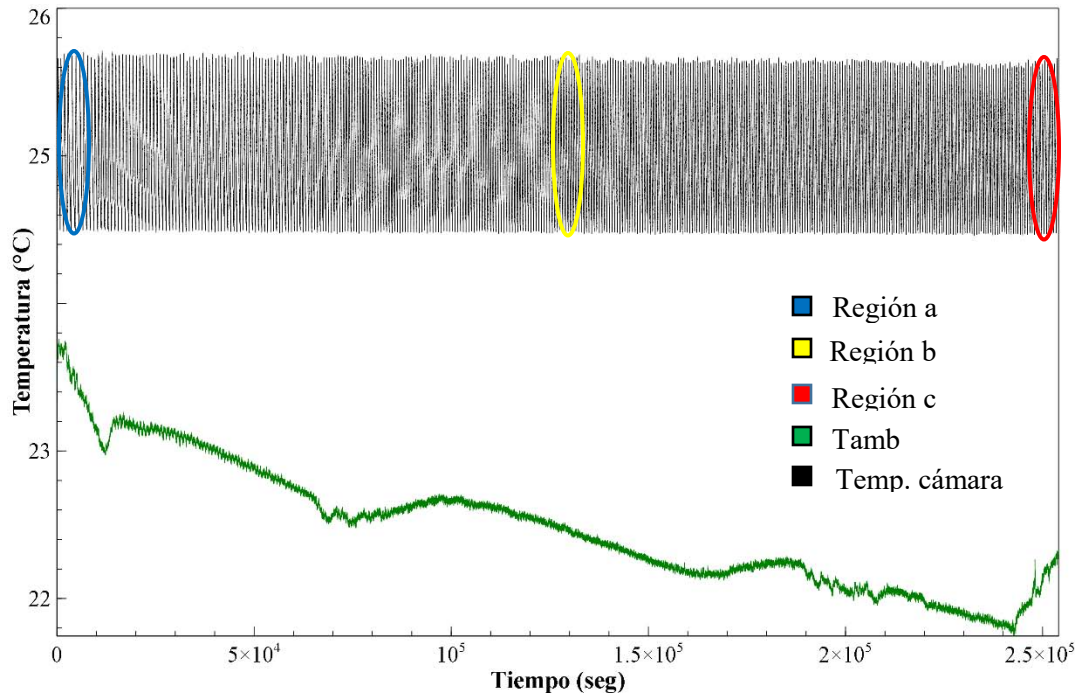
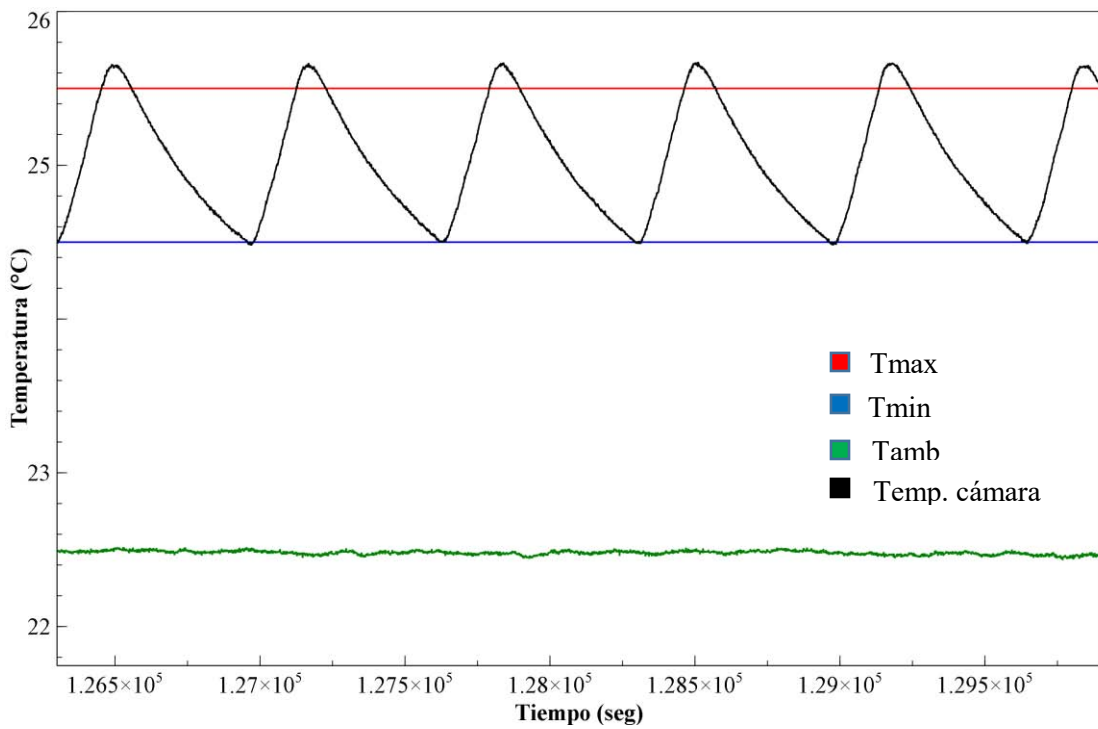
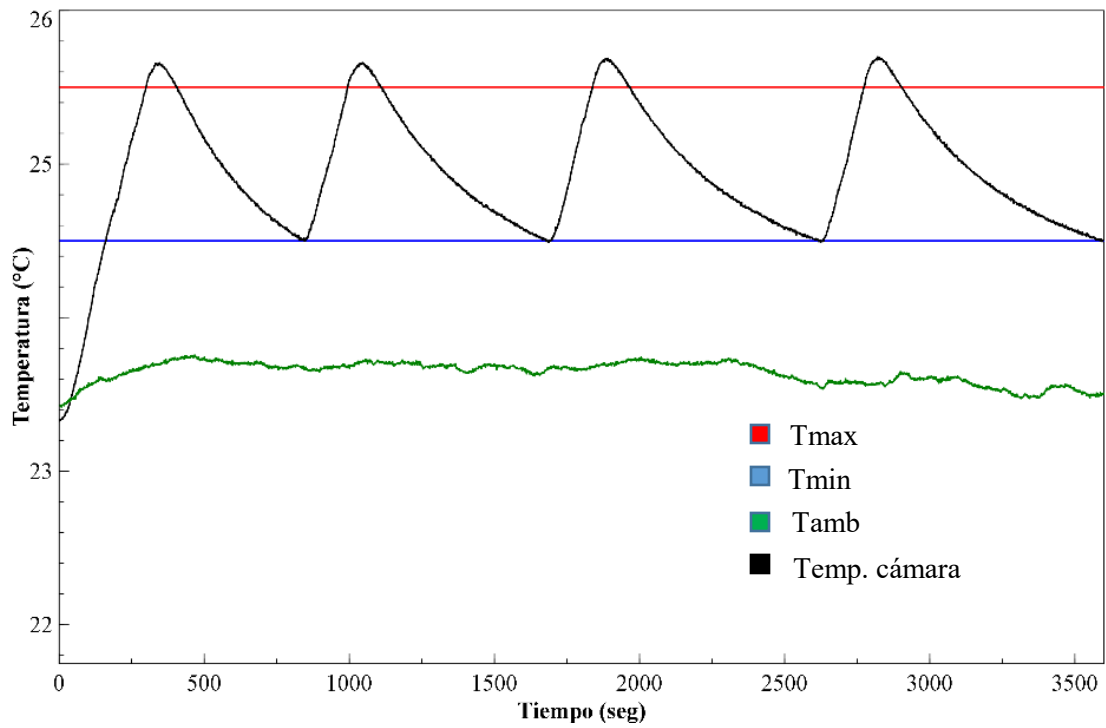


Fig. 4.4. Comportamiento de la temperatura en la cámara durante dos días.

Para una mejor visualización de la Figura 4.4, se muestran porciones del comportamiento de la temperatura en la cámara las cuales tienen una duración de *una hora*. Las regiones analizadas se encuentran al inicio, en medio y al final del experimento, y se muestran en las Figuras 4.5a, 4.5b, 4.5c, respectivamente. Además, estas áreas están resaltadas en color azul, amarillo y rojo en la Figura 4.4. Se eligieron estos lapsos de tiempo para observar como varía el comportamiento de la temperatura en la cámara cuando cambia la temperatura ambiente.



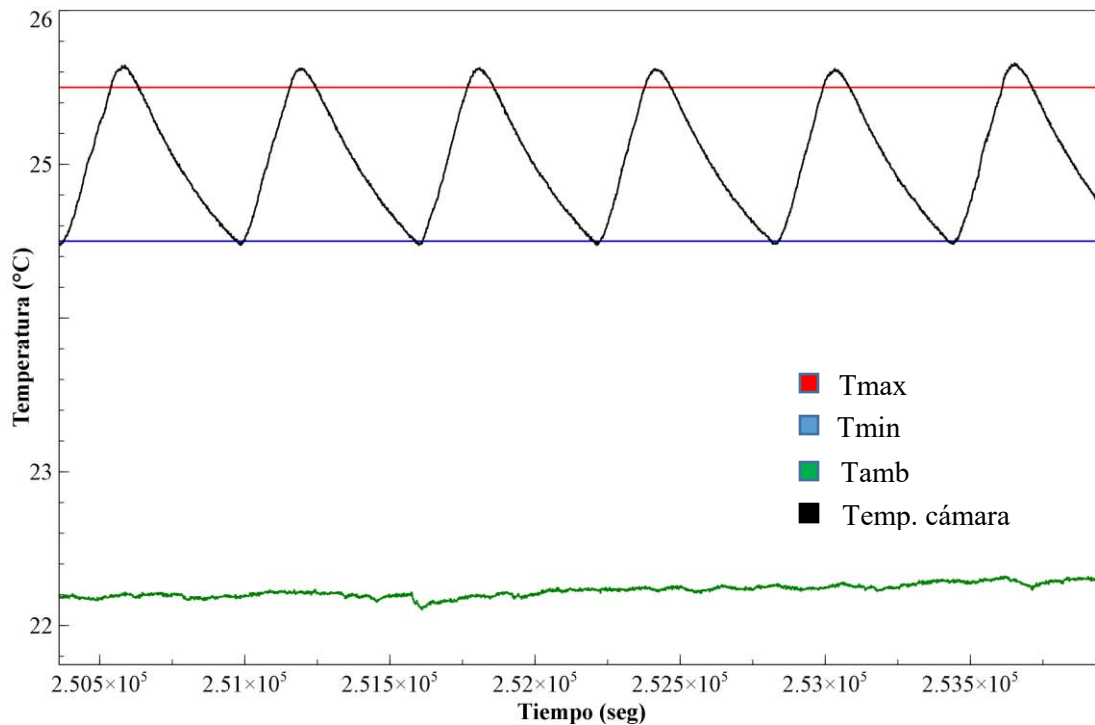


Fig. 4.5c. Región (c), porción de 1 hora al final del comportamiento de la temperatura en la cámara.

De acuerdo con las Figuras 4.5a, 4.5b, 4.5c, se observa que entre mayor es la diferencia de temperatura entre el interior de la cámara y el exterior la frecuencia de oscilación de la temperatura aumenta, por consecuencia se consume más energía. Dicho en otras palabras, a medida que la temperatura ambiente disminuye, el sistema se enfría más rápidamente, por lo tanto, el periodo de tiempo del enfriamiento es más pequeño. La Tabla 4.1 muestra una comparación entre las regiones (a), (b), (c).

- El periodo *promedio* de oscilación de la gráfica de la Figura 4.4 es de 621 segundos (*10.35 minutos*).
- De un total de 254,048 segundos (*70.56 horas*), la calefacción permanece encendida 65,013 segundos (*18.06 horas*) y 189,035 segundos (*52.5 horas*) apagada.
- Para la Figura 4.4, se presenta un sobrepaso promedio de 0.15 °C.

Tabla 4.1. Comparación de las regiones seleccionadas

	Región (a)	Región (b)	Región (c)
Duración promedio del periodo de calefacción	136 seg	165 seg	182 seg
Duración promedio del periodo de enfriamiento	702 seg	499 seg	432 seg
Periodo total de oscilación	838 seg	664 seg	614 seg
Temperatura ambiente promedio	23.64 °C	22.48 °C	22.22 °C
Duración total de calefacción encendida	789 seg	1007 seg	1090 seg
Duración total de calefacción apagada	2811 seg	2593 seg	2510 seg

4.5 Resultados del comportamiento teórico de la temperatura en la cámara

La Figura 4.6 muestra el comportamiento teórico de la temperatura para las condiciones antes mencionadas, el cual se obtuvo del programa de Mathematica.

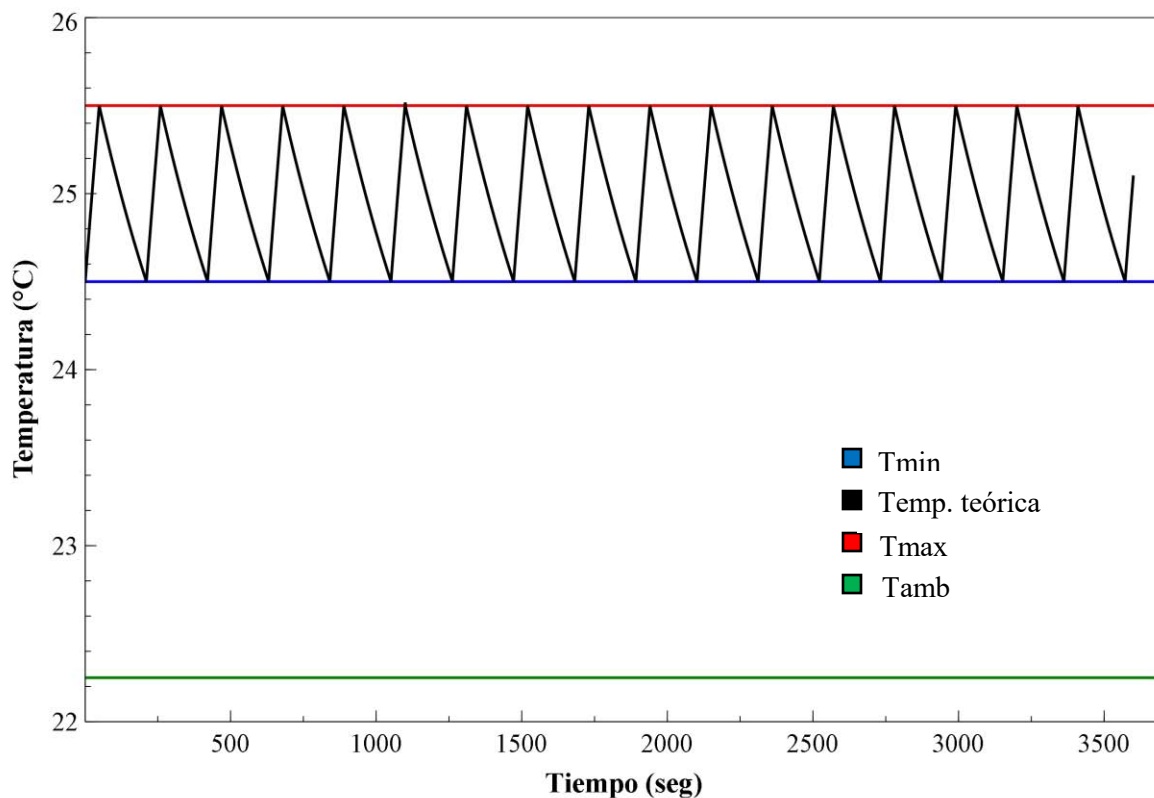


Fig. 4.6. Comportamiento teórico de la temperatura.

En la Tabla 4.2 se presentan las condiciones que fueron tomadas en cuenta para generar la curva teórica en Mathematica, las cuales emulan a las condiciones experimentales. Este grafica tiene las siguientes características:

- El periodo total de oscilación es de 211 segundos.
- De un total de 3600 seg. (1 hr.), la calefacción permanece encendida 829 seg. y 2,771 seg. apagada.
- No existe sobrepaso debido a que es un modelo teórico.
- La duración del periodo de calefacción es de 48 seg y del periodo de enfriamiento es de 163 segundos.

Tabla 4.2. Condiciones y constantes para generar la curva teórica.

Conducción			Temperaturas				
k_p	0.0288	$\frac{W}{mK}$	T_∞	22.22	$^\circ C$	295.37	K
k_a	0.21	$\frac{W}{mK}$	T_{int}	25	$^\circ C$	298.15	K
Espesores			Convección				
L_p	51	mm	h_{int}	20	$\frac{W}{m^2K}$	Forzada	
Área			h_{ext}	5	$\frac{W}{m^2K}$	Natural	
$A_p = A_a$	0.77^2	m^2					

Para justificar el uso de los coeficientes convectivos interior y exterior, se presenta la Tabla 4.3. la cual muestra el valor de la R_t para diferentes valores de coeficientes convectivos. Se observa que la variación del valor de resistencia térmica es muy pequeña modificando los valores de los coeficientes convectivos.

Tabla 4.3. Variación de la resistencia térmica respecto a los coeficientes convectivos.

$h_{int} = 20$		$h_{ext} = 5$	
h_{ext}	R_t	h_{int}	R_t
5	0.6913	30	0.6856
20	0.6407	50	0.6811
40	0.6322	100	0.6778

4.6 Criterio de comparación

Para comparar los resultados experimentales con el modelo teórico, se extrajeron datos de un periodo de tiempo de la prueba de control de temperatura de la cámara. Este periodo corresponde del segundo 174,130 al segundo 177,730, es decir una hora.

Idealmente el periodo de oscilación de la temperatura en el interior de la cámara sería constante si la temperatura ambiente no cambia, pero como se muestra en las Figuras 3.37 y

3.38 esto no es así. Por lo anterior, se decidió seleccionar una región en la que los periodos de calefacción y enfriamiento presenten un comportamiento lo más constante posible para ambos casos, como se puede ver en la Figura 4.7. donde se observa el comportamiento de los periodos de calefacción y de enfriamiento respecto al tiempo.

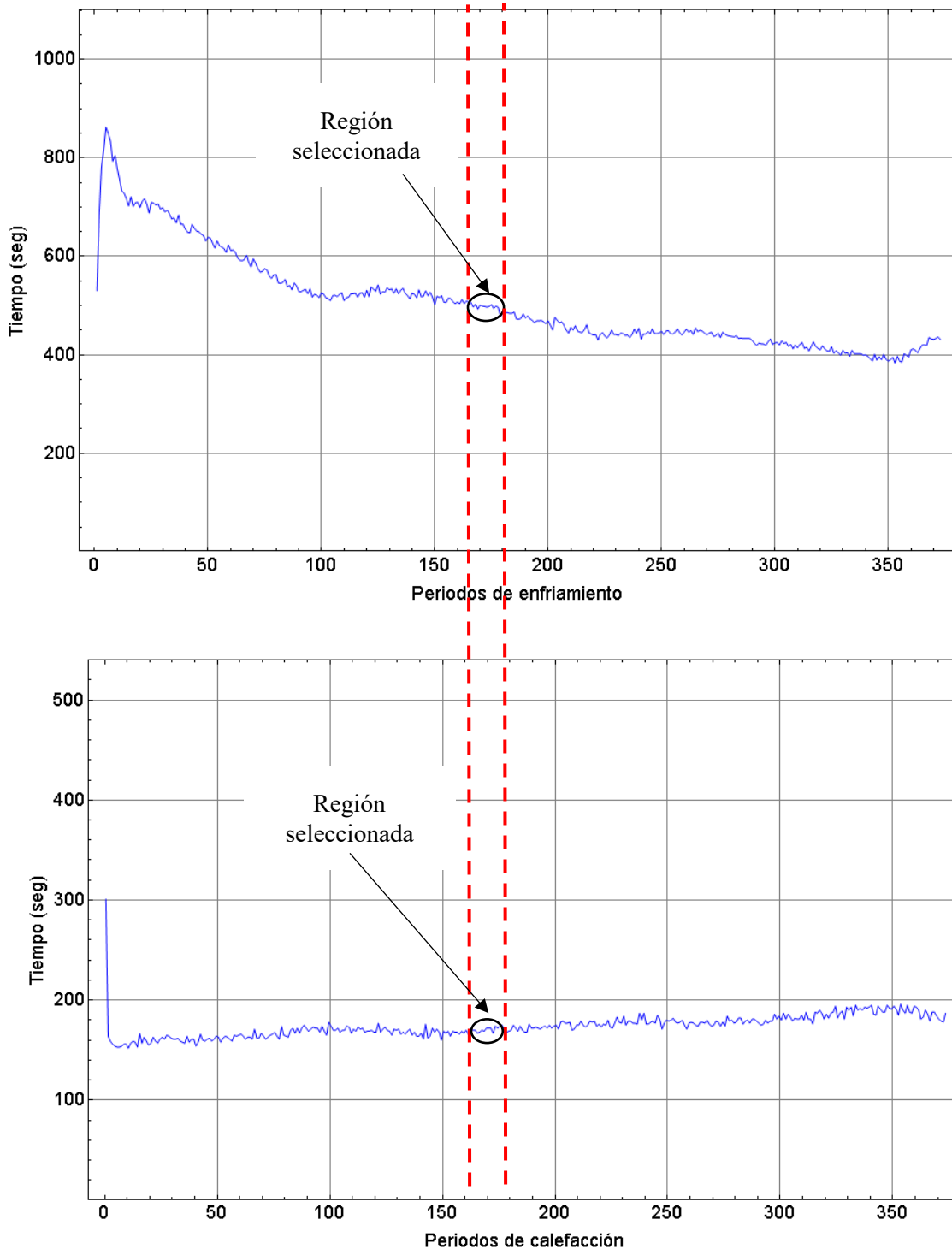


Fig. 4.7. Selección de la región para analizar el comportamiento de la temperatura.

La gráfica de la Figura 4.8 muestra el comportamiento de la temperatura durante *1 hora* (3600 seg) dentro de la región seleccionada.

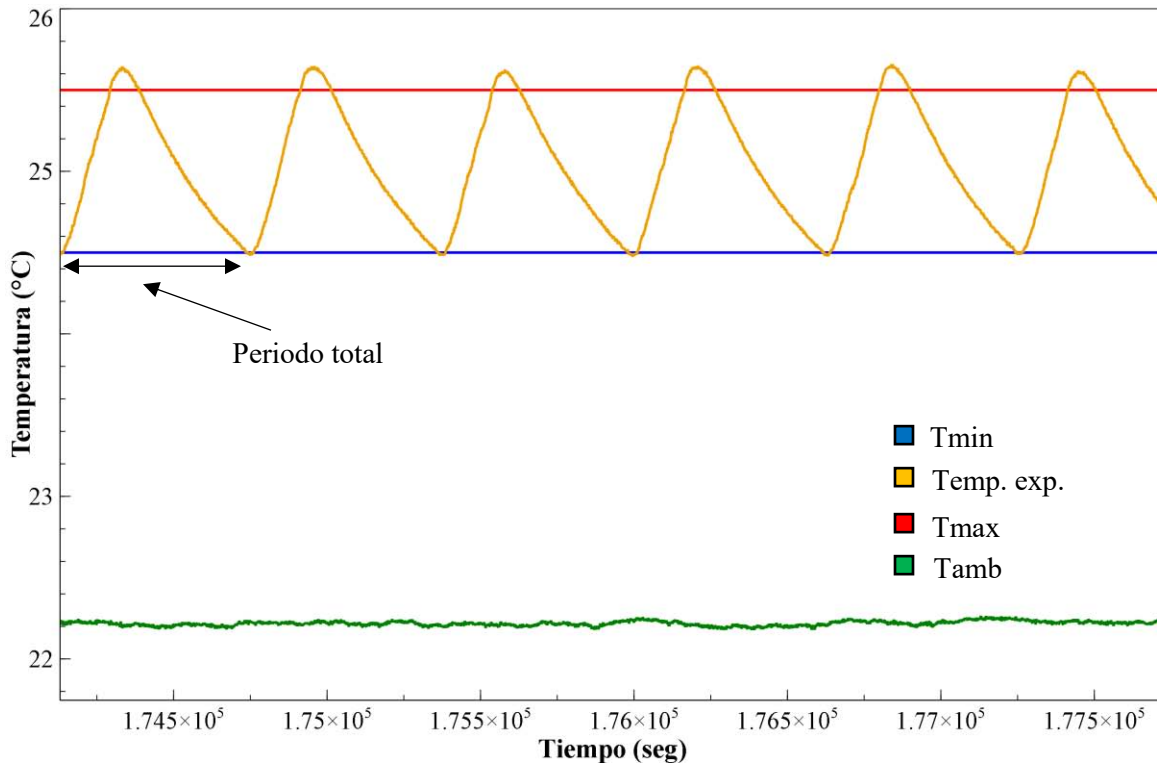


Fig. 4.8. Región de temperatura a analizar.

Para la región de temperatura seleccionada:

- El periodo total de oscilación es de 624 segundos de los cuales 177 segundos es la duración promedio del periodo de calefacción mientras que la duración promedio del periodo de enfriamiento es de 447 segundos.
- La temperatura ambiente tiene un valor promedio de **22.22 °C**.

4.7 Comparación de resultados experimentales con el modelo teórico

La Figura 4.9 muestra el comportamiento teórico y experimental de la temperatura en el interior de la cámara. La Tabla 4.4 resume los resultados obtenidos de las dos curvas. Se puede observar que el periodo de oscilación de la temperatura del modelo teórico es 3 veces mayor que la temperatura experimental.

Los periodos de calefacción del experimento tienen una duración mayor que los periodos del modelo teórico, esto podría deberse a la contribución de los siguientes factores:

- El sobrepaso hace que el periodo de oscilación de la temperatura experimental sea mayor.
- El enfriamiento en la prueba experimental ocurre más lentamente debido a que existe resistencia térmica de contacto entre los materiales de construcción, además de que el modelo teórico no contempla esta contribución.
- La respuesta experimental de la temperatura se produce de manera muy lenta, debido al transitorio del dispositivo calefactor como se observa en la Figura 4.2b, lo cual no se puede considerar en el modelo teórico. Esto da como resultado un periodo de oscilación más grande.

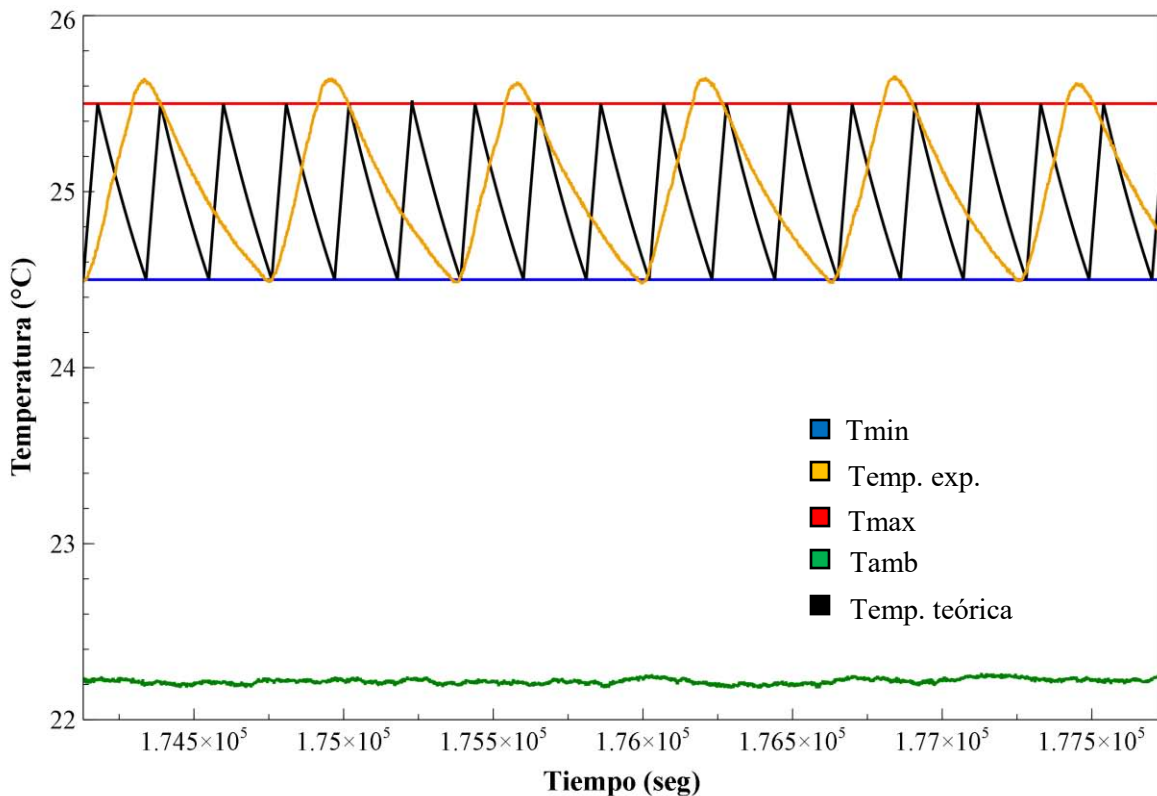


Fig. 4.9. Comparación entre el comportamiento teórico y el experimental.

Tabla 4.4. Resultados de la curva teórica y real

	Curva Experimental	Curva teórica
Duración del periodo de calefacción	177 seg	48 seg
Duración del periodo de enfriamiento	447 seg	163 seg
Periodo total	624 seg	211 seg
Duración total de calefacción encendida	1058 seg	829 seg
Duración total de calefacción apagada	2542 seg	2771 seg

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

Del funcionamiento de la cámara

De acuerdo con la Figuras 4.1a y 4.1b, a pesar de que la variación de temperatura durante un día es menor a un grado, para más tiempo puede ser hasta de dos grados centígrados, por esta razón se demuestra que es necesaria esta cámara para poder realizar experimentos con condiciones controladas en el laboratorio de Termofluidos.

En las gráficas del comportamiento de la temperatura al interior de la cámara se puede observar que la temperatura muestra un sobrepaso, es decir, al llegar a la temperatura máxima (25.5°C) y apagarse los dispositivos calefactores, existe inercia térmica que hace que se alcance una temperatura de 25.65 °C, esto puede deberse a que al desactivarse las resistencias eléctricas estas siguen estando calientes y liberan un poco más de calor, además de que la pérdida de calor en la cámara es menor debido al aislamiento utilizado.

Esto puede solucionarse fácilmente introduciendo una condición en la que el programa de control desactive los dispositivos calefactores a los 25.35 °C.

El sistema es muy sensible a cambios de temperatura en el exterior, lo cual dificulta comparar el comportamiento teórico con el experimental.

El criterio utilizado para la comparación de las curvas muestra que el comportamiento teórico presenta más periodos de calefacción y enfriamiento que el experimental, aproximadamente *tres* veces más. Esto puede deberse a la *contribución* de los siguientes factores:

- La incertidumbre en los valores de los coeficientes convectivos e incluso en los coeficientes de conducción que proporciona el proveedor de los materiales.
- La resistencia térmica de contacto existe, sin embargo, el modelo teórico desarrollado no contempla esta contribución debido a que se desconoce su valor.

El análisis de elemento finito para la base de la cámara arroja que el desplazamiento ocasionado por la deformación del acrílico cuando se le colocan 20 kg de peso es de 1.176 cm, este desplazamiento es pequeño y no representa ningún problema para la funcionalidad de la cámara, además, al colocarse el material de aislamiento se proporciona mayor rigidez.

Los resultados del funcionamiento de los dispositivos calefactores arrojan una temperatura máxima de 76.5 °C la cual resulta segura para el funcionamiento cotidiano del dispositivo calefactor.

Conclusiones generales

Se diseñó, construyó y caracterizó una cámara de temperatura controlada para uso en el laboratorio de Termofluidos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, ofreciendo un equipo robusto y funcional. Se desarrolló un control On-Off que mantiene la temperatura en los intervalos de operación para el desarrollo de los experimentos de sincronización térmica.

Con la construcción de la cámara y los experimentos realizados se pudieron lograr los objetivos planteados. Por lo que, con base en los resultados obtenidos en las gráficas de las pruebas tanto de la maqueta prototipo como de la cámara, se puede concluir que un control On-Off proporciona una buena respuesta para la aplicación.

El sistema presenta una menor pérdida de calor al tener un aislamiento de poliestireno extruido, con respecto a la maqueta prototipo, es decir, el periodo de oscilación es mayor para la cámara que para la maqueta prototipo.

Este desarrollo favorecerá a la infraestructura del laboratorio de Termofluidos y representa un punto de partida para próximas tesis que busquen mejorar el funcionamiento de la cámara.

TRABAJO A FUTURO

- Con la información del proyecto se podría desarrollar, construir y caracterizar un sistema de enfriamiento, para poder realizar el control de temperatura por debajo de la temperatura ambiente.
- Obtener un valor de resistencia térmica de contacto entre en acrílico y el poliestireno y determinar los coeficientes convectivos tanto en el interior de la cámara como en el exterior para predecir mejor el comportamiento de la temperatura en el modelo teórico.

APÉNDICE A

Tabla A-1 Datos técnicos de aislante

eko-therm



Poliestireno Extruido (XPS)

Datos técnicos*

PROPIEDAD	VALOR PARA TIPO IV	VALOR PARA TIPO VI	ASTM
Conductividad térmica máxima a temperatura media de 24 °C (75 °F)	0.0288 W/m·K (0.20 BTU In/h·ft ² ·°F)	0.0288 W/m·K (0.20 BTU In/h·ft ² ·°F)	C-518
Resistencia térmica mínima a 25 mm (1") de espesor a temperatura media de 24 °C (75 °F)	0.88 m ² ·K/W (5 ft ² ·h·°F/BTU)	0.88 m ² ·K/W (5 ft ² ·h·°F/BTU)	C-518
Resistencia a la compresión mínima al 10% de deformación	173 kPa (25 psi)	276 kPa (40 psi)	D-1621
Resistencia a la flexión mínima	345 kPa (50 psi)	414 kPa (60 psi)	C-203
Absorción máxima de agua por inmersión total en volumen	0.3 %	0.3 %	C-272
Permeancia máxima al vapor de agua a 25 mm (1") de espesor	86 ng/Pa·s·m ² (1.5 perm)	63 ng/Pa·s·m ² (1.1 perm)	E-96/E-96M
Estabilidad dimensional máxima (cambio en dimensiones)	2 %	2 %	D-2126
Propagación de flama	5	5	E-84
Desarrollo de humo	45.18	45.18	E-84
Índice de oxígeno mínimo en volumen	24 %	24 %	D-2863
Densidad mínima	25 kg/m ³ (1.5 lb/ft ³)	29 kg/m ³ (1.8 lb/ft ³)	D-1622

* Las propiedades físicas del producto presentado en este documento representan valores medios típicos, obtenidos de acuerdo con los métodos de prueba aceptados y están sujetos a las variaciones normales de fabricación. Se dan como servicio técnico y están sujetos a cambios sin previo aviso.

PRESENTACIÓN	ANCHO	LARGO	ESPESORES
Borde recto	1.22 m (4 ft)	2.44 m (8 ft)	25, 38, 51 mm (1, 1½, 2 in)
Traslapado 			

Tabla A-2 Datos técnicos de Acrílico

PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

TEMPERATURA DE FUSIÓN (°C):	> 280
TEMPERATURA DE EBULLICIÓN (°C):	---
TEMPERATURA DE INFLAMACIÓN (°C):	---
TEMPERATURA DE AUTOIGNICIÓN (°C):	---
DENSIDAD RELATIVA (AGUA = 1):	1.18 g/cm ³
DENSIDAD DEVAPOR (AIRE = 1):	---
REACTIVIDAD ENAGUA:	No reacciona.
PESO MOLECULAR:	---
ESTADO FÍSICO:	Sólido.
COLOR:	Incoloro.
OLOR:	Inodoro.
PORCENTAJE DEVOLATILIDAD:	0%
SOLUBILIDAD ENAGUA:	0 gr/100 ml de agua.
VELOCIDAD DE EVAPORACIÓN (BUTILACETATO = 1):	---
PRESIÓN DEVAPOR (mmHg a 20 C):	---

Tabla A-3 Datos técnicos del soporte de polímero

Patented Sorbothane® polymer mount absorbs (57% absorption efficiency) and dissipates energy (70% specific damping). Reduces vibration to other components by isolating the vibrations within the material while absorbing multi-directional forces. Can stabilize equipment weighing up to 152 pounds (hemisphere mounts), 108 pounds (¼-20 male bumper mounts), or 48 kg (M6 male bumper mounts). Hemisphere foot mounts measure 50mm dia. (top) x 26mm thick. Top side of hemisphere is tacky while the other side is felt. ¼-20 or M6 male bumper mounts measure 38.1mm dia. x 25.4mm thick. Threaded screw measures 12mm long. All models have a hardness durometer value of 70. Each package contains 4 mounts.


Sorbothane® Mounts



Specifications

Load Capacity (lbs)	18-26 per bumper
Diameter (mm)	38.1
Note	Thread Type: M6
Thread Length (mm)	12.7
Construction	Sorbothane
Thickness (mm)	25.4
Type	Metric
RoHS	Compliant

Tabla A-4 Valores comerciales para la resistencia de nicromel

www.mikai.com.mx Tel. (81) 8374-3217, (81) 8374-6021				
INFORMACION TECNICA ALAMBRES NiCrome 80% - 20 % (valores tomados a temperatura de 20°C)				
Alambre NICROM 80-20				
CALIBRE	DIAMETRO		RESISTENCIA	
	SWG	MM	PULG MIL	OHMS/MTO
2	5.4000	0.2575	0.0324	3.50
4	5.1900	0.2043	0.0515	5.70
5	4.2600	0.1819	0.0647	7.20
6	4.1200	0.1622	0.0820	9.00
7	3.6700	0.1445	0.1033	11.00
8	3.2600	0.1283	0.1302	14.00
9	2.9100	0.1146	0.1643	18.00
10	2.5900	0.1020	0.2073	23.00
11	2.3000	0.0906	0.2614	29.00
12	2.0300	0.0807	0.3280	36.00
13	1.8300	0.0720	0.4170	46.00
14	1.6300	0.0642	0.5250	58.00
15	1.4500	0.0571	0.6590	73.00
16	1.2900	0.0508	0.8330	92.00
17	1.1500	0.0453	1.0490	116.00
18	1.0200	0.0402	1.3250	146.00
19	0.9100	0.0358	1.6690	185.00
20	0.8100	0.0319	2.0990	232.00
21	0.7200	0.0283	2.6400	293.00
22	0.6400	0.0252	3.3460	370.00
23	0.5700	0.0224	4.1980	466.00
24	0.5100	0.0201	5.3140	589.00
25	0.4600	0.0181	6.7240	742.00
26	0.4040	0.0159	8.5000	941.00
27	0.3610	0.0142	10.7000	1179.00
28	0.3200	0.0126	13.5000	1497.00
29	0.2870	0.0113	16.8000	1863.00
30	0.2540	0.0100	21.1000	2330.00
34	0.1600	0.0063	54.2000	5995.00
36	0.1270	0.0050	86.0000	9515.00
38	0.1020	0.0040	134.4000	14814.00
40	0.0790	0.0031	223.8000	24656.00
42	0.0640	0.0025	344.1000	37915.00

A-5 Datos técnicos de la abrazadera de palanca

HORIZONTAL HANDLE TOGGLE CLAMPS



10

Series 201

- Cross Ref.: DE-STA-CO Series 205
- Holding Capacity: 60 lbs. (27 kg)
- Weight: 0.09 lb. (40 g)
- Bar opens: 90°, Handle 80°
- Spindle Supplied: GH-SA-08034 (Nylon)

This compact clamp is the most economical horizontal toggle clamp. Most suitable for holding down sheet metal or circuit boards. Many spindle bar and base combinations available.

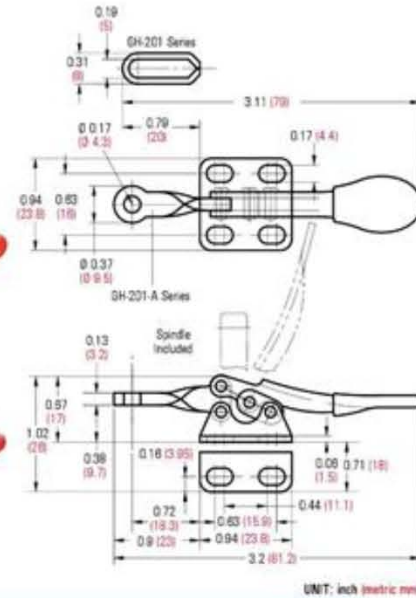
Model	Description
GH-201	U-Bar, Flanged Base
GH-201-SS	Stainless Steel Model of GH-201
GH-201-I	U-Bar, Straight Base
GH-201-L	U-Bar, Left Hand Flanged Base
GH-201-R	U-Bar, Right Hand Flanged Base
GH-201-A	Fixed Bar, Flanged Base
GH-201-ASS	Stainless Steel Model of GH-201-A
GH-201-AI	Fixed Bar, Straight Base
GH-201-AL	Fixed Bar, Left Hand Flanged Base
GH-201-AR	Fixed Bar, Right Hand Flanged Base



GH-201



GH-201-A

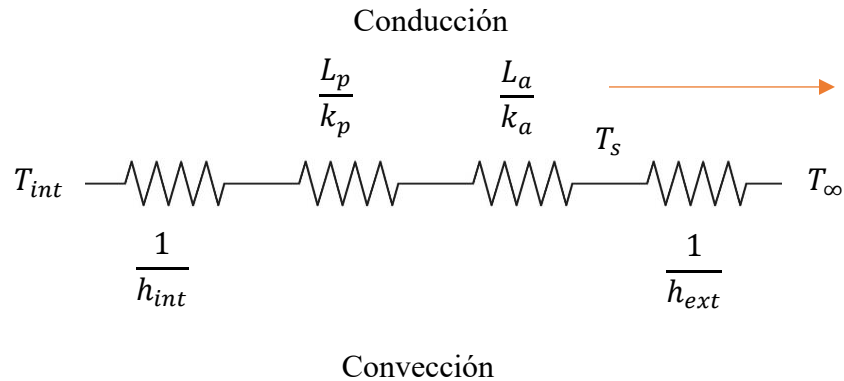


APÉNDICE B

Energía debido a la radiación de las paredes de la cámara

Una vez que se conoce la pérdida de calor de las paredes se puede determinar su temperatura. Se consideran los siguientes valores para el cálculo de la radiación emitida

Convección		
h_{ext}	5	$\frac{W}{m^2K}$
Área		
A_s	0.77^2	m^2
Temperaturas		
T_∞	12	$^\circ C$



$$q_{sale} = 18.8 \text{ W} = h_{ext} * A_s * walls * (T_s - T_\infty)$$

Despejando la temperatura de la pared de acrílico T_s

$$T_s = \frac{q_{sale}}{h_{ext} * A * walls} + T_\infty = \frac{18.8}{20 * 0.77^2 * 5} + 12 = 12.3035 \text{ } ^\circ C$$

De acuerdo con la Ecuación 1.4 para calcular la transferencia de calor que debido a la radiación.

$$q_{rad} = \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_{alr}^4) = 0.9 * 0.77^2 * 5.67 * 10^{-8} * (12.3^4 - 12^4)$$

$$q_{rad} = 6.5939 * 10^{-5} \text{ W}$$

Referencias

- [1] <https://www.memmert.com/fileadmin/products/documents/categories/BR-Camaras-Climaticas-espanol-D10023.pdf>
- [2] <http://www.grupomayasa.com.mx/cat%C3%A1logos/>
- [3] http://www.sevmexico.com/catalogos/CAMARAS_140312.pdf
- [4] Frank P. Incropera y David P. De Witt, “Fundamentos de transferencia de calor”, 4ª Edición, Editorial Prentice Hall, México, 1999.
- [5] W. Bolton, “MECATRÓNICA SISTEMAS DE CONTROL ELECTRÓNICO EN INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA”, 2ª Edición, Editorial Alfaomega, México, 2001.
- [6] <http://www.edmundoptics.com/optomechanics/optical-tables-breadboards/optical-breadboard-accessories/sorbothane-mounts/1618/>
- [7] <http://mx.omega.com/temperature/Z/pdf/z218-220.pdf>