



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO Y MANUFACTURA DE UN
MODELO EXPERIMENTAL PARA EL
ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA
DE CALOR EN UN MURO DE
RESGUARDO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Ingeniera Mecánica

PRESENTA:

Harumi Anaid Ortíz Gutiérrez

DIRECTOR DE TESIS :

Dr. Rafael Chávez Martínez

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019





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.

Agradecimientos

A mis padres Manuel y Coral por el apoyo y cariño incondicional brindando a lo largo de mi vida, por enseñarme a ser siempre la mejor versión de mí, superando todas las adversidades.

A mi hermana Hiromi por ser la mejor compañera que la vida pudo brindarme, recordándome que todos los días se aprenden cosas nuevas.

A Pablo mi compañero y amigo por enseñarme a trabajar en equipo, por toda la motivación mental y emocional durante la carrera.

A mis amigos por brindarme gratos momentos de alegría, en especial a Alejandro y Mariana quienes durante años han estado a mi lado apoyándome cuando más lo necesito.

A mi asesor el Dr. Rafael Chávez, por confiar en mí durante el desarrollo del proyecto, brindándome oportunidades de crecimiento en mi formación como ingeniera, por su gran apoyo y orientación.

Al Ing. Alfonso Samano, por sus acertadas observaciones y sus valiosas aportaciones para mejorar el proyecto.

Al Instituto de Fisiología Celular, en particular al Taller de mantenimiento a cargo del Ing. Aurey Galvan Lobato y el Ing. Manuel Ortíz Benavides, por el apoyo y asesoría técnica brindada.

Al Ing. Juan Manuel Barbosa y la Ing. Ivette Rosas Arciniega, personal de la Unidad de Cómputo del Instituto de Fisiología Celular por la asesoría técnica brindada para el desarrollo del proyecto.

A la UNAM, por permitirme desarrollarme de manera académica y deportiva en sus instalaciones; a todos los docentes que hicieron posible mi formación con su noble tarea de transmitir sus conocimientos. La oportunidad de conocer a magníficas personas en la Alberca Olímpica quienes me demostraron que todo es posible de lograr con disciplina y perseverancia.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Objetivo	2
1.2. Antecedentes	3
1.2.1. Aplicación del muro de resguardo	7
2. Diseño	11
2.1. Planteamiento del problema	11
2.2. Restricciones de diseño	13
2.3. Diseño de elementos	14
2.3.1. Placa de calentamiento	14
2.3.2. Estructura de soporte	26
3. Manufactura y ensamble	39
3.1. Placa de calentamiento	39
3.2. Estructura de soporte	42
3.3. Unión entre elementos	47
4. Instrumentación	55
4.1. Instalación de termopares	55
4.2. Programación y calibración	60
5. Conclusiones	64
A. Análisis nodal	66
Bibliografía	68

Capítulo 1

Introducción

La crisis del petróleo de 1973, es un importante precedente de las preocupaciones contemporáneas sobre el uso de los recursos energéticos y la dependencia de los combustibles fósiles, situación que desencadenó la investigación y el desarrollo de fuentes de energía renovables, tecnologías mejoradas y experimentos sociales que tendrían un impacto duradero en los campos político y arquitectónico tanto en América como en Europa.

El muro de resguardo consiste en colocar un muro extra a cierta distancia del muro interno de la casa, creando un canal donde entra el aire libremente **Fig.1.1**. El muro exterior al estar continuamente bajo la radiación solar, crea un flujo de aire interno debido a la diferencia de densidades, generando una ventilación natural, renovando el aire del interior del canal, minimizando así el calor transferido al interior de la casa o edificio. Este gradiente de densidades es provocado por la variación de temperatura dentro del canal.

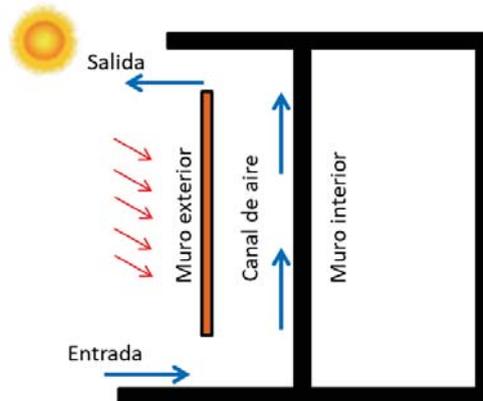


Figura 1.1: Esquema de un muro de resguardo.

Este dispositivo se implementó como una innovación arquitectónica cuyo objetivo es lograr la mayor eficiencia energética para el acondicionamiento al interior de una casa. Fue inventado en la década de los 60s, pero en los años 70 se desarrolló aún más, se usaron en varias casas y se analizaron, en gran parte, por revistas de arquitectura; cuando, en la década de los 80s, los combustibles fósiles y los precios de la energía disminuyeron en Europa, aparentemente se perdió el interés en investigar la integración del muro de resguardo. [1] Se observa que existe una relación entre la demanda de energía y la crisis financiera lo que provoca interés por aumentar la eficiencia energética reduciendo costos.

El incentivo actual, para retomar el estudio del muro de resguardo, desde la perspectiva de la ingeniería, no obedece a una crisis de petróleo, como ocurrió en la década de los 70s, sino a la severa crisis ambiental que enfrenta nuestro planeta; es dar un impulso científico y tecnológico, para tomar conciencia y generar soluciones que ayuden al medio ambiente sin sacrificar el confort humano.

1.1. Objetivo

Diseñar y construir un dispositivo para estudiar experimentalmente el fenómeno de capa límite térmica e hidrodinámica en un muro de resguardo, estableciendo un rango para las variables de temperatura de

superficie, ángulo de inclinación y la distancia de separación entre las paredes del muro de resguardo.

1.2. Antecedentes

La transferencia de calor es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas, siempre que exista una diferencia de temperaturas en un cuerpo, debe ocurrir una transferencia de calor. Existen diferentes tipos de procesos de transferencia de calor dependiendo el medio de transmisión.

Cuando existe un gradiente de temperatura en un medio estacionario se utiliza el término de *conducción* para referir la transferencia de calor que se producirá a través del medio. En cambio el término de *convección* se refiere a la transferencia de calor que ocurre entre una superficie y un fluido en movimiento cuando están a diferentes temperaturas. El tercer modo de transferencia de calor se denomina *radiación térmica*. Todas las superficies con temperatura finita emiten energía en forma de ondas electromagnéticas, por tanto en ausencia de un medio existe una transferencia neta de calor por radiación entre dos superficies a diferentes temperaturas [2].

El modelo para cuantificar el proceso de transferencia de calor por conducción se conoce como *Ley de Fourier*:

$$\dot{q}_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (1.1)$$

Donde:

\dot{q}_x = Flujo de calor o transferencia de calor por unidad de área W/m^2

dT/dx = Gradiente de temperatura K/m

k = Conductividad térmica del material $W/m K$

La transferencia de calor por *convección* se clasifica de acuerdo con la naturaleza del flujo. Hablamos de *convección forzada* cuando el flujo es causado por medios externos, como un ventilador, una bomba o vientos atmosféricos. En cambio la *convección natural (o libre)* el flujo es inducido por fuerzas de empuje que surgen a partir de diferencias de densidad

ocasionadas por variaciones de temperatura en el fluido.

Sin importar la naturaleza particular del proceso de transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa por la *Ley de enfriamiento de Newton* **Ec.1.2.** [3]

$$\dot{q}_{conv} = h(T_s - T_\infty) \quad (1.2)$$

Donde:

\dot{q}_{conv} = Flujo de calor por convección W/m^2

T_∞ = Temperatura ambiente K

T_s = Temperatura de superficie K

h = Coeficiente convectivo W/m^2K

El coeficiente convectivo depende de las condiciones en la capa límite, en las que influyen la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido y una variedad de propiedades termodinámicas del fluido y de transporte.

La transferencia de calor por *radiación* se expresa por la *Ley de Stefan-Boltzmann* **Ec.1.3.**

$$\dot{q}_{rad} = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_\infty^4) \quad (1.3)$$

Donde:

\dot{q}_{rad} = Flujo de calor por radiación W/m^2

ε = Coeficiente de emisividad

σ = Constante de Stefan-Boltzman $5.67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$

T_∞ = Temperatura ambiente K

T_s = Temperatura de superficie K

La emisividad ε proporciona una medida de la eficiencia con que una superficie emite energía, $0 \leq \varepsilon \leq 1$, la superficie idealizada que emite radiación a esta razón máxima se llama cuerpo negro. [3]

La transferencia de calor entre una pared vertical y el fluido circundante es de especial interés para ingenieros y científicos por la diversidad de aplicaciones que tiene. La capa de fluido adyacente a la pared tiene un

gran efecto en el calor transferido, y es conocida como *capa límite* cuyo concepto fue desarrollado por Ludwig Prandtl en 1904.

De acuerdo a la teoría de Prandtl, los efectos de la viscosidad están confinados dentro de una capa delgada adyacente a la pared, que es una región donde hay variaciones considerables de la componente de la velocidad paralela a la pared, desde cero en la superficie de la pared hasta una velocidad máxima. El espesor de esta capa se le conoce como *capa límite hidrodinámica* **Fig. 1.2 (a)** que se define como δ .

Al mismo tiempo, sobre la pared se presenta una región en la que están presentes gradientes de temperatura considerables, de la temperatura de la pared hasta la temperatura ambiente; es decir, hay una interacción térmica entre la pared y el fluido que se desplaza sobre esta. A esta región se le conoce como *capa límite térmica* **Fig. 1.2 (b)** y está definida como δ_T .

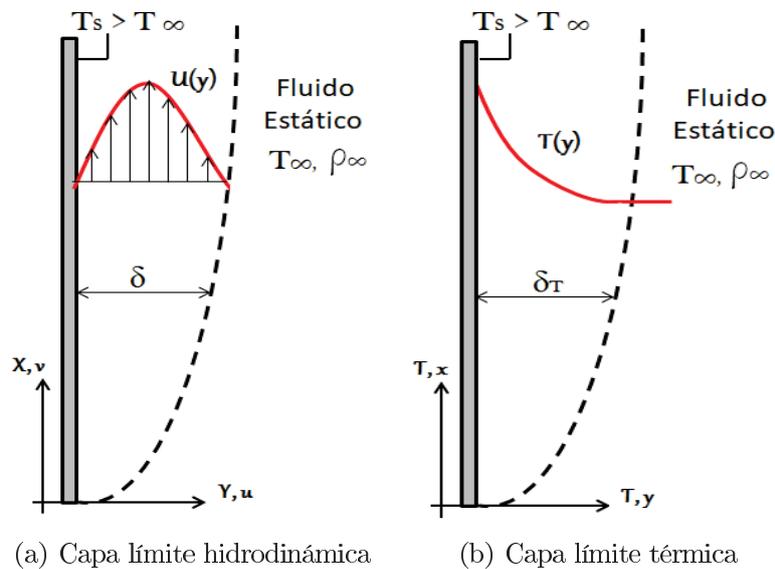


Figura 1.2: Capa límite en una placa vertical.

Cabe destacar que estas regiones no son fáciles de identificar y sus características van a depender de las propiedades del fluido como son la densidad, viscosidad, conductividad térmica, difusividad térmica, entre

otras. Los parámetros adimensionales que describen su comportamiento son el número de Rayleigh **Ec.1.4** y el número de Prandtl **Ec.1.5**.

$$Ra = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu \alpha} \quad (1.4)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (1.5)$$

Donde:

Ra = Número de Rayleigh (Adimensional)

Pr = Número de Prandtl (Adimensional)

g = Gravedad m/s^2

β = Coeficiente de expansión térmica volumétrica $1/K$

L = Longitud del canal m

ν = Viscosidad cinemática m^2/s

α = Difusividad térmica m^2/s

Dado que el proyecto se enfoca en el estudio de un muro de resguardo en la **Fig.1.3**, se ejemplifican cada uno de los modos de transferencia de calor que se presentan.

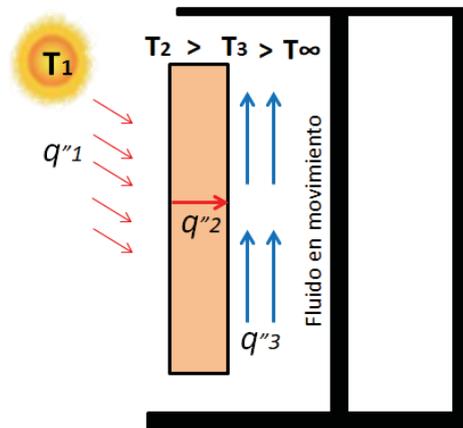


Figura 1.3: Modos de transferencia de calor

Se produce intercambio de calor por radiación entre T_1 y T_2 , se sabe que el flujo de calor que llega a la superficie de la tierra es aproximadamente de 10000 W/m^2 , seguidamente ocurre transferencia de calor por

conducción a través del muro de T_2 a T_3 , finalmente se presenta convección entre una superficie a un fluido en movimiento entre T_3 y T_∞ . Es importante entender los mecanismos físicos que sirven de base a los modos de transferencia de calor, para tener la capacidad de usar los modelos que proporcionan la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo.

Estos conceptos son la base de cualquier análisis de transferencia de calor. Para el caso esta tesis se centrará principalmente del estudio de la convección de calor en el canal formado dentro del muro de resguardo. En lo referente a la conductividad en la pared, hay estudios que se dedican a explicar dicho proceso tanto en materiales convencionales, como en materiales compuestos y de cambio de fase aplicados a edificios. [4–7].

1.2.1. Aplicación del muro de resguardo

A principio de los años 70s en la revista *Architecture d'Aujourd'hui* se publicó un artículo llamado *Arquitectura de Soleil* [8], en la revista se describen diferentes edificios relacionados con energía solar incluyendo el muro de resguardo, diseñado por el arquitecto *Jacques Michel* implementado en casas solares en Odelio, Francia. La **Fig.1.4** muestra el primer muro de resguardo en el techo de una casa construido en 1967.



Figura 1.4: Casa solar en Odelio con muro de resguardo en 1967. [8]

Colin Moorcraft [9] en 1973 en la revista *Architectural Design*, descri-

be los principios técnicos de un muro de resguardo. El primer dispositivo de calefacción solar fue patentado por el Ingeniero *Felix Trombe* en Francia en 1956. Posteriormente surgió otra patente por *Anvar Trombe* en 1972. La mayoría de las investigaciones sobre el muro de resguardo se llevaron a cabo en el *Centro Nacional de Investigación Científica* en Francia. Al contrario de *Jacques Michel*, *Felix Trombe* instaló el muro de resguardo de manera vertical a la estructura resultando ser más efectivo y eficiente que un dispositivo de almacenamiento de calor externo instalado en el techo como se observa en el primer boceto de la **Fig.1.5** ya que se requiere un mecanismo para extraer el calor. [1]

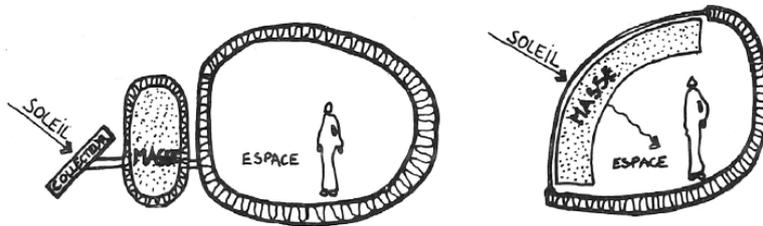


Figura 1.5: Arquitectura climática. Diagramas hechos a mano. Izquierda: Colector solar externo, Derecha: Muro de resguardo. [8]

Se retomó el estudio del muro de resguardo, o muro Trombe en honor a Felix Trombe, hasta el 2011 desde una perspectiva más formal enfocándose en el comportamiento térmico. *Samar Jaber y Salma Ajib* [10], estudiaron el impacto térmico, ambiental y económico del sistema de muros de resguardo para edificios residenciales en la región del Mediterráneo. Se ejecutaron simulaciones de computadora de energía hora por hora para analizar el desempeño de la pared de Trombe.

En el 2012 *Omidreza Saadatian* [11] clasificó el muro de resguardo en diferentes configuraciones **Fig.1.6**. Los muros de resguardo se consideran como una tecnología arquitectónica sostenible para la calefacción y ventilación.

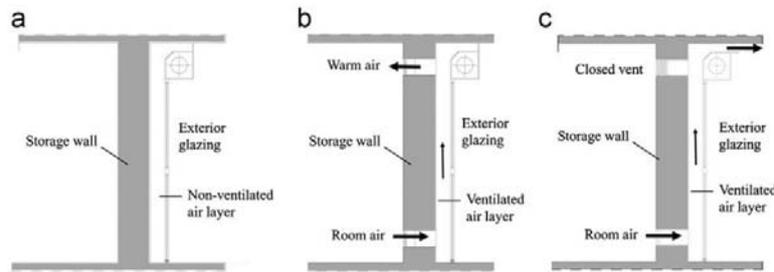


Figura 1.6: Configuraciones del muro de resguardo: a) Sin ventilación; b) Modo de invierno con circulación de aire; c) Modo de verano con ventilación cruzada [11]

El propósito es utilizar la energía solar para proporcionar confort térmico en edificios de varias regiones climáticas, funciona absorbiendo la radiación solar y la conversión de su energía se utilizan diferentes configuraciones para adaptar los muros de resguardo a diversos climas, propósitos y estaciones.

Posteriormente *Eduard Kruge* [12] en 2013 estudio el desempeño de un muro de resguardo en climas tropicales, él determinó que el muro de resguardo en posición vertical debe orientarse de modo que en invierno las ganancias de calor sea favorables y se minimice esta carga en verano. La correcta operación de este sistema se basa en principios básicos de ganancias de calor, ventilación natural, a veces potenciadas por convección forzada. Por otro lado, realizaron mediciones de temperatura al interior del muro, encontrando que se presentan ligeras variaciones en las diferentes estaciones del año.

Una gran parte de la energía primaria total consumida por los edificios de hoy se utiliza en calefacción, ventilación y aire acondicionado. Los sistemas de calefacción y refrigeración convencionales tienen un impacto en el costo operacional, el requerimiento de energía y la emisión de dióxido de carbono, por lo que, los muros de resguardo están recibiendo gran atención debido a su capacidad potencial para enfrentar la crisis ambiental y energética. *Zhongting* [13] revisó los contenidos más relevantes sobre el estudio del muro de resguardo que se han realizado en los últimos 15 años. Por lo que determino diferentes clasificaciones para

su estudio. Según las funciones que desarrolla el muro de resguardo, se dividen en dos tipos principales: calefacción y enfriamiento. En términos de contenido se enfatizan tres grupos de parámetros a considerar en el diseño de un muro de resguardo: parámetros de construcción, parámetros de configuración y parámetros de sitio. Finalmente, definieron tres indicadores para evaluar los muros de resguardo: energía, medio ambiente y económico.

Capítulo 2

Diseño

En este capítulo se explica la importancia del objetivo de estudio, la problemática a resolver, así como el proceso de diseño y las condiciones que lo restringen, para concluir se muestra el desarrollo de los cálculos realizados previo a la manufactura.

2.1. Planteamiento del problema

Este proyecto aborda el estudio de convección natural de un flujo interno en un muro de resguardo; siendo este el resultado de una compleja interacción térmica entre un fluido con las paredes que lo confinan. El fenómeno de convección natural en un volumen de control cerrado varía dependiendo de la geometría y orientación del canal, si el canal esta limitado por los costados tiene aplicaciones como colectores solares, muros de resguardo, circulación de aire en las habitaciones de un edificio, dependiendo de la relación de forma de la cavidad.

El uso de energía en edificios forma una gran parte de la demanda energética global y regional. La importancia de la calefacción y la refrigeración en el uso total de energía en los edificios es muy diversa, esta proporción varía entre el 18 % y el 73 %. [14]

El interés por los muros de resguardo como un sistema de energía renovable ha incrementado de manera significativa en la rama de la ingeniería para afrontar la crisis de energía existente, el reto principal para

el diseño de un Muro Trombe es optimizar el rendimiento para obtener el menor costo de operación y consumo energético, además de reducir las emisiones de carbono hacia el medio ambiente.

Este proyecto se centra únicamente en el estudio de un muro de resguardo, con base en la literatura disponible, se identificaron diferentes factores que influyen en el funcionamiento, los cuales se pueden clasificar en 4 grupos [15]:

1. Configuración
 - a) Área de entrada y salida
 - b) Ancho del canal
 - c) Ángulo de inclinación
2. Condiciones de instalación
 - a) Relación Altura/Distancia
 - b) Entrada a la cavidad
 - c) Colector solar
3. Material de construcción
 - a) Tipo de recubrimiento
 - b) Aislante térmico
4. Medio ambiente
 - a) Radiación solar
 - b) Corrientes de aire
 - c) Condiciones climáticas

El diseño de este dispositivo se enfoca en estudiar el efecto de los parámetros del Grupo 1 (Configuración) con la intención de visualizar el flujo, realizar mediciones de los campos de velocidad y temperatura al interior del canal con el propósito de determinar el ancho y la inclinación óptima de operación, para emplear el muro de resguardo en techos.

2.2. Restricciones de diseño

Como objetivo principal se contempla construir un dispositivo a escala 1:2 de 30 *cm* × 90 *cm* de alto y ancho respectivamente, con propósito de simular un muro de resguardo para estudiar experimentalmente: el fenómeno de capa límite, focalizándose en los efectos de la temperatura de la superficie caliente, el ancho del canal y el ángulo de inclinación, además de facilitar la visualización del flujo al interior del canal; es necesario que el diseño del dispositivo de pruebas contenga los elementos suficientes para poder desarrollar experimentos que ayuden a cumplir las metas del objetivo de manera eficiente, así como tomar en cuenta el espacio y material disponible en el laboratorio. El fenómeno de capa límite se desarrolla al interior del canal, por lo que se demanda que las condiciones de trabajo estén controladas para evitar perturbaciones y señales de ruido en las mediciones.

Para emular la temperatura que alcanza el muro exterior de un edificio sometido a la continua radiación del sol, se requiere que la superficie de estudio, tenga un rango de temperatura de 30 °C a 80 °C; para este propósito el laboratorio disponía de una placa de cobre con 99 % de pureza, idóneo para realizar los experimentos.

Con respecto a la transferencia de calor, es imprescindible que el dispositivo tenga un buen aislante térmico para evitar pérdidas y alcanzar la máxima temperatura de superficie con el menor consumo energético, dado que el único interés de estudio es al interior del canal, es importante que el flujo de calor sea hacia la superficie libre de la placa de cobre. Es necesario que no existan perturbaciones en el flujo dentro del canal debido a imperfecciones en la superficie, por lo que toda sujeción o modificación se exige sea en la parte posterior de la placa de cobre; del mismo modo facilitar la libertad de posicionarse en diferentes ángulos en un rango de 90° a 180° conforme la horizontal, así como soportar el peso de todo el arreglo. En la **Fig.2.1** se presenta el arreglo del muro de resguardo a diseñar y construir. La placa de cobre junto con el aislante simulan el muro externo de un muro de resguardo.

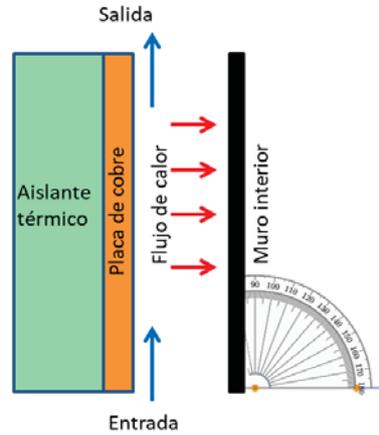


Figura 2.1: Esquema arreglo experimental.

Para complementar el arreglo experimental, resta simular el muro interno, es importante que el aire fluya únicamente de la parte inferior a la superior del canal, por lo que se precisa que los laterales se encuentren sellados evitando perturbaciones debido a flujos externos, adicionalmente la distancia interna entre muros debe ser adaptable, la visualización del flujo al interior del canal es imprescindible, de tal forma que se requiere el material de manufactura sea resistente y transparente. Por último la medición de la velocidad del flujo se realizará con el Laser Doppler. Para la visualización del flujo se inyectará humo iluminado con un plano láser.

2.3. Diseño de elementos

Esta sección detalla las características específicas de cada elemento, además de la aplicación de las restricciones planteadas y el desarrollo matemático para alcanzar los objetivos.

2.3.1. Placa de calentamiento

Para el caso ideal es importante mantener una temperatura uniforme en la placa de calentamiento, de éste modo se evitan gradientes de temperatura que dificulten el análisis experimental.

Para lograr una distribución uniforme de temperatura en la placa de calentamiento, se fabricó una resistencia eléctrica que estará en contacto directo con una placa de cobre.

La resistencia fue elaborada mediante cintas de nicromel, en el capítulo de "**3.1 Manufactura y ensamble**" se explicará detalladamente el proceso de fabricación; con el propósito de minimizar costos se calculó la distancia óptima entre cintas buscando un gradiente de temperatura menor a 0.5 °C. Para determinar la distribución de temperatura en la superficie de la placa de cobre se consideró como un caso de conducción bidimensional en estado estacionario definido por la Ley de Fourier en la **Ec.2.1**.

Analizando la placa de calentamiento como un sólido prismático largo donde la conducción de calor es principalmente en el plano XY , debido a la distribución de la resistencia eléctrica en la placa de calentamiento (**2.3.1 Diseño**).

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (2.1)$$

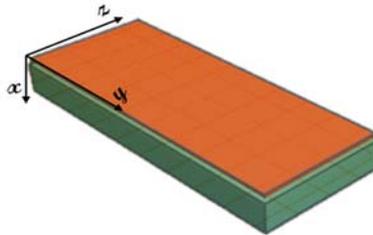


Figura 2.2: Arreglo de la placa de calentamiento con aislante térmico.

En la **Fig.2.2** el eje x indica el espesor de la placa de calentamiento y el eje y el largo, el eje z representa el ancho de la placa de calentamiento, para asegurar que el calor fluya al interior del muro de resguardo, se consideró que la parte posterior de la placa de cobre está aislada. En el modelo real se utilizó poliestireno expandido como material de aislamiento.

La **Ec.2.1** se puede resolver para $T(x, y)$ mediante diferentes análisis, ya sea analítico, gráfico y numérico. Dado que el principal interés es determinar la separación óptima entre cintas de nicromel, se optó por utilizar el método numérico de balance de energía, el cual consiste en subdividir la superficie de calentamiento en pequeñas regiones, al centro de cada sección se asigna un punto de referencia en el centro conocido como nodo; al generar una red nodal se puede calcular la temperatura específica en cada uno de los nodos distribuidos en la superficie de la placa de calentamiento.

Los puntos nodales se designan por un esquema numérico considerando las condiciones que afectan a su alrededor, cada nodo representa la temperatura promedio de la región asignada. La precisión de los cálculos depende del número de nodos, por lo que se empleó una malla fina con una $\Delta x=5 \text{ mm}$ y $\Delta y=1.5 \text{ mm}$, siendo la distancia entre cintas y el espesor de la placa de cobre respectivamente. Las posiciones x y y se designan con los índices m y n , como se muestra en la **Fig.2.3**.

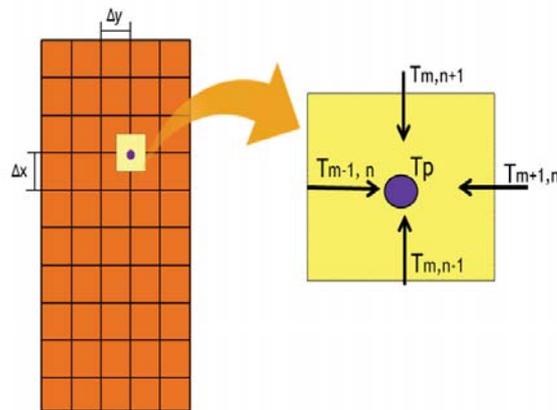


Figura 2.3: Red nodal de la placa de calentamiento.

La determinación numérica de la distribución de temperaturas dicta una ecuación de conservación apropiada para cada uno de los puntos nodales de temperatura desconocida. El conjunto de ecuaciones resultante se resuelve de manera simultánea para la temperatura en cada nodo. El balance de energía del nodo principal T_p se desarrolla de la siguiente

manera **Ec.2.2**:

$$\dot{E}_{ent} + \dot{E}_g = 0$$

$$\sum_{i=1}^4 q_{i \rightarrow m,n} + \dot{q}(\Delta x \cdot \Delta y \cdot 1) = 0 \quad (2.2)$$

Aplicando la conservación de energía a un volumen de control alrededor de la región nodal, es conveniente formular el balance de energía suponiendo que todo el flujo de calor es hacia el nodo. [2]

Suponemos que la transferencia de calor ocurre de manera exclusiva en dirección x o y , por lo tanto, es posible usar las formas simplificadas de la Ley de Fourier para conducción **Ec.2.3** y la Ley de enfriamiento de Newton para convección **Ec.2.4**.

$$q_{T_{m-1,n} \rightarrow T_p} = k(\Delta x) \frac{T_{m-1,n} - T_p}{\Delta y} \quad (2.3)$$

$$q_{T_{m-1,n} \rightarrow T_p} = h(\Delta x)(T_{m-1,n} - T_p) \quad (2.4)$$

Es necesario realizar la suma de las ecuaciones correspondientes a cada uno de los nodos, con el fin de conocer la temperatura del nodo principal **Fig.2.4**

$$\begin{aligned} q_{T_{m-1,n} \rightarrow T_p} &= k(\Delta x) \frac{(T_{m-1,n} - T_p)}{\Delta y} \\ q_{T_{m+1,n} \rightarrow T_p} &= k(\Delta x) \frac{(T_{m+1,n} - T_p)}{\Delta y} \\ q_{T_{m,n-1} \rightarrow T_p} &= k(\Delta y) \frac{(T_{m,n-1} - T_p)}{\Delta x} \\ q_{T_{m,n+1} \rightarrow T_p} &= k(\Delta y) \frac{(T_{m,n+1} - T_p)}{\Delta x} \\ &\sum q_{T_{m,n}} = q_p \end{aligned}$$

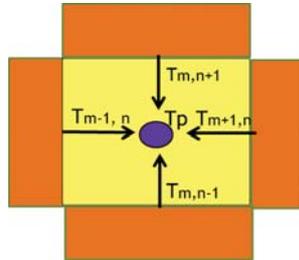


Figura 2.4: Flujo de calor alrededor del nodo principal

Para el caso de la placa caliente, el análisis se desarrolla en una pequeña sección de la placa de cobre, que comprende el espacio entre dos cintas de nicromel, con el objetivo de simplificar los cálculos en el malla-do. Para determinar la separación entre cintas, se implementó un código de colores, dependiendo la posición específica del nodo, de tal manera que las condiciones exteriores por las que se ve afectado no se repitan. En la **Fig.2.5** se muestra el plano seccionado de la **Fig.2.2** con la posición correspondiente a cada nodo.

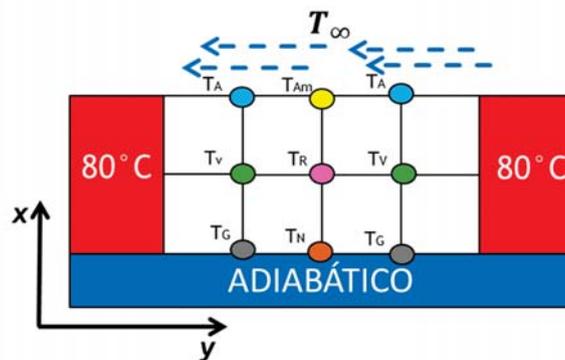


Figura 2.5: Código de colores posición de nodos.

Se utilizaron condiciones de trabajo críticas al realizar los cálculos:

- Temperatura mínima dentro del laboratorio $T_{\infty} = 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Coeficiente convectivo de aire quieto $h = 5 \text{ W/m}^2\text{k}$
- Coeficiente de conducción del cobre $k = 401 \text{ W/mK}$

- Temperatura máxima de la resistencia $T_{max} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$

Se realizó el análisis nodal cómo se muestra en la **Fig.2.4**, con las condiciones para cada nodo según su posición en la **Fig.2.5**.

La **Tabla 2.1** sintetiza las ecuaciones resultantes del análisis nodal en diferencias finitas, el análisis completo puede consultarse en el **Apéndice A**.

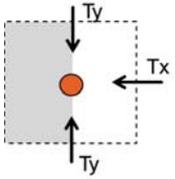
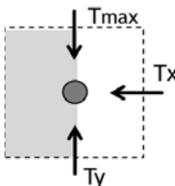
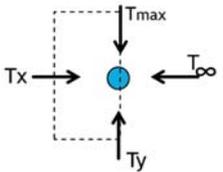
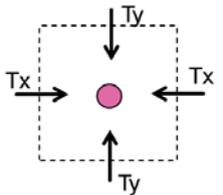
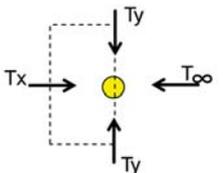
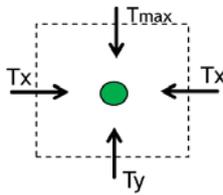
Configuración	Ecuación en diferencias finitas
	$Q_N = 120.30 T_y + 1336.61 T_x - 1456.92 T_N$ <p>Naranja: Nodo interior con pared adiabática</p>
	$Q_G = 60.15 T_y + 1336.6 T_x + 4812.45 - 1456.92 T_G$ <p>Gris: Nodo con pared adiabática y flujo de calor</p>
	$Q_A = 60.15 T_y + 1336.6 T_x + 4812.45 - 1456.92 T_A$ <p>Azul: Nodo en superficie con convección y flujo de calor</p>
	$Q_R = 240.6 T_y + 2673.2 T_x - 2913.8 T_R$ <p>Rosa: Nodo interior</p>
	$Q_R = 120.30 T_y + 1336.6 T_x + 0.45 - 1456.92 T_R$ <p>Amarillo: Nodo en superficie con convección</p>
	$Q_V = 120.30 T_y + 1336.6 T_x + 9624.14 - 2913.8 T_V$ <p>Verde: Nodo interior con flujo de calor</p>

Tabla 2.1: Síntesis de ecuaciones nodales.

Una vez que se estableció la red nodal y la ecuación en diferencias finitas correspondiente a cada nodo, es posible determinar la distribución de temperaturas, resolviendo un sistema de ecuaciones algebraicas lineales, para realizar esta actividad se eligió un método directo de inversión de matrices. Se consideró un sistema de N ecuaciones algebraicas, correspondientes a N nodos, el número de nodos depende del tamaño de la red nodal.

Para llevar a cabo el método de inversión de matrices las ecuaciones se expresan en forma matricial de la siguiente manera, **Ec.2.5**:

$$[A][T] = [C] \quad (2.5)$$

Donde:

- $[A]$ representa la matriz de coeficientes de tamaño $[N \times N]$ y sus elementos son coeficientes y constantes conocidas que implican cantidades como Δx , h , k , T_∞ .
- $[T]$ Y $[C]$ son matrices de una sola columna siendo vectores de solución.

Para despejar el vector de soluciones de Temperatura $[T]$ se procede a invertir la matriz $[A]$, para obtener la **Ec.2.6**.

$$[T] = [A]^{-1}[C] \quad (2.6)$$

La inversión de matrices y la solución al sistema de ecuaciones se resolvió con ayuda de *Matlab*. Con los valores de la **Tabla2.1** se expresaron las ecuaciones de manera matricial, variando el tamaño de la red nodal.

Caso 1

Distancia entre cintas de 4 *cm*, acorde al número de nodos del arreglo **Fig.2.6**, se generó una **Matriz** A_4 de $[9 \times 9]$. La matriz **C** y **T** indica los términos independientes de cada ecuación y la temperatura de cada nodo respectivamente.



Figura 2.6: Red nodal para distancia de 4 cm entre cintas.

$$A_4 = \begin{bmatrix} -1456.92 & 1336.61 & 0.00 & 60.15 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 1336.61 & -2913.82 & 1336.61 & 0.00 & 120.30 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 1336.61 & -1456.92 & 0.00 & 0.00 & 60.15 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 60.15 & 0.00 & 0.00 & -1456.92 & 1336.61 & 0.00 & 60.15 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 120.30 & 0.00 & 1336.61 & -2913.82 & 1333.61 & 0.00 & 120.30 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 60.15 & 0.00 & 1336.61 & -1456.92 & 0.00 & 0.00 & 60.15 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 60.15 & 0.00 & 0.00 & -1456.9 & 1333.61 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 120.30 & 0.00 & 1336.6 & -1923.82 & 1333.61 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 60.15 & 0.00 & 1333.61 & -1456.92 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ T_7 \\ T_8 \\ T_9 \end{bmatrix} C = \begin{bmatrix} -4812.45 \\ -9624.14 \\ -4812.45 \\ 0.00 \\ 0.00 \\ -0.45 \\ -4812.45 \\ -9624.14 \\ -4812.45 \end{bmatrix}$$

Resolviendo la **Ec.2.6** para encontrar los valores de la matriz **T**, los resultados se muestran en la **Tabla 2.2**.



$T_1 =$	79.42 °C
$T_2 =$	79.41 °C
$T_3 =$	79.49 °C
$T_4 =$	79.12 °C
$T_5 =$	79.13 °C
$T_6 =$	79.12 °C
$T_7 =$	79.42 °C
$T_8 =$	79.41 °C
$T_9 =$	79.40 °C

Tabla 2.2: Distribución de temperatura para distancia de 4 *cm* entre cintas.

Se observa que la diferencia de temperatura entre los nodos es mayor a 0.5 °C, provocando gradientes de temperatura en la superficie, por lo que se procedió a disminuir la distancia.

Caso 2

Distancia entre cintas de 3 *cm*, acorde al número de nodos del arreglo **Fig.2.7**, se generó una **Matriz** A_3 de $[6 \times 6]$. La matriz **C** y **T** indica los términos independientes de cada ecuación y la temperatura de cada nodo respectivamente.

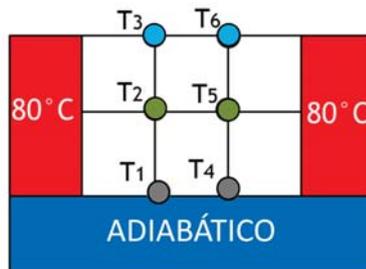
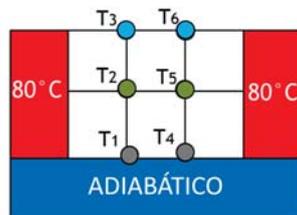


Figura 2.7: Red nodal para distancia de 3 *cm* entre cintas.

$$A_3 = \begin{bmatrix} -1456.92 & 1336.61 & 0.00 & 60.15 & 0.00 & 0.00 \\ 1336.61 & -2913.82 & 1336.61 & 0.00 & 120.30 & 0.00 \\ 0.00 & 1336.61 & -1456.92 & 0.00 & 0.00 & 60.15 \\ 60.15 & 0.00 & 0.00 & -1456.92 & 1336.61 & 0.00 \\ 0.00 & 120.30 & 0.00 & 1336.61 & -2913.82 & 1333.61 \\ 0.00 & 0.00 & 60.15 & 0.00 & 1336.61 & -1456.92 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} -4812.45 \\ -9624.14 \\ -4812.45 \\ -4812.45 \\ -9624.14 \\ -4812.45 \end{bmatrix}$$

Resolviendo la **Ec.2.6** para encontrar los valores de la matriz **T**, los resultados se muestran en la **Tabla 2.3**.



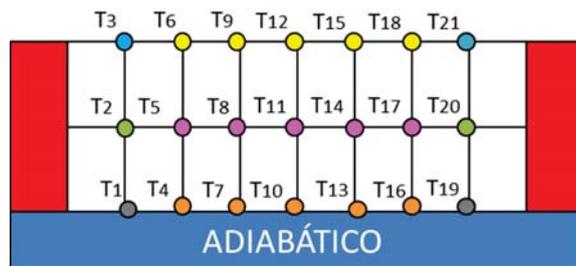
$$\begin{aligned} T_1 &= 79.70 \text{ °C} \\ T_2 &= 79.70 \text{ °C} \\ T_3 &= 79.69 \text{ °C} \\ T_4 &= 79.70 \text{ °C} \\ T_5 &= 79.70 \text{ °C} \\ T_6 &= 79.69 \text{ °C} \end{aligned}$$

Tabla 2.3: Distribución de temperatura para distancia de 3 *cm* entre cintas.

Se observa que en los nodos expuestos a la intemperie T_3 y T_6 generan un gradiente de temperatura de 0.1 °C, por lo que podemos concluir que la temperatura de superficie es homogénea. El propósito de realizar este cálculo es encontrar la distancia máxima entre cintas para reducir el costo durante el proceso de manufactura por lo que se estima un nuevo caso con una distancia intermedia.

Caso 3

Distancia entre cintas de 3.5 cm , acorde al número de nodos del arreglo se generó una Matriz de $[21 \times 21]$. El desarrollo de esta matriz es una extensión de la **Matriz** A_4 , debido al extenso número de componentes solo se muestra la **Tabla 2.4** con los resultados de la distribución de temperatura, .



$$T_1 = 79.98\text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 79.98\text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_3 = 79.98\text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_4 = 79.97\text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_5 = 79.97\text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_6 = 79.97\text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_7 = 79.96\text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_8 = 79.96\text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_9 = 79.96\text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{10} = 79.96\text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{11} = 79.96\text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{12} = 79.96\text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{13} = 79.96\text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{14} = 79.96\text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{15} = 79.96\text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{16} = 79.97\text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{17} = 79.97\text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{18} = 79.97\text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{19} = 79.98\text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{20} = 79.98\text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{21} = 79.98\text{ }^\circ\text{C}$$

Tabla 2.4: Distribución de temperatura para distancia de 3.5 cm entre cintas.

Se observa que la diferencia de temperaturas entre los nodos es máxima de $0.04\text{ }^\circ\text{C}$, por lo que la temperatura de superficie se considera homogénea. La resistencia eléctrica se conforma de tres componentes: cinta de nicromel, la cual es un alambre con una composición formada

por la aleación de dos metales, Níquel en un 80 % y Cromo en un 20 %, dicha aleación puede alcanzar una temperatura máxima de calentamiento de 1200 °C; mica aislante eléctrica para evitar el contacto entre cintas y finalmente, lámina galvanizada. Como resultado la placa de calentamiento es la unión de la resistencia eléctrica con la placa de cobre.

2.3.2. Estructura de soporte

Las características principales que se demandan en el diseño de la estructura es que no existan perturbaciones en el flujo dentro del canal debido a flujos externos o por imperfecciones en la superficie de estudio, la visualización del flujo es imprescindible, adicionalmente la distancia interna del canal debe ser adaptable, además de facilitar la libertad de posicionarse en diferentes ángulos, así como soportar el peso de todo el arreglo experimental.

Considerando las condiciones anteriores se propuso un primer diseño utilizando un software de CAD, el resultado se muestra en la **Fig.2.8, Vista Isométrica:**

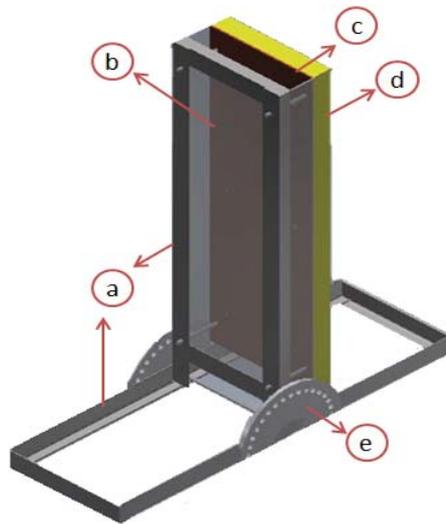


Figura 2.8: Prototipo. a)Base, b)Tapa transparente, c)Placa de calentamiento, d)Aislante térmico, e)Mecanismo de inclinación

En el prototipo se observa que la base soporta el peso del arreglo que se forma con la tapa transparente, la placa de calentamiento y el aislante por la parte frontal, con el propósito de evitar sujeciones cercanas a la placa de cobre evitando perturbaciones en el flujo. La tapa limita el canal de aire, forzando que el flujo ingrese únicamente por la parte inferior; al ser transparente se visualiza perfectamente el flujo interno. Para unir el arreglo con la base, se implementaron cuatro barras de acero con cuerda, la idea es fijar las piezas con tuercas de presión y desplazar la tapa transparente a la distancia requerida; adicionalmente, en los laterales al pie de la base se muestran dos discos con muescas a diferentes ángulos para posicionarse, finalmente se extiende en un rectángulo para dar mayor estabilidad y poder fijarse en una superficie plana.

Este diseño, a pesar de cumplir con las restricciones planteadas, presenta limitantes en los cálculos para realizar la manufactura, en principio se proyectó construir la base con perfiles de acero de $2\text{ in} \times 1\text{ in}$ a fin de soportar el peso de los componentes, sin embargo se limita la visibilidad en el borde del canal, por lo que es necesario reducir el área del perfil de acero comprometiendo la rigidez de la estructura. Para sujetar los componentes se planificó usar barras de acero de alta resistencia de 0.5 in en consecuencia se requiere perforar cada uno de los elementos con este diámetro, al atravesar la placa de cobre con un material diferente se afecta la conductividad del material perturbando la distribución de calor en la superficie; cuando la barra de acero cruza el canal de aire se generan perturbaciones en el flujo, surge la misma problemática si la perforación en la tapa no es exacta. Por consiguiente el mecanismo de inclinación se compone de dos semidiscos de acero con 15 cm de diámetro, el punto de apoyo al no ubicarse en el centro de gravedad, genera un brazo de palanca provocando que el sistema sea inestable, para compensar este problema, la base de acero se extiende en un rectángulo que se anclara en el lugar de trabajo complicando la instalación del dispositivo, aparte de limitar el acceso de aire al canal.

Posterior a analizar cada uno de los inconvenientes se optó por tomar otra perspectiva al realizar el diseño del dispositivo, obteniendo la siguiente solución **Fig.2.9, Vista Isométrica:**

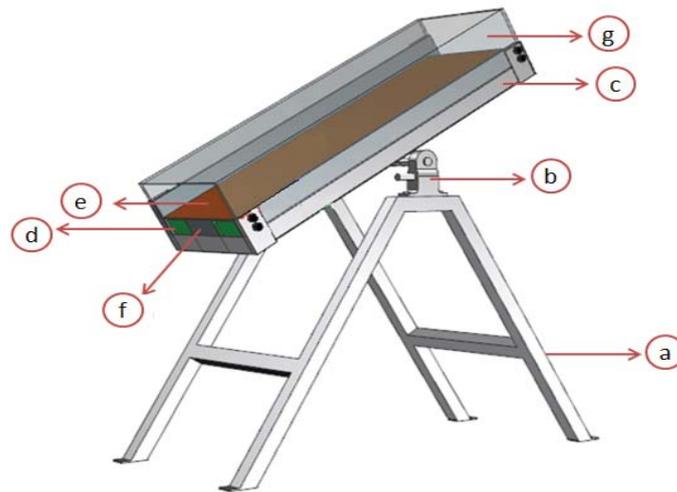


Figura 2.9: Dispositivo final: a)Base, b)Mecanismo de inclinación, c)Caja de lámina, d)Aislante térmico, e)Placa de calentamiento, f)Pieza de sujeción, g)Tapa de acrílico.

La mayor problemática a resolver es el peso total del arreglo así como mantenerse estable al posicionarse en diferentes ángulos; para resolver esta problemática se determinó como eje de rotación el centro de gravedad de la caja de lámina **Fig.2.10**, de esta manera el sistema se mantiene en equilibrio sin provocar brazos de palanca.

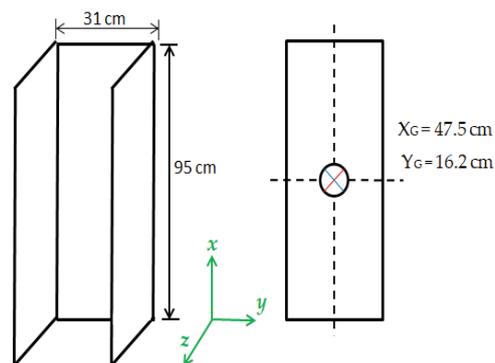


Figura 2.10: Centro de gravedad Caja lámina

La base que sostiene la caja de lámina, se diseñó tomando como referencia un columpio de juegos infantiles. Dado que la carga que se suscita al balancear un niño respecto a un eje es muy similar a la carga que se genera al variar la posición de la caja en diferentes ángulos sobre el eje de rotación; las normas de áreas de juegos infantiles [16], establecen medidas necesarias que aseguran la estabilidad de la estructura, para realizar los cálculos para el diseño de la base se tomó como referencia un columpio individual para una persona con peso máximo de 70 *kg*, que se presenta en la **Fig.2.11**, cabe destacar que dicha carga excede las necesidades del proyecto.

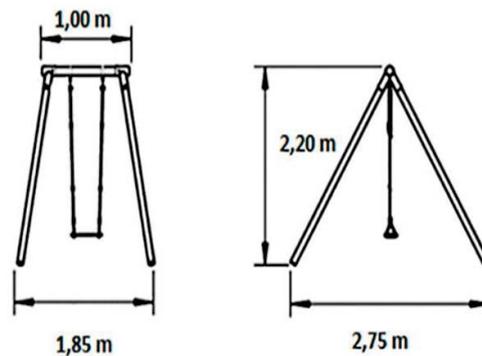


Figura 2.11: Columpio Individual KELUTS [17]

De acuerdo con **Fig.2.12**, mediante funciones trigonométricas se obtuvo el ángulo óptimo de apertura α , conforme la vertical.

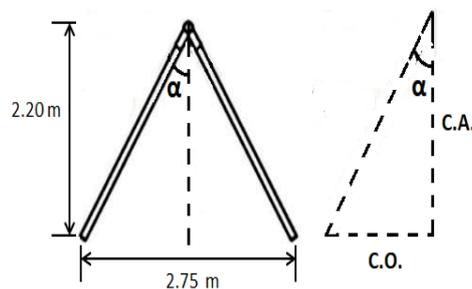


Figura 2.12: Análisis geométrico del columpio KELUTS

Funciones trigonométricas

$$\tan(\alpha) = \frac{C.O.}{C.A.} \rightarrow \alpha = \arctan \frac{C.O.}{C.A.}$$

Sustituyendo valores C.O.=1.37 m C.A.=2.20 m

$$\alpha = \arctan \frac{1.37}{2.20} = 31.91 \approx 32^\circ$$

Una vez definido el ángulo de apertura α , la estructura se adapta a las medidas requeridas para el dispositivo de pruebas. Se requiere que la entrada del aire sea por la parte inferior del canal inducido por convección natural, por lo que se optó por dejar 20 cm entre el piso y la parte inferior de la caja a 90° , por lo tanto la altura total de la base es de 67.5 cm. Al conocer la altura total y el ángulo óptimo de apertura α , se calculó la distancia del pie de apoyo al punto más alto de la base, así como la longitud del pie de apoyo, siendo representado por el Cateto opuesto (C.O) y la Hipotenusa (HIP) de la **Fig.2.13** respectivamente.

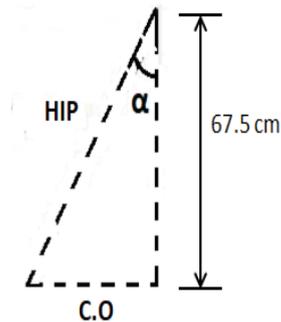


Figura 2.13: Análisis dimensional

Funciones trigonométricas

$$\cos(\alpha) = \frac{C.A.}{HIP} \rightarrow HIP = \frac{C.A.}{\cos(\alpha)}$$

Sustituyendo valores C.A.= 67.5 cm $\alpha=32^\circ$

$$HIP = \frac{67.5}{\cos(32)} = 80 \text{ cm}$$

Teorema de Pitágoras

$$HIP^2 = C.A.^2 + C.O.^2 \rightarrow C.O. = \sqrt{HIP^2 - C.A.^2}$$

Sustituyendo valores HIP=80 cm C.A=67.5 cm

$$C.O. = \sqrt{80^2 - 67.5^2} = 41.8 \text{ cm}$$

Se eligió como material de manufactura perfil tubular estructural de 1 in \times 1 in, el cual es una barra hueca, comúnmente utilizada para armar estructuras que no requieren gran tamaño ni peso, la ventaja de este tipo de perfil es la facilidad de armado y se puede galvanizar para evitar corrosión. Se modificaron las dimensiones calculadas de manera de posibilitar la manufactura de la base, considerando las características del material, en la **Fig.2.14**, se muestra la base en Vista Isométrica y en la **Fig.2.15** las proyecciones con las medidas necesarias previo a la manufactura.

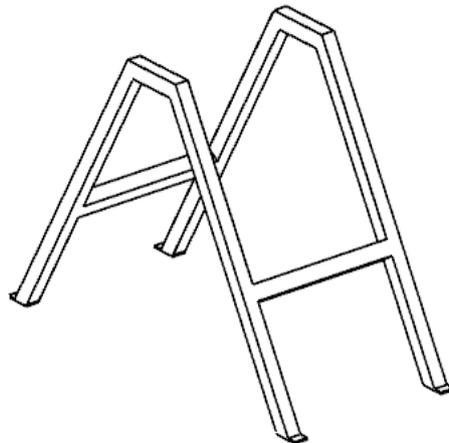


Figura 2.14: Vista Isométrica

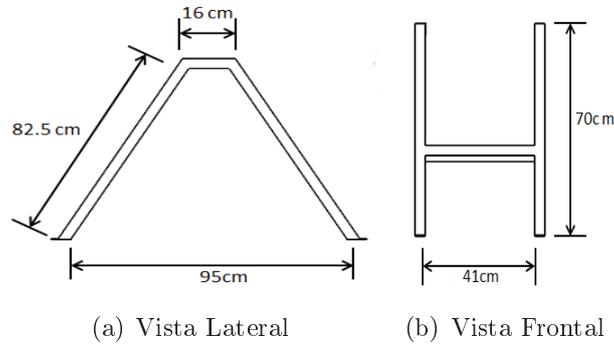


Figura 2.15: Medidas de la base

Por último se soldó un mecanismo sin fin con catarinas de tracción, que será de ayuda para inclinar la caja de lámina, de lado contrario se añadió un puntero para determinar el ángulo de inclinación. En la **Fig.2.16** se muestra el CAD final de la base.

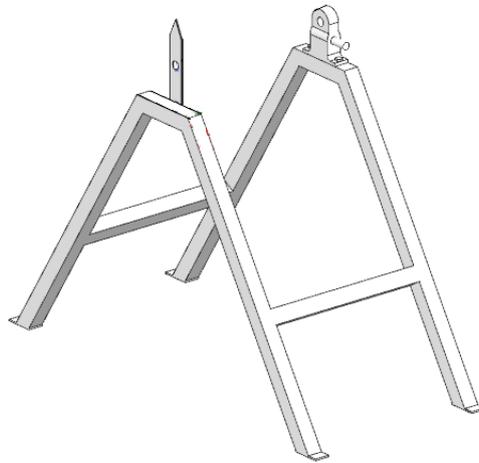


Figura 2.16: Base de PTR

La caja de lámina tiene la función de sostener el arreglo constituido por la placa de calentamiento y el aislante térmico, se implementaron bordes internos en la caja de lámina para descansar la placa de calentamiento. Por un costado la caja de lámina es de menor tamaño, permitiendo la visualización del fenómeno de capa límite el cuál se desarrolla al

borde de la placa de calentamiento, de lado contrario la caja de lámina es de mayor tamaño para sostener la tapa transparente. En la parte superior e inferior de la caja se soldaron cuatro perfiles de lámina cumpliendo la función de guía, se añadieron tornillos de goma para sujetar la tapa transparente, con la intención de poder modificar el ancho del canal de aire. Se soldó el eje de rotación perpendicular al centro de gravedad previamente calculado, dicho eje se acoplará al mecanismo de inclinación. En la **Fig.2.17**, se muestra la caja de lámina en Vista Isométrica y en la **Fig.2.18** las proyecciones con las medidas necesarias previo a la manufactura.

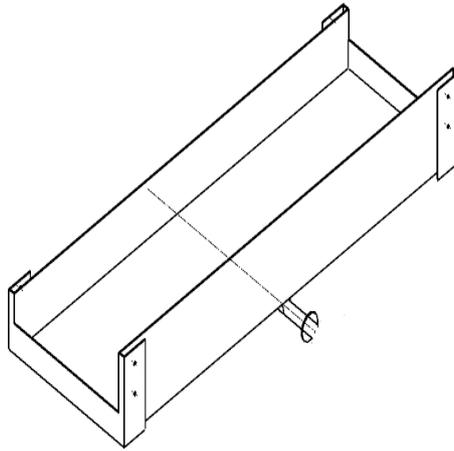


Figura 2.17: Vista Isométrica

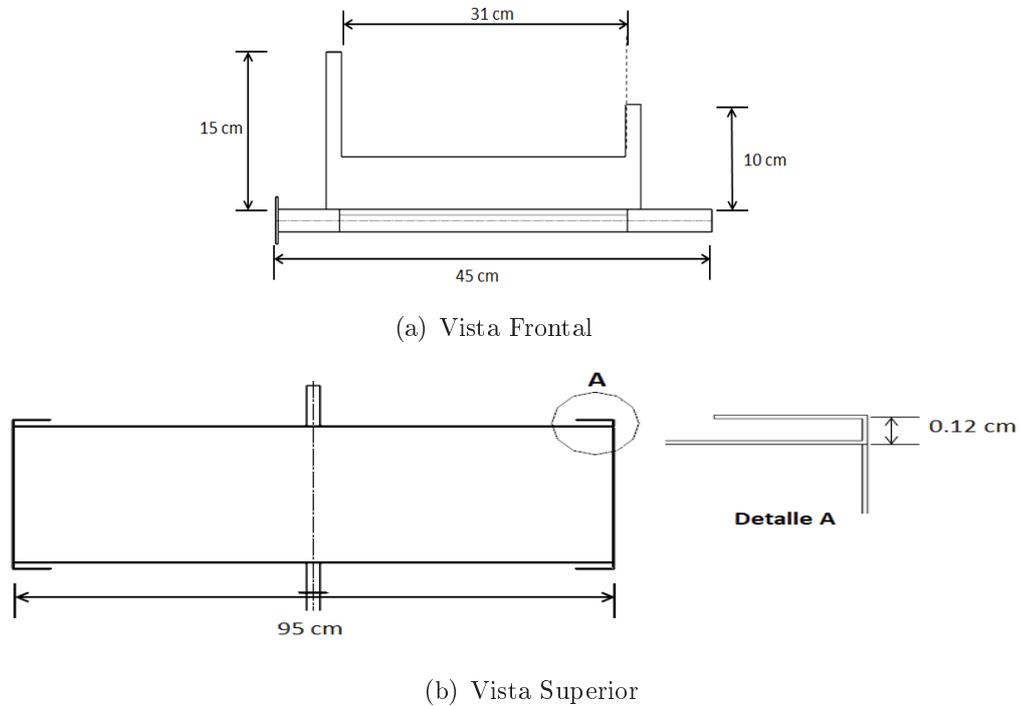
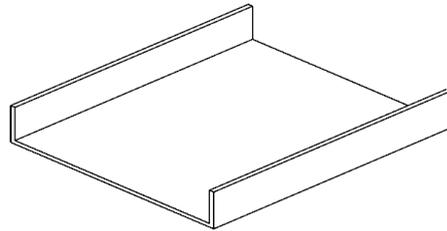
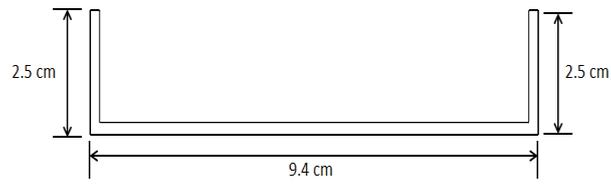


Figura 2.18: Medidas de la Caja de lámina

Posteriormente se coloca la placa de calentamiento junto con el aislante térmico al interior de la caja de lámina y se asegura con las piezas de sujeción Tipo C y Tipo Z, que fijaran la placa de cobre, la resistencia eléctrica y el aislante termico. La pieza Tipo C es la primera en colocarse debido a su posición en la parte inferior de la caja, en la **Fig.2.19 (a)** se muestra la Vista Isométrica, en la **Fig.2.19 (b)** las proyecciones con las medidas necesarias. La pieza Tipo Z se ubica en la parte superior, su geometría facilita el ensamble de todo el arreglo, en la **Fig.2.20 (a)** se muestra la Vista Isométrica, en la **Fig.2.20 (b)** las proyecciones con las medidas necesarias previo a la manufactura.

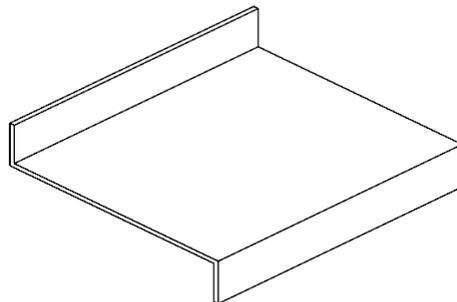


(a) Vista Isométrica

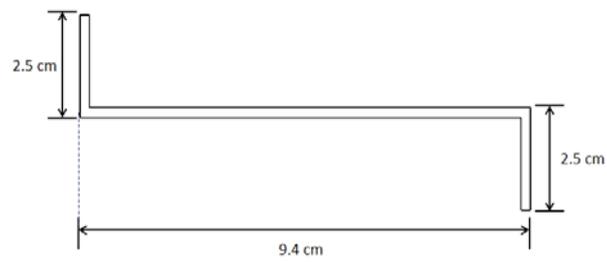


(b) Vista frontal

Figura 2.19: Medidas Pieza C



(a) Vista Isométrica



(b) Vista frontal

Figura 2.20: Medidas Pieza Z

Finalmente en la **Fig.2.21**, se muestra el CAD del arreglo final de la caja de lámina.

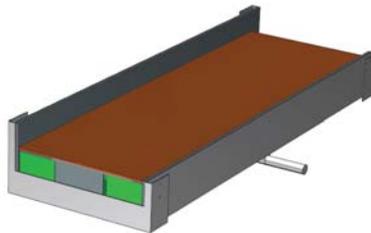


Figura 2.21: Arreglo final caja de lámina

Con el propósito de facilitar la visualización del flujo al interior del canal, se optó por hacer la tapa del canal con acrílico, el cual es un material termoplástico rígido, con una tasa de transmisión de luz del 92 %, además de ser inerte a sustancias corrosivas con alta resistencia a la intemperie. Debido a que la tapa de acrílico estará expuesta a la radiación de calor de la placa de calentamiento, se utilizó acrílico de 10 *mm* de espesor para las tapas laterales y de 3 *mm* de espesor para la tapa superior. La distancia del interior del canal varía de 5 *cm* a 10 *cm*, para posibilitar la sujeción de la tapa con la caja de lámina los laterales son de 15 *cm*; a fin de evitar perturbaciones debido a flujos externos la tapa de acrílico tiene una tolerancia de ± 2 *mm* al borde de la caja de lámina. En la **Fig.2.22**, se muestra la Tapa en Vista Isométrica y en la **Fig.2.23** las proyecciones con las medidas necesarias previo a la manufactura.

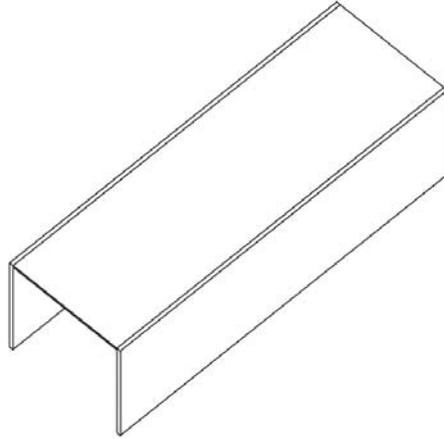
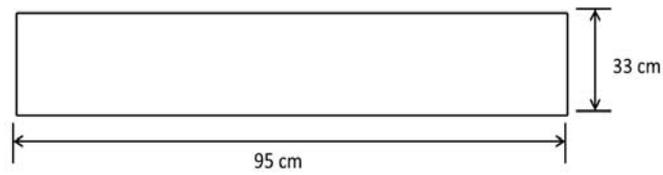
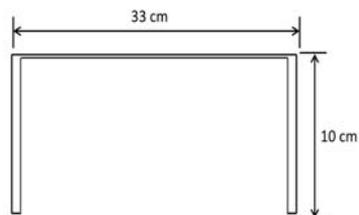


Figura 2.22: Vista Isométrica



(a) Vista Lateral



(b) Vista Frontal

Figura 2.23: Medidas de la Tapa

En la **Fig.2.24** se muestra el CAD final de la Tapa de acrílico.

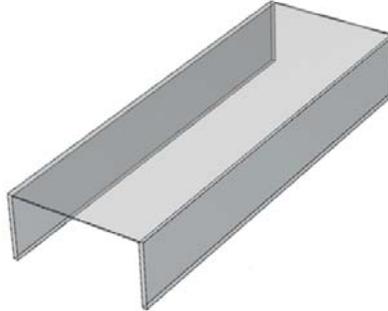


Figura 2.24: Tapa de acrílico

Una vez detallada las medidas de cada uno de los componentes del dispositivo de pruebas se procede el proceso de manufactura.

Capítulo 3

Manufactura y ensamble

En este capítulo se describen las modificaciones que se llevaron a cabo en cada uno de los elementos que componen el arreglo experimental, asimismo se detallan los procesos de manufactura empleados, además de explicar la unión entre los componentes.

3.1. Placa de calentamiento

Para simular el calentamiento debido a la radiación solar incidente en el muro, se utilizó una placa de cobre debido a la alta conductividad térmica que tiene este material. La placa de cobre disponible en el laboratorio tiene medidas de $91\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ de alto y ancho respectivamente **Fig.3.1.**



Figura 3.1: Placa de cobre sin modificaciones.

Para lograr una temperatura uniforme en la placa de cobre, se procedió a realizar la manufactura de la resistencia eléctrica que estará en contacto directo con la placa. Debido a las dimensiones requeridas para la resistencia eléctrica el costo de adquisición es elevado, por lo que se decidió realizar la manufactura personalmente reduciendo el costo en un 40 %.

Resistencia eléctrica

Para obtener una temperatura uniforme en la placa de calentamiento, en la sección **2.3.1 Diseño** se calculó la distancia máxima entre cintas para cumplir dicha condición, en vista de que la resistencia eléctrica debe cubrir la superficie de la placa de cobre, el proceso de manufactura es singular, por lo que se explica en los siguientes pasos:

1. Para cubrir el área total se realizaron dos resistencias de $15\text{ cm} \times 90\text{ cm}$, que posteriormente se conectaran en serie, por lo que se cortó la mica aislante como se muestra en la **Fig.3.2**.



Figura 3.2: Cortes en la mica aislante.

2. Para evitar el uso de pegamento especial para la conducción eléctrica, la cinta de Nicromel se enrolló en las micas de $15\text{ cm} \times 90\text{ cm}$, como se muestra en la **Fig.3.3**.



Figura 3.3: Tejido cinta de Nicromel en mica aislante.

Es importante destacar que la cinta de Nicromel debe mantenerse tensa para evitar abultamientos en la resistencia.

3. Posteriormente las micas aislantes se acomodan como en la **Fig.3.4**, de esta forma se asegura que la cinta de Nicromel no se encuentra en contacto e impedir un corto circuito.

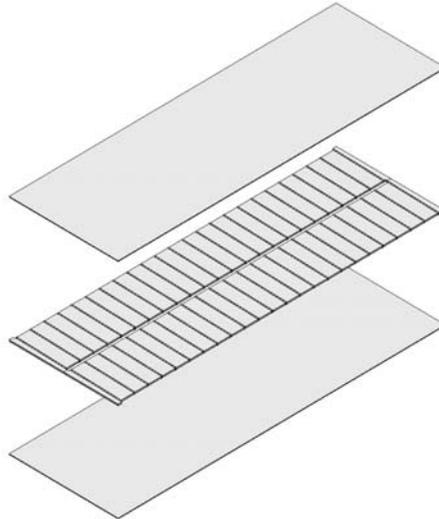


Figura 3.4: Posición de las micas.

4. Finalmente, el arreglo anterior se empaqueta con lámina galvanizada, de esta manera evitar el movimiento de los elementos.

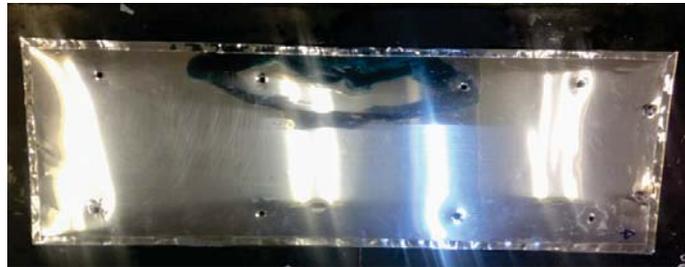


Figura 3.5: Resistencia eléctrica.

En la **Fig.3.5** se observan 8 barrenos, estos puntos fueron calculados de tal modo que no coincidan con la cinta de nicromel para evitar corto circuito en la resistencia eléctrica, de la misma manera se mantiene centrada con la placa de cobre.

3.2. Estructura de soporte

Para la manufactura de la estructura de soporte se eligió un material económico y resistente al calor, se utilizaron tubos de PTR para la base y lámina negra para la caja de soporte, al ser más compleja la construcción, el trabajo se mandó a hacer con una empresa privada dedicada a hacer anaqueles y mesas de laboratorio.



Figura 3.6: Estructura de soporte.

En la **Fig.3.6** se observa el resultado final de la estructura, se le dio un acabado de pintura color beige al horno para protegerlo de la corrosión y brindar una mejor presentación. La estructura cuenta con un mecanismo sin fin con catarinas de tracción para poder inclinar la lámina de cobre **Fig.3.7 (a)**, de lado contrario del mecanismo se colocó un puntero para indicar el grado de inclinación en la que se encuentra colocada la caja de soporte **Fig.3.7 (b)**. A fin de cumplir con el objetivo del proyecto, en la parte superior e inferior de la caja se soldaron cuatro perfiles de lámina con la finalidad de poder modificar el ancho del canal de aire **Fig.3.7 (c)**.



Figura 3.7: Complementos en la estructura de soporte.

Tapa de acrílico

Debido a que la tapa de acrílico tiene medidas específicas definidas es la sección **3.2 Diseño**, se procedió a realizar la manufactura de manera manual, para reducir los costos, el proceso de fabricación se detalla en los siguientes pasos:

1. Puesto que el acrílico se vende en placas grandes, el corte inicial se realizó con un cortador por consiguiente es necesario rectificar el corte con ayuda de la cierra de mesa, de esta modo aseguramos que la caja tendrá un ángulo de 90° en cada uno de sus lados, **Fig. 3.8**.

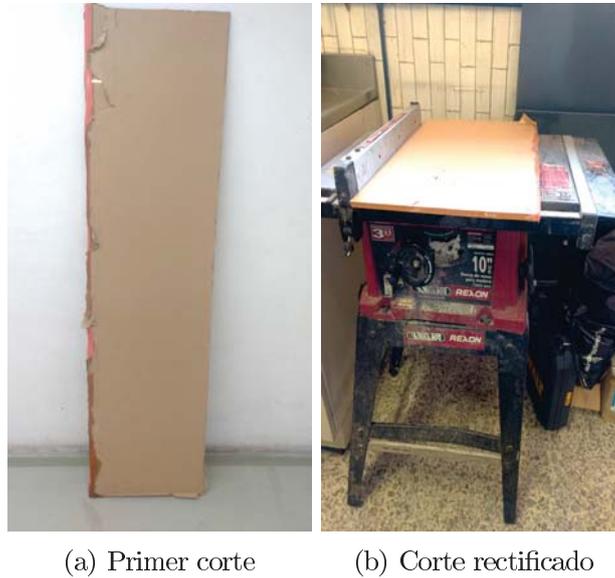


Figura 3.8: Corte de la placa de acrílico.

2. Posteriormente, se cortaron dos secciones de $15\text{ cm} \times 95\text{ cm}$ correspondientes a los laterales de la tapa y una sección de $31\text{ cm} \times 95\text{ cm}$ para la parte superior de la tapa, **Fig.3.9**.



Figura 3.9: Secciones de la tapa.

3. Para poder unir los laterales con la tapa, se fabricó un bisel con un router, asegurando un buen contacto entre caras, seguidamente se

aplicó el pegamento AD-CRYL con una jeringa para evitar residuos, como se muestra en la **Fig.3.10**.

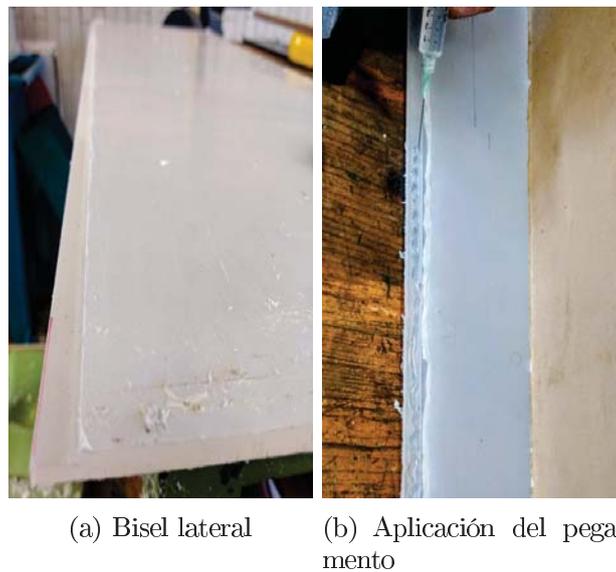


Figura 3.10: Unión entre piezas.

4. Finalmente, se dejó reposar la tapa de acrílico con guías de presión, como se muestra en la **Fig.3.11**



Figura 3.11: Arreglo final

3.3. Unión entre elementos

En la sección anterior, se explicó de manera detallada la elaboración de cada una de las componentes del arreglo experimental. A continuación, se detallarán las modificaciones para el ensamblaje final del mecanismo de pruebas.

Placa de cobre con Resistencia eléctrica

Para poder unir la placa de cobre con la resistencia eléctrica fue necesario maquinarse tornillos de cobre. En el mercado los tornillos de cobre se ocupan para instalaciones eléctricas siendo tornillos muy pequeños y de alto costo por lo que no son útiles para el proyecto. Se rechazó la idea de ocupar tornillos de otro material dado que afectarían la conductividad dentro de la placa de cobre, representando complicaciones para el objetivo de estudio.

El proceso de fabricación de los tornillos de cobre a utilizar, fue el siguiente:

1. Se utilizó un machuelo de $1/4$ -20 hilos para realizar una cuerda a una barra de cobre de 25 cm de largo y $1/4\text{ in}$ de diámetro, **Fig.3.12**



Figura 3.12: Machuelo y barra de cobre.

2. Se cortó la barra de cobre en secciones de 2.5 cm para obtener 8 tornillos, debido a la alta maleabilidad del material, es importante destacar que debe protegerse la cuerda en la zona de sujeción antes

de cortarla **Fig.3.13 (a)**, de otro modo la cuerda sufrirá daños y no podrá utilizarse. En la **Fig.3.13 (b)** se muestran los tornillos una vez cortados.

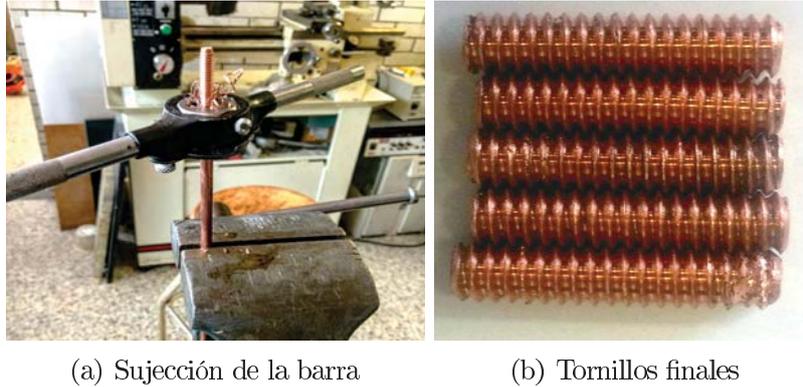


Figura 3.13: Maquinado de la cuerda.

3. Posteriormente los 8 tornillos se colocaron de tal manera que la placa de cobre este centrada con la resistencia eléctrica y se soldaron con soldadura SMAW (arco eléctrico) para evitar el desplazamiento de los tornillos, como se representa en la **Fig. 3.14**.

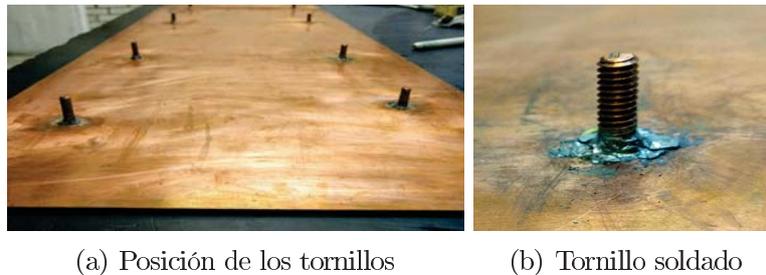


Figura 3.14: Unión de los tornillos en la placa de cobre.

4. Con lijas de agua de, menor a mayor número de grano, se obtuvo una superficie uniforme de este modo ocultar la unión de los tornillos con la placa. Ver **Fig.3.15**.



(a) Placa sin lijar



(b) Placa pulida

Figura 3.15: Acabado superficial de la placa de cobre.

5. Después de todas las modificaciones realizadas a la placa de cobre, se acopló la resistencia eléctrica de manera centrada, a continuación se colocaron rondanas y tuercas de presión en cada uno de los tornillos de cobre para mantener en contacto la placa de cobre con la resistencia eléctrica, como se muestra en la **Fig.3.16**.



(a) Placa de cobre y resistencia eléctrica (b) Sujeción entre elementos

Figura 3.16: Arreglo final placa de cobre y resistencia eléctrica.

6. Finalmente, se pintó la placa de cobre, con un recubrimiento especial para altas temperaturas en color negro semimate, para asemejar un cuerpo negro de esta manera la emisividad tiene un valor cercano a uno, como se muestra en la **Fig.3.17**. Es importante que la superficie sea lo más lisa posible, para evitar perturbaciones en el flujo interno.



Figura 3.17: Placa de cobre pintada de negro.

Estructura de soporte con placa plana

El estudio se enfoca en la parte superior de la placa de cobre, por lo que se debe asegurar que la transferencia de calor sea en su mayor parte hacia esta dirección, para lograr este objetivo es necesario aislar térmicamente la parte inferior.

El aislante térmico en la caja de lámina funciona en conjunto como soporte para la placa de calentamiento, se utilizaron placas de asbesto como aislante debido a que es un material ligero y resistente al calor. El proceso para aislar la caja de lámina es la siguiente:

1. Se cortaron tres secciones de la placa de asbesto para cubrir internamente la caja de lámina. **Fig.3.18**.

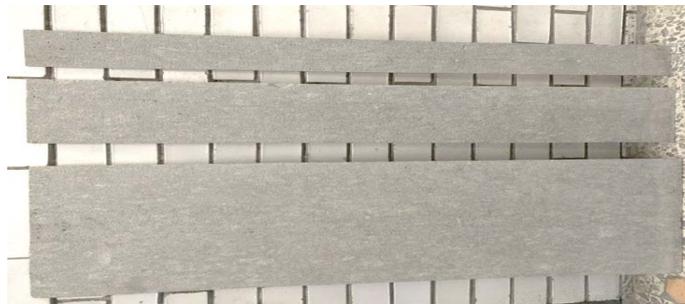


Figura 3.18: Secciones de asbesto.

2. Con adhesivo latex y con prensas de presión se colocó cada una de las placas de asbesto para cubrir interiormente la caja de lámina, como se muestra en la **Fig.3.19**.



(a) Distribución de prensas

(b) Conjunto de placas

Figura 3.19: Arreglo de presión.

3. Seguidamente, se instalaron dos placas de asbesto de menor tamaño, a los costados para generar una base en la que se posara la placa de cobre. Ver **Fig.3.20**



Figura 3.20: Aislante de la caja de lámina.

Para asegurar la placa de cobre se manufacturaron dos piezas de acero, **Fig.3.21 (a)** y **Fig.3.21 (b)**:

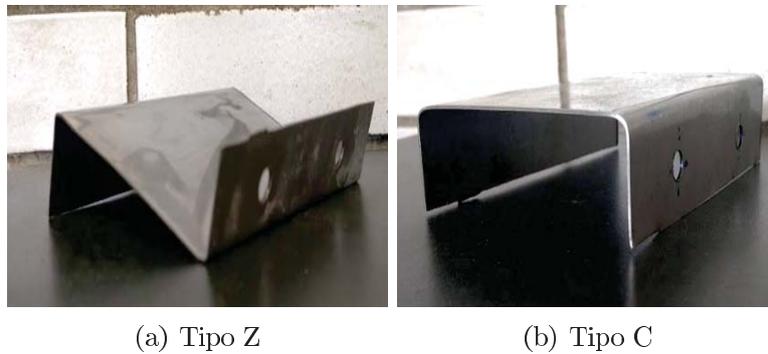


Figura 3.21: Piezas de seguridad.

El motivo por el cual se dobló la lámina de acero de diferente manera, es debido a que la pieza Tipo C se ubica en la parte inferior de la caja de lámina por lo que está al interior de la placa de cobre, siendo la primera pieza a colocar **Fig.3.22 (a)**; la pieza Tipo Z se encuentra en la parte superior de la caja, los barrenos de sujeción quedan al exterior de la placa de cobre facilitando el ensamble **Fig.3.22 (b)**.

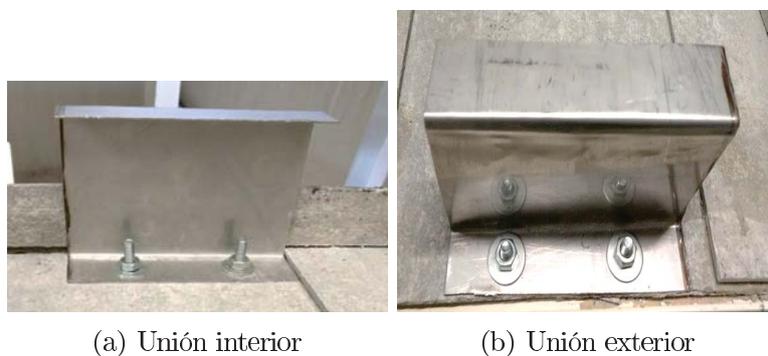


Figura 3.22: Posición de las piezas de seguridad.

Finalmente, se colocó aislante styrofoam (poliestireno extruido) en contacto con la resistencia para evitar pérdidas de calor en la parte inferior de la placa de calentamiento, para sujetar el styrofoam se adhirió una capa de poliestireno extruido en cada uno de las piezas de sujeción, así como en la parte inferior de la caja de soporte como se muestra en la **Fig.3.23**.



Figura 3.23: Sujeción del aislante térmico.

Ensamble completo

Una vez detallada cada uno de las secciones correspondientes a la manufactura, se procede a montar el arreglo experimental de la siguiente manera:

1. Atornillar la pieza Tipo C a la estructura de soporte.
2. Colocar el poliestireno extruido en la caja de lámina.
3. Acomodar la placa de cobre sobre el borde de asbesto y asegurar la pieza de sujeción entre la resistencia eléctrica y la placa de cobre.
4. Acoplar la pieza Tipo Z entre la placa de cobre y la resistencia, posteriormente poner en contacto el styrofoam con la superficie de la resistencia, finalmente, atornillar la pieza para asegurar la placa de cobre por ambos lados.



Figura 3.24: Ensamble completo.

Con la **Fig.3.24** se da por concluido la parte de manufactura de una manera satisfactoria, con los requisitos suficientes para cumplir con los objetivos del proyecto.

Capítulo 4

Instrumentación

En este capítulo se describe el proceso de instrumentación del dispositivo experimental, así como el equipo utilizado en el laboratorio para monitorear la temperatura de la placa de calentamiento.

4.1. Instalación de termopares

Prueba de la placa de calentamiento

Parte imprescindible del proyecto es mantener la temperatura de superficie homogénea. Para comprobar los resultados del diseño de la placa de calentamiento, se realizaron pruebas utilizando una cámara termográfica, Therma CAM P40. Las pruebas se realizaron colocando la placa a 90° , es decir en posición vertical, sin la tapa de acrílico. La **Fig.4.1** es una termografía tomada a la placa de cobre, en la que se puede observar que del centro hay un gradiente de temperatura de 0.2°C , mientras que en los bordes superior e inferior se presenta una temperatura de aproximadamente 1°C inferior al centro de la placa. Las variaciones de temperatura se deben a que en el laboratorio se encontraban personas ajenas al proyecto, las cuales estaban entrando y saliendo generando corrientes de aire. Lo anterior muestra lo sensible que es el fenómeno a estudiar por lo que se realizaron adecuaciones al laboratorio para minimizar los efectos de entorno.

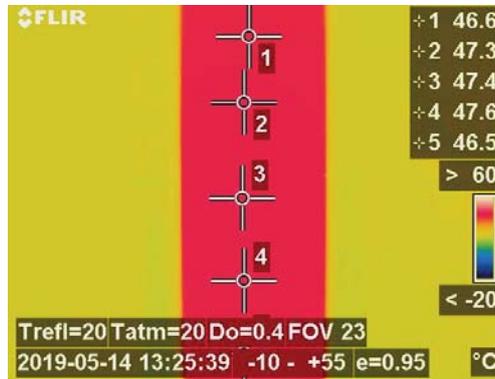


Figura 4.1: Termografía de la placa de cobre.

Colocación de termopares

El estudio de capa límite se enfoca en la parte central de la placa de calentamiento, de manera que se distribuyeron 5 termopares a lo largo de la placa **Fig.4.2**, con el fin de evitar los efectos de borde, donde se presentan los mayores gradientes de temperatura. Se construyeron 5 termopares tipo T, con cable termopar de la compañía Omega Engineering tipo TT-T-30 (cobre-constantan), con punta soldada de estaño-plomo.

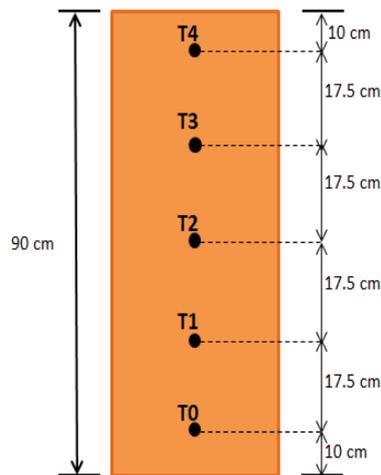


Figura 4.2: Distribución de los termopares.

Es preciso colocar los termopares en la parte posterior de la placa de cobre, con fin de mantener la superficie lisa y evitar perturbaciones en el flujo. En la **Fig.4.3** se observa que los termopares se ubican entre la placa de cobre y la resistencia eléctrica, para tener precisión en las lecturas se requiere que el termopar este en contacto en un solo punto de la placa de cobre, para sujetar los termopares se utilizó pasta epoxica Omegabond 200, apta para altas temperaturas y con gran conductividad térmica especialmente desarrollado para la unión permanente en superficies metálicas.

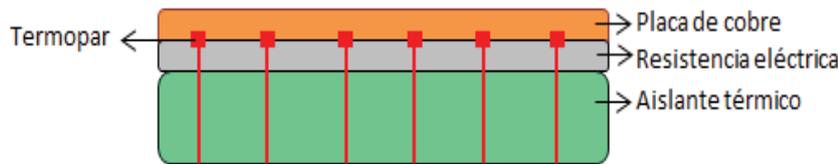


Figura 4.3: Posición de los termopares.

Con intención de posicionar el dispositivo de pruebas en diferentes ángulos sin tensar o afectar los termopares se calculó la distancia total de la siguiente manera: los termopares al colocarse en la parte posterior de la placa de cobre deben atravesar la resistencia eléctrica junto con el aislante térmico, por lo que se hizo un barreno de 3 *mm* en la parte central, sumando 5 *cm*; del centro de la placa al borde de la caja de lámina son 15 *cm*, se consideró una distancia de 1 *m* hacia la mesa de trabajo, por último se suman 5 *cm*, de holgura, siendo un total de 125 *cm*. Finalmente se añade la distancia de cada termopar en la placa de cobre. Considerando la distribución de la **Fig.4.2**, la distancia total de cada termopar es la siguiente:

$$T4=135.0 \text{ cm}$$

$$T3=152.5 \text{ cm}$$

$$T2=170.0 \text{ cm}$$

$$T1=187.5 \text{ cm}$$

$$T0=205.0 \text{ cm}$$

El termopar cero es el de mayor distancia debido a que se encuentra en la parte inferior de la placa de cobre. Para evitar ruido en las lecturas,

el cable debe permanecer sin dobleces con el fin de evitar daño en los hilos internos. En la **Fig.4.4** se muestra el acomodo de los termopares.



Figura 4.4: Colocación de los termopares.

A cada termopar se le asignó un número para identificar su posición y posibilitar una adecuada instalación. En el laboratorio se cuenta con sistema de adquisición de datos de National Instruments modelo PXI-1011 con una tarjeta de adquisición de temperatura modelo SCXI-1303, **Fig.4.6**, en el cual se conectaron los termopares de modo que el número del canal coincida, como resultado se ocuparon los canales del 0 al 4. Para conectar los termopares se deben separar los polos, como se indica en la **Fig.4.5** la terminal positiva corresponde al hilo de cobre y la negativa al constantan

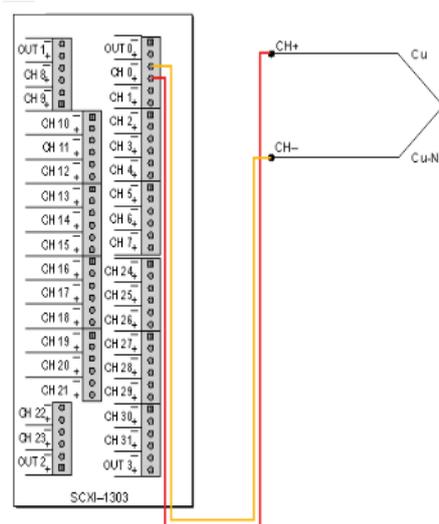


Figura 4.5: Diagrama de conexión.



Figura 4.6: Conexión de los termopares.

Para conectar los termopares se deben separar los polos, como se indica en la **Fig.4.5** la terminal positiva corresponde al hilo de cobre y la negativa al constantan. Como resultado la instrumentación del dispositivo de pruebas se muestra en la **Fig.4.7**.

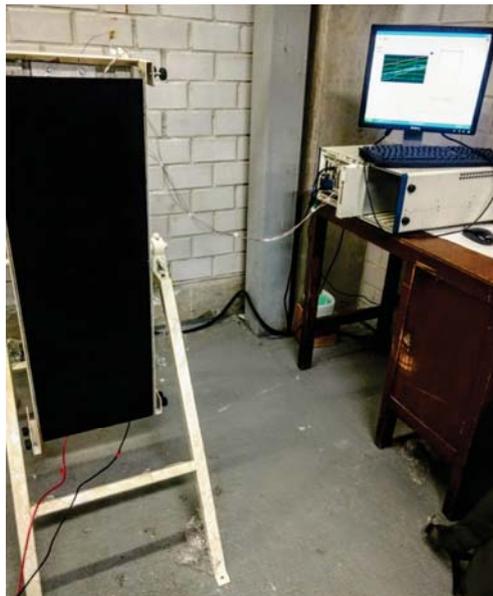


Figura 4.7: Instrumentación del dispositivo de pruebas

4.2. Programación y calibración

Para controlar las lecturas de temperatura de la placa de cobre se utilizó LabView 7.1 es un ambiente de desarrollo gráfico, diseñado específicamente para científicos e ingenieros. Este software permite desarrollar proyectos de medición, monitoreo y control con un mínimo de programación, de igual forma permite guardar variables específicas en intervalos de tiempos establecidos por el usuario. El programa desarrollado permite monitorear en tiempo real la temperatura de los termopares instalados en la placa.



Para empezar el programa se utilizó el bloque DAQ-Assist, después se eligió el tipo de variable a medir, los termopares son una entrada analógica Fig.4.8.

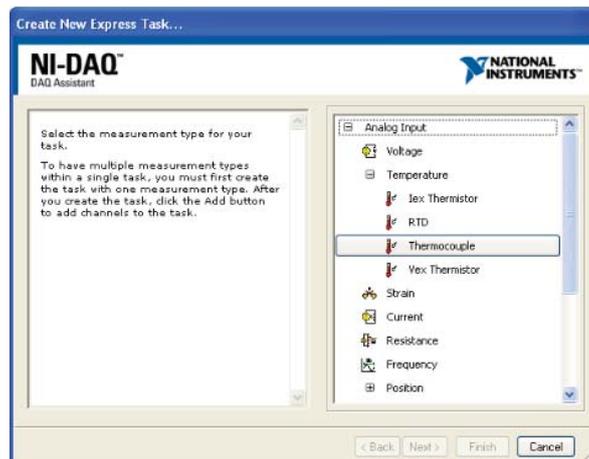


Figura 4.8: Menú del bloque DAQ-Assist.

Posteriormente se estableció el rango de operación de 17 °C a 100 °C a cada uno de los termopares tipo T, utilizando como referencia el termistor instalado en la tarjeta de adquisición de temperatura. La lectura de cada termopar es almacenada a una tasa de muestreo de 1 *dato/s*. Todas las características se indican en el menú de la **Fig.4.9**.

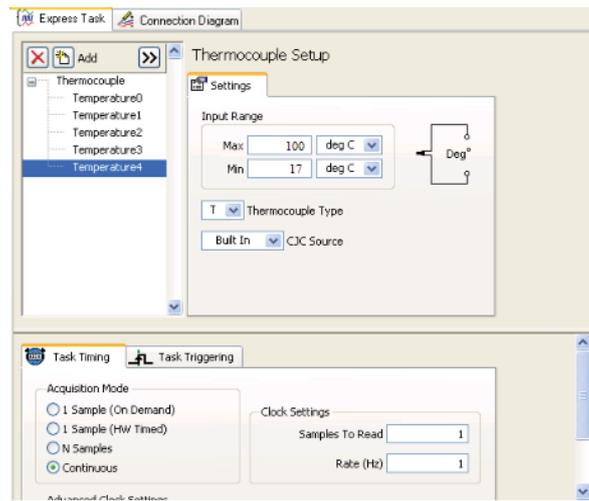


Figura 4.9: Menú de caracterización de los termopares.

Seguidamente se realizó la programación como se muestra en el diagrama de bloques en la **Fig.4.10**, la función Waveform Chart **Fig.4.11(a)**, genera una gráfica de cada uno de los termopares, para convertir los datos dinámicos obtenidos directamente del Daq-Assist(Asistente de adquisición de datos), a datos numéricos se ocupó la función Dinamyc Data Tipe **Fig.4.11(b)**, seguidamente la función Array **Fig.4.11(c)**, separa las lecturas de cada termopar, finalmente con operaciones booleanas se asigna un factor de corrección por termopar. Para calibrar los termopares se colocaron en agua con hielo junto con un termistor de alta precisión, la diferencia entre lecturas corresponde al factor de corrección.

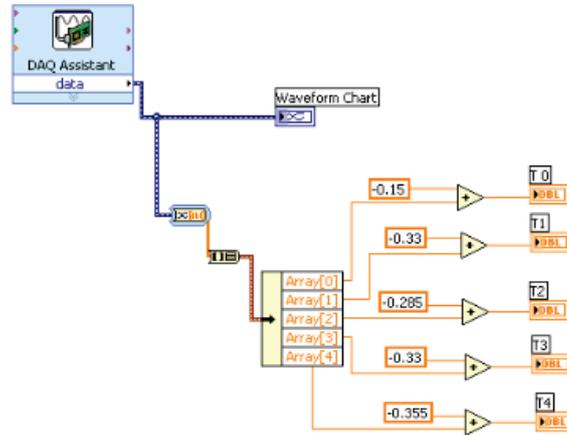


Figura 4.10: Diagrama de bloques.

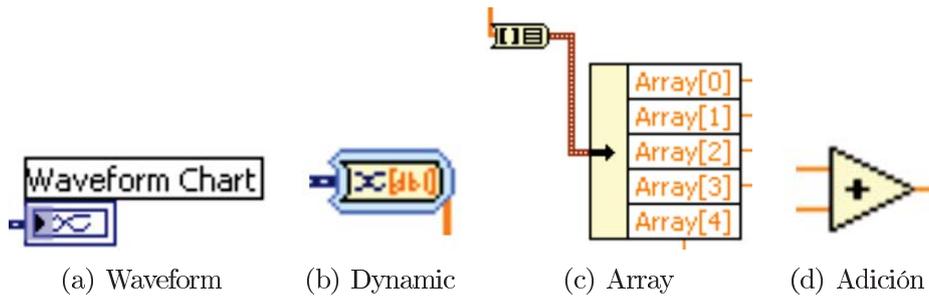


Figura 4.11: Funciones de Lavbiew.

La interfaz de usuario se muestra en la **Fig.4.12**.

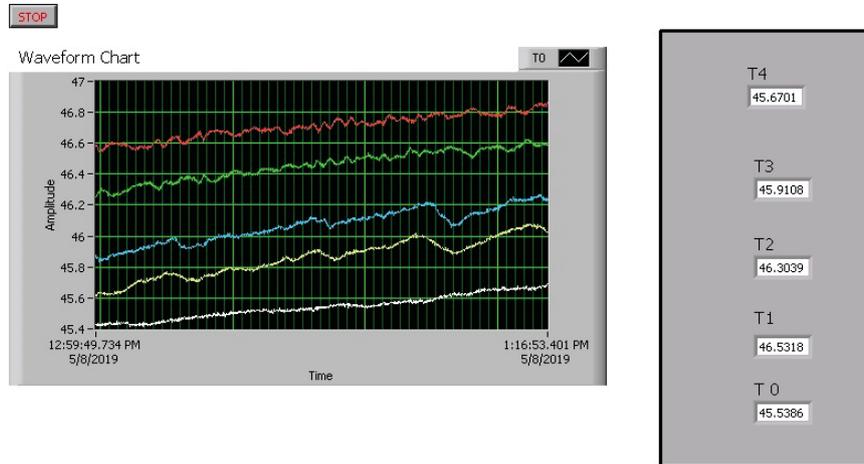


Figura 4.12: Interfaz de usuario

Las fluctuaciones que se observan en la gráfica son provocadas por los factores de ruido dentro del laboratorio, las lecturas se tomaron cuando el experimento aún no llegaba en un estado estable, por lo que se observan gradientes de temperatura en el esquema de lado derecho.

Capítulo 5

Conclusiones

El uso de energía en sistemas de aire acondicionado y calefacción forma gran parte de la demanda energética global, con el propósito de afrontar la crisis energética surge el interés por estudiar los muros de resguardo con la intención de proporcionar una alternativa amigable con el medio ambiente.

El reto principal es minimizar los costos de operación y consumo energético, además de mejorar el confort térmico de las personas que habitan o hacen uso de casas y edificios; por otro lado, se reducen las emisiones de carbono hacia el medio ambiente. Para lograr este propósito el tema de esta tesis se enfocó en el diseño y manufactura de un dispositivo que permita estudiar experimentalmente el fenómeno de capa límite en un muro de resguardo, así como los factores que afectan directamente su comportamiento y de este modo encontrar los valores óptimos de operación. El fenómeno de capa límite se desarrolla al interior del canal, por lo que se demanda que las condiciones de trabajo estén controladas para evitar perturbaciones y señales de ruido en las mediciones.

Para emular la temperatura de un muro exterior sometido a continua radiación los experimentos se llevaran a cabo en un rango de temperatura de 30 °C a 80 °C, es importante mantener una temperatura uniforme en la placa de calentamiento, de éste modo se evitan gradientes de temperatura que dificulten el análisis experimental. El diseño propuesto de la placa de calentamiento garantiza una distribución uniforme de tempera-

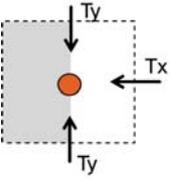
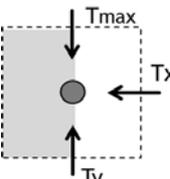
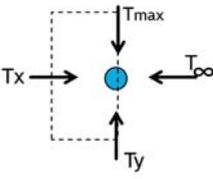
tura con una precisión de ± 0.3 °C.

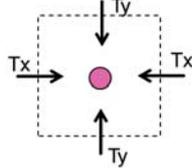
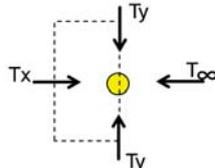
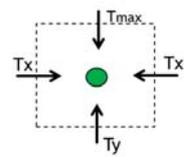
Es fundamental para el desarrollo de los experimentos evitar perturbaciones en el flujo interno, por lo que toda sujeción del dispositivo de pruebas se realizó en la parte posterior de la placa de cobre, asegurando una superficie lisa de color negro semi-mate. La manufactura de una tapa transparente permite observar el flujo interno inyectando humo iluminado con un plano laser, en adición facilita la medición de la velocidad del flujo con el Laser Doppler. El dispositivo soporta el peso total del arreglo sin perder estabilidad, también permite que el aire ingrese por convección natural al interior del canal, así como variar la distancia entre muros, finalmente tiene la capacidad de posicionarse en diferentes ángulos, favoreciendo la aplicación de un muro de resguardo en techos.

En conclusión, se diseñó y manufacturó un dispositivo para estudiar el fenómeno de capa límite en un muro de resguardo con las características necesarias para realizar experimentos de manera satisfactoria con el propósito de establecer la configuración óptima de operación.

Apéndice A

Análisis nodal

Configuración	Análisis nodal
 <p data-bbox="343 1160 703 1189">Nodo interior con pared adiabática</p>	$Q_{x \rightarrow N} = k(\Delta y) \left(\frac{T_x - T_N}{\Delta x} \right)$ $Q_{y \rightarrow N} = k \left(\frac{\Delta x}{2} \right) \left(\frac{T_y - T_N}{\Delta y} \right)$ $\sum Q_N = Q_{x \rightarrow N} + 2Q_{y \rightarrow N}$
 <p data-bbox="384 1406 662 1464">Nodo con pared adiabática y flujo de calor</p>	$Q_{max \rightarrow G} = k \left(\frac{\Delta x}{2} \right) \left(\frac{T_{max} - T_G}{\Delta y} \right)$ $Q_{y \rightarrow G} = k \left(\frac{\Delta x}{2} \right) \left(\frac{T_y - T_G}{\Delta y} \right)$ $Q_{x \rightarrow G} = k(\Delta y) \left(\frac{T_x - T_G}{\Delta x} \right)$ $\sum Q_G = Q_{x \rightarrow G} + Q_{y \rightarrow G} + Q_{max \rightarrow G}$
 <p data-bbox="343 1688 699 1747">Nodo en superficie con convección y flujo de calor</p>	$Q_{max \rightarrow A} = k(\Delta x) \left(\frac{T_{max} - T_A}{\Delta y} \right)$ $Q_{\infty \rightarrow A} = h(\Delta y) \left(\frac{T_{\infty} - T_A}{\Delta x} \right)$ $Q_{y \rightarrow A} = k(\Delta x) \left(\frac{T_y - T_A}{\Delta y} \right)$ $Q_{x \rightarrow A} = k(\Delta y) \left(\frac{T_x - T_A}{\Delta x} \right)$ $\sum Q_A = Q_{max \rightarrow A} + Q_{\infty \rightarrow A} + Q_{y \rightarrow A} + Q_{x \rightarrow A}$

Configuración	Análisis nodal
 <p data-bbox="446 638 590 667">Nodo interior</p>	$Q_{y \rightarrow R} = k(\Delta x) \left(\frac{T_y - T_R}{\Delta y} \right)$ $Q_{x \rightarrow R} = k(\Delta y) \left(\frac{T_x - T_R}{\Delta x} \right)$ $\sum Q_R = 2Q_{y \rightarrow R} + 2Q_{x \rightarrow R}$
 <p data-bbox="343 873 702 902">Nodo en superficie con convección</p>	$Q_{\infty \rightarrow Am} = h(\Delta y) (T_{\infty} - T_{Am})$ $Q_{y \rightarrow Am} = k(\Delta x) \left(\frac{T_y - T_{Am}}{\Delta y} \right)$ $Q_{x \rightarrow Am} = k(\Delta y) \left(\frac{T_x - T_{Am}}{\Delta x} \right)$ $\sum Q_R = Q_{\infty \rightarrow Am} + 2Q_{y \rightarrow Am} + Q_{x \rightarrow Am}$
 <p data-bbox="359 1108 686 1137">Nodo interior con flujo de calor</p>	$Q_{max \rightarrow V} = k(\Delta x) \left(\frac{T_{max} - T_V}{\Delta y} \right)$ $Q_{y \rightarrow V} = k(\Delta x) \left(\frac{T_y - T_V}{\Delta y} \right)$ $Q_{x \rightarrow V} = k(\Delta y) \left(\frac{T_x - T_V}{\Delta x} \right)$ $\sum Q_R = Q_{max \rightarrow V} + 2Q_{x \rightarrow V} + Q_{y \rightarrow V}$

Bibliografía

- [1] Piero Medici. The trombe wall during the 1970s: technological device or architectural space? critical inquiry on the trombe wall in europe and the role of architectural magazines. 5:45–60, 10 2018.
- [2] Frank P. Incropera and David P. DeWitt. *Fundamentos de transferencia de calor y masa*. John Wiley & Sons, Inc., New York City, New York, 4th edition edition, 1996.
- [3] Yunus.A. Çengel. *Transferencia de calor and masa*. McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2011.
- [4] P.T. Tsilingiris. Parametric space distribution effects of wall heat capacity and thermal resistance on the dynamic thermal behavior of walls and structures. *Energy and Buildings*, 38(10):1200 – 1211, 2006.
- [5] C. Luo, B. Moghtaderi, S. Hands, and A. Page. Determining the thermal capacitance, conductivity and the convective heat transfer coefficient of a brick wall by annually monitored temperatures and total heat fluxes. *Energy and Buildings*, 43(2):379 – 385, 2011.
- [6] Bruno Bueno, Leslie Norford, GrÃ©goire Pigeon, and Rex Britter. A resistance-capacitance network model for the analysis of the interactions between the energy performance of buildings and the urban climate. *Building and Environment*, 54:116 – 125, 2012.
- [7] K.A. Antonopoulos and E. Koronaki. Apparent and effective thermal capacitance of buildings. *Energy*, 23(3):183 – 192, 1998.
- [8] Paris. Groupe Expansion. Aa l architecture d aujourd hui, no. 167, 1973.

- [9] Colin Moorcraft. Solar energy in housing. *Architectural Design*, 43, 1973.
- [10] Samar Jaber and Salman Ajib. Optimum design of trombe wall system in mediterranean region. *Solar Energy*, 85(9):1891 – 1898, 2011.
- [11] Omidreza Saadatian, K. Sopian, C.H. Lim, Nilofar Asim, and M.Y. Sulaiman. Trombe walls: A review of opportunities and challenges in research and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8):6340 – 6351, 2012.
- [12] Eduardo KrÄ¼ger, Eimi Suzuki, and Adalberto Matoski. Evaluation of a trombe wall system in a subtropical location. *Energy and Buildings*, 66:364 – 372, 2013.
- [13] Zhongting Hu, Wei He, Jie Ji, and Shengyao Zhang. A review on the application of trombe wall system in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70:976 – 987, 2017.
- [14] Diana Urge-Vorsatz, Luisa F. Cabeza, Susana Serrano, Camila Barroneche, and Ksenia Petrichenko. Heating and cooling energy trends and drivers in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41:85 – 98, 2015.
- [15] Long Shi, Guomin Zhang, Wei Yang, Dongmei Huang, Xudong Cheng, and Sujeeva Setunge. Determining the influencing factors on the performance of solar chimney in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 88:223 – 238, 2018.
- [16] ASES XXI. *Normas de 2009 Areas de juegos infantiles: Guia para su evaluacion and practica*, Noviembre 2009.
- [17] Columpios KELUT. <https://www.indalchess.com/tienda>, 2019.