



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

ANÁLISIS TÉRMICO DE UNA PLACA PARA UNA PRENSA DE  
TERMOFORMADO

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERA MECÁNICA**

PRESENTA:

**FLOR YAZMÍN MÉNDEZ MARTÍNEZ**

DIRECTOR DE TESIS: DR. ENRIQUE SOTO CASTRUITA



MÉXICO, D.F.

2012

**JURADO**

Dr. Francisco Javier Solorio Ordaz

Dr. Enrique Soto Castruita

Dr. Martin Salinas Vázquez

Ing. Gabriel Alejandro Jaramillo Morales

M. I. Rafael Chávez Martínez

**DEDICATORIAS**

*A Dios*

*Por permitirme llegar hasta aquí.*

*A mis padres Florina y Pablo*

*Por su apoyo, comprensión, consejos y por la confianza depositada en mí, pero  
sobre todo por su amor.*

*A mis hermanos Griselda y Alfredo*

*Por darme su apoyo incondicional y por estar ahí, siempre que los he  
necesitado.*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente a mi Familia mil palabras no bastaran para agradecerles todo su apoyo.

Mi madre Florina por estar al pendiente de mí en todo momento y apoyarme en mis decisiones, así como por darme su esfuerzo y amor incondicional, sus consejos, su paciencia, por los valores que me inculco y por todo lo que me ha dado.

A mi padre Pablo, por su paciencia, cariño y apoyo incondicional, por su ejemplo de perseverancia y constancia, y por todas sus enseñanzas.

A mis hermanos Alfredo y Griselda por estar ahí siempre apoyándome en mis decisiones, hacerme saber que puedo contar con ellos.

A la UNAM, por ser mi alma mater y a la Facultad de Ingeniería por la formación académica y al CCADET por permitirme realizar este trabajo en sus instalaciones.

A la DGAPA que por medio del proyecto PAPIIT con clave IB100211 me otorgo una beca para la elaboración de esta tesis.

Al Dr. Enrique Soto Castruita por su orientación en la elaboración de este trabajo, así como por haberme facilitado siempre los medios suficientes para llevar a cabo todas las actividades desarrolladas en esta tesis.

Al Dr. Cresencio García Segundo por su colaboración en las pruebas termográficas.

A la Dra. María Soledad Córdova Aguilar por su apoyo técnico en el laboratorio.

Al Ingeniero Eduardo Bernal por su colaboración en el diseño

Al Dr. Gabriel Ascanio, Sr. Norberto, Sr. Alejandro y en general a todos los del taller, a Jesús Pacheco y todos los que de alguna u otra manera me apoyaron en la culminación de este trabajo.

A mis sinodales Dr. Francisco Solorio Ordaz, Dr. Martín Salinas Vázquez, Ing. Gabriel Alejandro Jaramillo Morales, M. I. Rafael Chávez Martínez, por aceptar ser parte del jurado.

A mis compañeros y amigos del CCADET, Jonathan Arenas, Ricardo Reséndiz, Álvaro Núñez, Luis Vázquez, Tonatiuh, a todos ellos que estuvieron durante el proceso de la elaboración de este trabajo que de alguna u otra manera me apoyaron, y que me hicieron pasar buenos momentos durante mi estancia en el centro.

Así como a mis amigos de la Facultad, por los buenos momentos vividos a lo largo de la carrera y después de esta, Salvador Sánchez, Héctor Hernández, Nury Rives, Joana Rojas, Guillermo Miguel, y a aquellos compañeros de facultad y que llegue a considerar amigos gracias al CCADET, Mario Sánchez, Alfredo Martínez y Miguel Peña.

## Índice

Nomenclatura.....	7
Resumen.....	8
1. INTRODUCCIÓN.....	10
Objetivo.....	11
Objetivos particulares.....	11
2. MARCO TEÓRICO.....	12
2.1 Elementos diseñados para calentar o transferir calor.....	12
2.2 Propiedades y conformado de los polímeros.....	14
2.2.1. Influencia de la temperatura en la calidad de un polímero.....	16
2.2.2. Proceso de moldeo a presión.....	18
2.3. Transferencia de calor.....	20
2.3.1. Ecuación de conducción de calor.....	23
2.3.2. Convección de calor.....	26
2.3.3. Radiación de calor.....	31
2.4. Método de resistencia interna despreciable.....	35
3. DESARROLLO DEL PROBLEMA.....	38
3.1 Planteamiento del problema.....	38
3.2 Características del material empleado.....	40
3.2.1 Cálculo de energía generada por la resistencia.....	47
3.3 Desarrollo experimental.....	53
4. SIMULACION DEL PROCESO.....	57
4.1 Desarrollo numérico.....	57
4.2 Configuración y características de la placa simulada con resistencia en forma de senoide 61	
4.3. Configuración y características de posibles arreglos de resistencias rectas en la placa.....	63
5. RESULTADOS.....	68
5.1 Comparación de datos de temperatura teóricos y experimentales para el caso #1.....	68
5.2. Simulación de posibles arreglos.....	76
6. CONCLUSIONES.....	97
Apéndice A.....	99
Bibliografía.....	101
Mesografía.....	101

## Nomenclatura

$A$	Área de contacto, $m^2$	$T_{\infty}$	Temperatura del fluido, K
$Bi$	Numero de Biot,	$U$	Energía interna, J
$c_p$	Calor específico, $J/Kg \cdot K$	<b>Letras griegas</b>	
$E$	Voltaje, V	$\alpha$	Absortividad
$\dot{E}_{alm}$	Energía que se almacena, W	$\varepsilon$	Emisividad
$\dot{E}_{ent}$	Energía que entra, W	$\mu$	Viscosidad, $Kg/s \cdot m$
$\dot{E}_g$	Energía que se genera, W	$\rho$	Densidad, $Kg/m^3$
$\dot{E}_{sale}$	Energía que sale, W	$\sigma$	Constante de Stefan Boltzmann, $W/m^2 \cdot K^4$
$E_d$	Energía emisiva, $W/m^2$		
$G$	Energía absorbida, $W/m^2$		
$h$	Coefficiente de convección térmica, $W/m^2 \cdot K$		
$I$	Corriente, A		
$k$	Coefficiente de conductividad térmica, $W/m \cdot K$		
$L$	Longitud característica, m		
$m$	Masa, Kg		
$P$	Potencia, W		
$Q$	Calor, J		
$q$	Energía, W		
$R$	Resistencia eléctrica, $\Omega$		
$T_s$	Temperatura de la superficie, K		

### Resumen

En el presente trabajo se realizó la caracterización del proceso de calentamiento de una placa de fundición gris similar a la utilizada en una prensa de termoformado de plásticos, el análisis se llevó a cabo por medio de simulaciones en 3D, donde los resultados fueron comparados con datos experimentales obtenidos por medio de una cámara termográfica.

En el caso de las simulaciones numéricas se elaboraron 6 configuraciones cambiando la colocación de las resistencias en el interior de la placa y algunas variaciones en el espesor. El primer arreglo fue una placa cuadrada con base de  $120 \times 120$  [mm] y un grosor de 25.4 [mm] con un canal y una resistencia en forma de sinusoidal, y con un diámetro de  $1/4''$  (0.635 [cm]), este diámetro fue considerado tanto para este arreglo como para de otras de las propuestas. El arreglo del caso #2 consistió en la colocación de tres resistencias en un mismo plano paralelo a la superficie. En el caso #3 se colocaron tres resistencias en forma paralela entre sí y a la superficie de interés, pero con un ligero desfase hacia la parte inferior de la resistencia que se encuentra en la parte central, los casos #4, #5 y #6 tienen configuraciones con cuatro resistencias en su interior.

En la parte experimental se elaboró una placa de fundición gris con las características del primer arreglo de la simulación por lo que se mandó elaborar una resistencia con forma sinusoidal, obteniendo una densidad de carga de  $71181 \text{ W/m}^2$ , este valor se calculó de manera experimental usando un contenedor completamente agitado con la resistencia en el interior. Se registro la temperatura como función del tiempo y se consideraron las pérdidas por radiación y convección al exterior del sistema.

Durante el funcionamiento de la resistencia colocada dentro de la placa, se capturaron imágenes de la superficie con una cámara termográfica, las cuales nos proporcionaron datos de temperatura que se usaron para ser comparados con los obtenidos por medio de la simulación. Se encontró una buena concordancia entre los resultados experimentales y los numéricos, por lo que se confirmó la validez de las simulaciones numéricas y se recomienda como un método para optimizar y estudiar fenómenos similares.



## ANÁLISIS TÉRMICO DE UNA PLACA PARA UNA PRENSA DE TERMOFORMADO

---

Finalmente, se compararon las gráficas de los arreglos propuestos y con base en esto se determinó cual podría ser el mejor arreglo en cuanto al perfil de temperaturas adquirido por la superficie.

### 1. INTRODUCCIÓN

En el CCADET se fabricó una prensa de moldeo para la elaboración de piezas usando un material polimérico como materia prima, el cual requiere ser calentado para su conformado, este proceso es realizado a través del calentamiento de placas que tienen integradas unas resistencias. La superficie de la placa no se calienta uniformemente y muchas veces este problema se ve reflejado en la calidad del producto final.

A simple vista y durante todo el proceso de calentamiento no se sabe que es lo que está ocurriendo exactamente en la superficie y mucho menos dentro de las placas; es decir, cómo se está realizando la transferencia de calor a través de ellas.

Para la caracterización del comportamiento térmico de una placa de este tipo se necesita averiguar los valores de temperatura en distintos puntos de la placa y para lapsos específicos cuando se aplica una fuente de calor. En estos casos una cámara infrarroja es de gran ayuda, con esta se puede medir la temperatura de la superficie en un instante dado.

La cámara asocia un color a cada pixel de la imagen que dependerá de la temperatura que tenga la placa, a su vez cuenta con un rango de colores que se tiene asociado con un escala de temperaturas, así se obtiene el campo escalar de temperaturas.

La obtención de datos en el interior de la placa no es tan fácil como los de la superficie, por lo que se utiliza una simulación, dado que esta nos puede mostrar mayor cantidad de información ya que se cuenta con resultados para el volumen completo de la placa, permitiendo realizar cortes en cualquier plano que se desee.

### Objetivo

Identificar los principales factores involucrados en el calentamiento de una placa, para mejorar la homogeneidad de la temperatura en su superficie por medio de simulaciones numéricas para diferentes arreglos geométricos de los elementos de calentamiento y comparar algunos de estos con resultados experimentales.

### Objetivos particulares

Estudiar el efecto de diferentes arreglos geométricos sobre el perfil de temperaturas en la superficie de la placa.

Proponer las metodologías para caracterizar las placas reales por medio de termografías infrarrojas y para obtener la carga térmica de los elementos involucrados de manera teórica y experimental.

Validar las simulaciones por medio de la comparación con resultados experimentales para las diferentes geometrías y proponer un arreglo que permita mejorar la homogeneidad de la temperatura sobre la placa para su posible implementación en una aplicación semejante.

## 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se dará una visión general de algunos elementos que existen en el mercado para calentar algún medio u objeto, se hablará de algunas características y propiedades de los polímeros, importantes para los fenómenos que se presentan durante su transformación, así como algunos de los métodos utilizados para la obtención de un producto. Se explicará cómo se lleva a cabo la transferencia de calor en un medio sólido o fluido.

### 2.1 Elementos diseñados para calentar o transferir calor

En la actualidad existen una variedad de aparatos que sirven como generadores de calor, o que tienen la capacidad de transferir calor con la finalidad de incrementar o controlar la temperatura de un elemento. Dentro de estos dispositivos se encuentran los baños térmicos, resistencias eléctricas, parrillas de inducción eléctrica, celdas Peltier, también llamadas módulos termoelectrónicos, entre otros. Algunos de estos dispositivos pueden presentar limitaciones para determinadas aplicaciones. A continuación se dará una breve descripción de cada uno de estos.

#### **Baños térmicos**

El baño térmico consiste en introducir el elemento a calentar o enfriar en un medio fluido con una temperatura superior o inferior al objeto, y por medio de convección se transfiere el calor, por lo general, se trata de evitar que la temperatura del fluido cambie demasiado para mantener el gradiente de temperaturas (por el hecho de ceder o adquirir el calor de/a otro cuerpo). Dependerá de la temperatura que tenga este fluido, para determinar el tiempo necesario para que el objeto se caliente o enfríe. En algunos casos, el fluido se recircula por el elemento a controlar, de tal manera que el baño funge como un regulador, pues generalmente está equipado con sistemas de calentamiento o enfriamiento.

#### **Resistencias eléctricas**

Este tipo de elementos consiste en el calentamiento de un alambre (comúnmente nicromel) por el que se hace pasar una corriente eléctrica, y dada la resistencia eléctrica del material se libera calor durante el proceso por el efecto Joule. El calor generado es transmitido a sus alrededores. Para proteger el elemento resistivo, en la mayoría de los casos, se encapsula con una cerámica. El uso de este material como recubrimiento se debe a que presenta una alta resistencia a altas temperaturas, y por la buena capacidad como aislante eléctrico. Las temperaturas que se puedan lograr dependerán de diversos factores, como el calibre del alambre, la corriente eléctrica y la geometría. En el mercado se pueden encontrar una gran variedad de este tipo de elementos, con diversas capacidades de generación de calor, distintas configuraciones y para distintas aplicaciones. El costo de estos es relativamente bajo, aunque dependerá de las características que se requieran para determinar su valor, características como: watts en cada unidad de superficie, voltaje al que operará, condiciones a las que estará expuesto, entre otras.

### **Parrillas de inducción**

Este tipo de dispositivo funciona por medio de una corriente inducida por un campo magnético y es conocida como corriente Foucault, el campo magnético es generado por una bobina que se encuentra conectada a una fuente, generando de esta manera un campo en el interior de la bobina, el campo magnético es dirigido al elemento más próximo, este elemento tiene que ser un material ferromagnético para que se comience a dar el calentamiento por el movimiento inducido en las partículas del material, este efecto de calentamiento por el movimiento de las partículas es mejor conocido como efecto Joule y se da sin la necesidad de tener un contacto directo entre el elemento a calentar y la bobina generadora del campo.

En el mercado existen parrillas que funcionan con este principio, aunque su eficiencia resulta ser buena y las temperaturas que pueden alcanzar los objetos a calentar son elevadas, sus costos son altos en comparación con otras opciones.

### **Celda Peltier**

La celda Peltier es un dispositivo que tiene la capacidad mantener una temperatura distinta en cada una de sus caras, fenómeno conocido como efecto Peltier. Esto se debe al efecto de

la corriente al pasar por los semiconductores, en una de sus caras la corriente pasa de un material con exceso de electrones a uno con carencia de estos, por consiguiente el paso de la corriente en un sentido circulan con mayor facilidad, pues se ve beneficiado por el potencial de contacto mientras que en el otro se tiene que vencer la barrera energética, lo que da origen a un enfriamiento o calentamiento, según sea el caso. Por lo tanto estos dispositivos pueden ser utilizados en sistemas de control para regular la temperatura de manera precisa. Pueden llegar a alcanzar una temperatura de 200 °C, aunque su principal limitante son sus dimensiones. En el mercado se encuentran con dimensiones de hasta 50x50 [mm], y los costos rondan entre 200 y 700 pesos, dependiendo de sus características, llegando a encontrar placas con una capacidad de carga máxima de 172 watts, conectado a una fuente de corriente directa.

### 2.2 Propiedades y conformado de los polímeros

En la actualidad, los polímeros son indispensables en la vida cotidiana, por lo general los encontramos en objetos con los que estamos en contacto directo como: celulares, monitores y botellas de agua, por citar algunos ejemplos.

Así como tienen una inmensa variedad de aplicaciones, también existe una gran variedad de métodos utilizados para poder llevar a cabo su transformación a un producto final. El tipo de método a utilizar depende en gran medida de las propiedades reológicas, térmicas y fisicoquímicas del polímero, así como de las propiedades deseadas.

La calidad de un polímero depende también del grado de cristalización, entre mayor sea esta cristalización se podrán tener mejores propiedades mecánicas, así como mayor resistencia al ataque químico, y a altas temperaturas. Aunque existen casos donde el polímero debe ser amorfo para mantener su transparencia y resistencia, como el polietilentereftalato, conocido como PET, y que se utiliza en grandes volúmenes en la producción de botellas para envasar bebidas.

A continuación se describen los principales factores que deben tomarse en cuenta para realizar la transformación de los polímeros:

- La rapidez de enfriamiento del polímero, dado que si se realiza lentamente se está permitiendo la alineación de cadenas, induciendo así mayor cristalinidad, como en el caso de polímeros rígidos y con alta resistencia mecánica. En el caso contrario, los enfriamientos rápidos tienden a conservar la estructura de fluido, que generalmente, deriva en polímeros transparentes y flexibles.
- El recocido, cuando se presenta el calentamiento del material por debajo de la temperatura de fusión, permite a las cadenas del material aumentar su tamaño. Lo que implica el crecimiento de cristales.
- La velocidad de deformación del polímero, una deformación lenta durante el lapso de temperatura de fusión y de transición vítrea permite la alineación y acercamiento de las cadenas, produciendo así la cristalización, como en el caso de las fibras de Nylon.

Dado que no todos los polímeros reaccionan de la misma manera cuando se cambia su temperatura, estos se dividen en dos grandes grupos: los termoestables y los termoplásticos. Estos últimos son más fáciles de procesar y reciclar, pues están conformados de cadenas poliméricas unidas por interacciones electrostáticas que permiten su fusión al incrementar la temperatura. Los termoestables son más resistentes y poco dúctiles, por lo que son más difíciles de volver a procesar una vez que se forman las uniones químicas entre las cadenas poliméricas.

El calor, la presión y la mezcla de resinas o sólidos comienzan la formación de enlaces cruzados, por lo que se debe tener un control de temperatura y tiempo de procesamiento del material, pues llega un punto en el que el material deja de comportarse como un fluido y adquiere sus propiedades finales que no permiten deformarlo nuevamente. Esta reacción puede ser endotérmica o exotérmica. Estos materiales suelen tener una temperatura de fusión muy alta o simplemente no la tienen, por lo que son térmicamente estables hasta el punto en que se degradan por un proceso térmico como la pirolisis o la incineración.

Una vez ocurrido el endurecimiento de un termoestable muy difícilmente puede volver a procesarse. La característica de estos materiales es su gran resistencia y rigidez, ocasionada por el gran endurecimiento de las cadenas poliméricas, que evita el deslizamiento o giro de estas.

Los termoplásticos se comportan como fluidos a temperaturas muy altas y con lapsos relativamente largos, y a bajas temperaturas se comportan como sólidos. Al aplicar una fuerza normal al molde las cadenas se deslizan entre sí, donde la magnitud del deslizamiento dependerá de la temperatura, y de la velocidad de la carga aplicada.

Esto significa que si aplicamos una fuerza a gran velocidad o una temperatura muy baja el polímero presentará un comportamiento muy cercano al presentado en un sólido, para este caso el polímero se comporta como un material frágil, ocasionado por el poco tiempo que tienen las cadenas poliméricas para deslizarse y acomodarse. Ocurre lo contrario cuando se aplica una carga a bajas velocidades o a altas temperaturas, en este caso se deforma y ocurren re arreglos permanentes de manera similar a lo sucedido con un fluido viscoso.

Otra clasificación dada a los polímeros es por su uso, esta es: polímeros comerciales (conocidos también como estándar o de alto volumen de consumo) y polímeros ingenieriles (de alta especialidad). Los comerciales como su nombre lo dice son comercialmente más usados, los cuales tienen la característica de ser ligeros, resistentes a la corrosión y con poca tenacidad, y van desde bolsas de plástico hasta tinas de baño. Los ingenieriles tienen características superiores a los comerciales, como soportar altas temperaturas (aproximadamente 350°C) y mayor tenacidad, un ejemplo de este tipo de polímeros es el poliacetil que se usa para la elaboración de engranes o ruedas de patines y patinetas.

### **2.2.1. Influencia de la temperatura en la calidad de un polímero**

Como se mencionó anteriormente la temperatura juega un papel importante cuando se trabaja en el procesamiento de polímeros, pues impacta directamente en las características y calidad del producto final una vez llevado a cabo el moldeo. Una de las desventajas de los plásticos es la presencia de un coeficiente de conductividad térmica muy bajo, con esto el material puede llegar a sobrecalentarse en ciertos puntos y producir una ruptura o entrecruzamiento en el enlace de las cadenas poliméricas llegando a quemar o a carbonizar el polímero.



En algunas ocasiones, se presenta una degradación en el polímero, esto sucede cuando alcanza una temperatura muy elevada, produciendo un cambio en la coloración de este. Para poder prevenir esto y tener un producto final de mayor calidad es conveniente conocer la temperatura de degradación y no sobrepasar esta al momento de procesar el material.

En la tabla 2.1 se muestra la temperatura de trabajo de algunos materiales.

Tabla 2.1 Temperatura de deflexión de Polímeros [15].

POLÍMEROS	TEMPERATURA DE DEFLECCIÓN AL CALOR		
	A 264 PSI (°C)	A 66 PSI (°C)	SIN CARGA (°C)
Acrílico extruido	94	98	
Acrílico cell-cast	96	110	
Acetobutirato de celulosa	65-75	75-80	120-150
Polietileno de alta densidad		60-80	100
Polipropileno	55-65	110-115	140
Poliestireno	70-95	70-100	100
Poliestireno alto impacto	85-95	90-95	120
SAN	100	105	
ABS	75-115	80-120	95
Polivinilo de cloruro (RV.C.)	70	75	110
Policarbonato	130	140	160

Todo este control de temperatura debe ser considerado en el equipo que realizará el proceso de moldeo. Existen distintos equipos para procesar los polímeros, con diferentes métodos cada uno, entre los cuales se encuentra el moldeo a presión, moldeo por inyección, moldeo por soplado, moldeo rotacional, entre otros.

A continuación se dará una breve explicación de cómo es y cómo funciona una prensa de moldeo a presión, puesto que las placas empleadas en el desarrollo de este trabajo, son similares a las que se emplean en este tipo de prensa.

### 2.2.2. Proceso de moldeo a presión

Este tipo de moldeo es realizado cuando no se requieren grandes volúmenes de producción, como en el caso de investigación, esto debido a que se necesita más tiempo para realizar el proceso, es complicado de automatizar y por lo tanto resulta más costoso, para el caso de grandes volúmenes es más común utilizar el proceso de moldeo por inyección.

En el proceso de moldeo por compresión, el polímero es depositado dentro de los moldes que tienen la forma que se pretende obtener, posteriormente el molde es calentado a través del contacto mantenido entre el molde y las placas que disipan calor, poco tiempo después de que se calienta el molde con el material, se ejerce una determinada presión. Para el momento en que se da la compresión, el material debe estar comportándose como un fluido con el aumento de temperatura para poder compactarlo de la forma establecida por el molde y obtener una pieza con las propiedades esperadas.

El calor disipado por las placas proviene de las resistencias que se encuentran en funcionamiento, localizadas dentro de las placas. La temperatura alcanzada por el polímero (en el caso de termoplásticos) debe ser cercana o superior a su temperatura de fusión. Algunos equipos cuentan con sistema de enfriamiento y permiten controlar tanto la temperatura como la tasa de enfriamiento.

Como se mencionó la prensa ejerce una presión para darle forma al material, dicha fuerza es suministrada por una unidad hidráulica, el manejo de esta puede ser manual, semiautomático o completamente automático.

El control de la velocidad a la que se ejerce la presión y la temperatura ejercida en el molde son factores importantes que determinarán las características y propiedades del producto final, también influye si se da un precalentamiento, para elaborar una preforma que será usada como el material para la elaboración del producto final, con lo cual se puede obtener un acabado más uniforme.

## ANÁLISIS TÉRMICO DE UNA PLACA PARA UNA PRENSA DE TERMOFORMADO

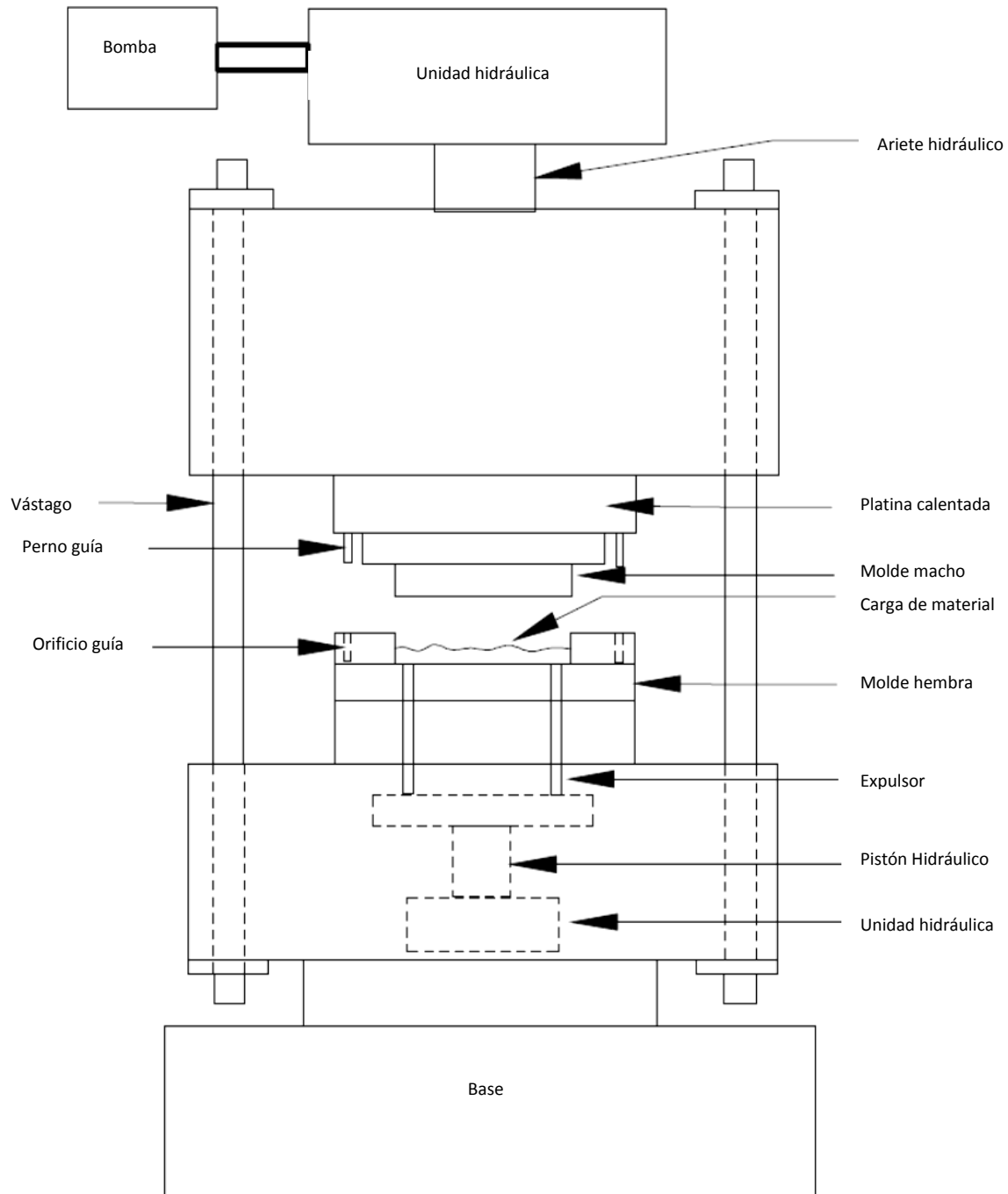


Figura 2.1 Prensa de moldeo.

Particularmente, la prensa elaborada por el CCADET consiste de unas placas de fundición gris colocadas sobre dos bases y con cuatro guías, un cilindro de soporte y un cilindro hidráulico, este último es el que mueve verticalmente la base inferior.

Este equipo cuenta con un sistema actuador que por medio de un electroimán coloca los moldes dentro de la prensa para ser procesada y los retira cuando se termina el proceso, evitando que la persona esté expuesta al calor al momento de la manipulación del molde.

Después de ser colocado el molde en la prensa las placas que se encuentran en contacto con éste comienzan a calentarse y transmitir su calor, posteriormente se ejerce una presión para que los moldes adopten la forma deseada, finalmente se enfría la placa

### 2.3. Transferencia de calor

Al fenómeno de transferencia de calor se le define como “la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas”. Existen diferentes formas en las que se da la transferencia de calor, ocasionadas por la presencia de energía que altera el estado de equilibrio térmico de un cuerpo. Estas formas son: conducción, radiación y convección.

Otro factor que se debe tener presente es si el sistema en estudio se encuentra en estado transitorio o en estado permanente, este último llamado también estado estable o estacionario.

Un cuerpo se encuentra en estado permanente cuando no presenta variaciones en las condiciones iniciales, para cualquier instante de tiempo durante todo el análisis, lo contrario a esto (cuando varía una de las condiciones en función del tiempo) se está hablando de un estado transitorio.

Algunas de las condiciones iniciales tomadas en cuenta para establecer el estado de un sistema en estudio son: temperatura, densidad, presión y/o velocidad, estas dos últimas principalmente referidas a algún fluido.

Entre los factores que influyen en la determinación del estado, son el lugar donde se realiza el análisis, la estabilidad de los equipos que intervienen en el comportamiento del sistema, un ejemplo es una fuente generador de calor que actúa, y modifica la temperatura de los objetos en contacto o próximos a ella. Muchos de los sistemas que se analizan presentan un comportamiento estable después de un intervalo de tiempo finito.

Independientemente del estado que se tenga en el sistema, se debe cumplir el principio de la conservación de la energía en todo momento. Por lo tanto, el calor entrante o generado dentro del sistema debe irse y/o almacenarse en alguna parte y de alguna manera, cumpliendo los principios de conservación energía y materia

La siguiente ecuación nos muestra cómo se da esta conservación de la energía, cumpliéndose para cualquier instante.

$$\dot{E}_{ent} + \dot{E}_g - \dot{E}_{sale} = \frac{dE_{alm}}{dt} \equiv \dot{E}_{alm} \quad (1)$$

Esta ecuación establece que la energía que entra  $\dot{E}_{ent}$ , más la energía que se genera  $\dot{E}_g$ , menos la energía que sale  $\dot{E}_{sale}$ , debe ser igual a la energía que se almacena en el sistema.



Figura 2.2 Transferencia de energía en un medio sólido o fluido.

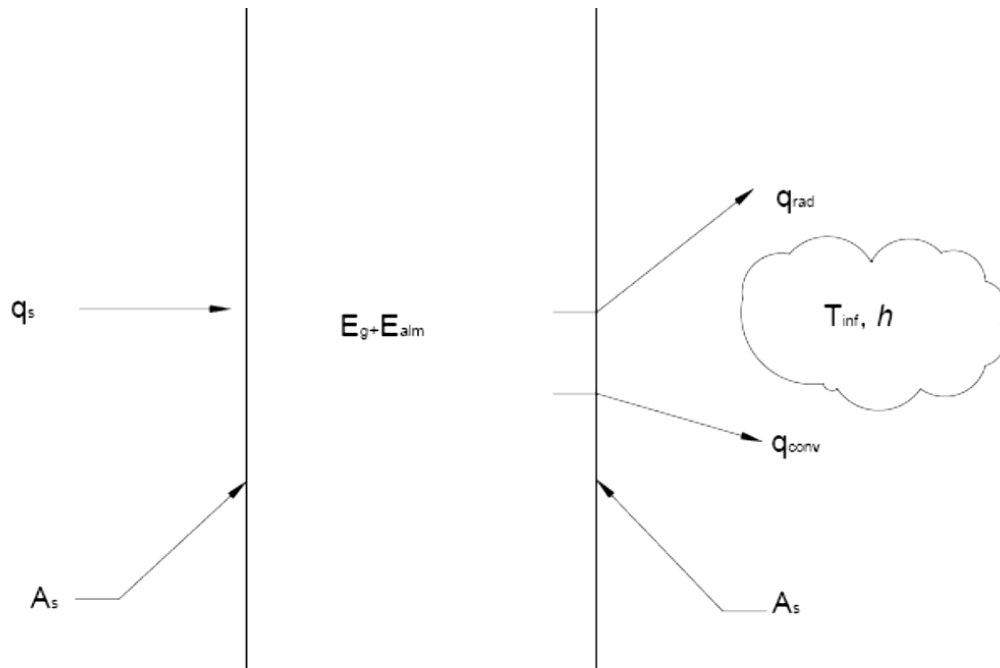


Figura 2.3 Superficie de control para el análisis general de la resistencia interna despreciable.

El flujo de energía entrante ( $\dot{E}_{ent}$ ), así como el flujo de energía saliente ( $\dot{E}_{sale}$ ), pueden ser llevados a cabo mediante cualquiera de las tres formas existentes de transferencia de calor: conducción, convección o radiación.

El flujo de energía generada ( $\dot{E}_g$ ) como su nombre lo dice es la energía que se genera de alguna manera dentro del sistema en análisis, esta puede ser producida por diferentes medios, como la reacción química de algunos elementos. Un ejemplo es la combustión, otra forma es por medio de una resistencia eléctrica, como consecuencia de la obstrucción al paso de la corriente eléctrica.

Como se mencionó con anterioridad, cuando se tiene una fuente generadora de energía calorífica, se pueden tener tres formas de transferencia de esta energía, a continuación se dará una breve explicación de cómo se da el proceso en cada una de estas transferencias.

### 2.3.1. Ecuación de conducción de calor

La conducción de calor se da en un medio sólido donde la energía generada por una fuente de calor se transmite a las partículas más cercanas a esta, y a su vez esas partículas transfieren la energía a las partículas contiguas con menor temperatura.

Para poder cuantificar la cantidad de calor transmitido a un cuerpo por medio de la conducción se tiene la siguiente ecuación.

$$\frac{\delta}{\delta x} \left( k \frac{\delta T}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left( k \frac{\delta T}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left( k \frac{\delta T}{\delta z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\delta T}{\delta t} \quad (1)$$

Donde se establece que “la transferencia de energía por conducción en un volumen dado más la rapidez de generación volumétrica de energía térmica debe ser igual a la rapidez de cambio de energía térmica almacenada dentro del volumen”.

La cantidad de calor transferido por unidad de área depende principalmente de las propiedades del material, como el coeficiente de conductividad térmica  $k$ , la densidad  $\rho$  y la capacidad térmica específica  $c_p$ , de la cantidad de energía generada y la diferencia de temperaturas.

Si se requiere hacer un análisis teórico para predecir el comportamiento del cuerpo en cada instante de tiempo y para una posición cualquiera del mismo, es preciso hacer un balance de energía, usando la ecuación (1).

El incremento de energía interna en un volumen se describe por la siguiente integral.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} \rho c T dV = dU \quad (2)$$

Al tener una diferencia en el flujo de energía en la entrada y la salida del volumen de control se considerara la existencia de un incremento en la energía interna del volumen. Lo cual se establece como:

$$\oint_s \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} dS = \oint_v \text{div } \mathbf{q} dV \quad (3)$$

Considerando que para la conservación de la energía, se debe cumplir que la energía absorbida por un cuerpo sea igual a la variación de energía interna del volumen de control.

$$\frac{\partial}{\partial t} \oint_V \rho c T dV + \oint_V \text{div } \mathbf{q} dV = 0 \quad (4)$$

Reduciéndose la ecuación a:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div } \mathbf{q} = 0 \quad (5)$$

Usando la ecuación (1) de conservación de energía en (5) resulta la siguiente ecuación.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div} (k \text{grad } T) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c} \nabla^2 T \quad (7)$$

Esta última mejor conocida como la ecuación de Fourier de conducción de calor.

La forma más simplificada de expresar la ecuación (7) se establece cuando el cuerpo en estudio ha alcanzado el equilibrio, es decir no presenta cambios de temperatura en función del tiempo pero sí en función de la distancia entre el punto de análisis y la fuente de calor. En este caso se da por hecho que la energía interna permanece constante. Por lo que la ecuación queda como:

$$\rho c_p \frac{\delta T}{\delta t} = 0$$

A continuación se muestra una gráfica que describe el comportamiento de la conducción a través de un cuerpo sólido de espesor  $e$ .



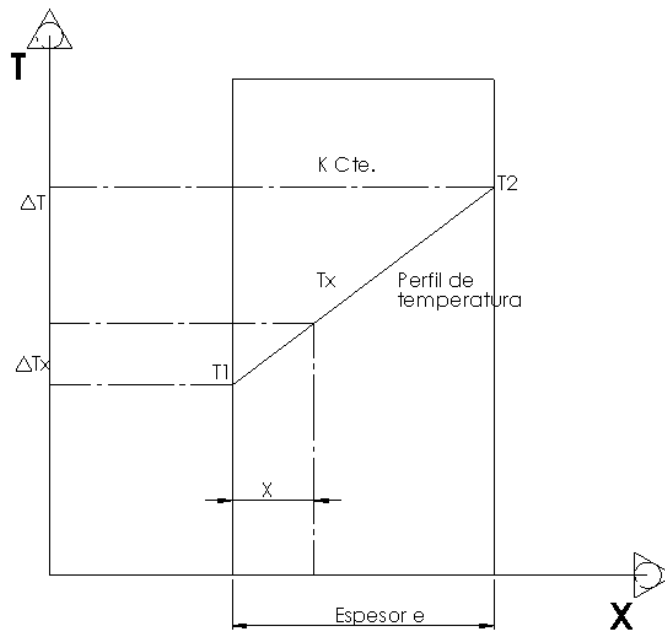


Figura 2.4 Comportamiento de la temperatura a lo largo de un cuerpo sólido.

En la imagen se observa que la temperatura disminuye a lo largo del cuerpo, con esto se puede deducir la dirección del flujo de calor, siendo en este caso el punto  $T_2$  donde la temperatura es más elevada, decayendo progresivamente conforme avanza a lo largo del espesor  $e$  en dirección al punto  $T_1$ , entre más ancho es el espesor más grande será la diferencia de temperaturas entre el punto  $T_1$  y  $T_2$ . La pendiente obtenida se define como la constante de conductividad térmica  $k$ , valor establecido por el material usado para el análisis.

La cantidad de energía que se está transmitiendo de un punto a otro de un cuerpo se puede saber solo conociendo los siguientes parámetros: tipo de material del que está hecho el objeto calentado o específicamente el valor de su constante de conductividad térmica, la diferencia de temperatura que hay entre el punto más caliente y el más frío, y la distancia que hay entre estos dos puntos, teniendo estos valores se puede aplicar la ecuación de Fourier:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (8)$$

Representada vectorialmente como:

$$q = -k \nabla T \quad (8.1)$$

### 2.3.2. Convección de calor

La conducción por lo general no es el único fenómeno presente en el análisis de transferencia de calor en un cuerpo, en la mayoría de los casos también se ven involucradas la convección y/o la radiación, debido a que no se pueden controlar las condiciones del medio a las que se encuentra expuesto el cuerpo. Por ejemplo, el aire que es un fluido con el cual se podría llevar a cabo la convección.

Al existir una diferencia de temperaturas entre un cuerpo y un fluido se presenta el proceso de convección, así como la conducción aunque esta última en menor medida. Dependerá de cuál de los dos (el fluido o el sólido) se encuentre a la mayor temperatura, para definir el comportamiento y dirección del fluido a la hora de llevar a cabo el proceso.

En la siguiente figura se puede ver el comportamiento del fluido encontrado en la cercanía del cuerpo, la dirección que toma el fluido dependerá de quién tiene la mayor temperatura si el fluido o el cuerpo. También, se puede observar que la gravedad juega un papel importante en el movimiento del fluido.

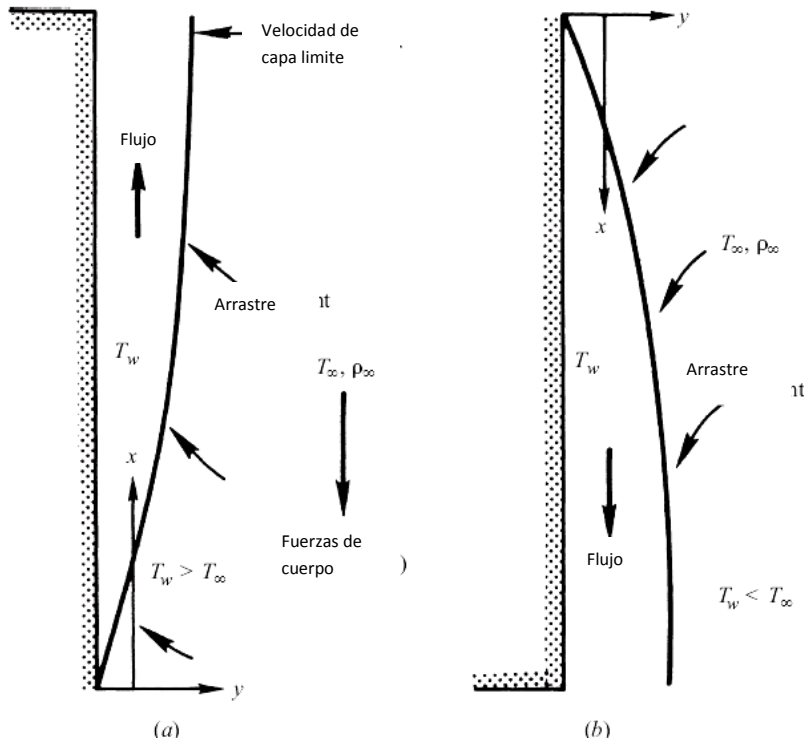


Figura 2.5 Comportamiento de la convección natural de un fluido a través de una superficie vertical.

La convección se da por la energía transmitida en forma de calor a las partículas o de las partículas de un fluido a las paredes de un sólido, dependiendo de la temperatura del fluido, si esta es mayor que la del sólido la energía se transmitirá de las partículas de fluido al sólido, y si es menor la energía se transmite del sólido hacia las partículas de fluido.

Cuando el cuerpo sólido se encuentra con mayor temperatura que el fluido, las paredes que están en contacto con el fluido, transmite la energía a las partículas más próximas de este último y de esta manera ascienden como consecuencia del aumento en su temperatura. Lo contrario a esto es cuando el fluido pierde energía al estar en contacto con la superficie sólida aumentando su densidad y con esto ocasiona un descenso del fluido.

En la mayoría de los casos donde se trata de transferencia de calor en fluidos la conducción de calor no se considera, porque el coeficiente de conducción es muy bajo en comparación con la contribución de la convección tanto para líquidos como gases, como se puede observar en la Figura 2.6, los coeficientes de conducción de los gases son bajos, de hecho

son utilizados como aislantes por ejemplo en el caso de las ventanas con doble pared o recipientes aislantes.

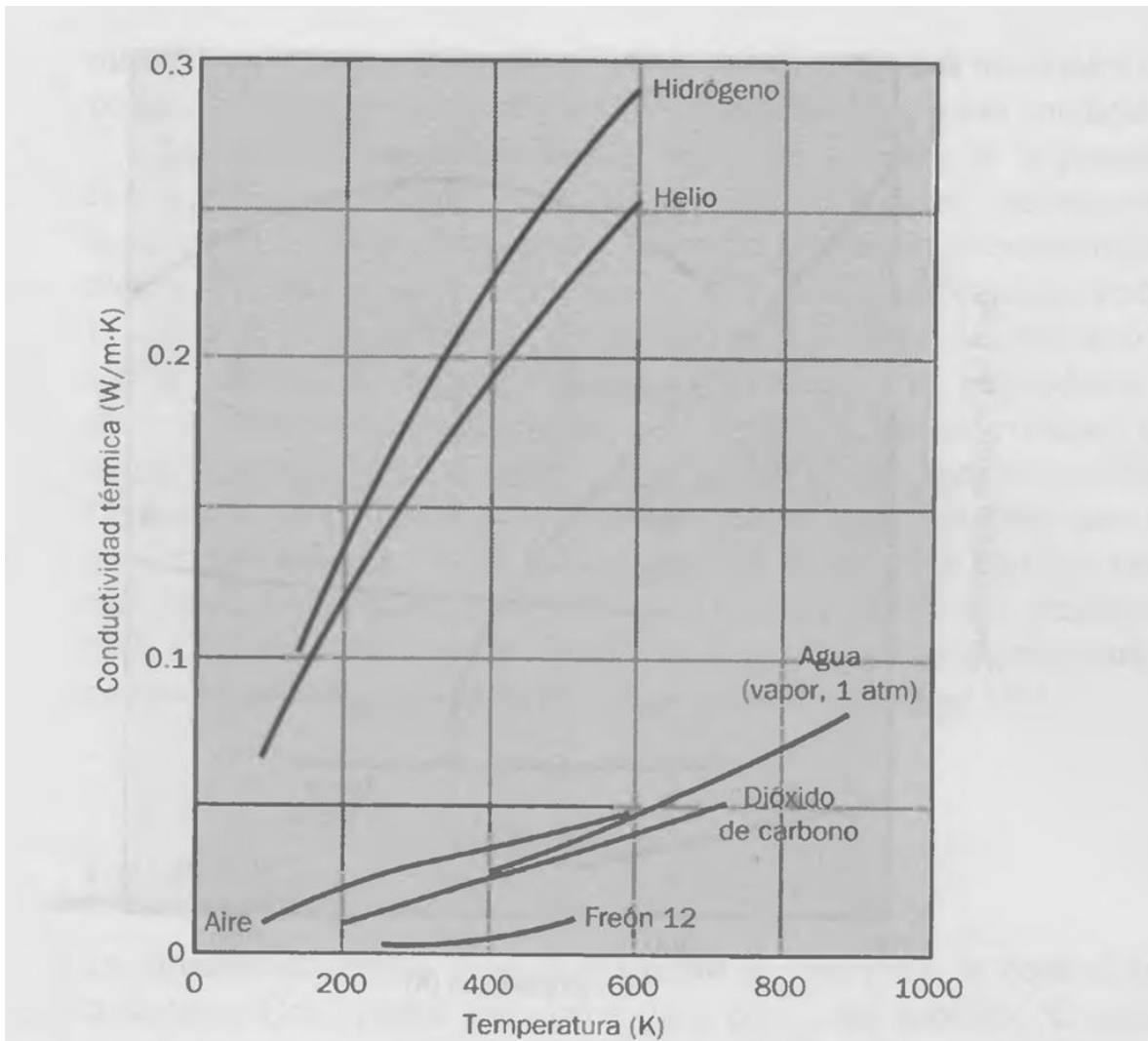


Figura 2.6 Comportamiento de la conductividad térmica de algunos gases a diferentes temperaturas.

En el caso del agua en estado líquido los valores de conductividad son mas grandes comparada con los gases pero aun así no deja de ser pequeño, el rango de valores se presenta en la tabla 2.2, observándose que después de determinada temperatura este valor comienza a disminuir.

Tabla 2.2 Conductividad térmica del agua [2].

°C	$k$ , $W/m^{\circ}C$
0	0.566
4.4	0.575
10	0.585
15.56	0.595
21.11	0.604
26.67	0.614
32.22	0.623
37.78	0.630
43.33	0.637
48.83	0.644
54.44	0.649
60	0.654
65.55	0.659
71.11	0.665
76.67	0.668
82.22	0.673
87.78	0.675
93.33	0.678
104.4	0.684
115.6	0.685
126.7	0.685
137.8	0.685
148.9	0.684
176.7	0.677
204.4	0.665
232.2	0.646
260	0.616

Se puede observar como para el caso del aire y del agua, que son los dos gases más comúnmente encontrados en análisis de transferencia tienen un coeficiente de conducción menor de  $1 [W/m \cdot K]$ . Resultando ser una forma muy pequeña de transferencia de energía.

Así como para el caso de los sólidos el coeficiente de conducción de calor es importante, para el caso de los fluidos uno de los valores importante a la hora de calcular la energía trasferida es el coeficiente de trasferencia de calor por convección. Este dependerá del tipo de fluido (líquido o gas), y el tipo de convección (libre o forzada).

Tabla 2.3 Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección [1].

Proceso	$h \left( \frac{W}{m^2K} \right)$
Convección libre	1
Gases	2-25
Líquidos	50-1000
Convección forzada	
Gases	25-250
Líquidos	50-20000
Convección con cambio de fase	
Ebullición o condensación	2500-100000

Se considera convección forzada cuando existe un elemento externo que afecte en la velocidad del movimiento del fluido como un ventilador o una bomba, de lo contrario se está hablando de una convección libre o natural, donde el movimiento se genera por medio de los cambios de densidad como producto de los cambios de temperatura.

La ecuación que calcula la cantidad de energía transferida por convección en una superficie dada es:

$$q = hA(T_s - T_\infty)$$

Donde:

$h$  → Coeficiente de convección que dependerá de la naturaleza del fluido y la velocidad del mismo.

$A$  → Área que se encuentra en contacto con el fluido que está presentando el fenómeno de convección.

$T_s$  → Temperatura de la superficie del sólido.

$T_\infty$  → Temperatura del fluido.

### 2.3.3. Radiación de calor

Esta última forma de transferencia de calor se caracteriza por ser independiente de un medio sólido o fluido a través del cual se deba transmitir la energía, pues esta transferencia se lleva a cabo mejor en el vacío.

El principio de la radiación establece que al tener un cuerpo o superficie caliente se generan grandes excitaciones subatómicas al grado de emitir energía sin ningún contacto directo con el receptor, la energía es transmitida por medio de ondas que viajan en el espacio y al no tener algún medio que se interponga en el paso de la radiación, las ondas viajan mucho más rápido, por esta razón la energía transmitida por radiación es mayor cuando se presenta en el vacío.

La cantidad de energía radiante que un cuerpo emite se limita solo a la superficie expuesta y la velocidad a la que se libera esta energía por unidad de área llamada también potencia emisiva  $E_d$ . El valor máximo de potencia emisiva que se puede llegar a tener es en un cuerpo negro, que es un caso idealizado y se determina por medio de la ley de Stefan-Boltzmann.

$$E_d = \sigma T_s^4$$

$T_s$  → Temperatura de la superficie del sólido radiante.

$\sigma$  → Constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )

Generalmente, los cuerpos emiten menos cantidad de energía que la de un cuerpo negro, para estos se establece la siguiente ecuación que se deriva de la ecuación de Stefan-Boltzmann:

$$E_d = \varepsilon \sigma T_s^4$$

Donde  $\varepsilon$  es considerada como la eficiencia del cuerpo para emitir radiación, y tiene valores dentro del rango de  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ , dependerá del material y el acabado de la superficie.

En la siguiente tabla se muestra el valor de emisividad hemisférica (en todas las direcciones posibles a las que se puedan dirigir) de algunos materiales y para distintas temperaturas.

## ANÁLISIS TÉRMICO DE UNA PLACA PARA UNA PRENSA DE TERMOFORMADO

Tabla 2.4 Emisividad total hemisférica en sólidos metálicos a diferentes temperaturas [1].

Descripción & composición	100K	200K	300K	400K	600K
<b>Aluminio</b>					
Altamente pulido	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06
Hoja brillante	0.06	0.06	0.07		
Anodizado			0.82	0.76	
<b>Cromo</b>					
Pulido o plateado	0.05	0.07	0.10	0.12	0.14
<b>Cobre</b>					
Altamente pulido			0.03	0.03	0.04
Establemente oxidado					0.05
<b>Oro</b>					
Altamente pulido	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04
Hoja brillante	0.06	0.07	0.07		
<b>Molibdeno</b>					
Pulido					0.06
Limpiado con chorro de perdigones, áspero					0.25
establemente oxidado					0.80
<b>Níquel</b>					
Pulido					0.09
Establemente oxidado					0.40
<b>Plata</b>					
Pulida			0.02	0.02	0.03
<b>Acero inoxidable</b>					
Típico, pulido			0.17	0.17	0.19
Típico limpio			0.22	0.22	0.24
Típico, ligeramente oxidado					
Típico, altamente oxidado					
AISI 347, establemente oxidado					0.87
<b>Hierro fundido, fundición rugosa</b>					
			0.81		
<b>Hierro fundido pulido</b>					
			0.21		
<b>Hierro, brillante, grabado</b>					
			0.16		
<b>Hierro, forjado, pulido</b>					
			0.28		
<b>Hierro oxidado</b>					
			0.74		

En algunas ocasiones no solo se presenta la transferencia de energía por radiación de un cuerpo hacia el medio, también se efectúa la transferencia del medio hacia el cuerpo, esto



sucedirá siempre y cuando se encuentra en la cercanía de algún medio que tenga la capacidad de generar calor y que no esté en contacto directo con el cuerpo, comúnmente el Sol es uno de estos medios involucrados.

Este efecto de absorber la energía del medio llega a tener una gran influencia en el cuerpo en estudio, pues puede llegar a aumentar la temperatura de este cuerpo considerablemente, esto dependerá de la cantidad de energía que sea capaz de absorber el cuerpo y la temperatura del aire, a esta capacidad del cuerpo de absorber energía se le conoce como absorptividad  $\alpha$ , y también va del rango de  $0 \leq \alpha \leq 1$ .

Esta energía en cuestión se calcula de manera similar a la radiación pues se tienen que:

$$G_{abs} = \alpha G$$

Donde  $G = \sigma T_{aire}^4$ .

En la siguiente tabla se presentan algunos valores del coeficiente de energía solar absorbida por distintos cuerpos.

Tabla 2.5 Coeficiente de energía solar absorbida por algunos materiales [19].

Metal	Estado superficial	Absortivida
Aluminio	Pulido	0.10
Aluminio	Anodizado	0.14
Aluminio	En placas	0.15
Bronce	Pulido	0.3-0.5
Bronce	Mate	0.4-0.65
Cromo	Electroplateado	0.41
Cobre	Muy pulido	0.18
Cobre	Decapado	0.25
Cobre	Decolorada por exposición	0.64
Oro		0.21
Hierro	Galvanizado pulido	0.34
Hierro	Galvanizado nuevo	0.64
Hierro	Mate, oxidado	0.96
Magnesio	Pulido	0.19
Magnesio	Oxidado	0.55-0.2
Níquel	Muy pulido	0.15
Níquel	Pulido	0.36
Níquel	Oxidado	0.79
Platino	Brillante	0.31
Plata	Muy pulida	0.07
Plata	Pulida	0.13
Acero inoxidable	Pulido	0.33
Acero inoxidable	Decapado	0.52
Tungsteno	Muy pulido	0.37
Zinc	Muy pulido	0.34
Zinc	Pulido	0.55

En la Figura 2.7 se muestran de manera esquemática las distintas formas en las que influye la radiación sobre un cuerpo.

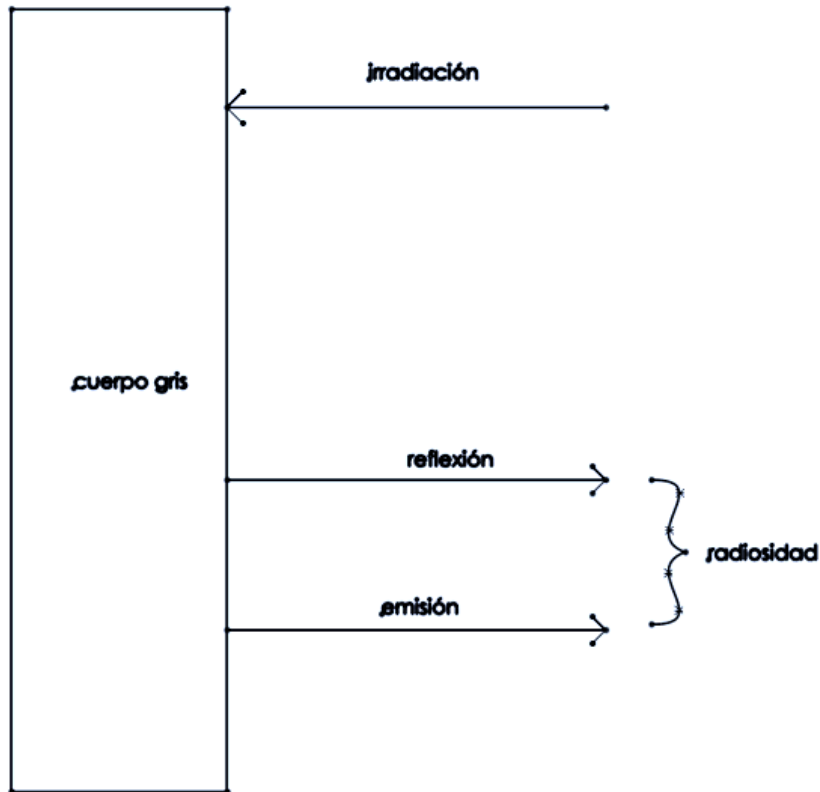


Figura 2.7 Efecto de la radiación en un cuerpo.

Como se observa, la cantidad de energía radiante que llega al cuerpo en estudio se le conoce como irradiación, mientras que a la energía que se trasmite del cuerpo negro al medio debido a la temperatura a la que se encuentra más la energía que es reflejada, se le define como radiosidad.

#### 2.4. Método de resistencia interna despreciable

En algunas ocasiones la transferencia de calor dentro de un cuerpo se da a una gran velocidad esto debido a la baja resistencia que presenta el material a la conducción, o se considera aceptablemente rápida cuando es mayor que la velocidad de convección. En

ciertos casos nos ayuda el tener estas condiciones para la simplificación de la solución del problema, cuando se analiza el cuerpo sólido.

El método de resistencias internas despreciables permite determinar el tiempo necesario para que un cuerpo alcance una determinada temperatura o viceversa, la temperatura alcanzada por un cuerpo en un tiempo determinado, pero para poder aplicar este método se deben cumplir algunas condiciones que se mencionan a continuación:

Que la temperatura del sólido sea espacialmente uniforme, en cualquier instante durante todo el proceso transitorio, es decir un gradiente de temperatura despreciable. Tomando en cuenta que esto no se logra en ningún caso, se consideraría aceptable si la resistencia a la conducción dentro del cuerpo es mucho menor a la resistencia a la transferencia por convección de las paredes del sólido a sus alrededores.

Esta relación se establece por medio de un número adimensional conocido como número de Biot ( $Bi$ ), que es la razón de resistencia térmica interna de un sólido a la resistencia térmica de la capa límite

$$Bi = \frac{hL}{k}$$

Es aceptable aplicar el método cuando el valor de este número resulta  $\ll 1$ .

Entre más pequeño sea este número significa que la resistencia a la conducción dentro del sólido es mucho menor que la resistencia a la convección de la pared hacia el aire. En la Figura 2.8 se puede observar el comportamiento de la temperatura a lo largo del cuerpo, donde obteniendo el valor del número de Biot se puede predecir la distribución.

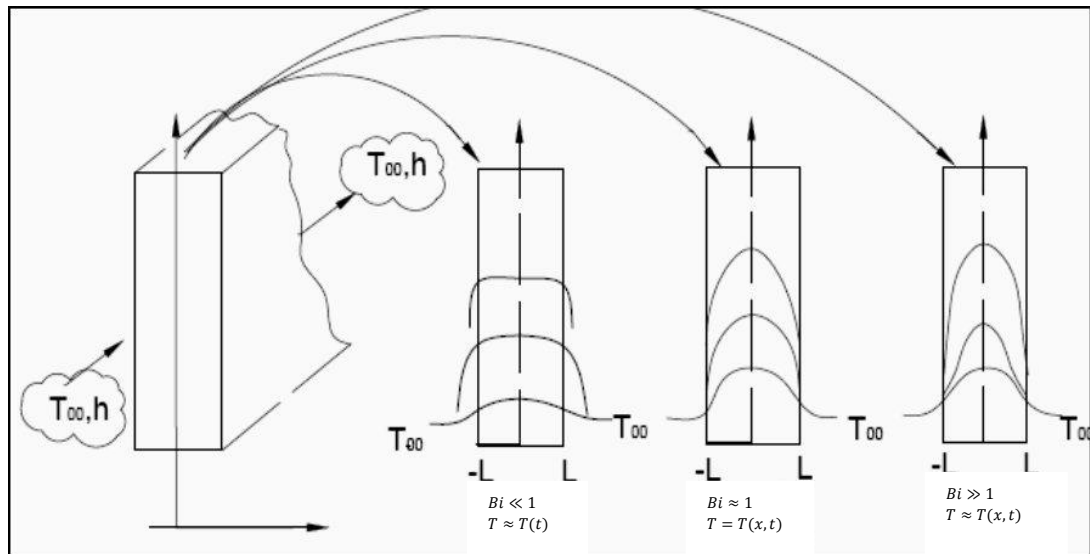


Figura 2.8 Distribución de temperaturas transitoria para diferentes números de Biot en una pared plana enfriada simétricamente mediante convección.

### 3. DESARROLLO DEL PROBLEMA

#### 3.1 Planteamiento del problema

Como se menciona al inicio del presente trabajo, se busca caracterizar el fenómeno de transferencia de calor en una placa al momento de ser calentada por medio de resistencias internas, es decir necesitamos saber cuál es el comportamiento y distribución de temperatura en la superficie.

Los casos de transferencia de calor en los cuales el fenómeno se puede caracterizar usando las ecuaciones de manera directa son limitados, pues estas se emplean solo cuando se busca conocer la temperatura alcanzada por un solo punto del cuerpo, o en los casos donde se presenta condiciones de frontera favorables como: una generación de energía constante y uniforme, y/o un régimen estacionario.

Las ecuaciones no pueden ser aplicadas de manera directa a nuestro caso, pues el valor de temperatura de cada punto de la placa está determinado principalmente por la distancia a la que se encuentra de la resistencia, además al tratarse de un fenómeno en estado transitorio la temperatura estará variando en cada instante de tiempo.

En la Figura 3.1 se ejemplifica como algunas líneas de flujo tardan más en llegar a la superficie por la trayectoria que presentan.

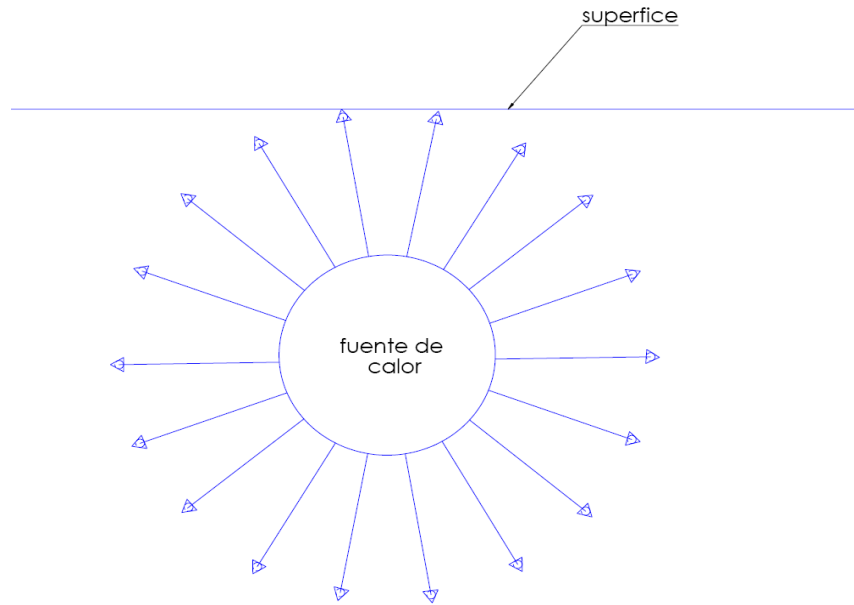


Figura 3.1 Tráferencia de calor de forma radial en una superficie plana.

Para tener una superficie con calentamiento uniforme todas las líneas de flujo deben recorrer la misma distancia. Si se tiene una fuente de calor radial como la imagen de la figura 3.1 es necesario que la superficie sea también de forma radial como se muestra en la figura 3.2

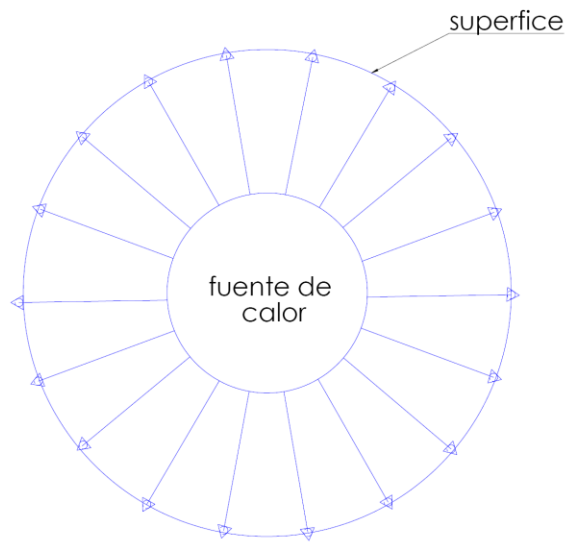


Figura 3.2 Tráferencia de calor de forma radial en una superficie radial.

Cuando el objeto de estudio es de forma plana y la fuente de forma radial, las ecuaciones se vuelven algo complejas debido a la distribución no uniforme de calor en la superficie, para esto se tiene la opción de usar el método de resistencia interna despreciable, ya que no toma en cuenta la dirección de las líneas de flujo, ni su recorrido, solo la velocidad de transferencia. Pero para aplicar dicho método se deben satisfacer las condiciones descritas anteriormente en el método, dichas condiciones no se cumplen en las placas, por lo tanto una opción para resolver el problema es por medio de un método numérico.

### 3.2 Características del material empleado

Con una generación de calor de forma radial y una superficie plana afectada por esta energía, se predice que el calor tardará en tener una distribución aceptablemente uniforme en la superficie, pero la determinación del tiempo y la forma de esta distribución dependerá en gran parte de la configuración de las resistencias, arreglo que podrá favorecer o perjudicar a la distribución y el tiempo requerido.



Para saber de qué manera afecta la posición en la que se coloca el arreglo de resistencias y la forma de estas, en la temperatura alcanzada en la superficie, se simularán algunas configuraciones propuestas. Esto ayudará a proponer un arreglo que podría ser utilizado en una prensa para termoformado de plásticos.

Por otra parte, debido a que se compararán los resultados obtenidos de la simulación con los de las pruebas experimentales se tomarán las mismas dimensiones de las placas de nuestro modelo para la simulación. Dichas placas son de  $120 \times 120$  [mm] de superficie y  $\frac{1}{2}$ " (1.27 [cm]) de espesor.

Las siguientes imágenes muestran la configuración del canal maquinado en las placas, donde se colocará la resistencia.

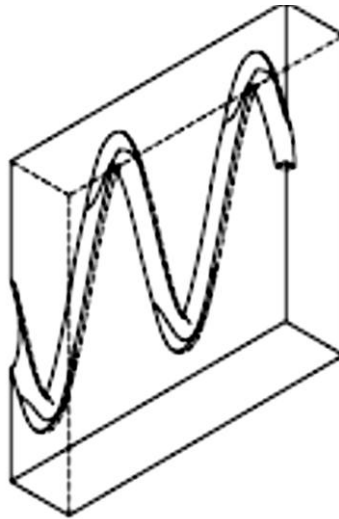


Figura 3.3 Configuración del canal para la resistencia.

Teniendo la resistencia colocada en el canal se sobrepondrá la otra mitad de la placa con las mismas dimensiones.



Figura 3.4 Placa con resistencia colocada internamente.

La resistencia empleada difícilmente puede seguir la forma del canal maquinado sobre la placa. Por tal motivo se decidió dejar una tolerancia durante el maquinado y permitir que la resistencia entrara totalmente en el canal. Dicha tolerancia podría inducir un comportamiento diferente al que pudiera presentar si la placa como la resistencia embonaran en su totalidad. Por lo que el valor de temperaturas alcanzado en algunos puntos de la superficie podría ser mucho mayor.

A fin de contrarrestar el efecto producido por estos espacios se agregó una pequeña capa de una cerámica que sirvió de material conductor del calor y de esta manera se evitó la resistencia térmica del aire, que es mucho mayor a la de la cerámica empleada.

Para saber si lo que asumimos sobre la elevación de la temperatura, si no existieran estos espacios, es correcto, se hicieron pruebas con las placas usando óxido de magnesio para cubrir esos espacios y se compararon con los resultados de las pruebas de la placa con ningún tipo de material. De esta forma se observó que tanto afectó esta modificación.

La selección del óxido de magnesio se debe a que este material se adapta bien a las condiciones a las que estará sometido al estar en contacto directo con la resistencia, pues es considerable el valor de temperatura alcanzado por esta.

Generalmente, la mayoría de los materiales usados para casos donde se manejan altas temperaturas son las cerámicas, aún cuando su coeficiente de conducción no es muy alto, como se muestra en la Figura 3.5, son materiales que tienen un punto de fusión elevado, como podemos ver en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Punto de fusión de algunas cerámicas [9].

Compuesto cerámico	Formula	Punto de fusión (°C)
Carburo de hafnio	<b>HfC</b>	<b>4150</b>
Carburo de titanio	<b>TiC</b>	<b>3120</b>
Carburo de tungsteno	<b>CW</b>	<b>2850</b>
Óxido de magnesio	<b>MgO</b>	<b>2798</b>
Bióxido de circonio	<b>ZrO2</b>	<b>2750</b>
Carburo de silicio	<b>SiC</b>	<b>2500</b>

Otras de las razones por las que se eligió el óxido de magnesio fueron por ser uno de los materiales más usados en las resistencias como aislante eléctrico aparte de tener un coeficiente de conductividad térmica alto (comparado con otras cerámicas), es un material fácil de conseguir en el mercado. La capa de cerámica que se utilizó es delgada por lo que el bajo coeficiente de transferencia de calor no limita de manera considerable el flujo efectivo de calor. En la figura 3.5 se presentan los valores de conductividad térmica para varios materiales cerámicos como una función de la temperatura.

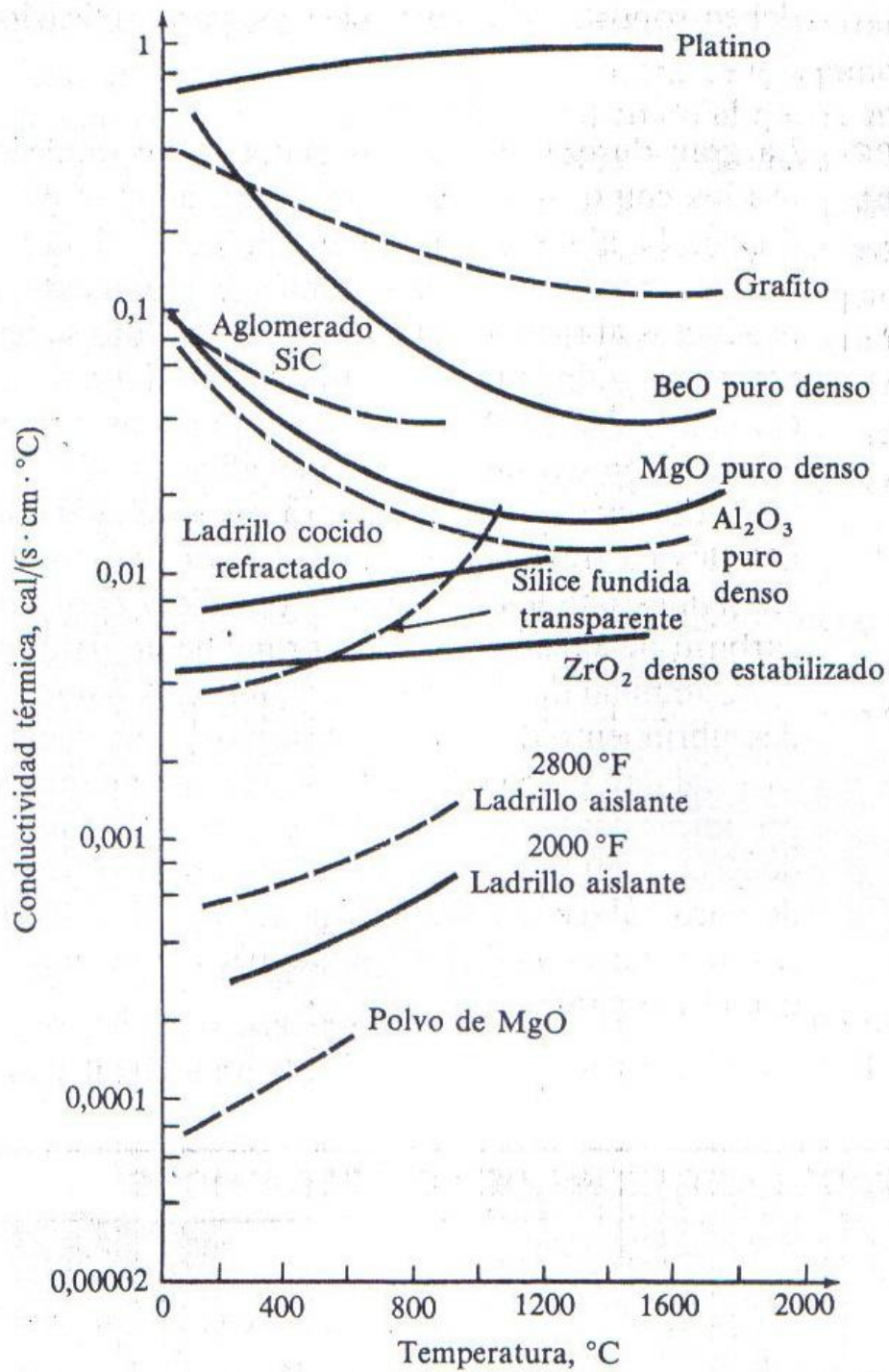


Figura 3.5 Conductividad térmica de materiales cerámicos a diferentes temperaturas [9].

Las placas utilizadas en las pruebas experimentales son del material conocido como fundición gris (cast-iron), que tiene las siguientes propiedades:

Tabla 3.2 Propiedades de fundición gris.

Propiedades de fundición gris	
Densidad $\rho$	6800 $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$
Capacidad térmica específica $C_p$	460 $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$
Conductividad térmica $k$	46.737 $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$
Emisividad	0.81

La resistencia usada en las pruebas experimentales es de forma tubular de 1/4" (1.27 [cm]) de diámetro, y con una longitud de aproximadamente 40 centímetros de largo, y con la capacidad de trabajar a 220 volts, en la Figura 3.6 se muestra una fotografía de esta.



Figura 3.6 Resistencia en forma de senoide.



Existen otro tipo de resistencias que son igualmente de forma tubular pero rectas (conocida como resistencia de cartucho), y que son muy comunes para aplicaciones de este tipo, un ejemplo de estas se observa en la Figura 3.7.

Se pueden encontrar con una variedad de características, esto es en cuanto a la potencia que pueden generar, los volts a los que trabajarán, el tipo de forro que tienen, así como en una gran variedad de dimensiones.



Figura 3.7 Resistencia de cartucho 1800 [W] a 220 [V].

Las resistencias tanto de cartucho como las elaboradas en forma de senoide generalmente están conformadas por un alambre de nicromel recubierto de una cerámica, comúnmente óxido de magnesio u óxido de aluminio, esto por sus buenas propiedades como aislantes eléctrico, finalmente este material se encuentra cubierto con una funda de acero.

Un alambre nicromel suele tener una aleación 80% de níquel y 20% de cromo y cuyas propiedades son:

Tabla 3.3 Propiedades de la aleación níquel-cromo.

Propiedades del níquel-cromo	
Punto de fusión	1400 [°C]
Conductividad térmica	11.2 [W/m °C]
Capacidad térmica específica	460 [ $\frac{J}{kg \cdot K}$ ]
Densidad	2659 [kg/m <sup>3</sup> ]

### 3.2.1 Cálculo de energía generada por la resistencia

La resistencia es uno de los elementos del que depende el calentamiento de la placa, por eso es fundamental saber cuánta energía es capaz de generar.

El alambre de nicromel es el generador del calor, pues en este ocurre el fenómeno de conversión de energía eléctrica a energía calorífica, debido al paso de corriente eléctrica.

Para calcular la energía liberada por la resistencia en forma de calor es necesario conocer el valor de la resistencia eléctrica del alambre, y el voltaje de trabajo. El valor de la resistencia fue obtenido con un multímetro, mientras que el voltaje depende de la fuente de alimentación. Estos valores resultaron ser:

Alambre nicromel con un diámetro de 1/32 in (2 [mm])

- Resistencia  $R=92.9$  [ $\Omega$ ]
- Voltaje  $E=240$  [V]
- Corriente  $I = \frac{E}{R} = \frac{240}{92.9} = 2.58$  [A]
- Potencia  $P=VI=240*2.58=620$  [W]

Con los datos anteriores se procede a hacer el cálculo de la distribución de potencia en cada unidad de volumen y en cada unidad de superficie.

Potencia por unidad de volumen (usando el volumen total del tubo que compone la resistencia, de diámetro 1/4”).

$$\frac{P}{V} = \frac{W}{\pi * r^2 * L} = \frac{620 [W]}{\pi * .003175^2 [m^2] * 0.4 [m]} = 48,943,426 \left[ \frac{W}{m^3} \right]$$

Potencia en cada unidad de área (longitud de 0.4 [m]).

$$\frac{P}{A} = \frac{W}{\pi * D * L} = \frac{620 [W]}{\pi * .00635 [m] * 0.4 [m]} = 77697 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

En las siguientes imágenes se observa que los extremos de la resistencia en forma de senoide no se calientan a la misma velocidad que el resto de ella, teniendo el mayor calentamiento en el centro de la resistencia





Figura 3.8 Resistencia para el tiempo t=5 minutos.

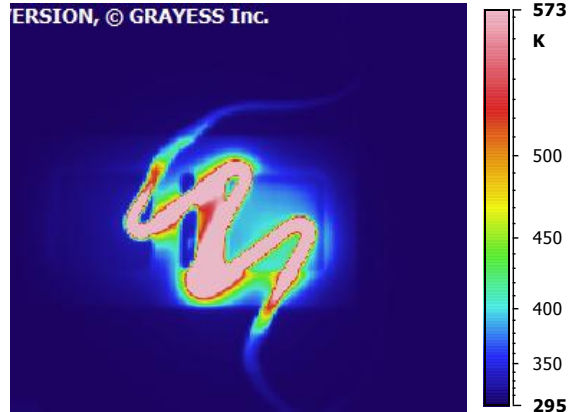


Figura 3.9 Resistencia para el tiempo t=15 minutos.



Figura 3.10 Placa con la resistencia para el tiempo t=5 minutos, (escala de temperaturas de 18°C – 180°C)

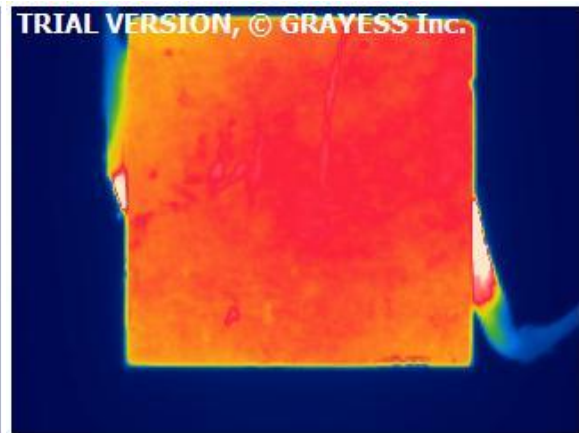


Figura 3.11 Placa con la resistencia para el tiempo t=15 minutos (escala de temperaturas de 18°C – 180°C).

Por lo general, el cálculo de la energía generada no siempre resulta ser la que se obtiene de manera experimental, en la mayoría de los casos resulta ser menor a la esperada, por eso se comparará el cálculo de la potencia por unidad de superficie obtenidos anteriormente con los que arrojen las pruebas experimentales en las resistencias, y sabremos si tenemos que hablar o no de una eficiencia de la resistencia.

Algunos de los factores que podrían influir en el valor de esta son: la manufactura de la resistencia, la calidad del material, la fuente de energía a la que se conecta la resistencia, el contacto entre las terminales de la resistencia, entre otras.

Las pruebas consisten en colocar una cantidad fija de agua en una cubeta y calentarla con las resistencias durante un lapso determinado, para posteriormente medir la temperatura alcanzada. Conociendo la capacidad térmica específica del agua se pueden hacer los respectivos cálculos para determinar la cantidad de energía absorbida por el líquido, durante el tiempo en el que estuvo en funcionamiento la resistencia.

### Prueba para el cálculo de la energía real generada por la resistencia

La energía depende de la masa por la capacidad térmica específica y por el cambio de temperatura del cuerpo

$$Q = mc_p(T_2 - T_1)$$

- Capacidad térmica específica del agua:  $C_p = 4.18 \left[ \frac{KJ}{kg K} \right]$

- Resistencia a: 220 [V]

- Tiempo de prueba: 5 minutos

- Cantidad de agua: 3.020 kg

### Prueba de calentamiento

Tabla 3.4 Variación de la temperatura del agua en el tiempo.

Tiempo en minutos	Temperatura absoluta en [K]
0	303.7
1	306
2	308.3
3	310.4
4	312.1
5	314.3

Calor transmitido al agua.

$$Q = mc\Delta T = 3.02[Kg] \times 4.18 \left[ \frac{KJ}{KgK} \right] \times 10.6[K] = 133.8 [KJ]$$

$$\frac{133.8 [KJ]}{5 \times 60[s]} = 446[W]$$

Para tener una temperatura uniforme en todo el líquido se aplicó una agitación constante, que permitiera homogeneizar, por medio de convección forzada, la temperatura del líquido, pues por convección natural el líquido tardaría más en tener la misma temperatura en todos sus puntos y la temperatura final dependería del punto de muestreo.

Como muestra la Figura 3.12, la temperatura se incremento de manera uniforme a una tasa aproximada de 2.1 °C/minuto, como lo indica el cálculo de la pendiente.

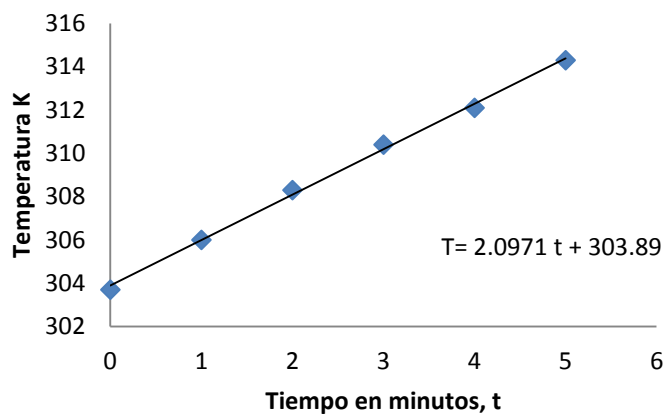


Figura 3.12 Grafica de comportamiento de la temperatura del agua en el tiempo.

### Prueba de pérdida de calor por convección y radiación

Al tener el líquido expuesto al medio ambiente, se presenta una transferencia de calor del agua calentada hacia el medio exterior, por medio de convección y radiación lo que implica una pérdida constante de energía del líquido, por esta razón también se calcularon estas pérdidas.

La energía perdida por este medio se calculó tomando como temperatura inicial una temperatura mayor a la temperatura ambiente y a partir de ahí se generó un movimiento del líquido durante 5 minutos, posteriormente se midió la temperatura que alcanzó el líquido, en la tabla siguiente se muestran estas dos temperaturas.

Tabla 3.5 Variación de la temperatura por efecto de la radiación y convección.

Tiempo en minutos	Temperatura K
0	316.7
5	313.8

De igual manera con la ecuación para calcular el calor sensible transferido a un cuerpo, se calculo la cantidad de energía resultante de esta diferencia de temperaturas.

$$Q = mC\Delta T = 3.02[kg] \times 4.18 \left[ \frac{KJ}{kgK} \right] \times 2.9[K] = 36.6 [KJ]$$

$$\frac{36.6 [KJ]}{5 \times 60[s]} = 122[W]$$

La energía total transmitida por la resistencia es la suma de la energía transmitida al líquido, la energía perdida por convección y aquella por radiación.

$$446[W] + 122[W] = 568[W]$$

Ahora con la potencia en watts real podemos calcular la densidad de la resistencia, que resulta ser la cantidad de watts por unidad de área.

$$\frac{P}{A} = \frac{W}{\pi * D * L} = \frac{568 [W]}{\pi * .00635[m] * 0.4[m]} = 71181.1 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

Comúnmente, esta densidad los fabricantes la dan en pulgadas cuadradas resultando entonces.

$$71181.1 \left[ \frac{W}{m^2} \right] \times \left( \frac{0.0254[m]}{1[in]} \right)^2 = 46 \left[ \frac{W}{in^2} \right]$$

Comparando los datos teóricos con los obtenidos experimentalmente resulta ser menor la energía real liberada por la resistencia, lo que nos da una eficiencia de:

$$\eta = \frac{568[W]}{620[W]} = 91.6\%$$

La diferencia que obtenemos entre el valor teórico y el obtenido al hacer las pruebas representa solo un 8.4%.

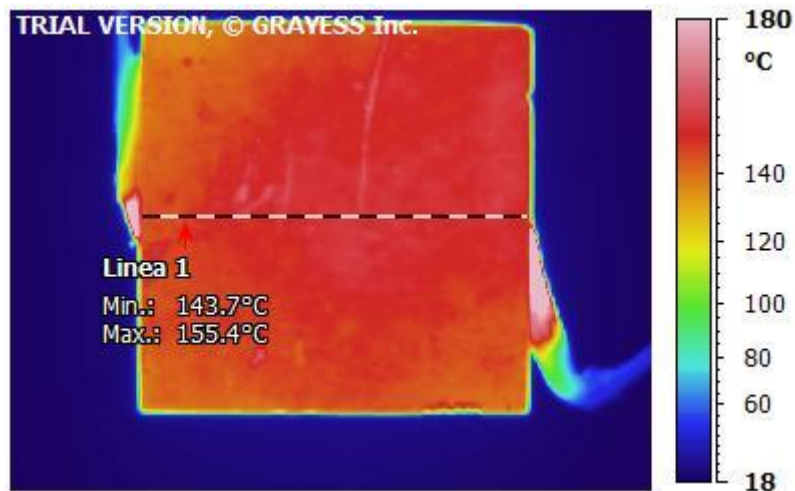


Figura 3.13 Línea de análisis.

Los valores de temperatura para periodos de tiempo de 5, 10 y 15 minutos y para una posición específica se obtienen por medio de un programa que permite leer la información de los termogramas. Finalmente, los resultados obtenidos de la simulación serán cotejados con los valores de las pruebas experimentales.

La posición de los puntos en la placa donde se medirá la temperatura es una línea imaginaria establecida en la superficie y que pasan de un extremo a otro atravesando la parte central de la placa, como lo muestra la Figura 3.13.

### 3.3 Desarrollo experimental

Para la toma de datos experimentales se utilizó una cámara termográfica Fluker Ti45 (ver detalles en apéndice A) que permite obtener la temperatura de una gran cantidad de puntos sobre una superficie, que es lo que se busca con este trabajo, conocer todo el patrón de temperaturas de la superficie de la placa y para varios instantes de tiempo. La cámara se colocó aproximadamente a 40 cm de distancia de la placa y de manera horizontal considerando una emisividad de la placa de 0.81 y una temperatura ambiente de 20° C.

En la cámara se fijó el rango de temperaturas de la paleta de colores con los que describirá a la imagen, quedando establecido 18°C como valor mínimo (color azul), y como valor máximo el valor de 180°C (color rojo), si una parte de la imagen llegara a salir del rango de

temperaturas establecidas, la cámara la mostrará en color blanco, indicando que se tiene una temperatura fuera del rango establecido.

La resistencia montada en el interior de la placa se conecta a la corriente eléctrica y se empieza la captura de imágenes en la superficie de la placa, para lapsos de 60 segundos por un tiempo de 15 minutos. Esta toma de imágenes se realizó, tanto para la placa que cuenta con una capa de óxido de magnesio como para la que no. En los dos casos la escala en la que se encuentra la paleta de colores va de 18°C a 180°C, viéndose rebasado en el caso de la placa con capa de óxido de magnesio.

El límite de tiempo de análisis tanto de los experimentos como de las simulaciones fue de 15 minutos basado en el tiempo límite que tenía la prensa de moldeo para alcanzar una temperatura establecida.

En la Figura 3.14 se observa el comportamiento de la placa sin óxido de magnesio, observando un mayor calentamiento en la parte central y con tendencia hacia el extremo izquierdo, esto podría deberse a que un extremo de la resistencia se calienta más rápido que el otro y/o por un mayor contacto con la placa.

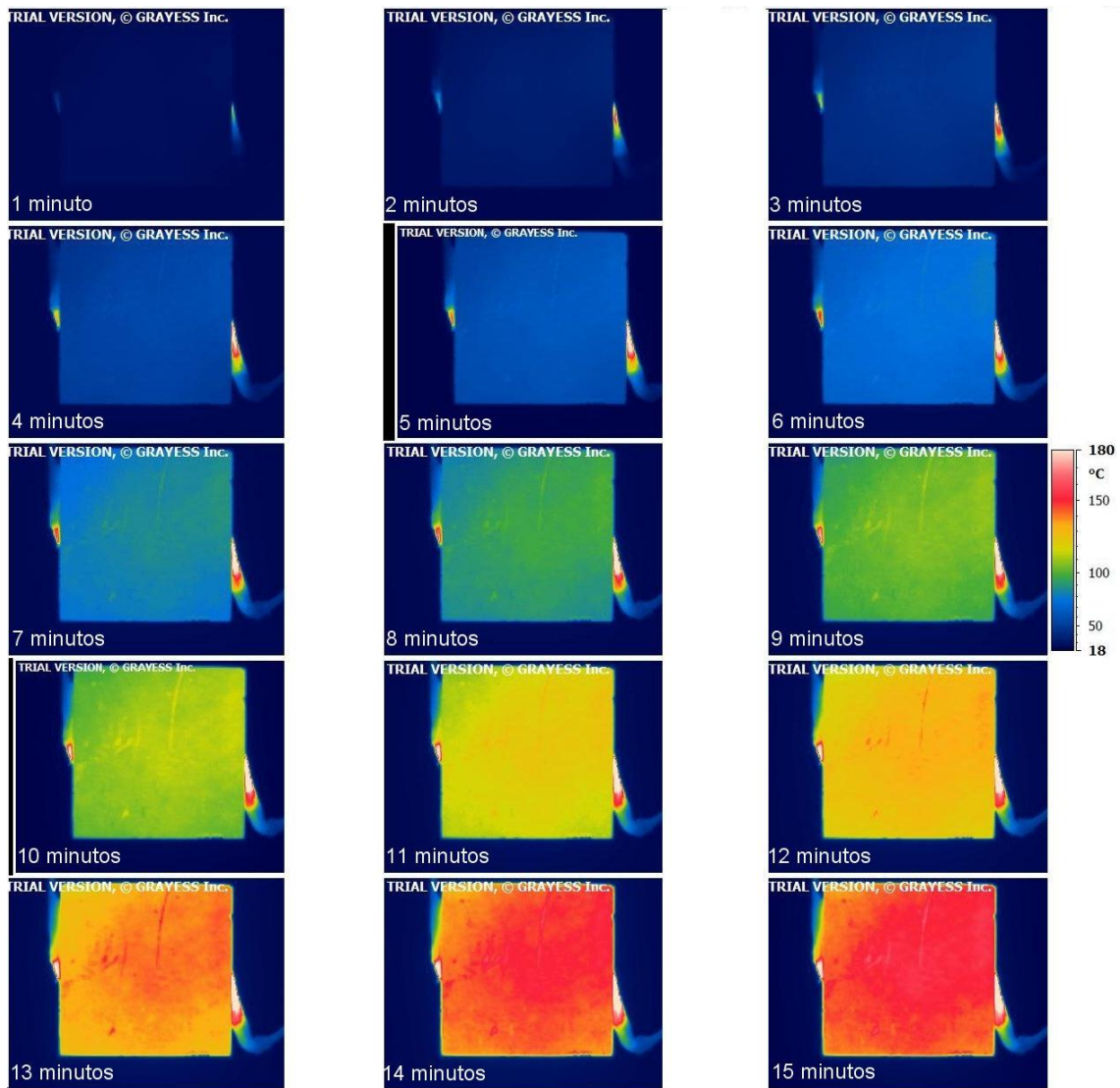


Figura 3.14 Comportamiento de la placa sin capa de óxido de magnesio a partir de  $t = 1$  minuto hasta  $t = 15$  minutos.

A continuación se presenta la secuencia de imágenes de la placa que cuenta con una capa de óxido de magnesio, igual que en el caso anterior la captura de imágenes se realizó cada 60 segundos, mostrando estas en la Figura 3.15.

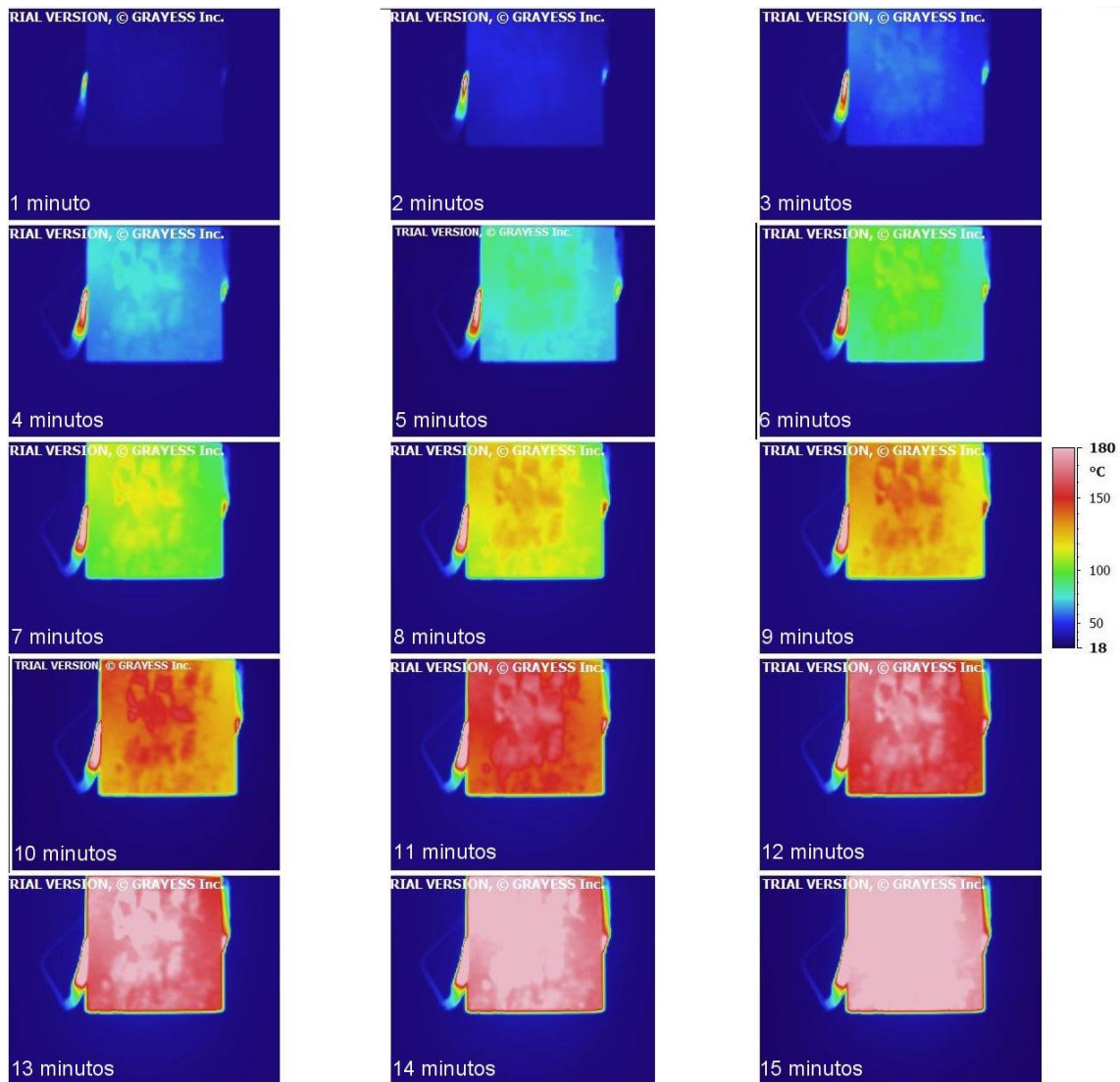


Figura 3.15 Comportamiento de la placa con capa de óxido de magnesio a partir de  $t=1$  minuto hasta  $t=15$  minutos.

La comparación entre ambos casos indica que el efecto que tiene la capa de óxido de magnesio es suficiente para que la placa alcance la temperatura final en un menor tiempo. Aunque a simple vista se observa que la homogeneidad de la temperatura es mayor para este segundo caso, esto no resulta tan cierto a la hora de analizar las gráficas de determinados puntos de la superficie.

Con la secuencia de imágenes y los valores de temperatura de cada punto de esta se procederá a comparar los resultados con los arrojados en las simulaciones.



## 4. SIMULACION DEL PROCESO

### 4.1 Desarrollo numérico

Por medio de un método numérico (volumen finito) se pretende discretizar el problema mencionado anteriormente, lo que implica resolver una gran cantidad de ecuaciones, hacerlo de forma manual resultaría un proceso tedioso que requiere de mucho tiempo y con gran probabilidad de cometer errores. Hoy en día existen programas computacionales que realizan la solución de problemas como estos de manera más rápida.

El discretizar nuestro problema significa que tendremos que aplicar las ecuaciones para cada diferencial de volumen de nuestra geometría, el número de elementos diferenciales resultantes dependerá del mallado que se tenga, entre más fino sea mayor será el número de puntos en que debe resolverse el sistema de ecuaciones.

Dentro de los métodos usados en los programas computacionales se encuentran los métodos de volumen finito, diferencias finitas, elemento finito, métodos espectrales, entre otros. El programa Fluent usa el método de volumen finito.

Las ventajas del método de volumen finito es que se puede aplicar a objetos con geometrías complejas. Para el caso de tres dimensiones se pueden tener combinación de geometrías como tetraedros y hexaedros.

Una malla puede ser regular o no regular, la malla regular como su nombre lo dice se refiere a una malla donde cada elemento que la compone tiene una forma regular, con cuatro puntos nodales para una geometría en dos dimensiones y en forma de hexaedro para geometrías en tres dimensiones, resultando en ocho puntos nodales.

El caso de una malla no regular se refiere a una malla que tiene elementos de forma triangular para geometrías en dos dimensiones con tres puntos nodales y en forma de tetraedros para geometrías en tres dimensiones con cuatro nodos.

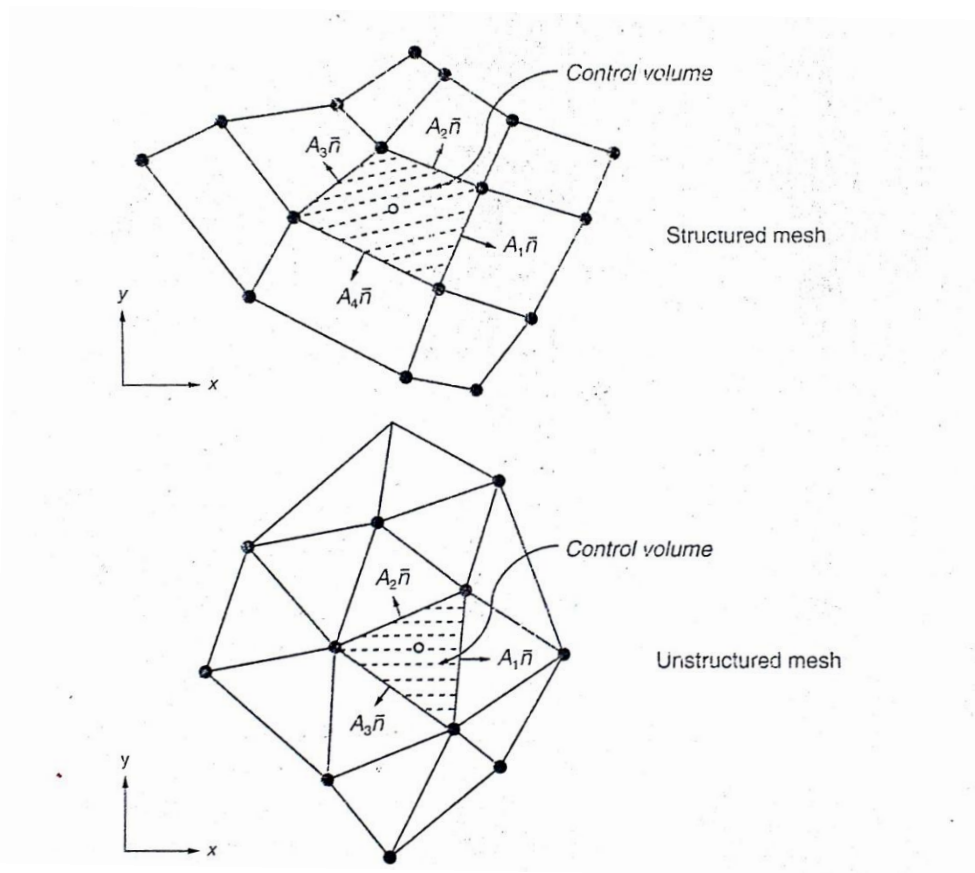


Figura 4.1 Representación de mallas regular y no regular.

En la parte central de cada volumen de control el valor de las variables es calculado, en la Figura 4.1 se observa como el punto del centro del triángulo, para el caso de la malla no regular, también como el punto blanco del centro del cuadrado, para el caso de la malla regular.

A continuación se muestra el mallado obtenido para la placa en tres dimensiones con una resistencia en forma de senoide, siendo este el primer caso de análisis. Los elementos forman el volumen de la placa maquinada en forma sinusoidal con lo que se tomará en cuenta a la resistencia como un elemento uniforme que entrega una carga térmica constante.

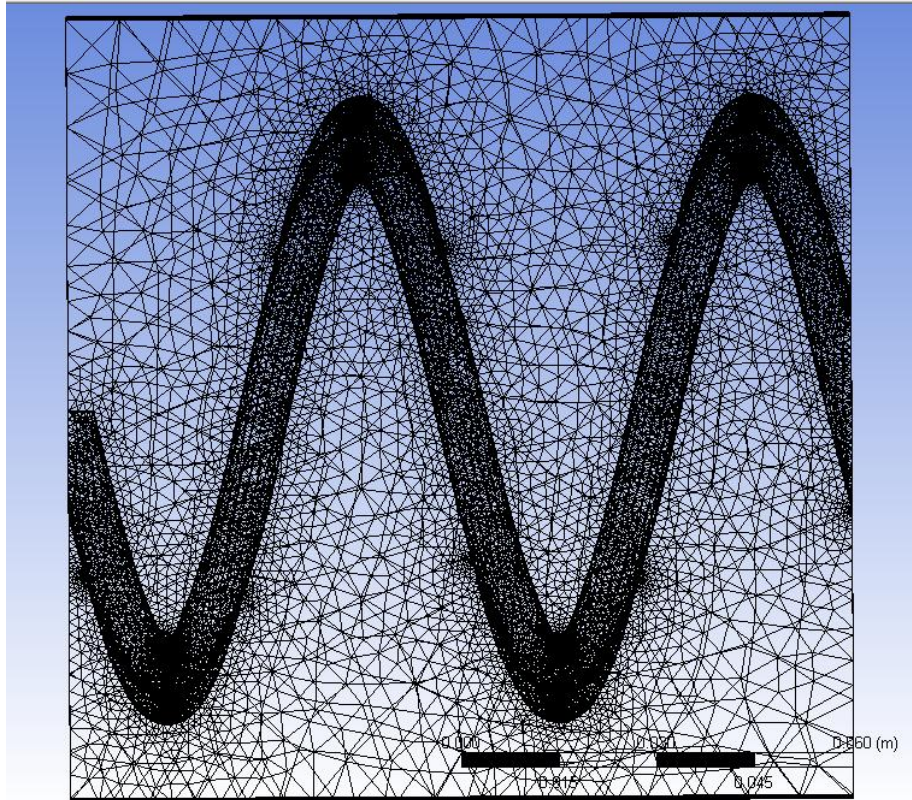


Figura 4.2 Vista de planta de mallado tridimensional de la placa, con 157974 nodos y 822223 elementos.

La ecuación general para un análisis térmico de regiones sólidas usada por el programa, es la siguiente.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\vec{v}\rho h) = \nabla \cdot (k\nabla T) + S_h$$

Donde:

$\rho =$  Densidad

$h =$  Entalpía sensible  $\int_{T_{ref}}^T C_p dT$

$\vec{v} =$  Vector de velocidad

$k =$  Conductividad

$T =$  Temperatura

$S_h =$  Fuente térmica volumétrica

El primer término del lado izquierdo de la ecuación representa la variación de energía del cuerpo en un instante, el segundo término de ese mismo lado representa la transferencia de energía de manera convectiva debido al movimiento rotativo o de traslación del sólido. El primer término del lado derecho de la ecuación representa el flujo de calor debido a la conducción y el segundo la fuente térmica volumétrica dentro del sólido.

El segundo término del lado izquierdo de la ecuación se considera cero, pues para este caso en particular las placas no tienen movimiento alguno.

El término “fuente térmica volumétrica” también lo consideramos cero, pues la energía transmitida a la placa la consideramos como un flujo de calor de las paredes de la resistencia, y no como una generación volumétrica.

Con estas consideraciones solo es necesario conocer los valores de la constante de conductividad térmica, la densidad y la entalpia del material para poder darle solución a esta ecuación.

El sistema de ecuaciones que debe resolverse se reduce a

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) = \frac{\partial}{\partial x}(k\nabla T) + \frac{\partial}{\partial y}(k\nabla T) + \frac{\partial}{\partial z}(k\nabla T)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{d^2 T}{dx^2} + k \frac{d^2 T}{dy^2} + k \frac{d^2 T}{dz^2}$$

Para el caso del cálculo de las pérdidas de energía que se tienen por convección natural y por radiación hacia el medio exterior, se presenta la siguiente ecuación:

$$q_p = q_{rad} + q_{conv}$$

$$q_p = \epsilon_{ext} \sigma (T_{\infty}^4 - T_{\omega}^4) + h_{ext} (T_{\infty} - T_{\omega})$$

Donde:

$$q_p = \text{Energía perdida}$$

$$q_{rad} = \text{Energía por radiación}$$

$q_{conv}$  = Energía por convección

$\epsilon_{ext}$  = Emisividad de la pared

$\sigma$  = Constante de Stefan – Boltzman

$T_{\infty}$  = Temperatura del medio exterior

$T_{\omega}$  = Temperatura de la superficie de la placa

$h_{ext}$  = Coeficiente de conveccion de calor del exterior

Para dar solución a todas estas ecuaciones con la geometría de la placa y el mallado, es necesario introducir algunos datos como propiedades y condiciones de frontera del elemento a analizar.

Dentro de las propiedades a considerar se encuentran las del material de las placas, en este caso la conductividad de la fundición gris, también se consideran las propiedades del aire.

Algunas de las propiedades consideradas son termodinámicas y de transporte. Para el caso de propiedades de transporte se encuentran la conductividad  $k$  (transporte de calor), para las propiedades termodinámicas relacionadas con el equilibrio del sistema se encuentran la capacidad térmica volumétrica, una peculiaridad de esta última propiedad es, que los materiales con mayor densidad tienden a presentar un calor específico menor.

El establecimiento de la cantidad de energía generada por las resistencias es de suma importancia, pues de este valor depende en gran parte la temperatura alcanzada por la placa para un tiempo específico, por eso fue necesario hacer el cálculo de manera experimental de la energía generada por la resistencia, pues las características dadas por el fabricante no son del todo exactas, como la generación de potencia de la resistencia que resulto ser de 568 watts y no de 700watts.

### 4.2 Configuración y características de la placa simulada con resistencia en forma de senoide

#### Caso # 1

## ANÁLISIS TÉRMICO DE UNA PLACA PARA UNA PRENSA DE TERMOFORMADO

En esta caso se simuló una placa de dimensiones de 120 [mm] de cada lado y un espesor de 2" (5.08 [cm]) y con un canal en forma de senoide, dentro de este se simuló una resistencia, de diámetro de 1/2" (1.27 [cm]) con la misma forma del canal. Las condiciones establecidas para el análisis fueron: que los espacios sobrantes del canal estaban ocupados por aire, la densidad de flujo de calor de la resistencia era de  $71181 \text{ W/cm}^2$ , el valor de convección en todas las paredes era de  $25 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$  y una emisividad de 0.81. En cuanto a las propiedades de la fundición gris se consideró una densidad de  $6800 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ , un coeficiente de capacidad térmica específica de  $460 \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$  y una conductividad térmica de  $46.737 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$ . La temperatura ambiente se estableció de  $12 \text{ }^\circ\text{C}$

En la Figura 4.3 se muestra la configuración del canal y parte de las dimensiones de la placa

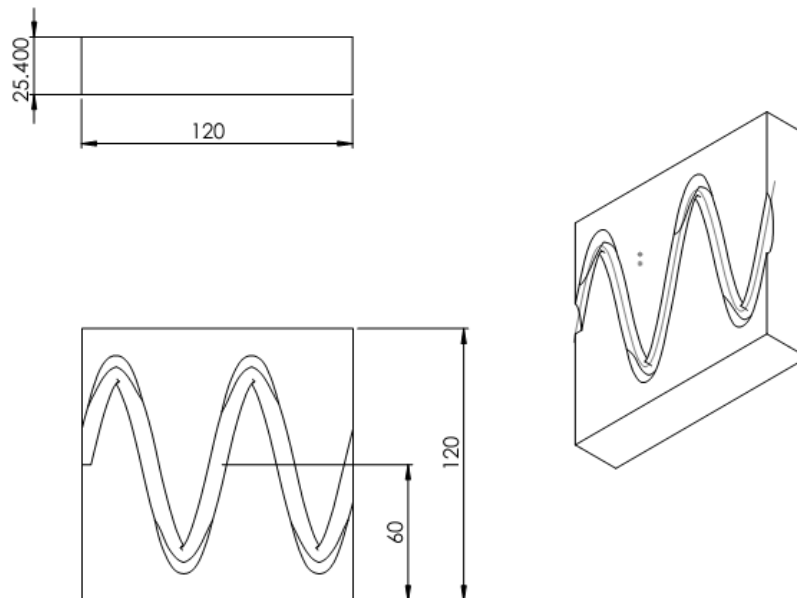


Figura 4.3 Placa con resistencia en forma de senoide.

### 4.3. Configuración y características de posibles arreglos de resistencias rectas en la placa.

#### Caso # 2

Placa con tres resistencias, espesor de 25.4 [mm] este arreglo se muestra en la Figura 4.4

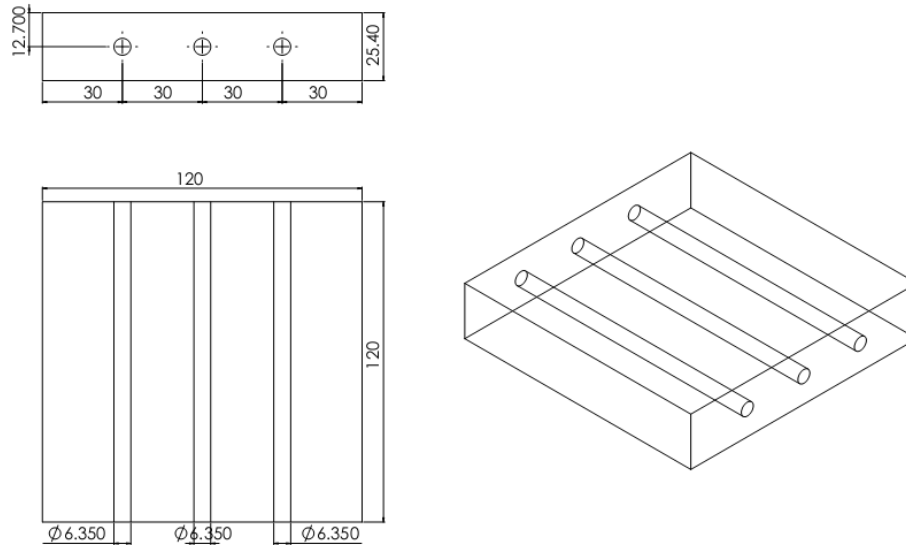


Figura 4.4 Placa con tres resistencias caso #2.

Como se menciona el espesor de la placa se propuso de 1" (2.54 [cm]), con distancia de centro a centro de las resistencias de 3 [cm] y con un diámetro cada una de 1/4" (0.635[cm]), la densidad de energía generada por cada una fue de 71181 [W/m<sup>2</sup>].

Las propiedades establecidas para la placa son igual que en el caso anterior, para la fundición gris, en este caso se estableció un contacto directo y total entre las resistencias y la placa, el valor de convección se definió como  $25 \left[ \frac{W}{(m^2 \cdot K)} \right]$  y emisividad 0.81, estos dos valores aplicados para las seis paredes exteriores del cuerpo.

#### Caso # 3

En este caso el cambio que se le hizo a la propuesta de la placa fue el espesor, pues se aumentó de 2.54 [cm] a 6.5 [cm] promoviendo un desfase de las resistencias de  $\frac{1}{2}$ " (1.27 [cm]) de diámetro cada una, la configuración se muestra en la Figura 4.5.

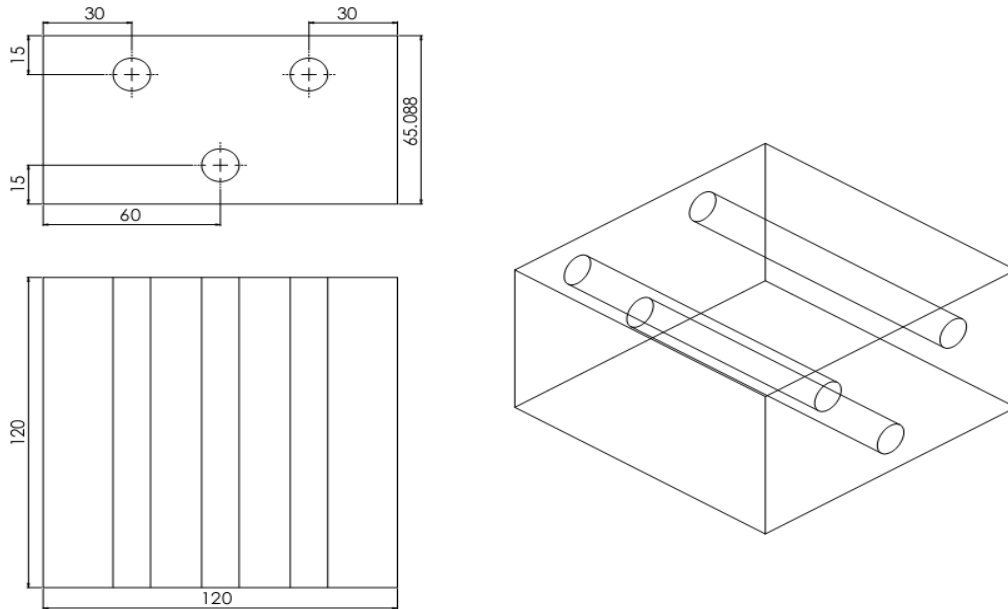


Figura 4.5 Placa con tres resistencias desfasadas.

En esta placa podemos analizar el comportamiento de la superficie tanto superior como inferior, pues no es el mismo por la distancia que presenta cada una a las resistencias. Pudiendo establecer dos casos de de análisis, estos son:

### Caso #3a

Este caso es para la superficie más cercana a las dos resistencias que se encuentran en paralelo entre si y a la misma distancia de la superficie, esta es señalada en la Figura 4.6.

### Caso #3b

Esta cara es la que solo una resistencia se encuentra más cercana a la superficie, también es señalada en la Figura 4.6.



Tanto para el caso #3a como para el #3b se manejan las mismas propiedades y condiciones que en los casos anteriores.

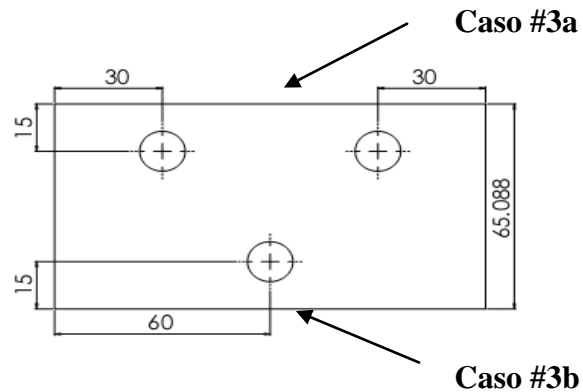


Figura 4.6 Placa con tres resistencias desfasadas caso #3a y #3b.

### Caso #4

En este caso se consideran cuatro resistencias paralelas entre si y colocadas en el centro de la placa, el diámetro de las resistencias es de  $\frac{1}{2}$ " (1.27 [cm]), la distancia entre centro y centro de las resistencias es de 2.4 [cm], el espesor de la placa es igual que el caso anterior de 6.5 [cm].

Las condiciones y propiedades son las mismas que en los casos anteriores y para los casos siguientes, lo único que cambia son la posición de las resistencias, las dimensiones tanto de la placa como de las resistencias.

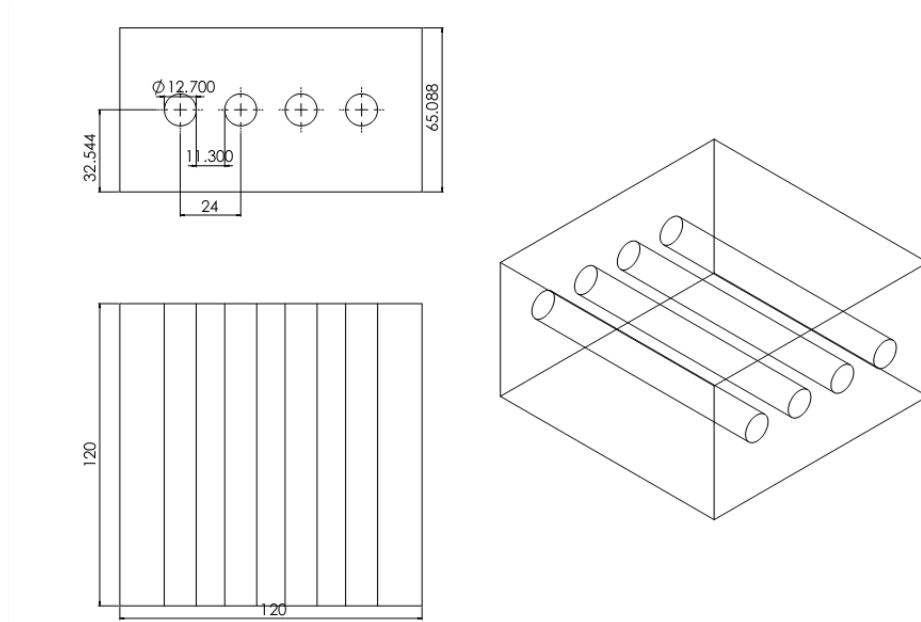


Figura 4.7 Placa con cuatro resistencias caso #4.

**Caso #5**

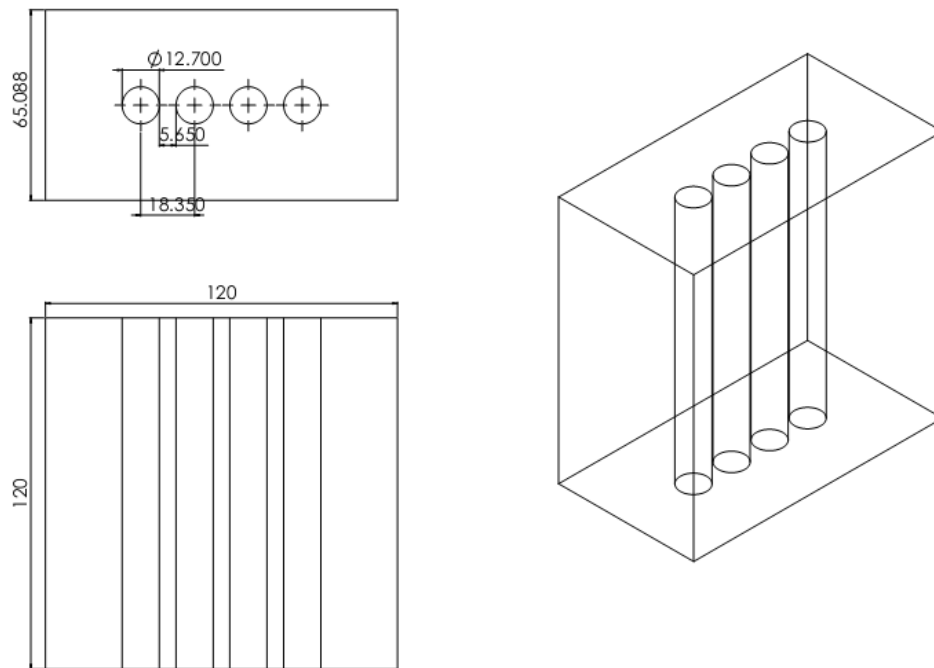


Figura 4.8 Placa con cuatro resistencias caso #5.

La diferencia que se establece entre este caso y el caso #4 es la separación que hay entre resistencias, resultando ser de 1.85 [cm], concentradas en el centro, quedando una

separación de 2.79 [cm] entre las resistencias de los extremos y los extremos más próximos de la placa.

Las propiedades y condiciones son iguales que en los casos anteriores, de la misma manera las dimensiones de las resistencias y de la placa son las mismas.

### Caso #6

En este último caso se tiene una placa con espesor de 1" (2.54 [cm]) y con cuatro resistencias en su interior de 1/2" (1.27 [cm]) de diámetro, y una distancia entre los centros de cada una de estas resistencias de 2.4 [cm].

Las propiedades y condiciones siguen siendo las mismas que en los otros casos

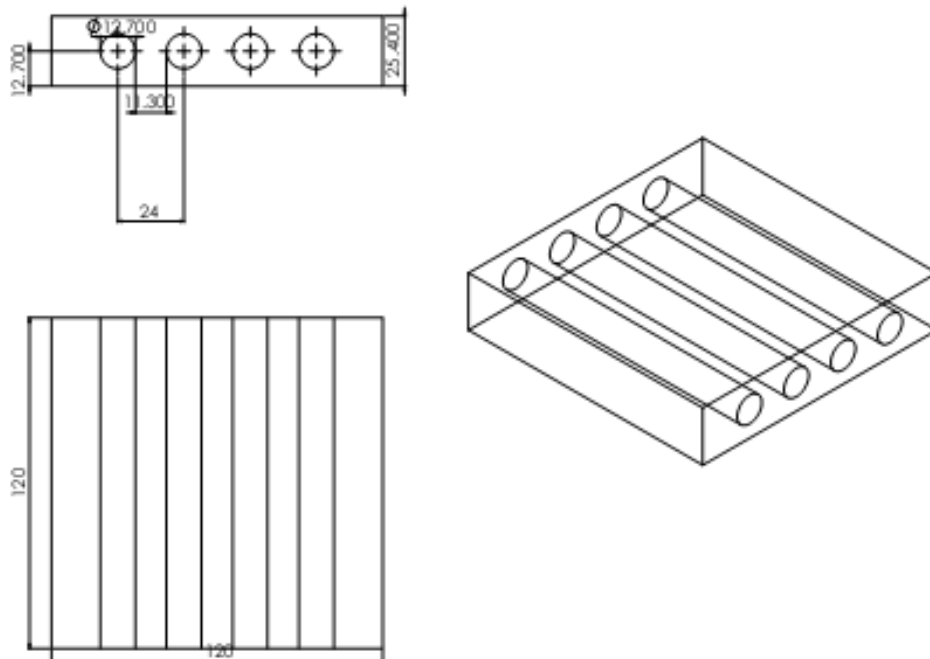


Figura 4.9 Placa con cuatro resistencias caso #6.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Comparación de datos de temperatura teóricos y experimentales para el caso #1

#### Comparación para la placa sin óxido de magnesio MgO

En la Figura 5.1 se muestra una línea localizada sobre la superficie de la placa. Para el análisis y comparación de resultados, se tomarán las temperaturas a lo largo de esta línea para los casos experimentales y numéricos con fines comparativos, en función de estas mediciones se propondrá una explicación a las variaciones entre ambos casos, así como se sugerirán algunas mejoras.

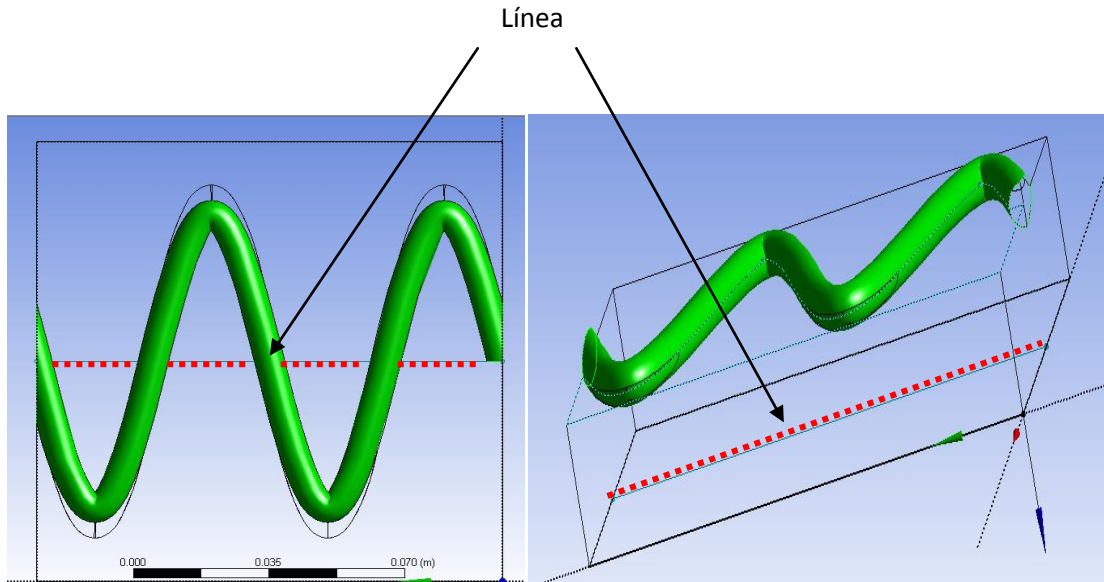


Figura 5.1 Posición de la línea de análisis ubicada en la parte central de la superficie, línea que servirá como base del análisis.

En la Figura 5.2 se muestra la simulación de esta misma placa cuando se encuentra en el proceso de calentamiento.

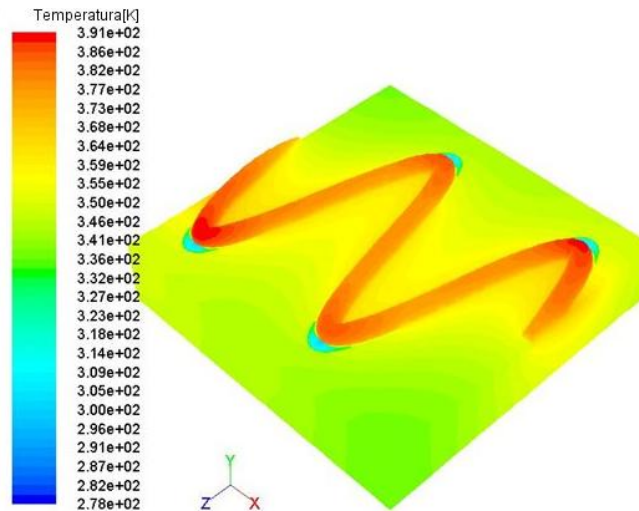


Figura 5.2 Simulación del calentamiento de la placa con resistencia en forma de senoide.

En la Figura 5.3 se muestra la secuencia de imágenes del proceso de calentamiento de la placa de la simulación. Estas corresponden para los tiempos  $t=5$  minutos,  $t=10$  minutos y  $t=15$  minutos. Se puede observar en la figura la temperatura de la superficie y la distribución de esta.

**Sin óxido de magnesio**

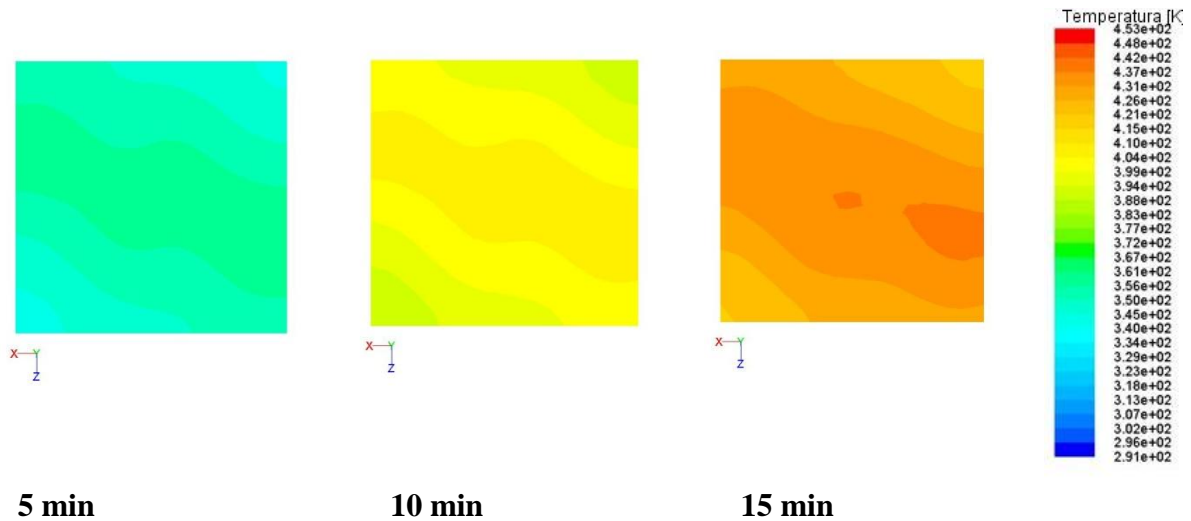


Figura 5.3 Calentamiento de la placa con la resistencia en forma de sinusoide y con óxido de magnesio para diferentes tiempos.

Como lo muestra la Figura 5.3 se presenta una trayectoria de calentamiento igual a la resistencia, pues depende de qué zonas están más cercanas a la resistencia, para determinar la distribución de los gradientes de temperatura. Más adelante se mostraran gráficamente las temperaturas que se lograron alcanzar en cada uno de estos tres tiempos analizados y a lo largo de la línea señalada en la Figura 5.1.

En esta placa se tiene la presencia de aire en pequeños huecos, localizados entre la placa y la resistencia, en el caso de la simulación solo se consideran huecos establecidos en las zonas de los dobleces de la resistencia.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la simulación, en estos se puede observar que la forma adquirida de la gráfica no es simétrica, pues presenta una mayor caída de temperatura en uno de los extremos que en el otro, las causas podrían atribuirse al menor contacto de la resistencia con la placa.

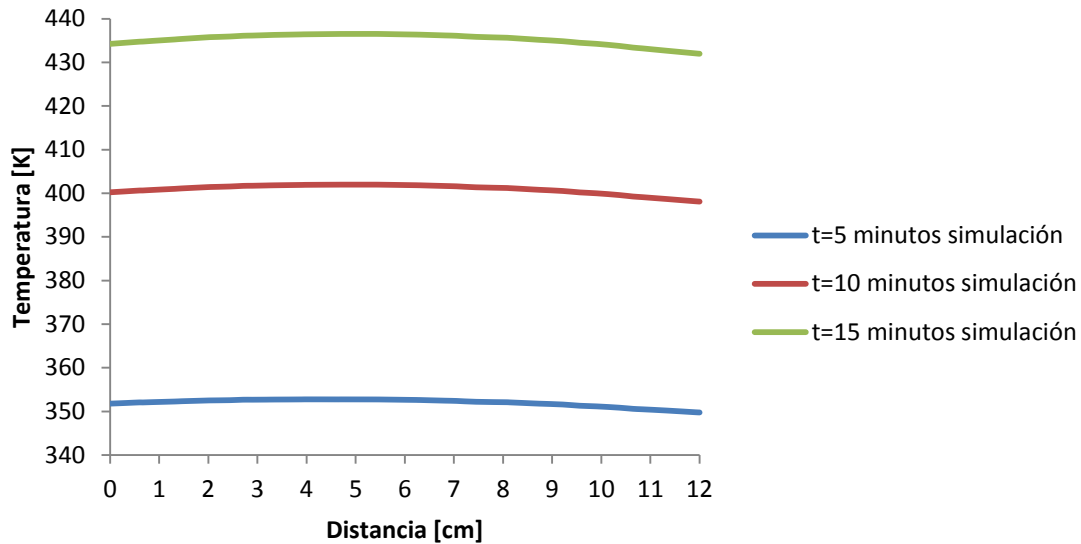


Figura 5.4 Variación de la temperatura en la simulación para los tiempos t=5, 10 y 15 minutos.

La temperatura máxima alcanzada para el tiempo igual a 5 minutos es de 353 K (80 °C) y con un valor mínimo situado en uno de los extremos de 349[K] (76 °C), resultando en una diferencia de cuatro grados entre los puntos de mayor y menor temperatura y una temperatura promedio de 352 [K]. Después de 10 minutos la temperatura osciló entre 398 [K] (125 °C) como valor mínimo y 402 [K] (129 °C) como valor máximo, y una temperatura promedio de 400 [K], y finalmente para después de 15 minutos se encuentra en el rango de 432 [K] (159°C) como mínima, 437 [K] (164 °C) como máxima y un promedio de 435. Resultando una diferencia mayor en el tiempo t= 15 minutos, pues para el tiempo t=5 minutos se tienen 4°C de diferencia, igual que para el tiempo t=10 minutos, mientras que para el tiempo t=15minutos se tuvieron 5°C.

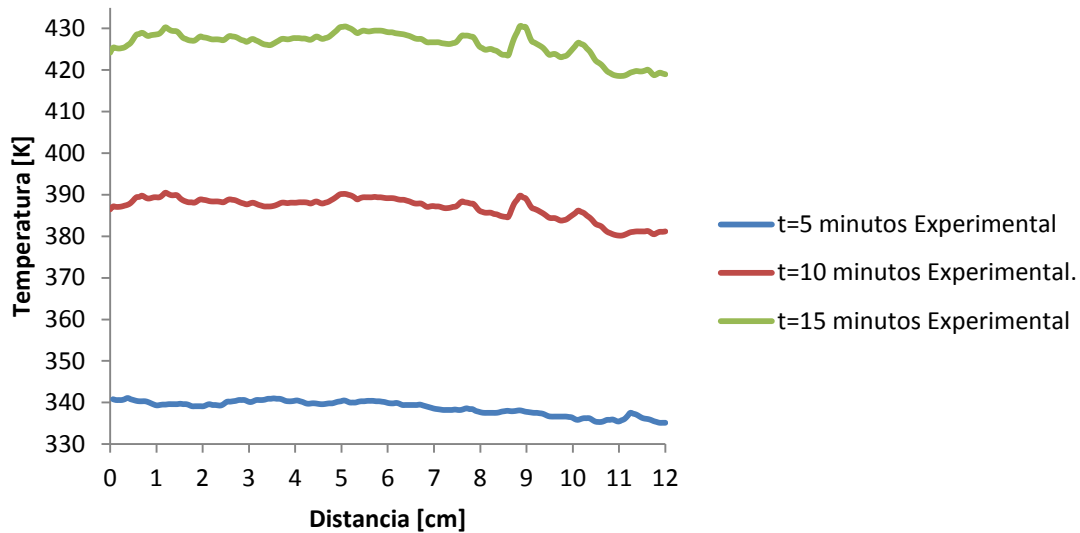


Figura 5.5 Variación de la temperatura en las pruebas experimentales sin MgO para los tiempos  $t=5$ , 10 y 15 minutos y a lo largo de una línea definida.

En la Figura 5.5 se observa el comportamiento de la línea de análisis de la placa experimental del caso #1, observamos que para el tiempo de 5 minutos se tiene una temperatura máxima de 341 [K] ( $68^{\circ}\text{C}$ ) alcanzada en el extremo del lado izquierdo mientras que en el lado derecho resulta la temperatura más baja que es 334 [K] ( $61^{\circ}\text{C}$ ), teniendo una diferencia entre los dos valores de  $7^{\circ}\text{C}$  y una temperatura promedio de 338 [K]. Para el tiempo  $t=10$  la temperatura se elevó hasta 390 [K] ( $117^{\circ}\text{C}$ ) en el punto más caliente, y con un mínimo de 380 K ( $107^{\circ}\text{C}$ ). Resultando una diferencia de  $10^{\circ}$  y una temperatura promedio de 387 [K].

Finalmente, para después de 15 minutos transcurridos se logró alcanzar una temperatura de 430 [K] ( $157^{\circ}\text{C}$ ) como valor máximo y como mínimo un valor de 418 [K] ( $145^{\circ}\text{C}$ ), teniendo así una diferencia de  $12^{\circ}$  y un promedio de 426 [K]. Igual que en la simulación, la diferencia de temperaturas entre el punto más caliente y el más frío resultó ser para el tiempo  $t=15$  minutos

Las líneas de la Figura 5.5 presentan una variación que se asocia a la rugosidad de la placa, dado que la cámara termográfica asocia pequeñas diferencias de temperatura en los sitios menos expuestos debidos a que se pierde la perpendicularidad entre ambos elementos.



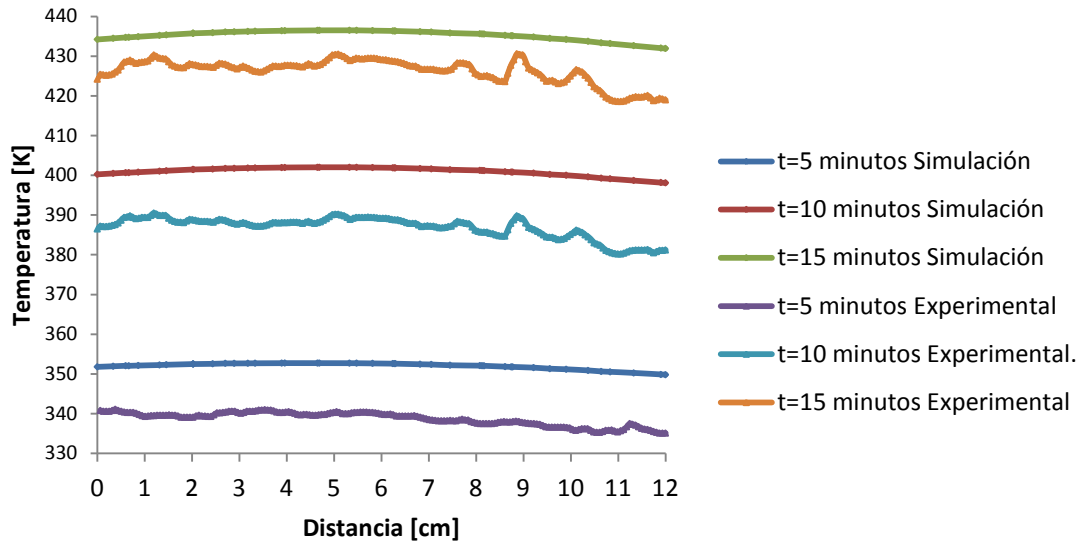


Figura 5.6 Comparación de datos teóricos y experimentales para el caso #1 y para los tiempos  $t=5$ , 10 y 15 minutos.

En la Figura 5.6 se presenta una comparación de las gráficas teóricas y experimentales (Figura 5.4 y 5.5). Se observa un comportamiento similar entre los dos casos, aunque con un ligero desfase para cada tiempo, aproximadamente de  $14^\circ$  para el tiempo  $t=5$  minutos,  $13^\circ$  para el tiempo  $t=10$  minutos,  $9^\circ$  para el tiempo de  $t=15$  minutos, resultando ser menor en este último.

Podemos ver que las gráficas de las pruebas experimentales son las que presentan los valores de temperaturas menores y con algunos picos que elevaban la temperatura drásticamente, algunas posibles causas se mencionan a continuación:

- Las propiedades reales del material, pues se consideraron las establecidas en tablas para fundición gris, que no siempre resultan ser las que en verdad se tienen, debido a variaciones en la composición o procesamiento del material. Para comprobar o determinar este valor sería necesario realizar algunas pruebas que nos ayudarán a saber el valor exacto, Por ejemplo los coeficientes reportados en la literatura varían entre de 46 a 80  $W/m \cdot K$ .
- En cuanto a los picos presentados en las gráficas experimentales, pueden deberse a que el material presenta ciertas irregularidades en la superficie, ocasionando que se

tengan temperaturas mayores, o la cámara las determinará de manera distinta. Sin embargo, cualitativamente se puede decir que los resultados obtenidos por medio de la simulación corresponden adecuadamente con los resultados experimentales.

### Placa con capa de óxido de magnesio

Las gráficas de la Figura 5.7 son de la placa que cuenta con una pequeña capa de óxido de magnesio (MgO) que ocupa los huecos del canal, esto con la finalidad de ver el efecto que tienen este proceso.

En este caso las gráficas que se muestran son solo para el caso experimental, pues para el caso numérico tienen que ser introducidos los valores de las propiedades de tablas, propiedades que cambian de acuerdo al proceso de manufactura, y dado que no se pudo tener un control de este, introducir los valores de tablas sería erróneo.

Las gráficas que se muestran a continuación son para los tiempos  $t=5$ ,  $t=10$  y  $t=15$  minutos específicamente para los puntos que se encuentran en la parte central de la superficie, (en la misma línea que en el caso anterior).

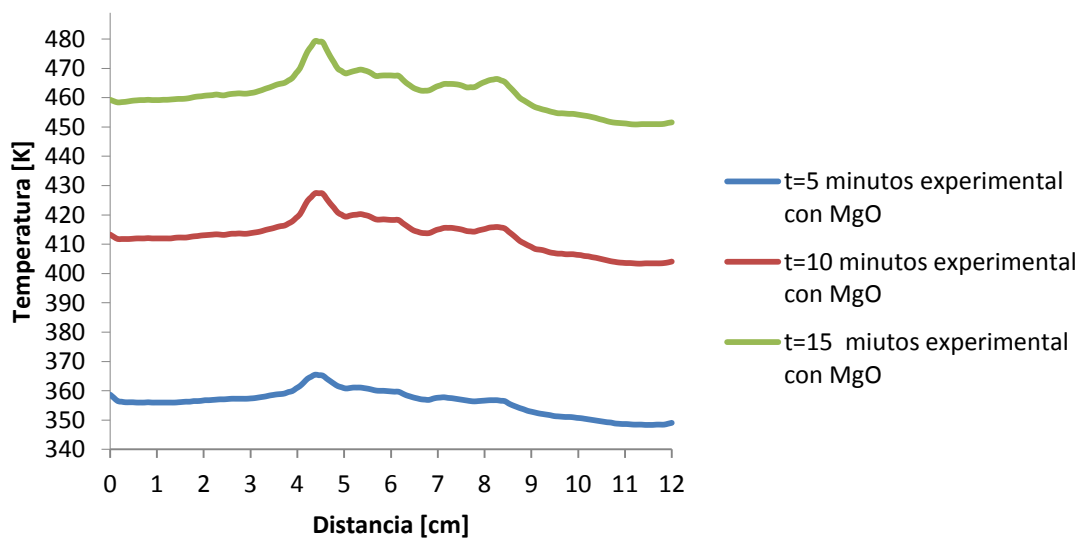


Figura 5.7 Variación de la temperatura en las pruebas experimentales con óxido de magnesio en los huecos, para los tiempos  $t=5$ ,  $10$  y  $15$  minutos y a lo largo de una línea definida.

En el caso donde trascurrieron 5 minutos el valor máximo alcanzado fue de  $367$  [K] ( $94$  °C), el mínimo de  $348$  [K] ( $75$  °C) y el promedio de  $356$  [K]; como se observa, las

temperaturas fueron mayores que en el caso de la placa que no cuenta con este material, aunque, el comportamiento que adquiere es similar a los casos anteriores la diferencia entre el punto más caliente y el más frío aumentó considerablemente, alcanzando los 19°C para este tiempo. El valor máximo logrado para los 10 minutos transcurridos fue de 427[K] (154 °C), el valor mínimo de 403[K] (130 °C), teniendo una diferencia de 24° y un temperatura promedio de 413 [K], esta es mucho mayor que la obtenida para 5 minutos. La temperatura máxima alcanzada después de 15 minutos fue de 479 [K] (206 °C) y el valor mínimo de 451 [K] (178 °C) con una diferencia de 28° y una temperatura promedio de 461 [K], superior a los dos tiempos anteriores de óxido de magnesio (5 y 10 minutos).

Con lo mencionado anteriormente, podemos suponer que al elevarse la temperatura de la placa y con el paso del tiempo, aumenta la diferencia entre el punto más caliente y el más frío, esto se puede asociar a que el óxido de magnesio mejora el contacto en algunos puntos, y a que el intercambio de calor se ve favorecido en la superficie por el incremento del gradiente de temperatura, mientras que dentro de la placa el calor se conduce por conducción

En las graficas de la Figura 5.8 se muestra la comparación de las temperaturas de la placa con óxido de magnesio y sin este. La diferencia de temperaturas entre un caso y otro aumenta con el tiempo, observando que la placa con óxido de magnesio eleva su temperatura mucho más rápido que la que no tiene este material, pues para el tiempo  $t=10$  minutos en el caso de la placa con óxido de magnesio alcanza temperaturas muy cercanas a las observadas en el caso de la placa sin óxido de magnesio pero para el tiempo  $t=15$  minutos.

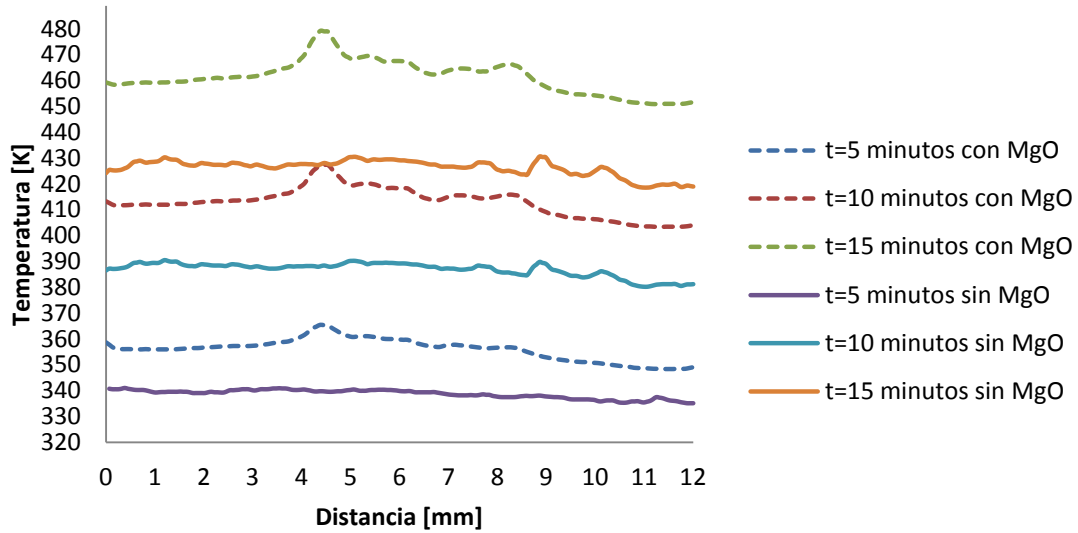


Figura 5.8 Comparación de temperaturas alcanzadas por las placas con MgO y sin MgO experimentalmente.

## 5.2. Simulación de posibles arreglos

### Caso #2

Placa con tres resistencias, espesor de 25.4 [mm]. En la Figura 5.9 se muestra la línea de análisis de temperaturas para este caso.

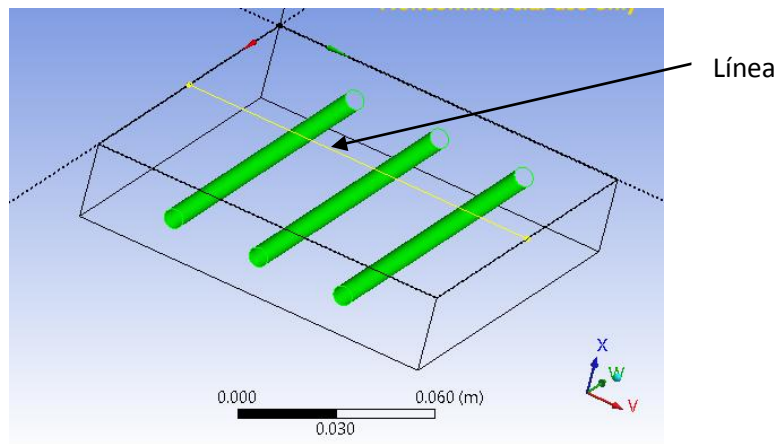


Figura 5.9 Configuración de placa con 3 resistencias en paralelo.

El arreglo de resistencias es similar al utilizado en la placas de la prensa pero con dimensiones menores y una cantidad de resistencias menor.

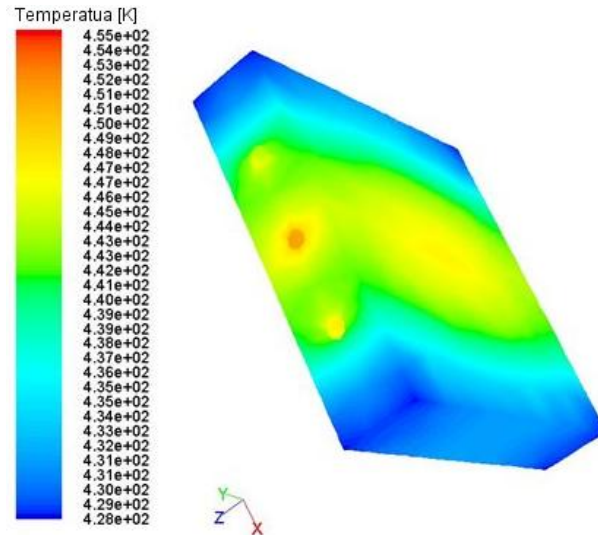


Figura 5.10 Simulación de la placa con 3 resistencias en paralelo.

En la Figura 5.10 se muestra el perfil de temperaturas al tiempo  $t= 7$  minutos de calentamiento de la placa, con la misma densidad de energía de  $71181 \left[\frac{W}{m^2}\right]$ . Como se puede observar la temperatura en el centro es mucho mayor que en las orillas. El perfil de temperaturas alrededor de la resistencia central tiene forma envolvente.

Por otro lado, las paredes más lejanas son las que más tardan en elevar su temperatura, debido a la distancia que se tiene a la fuente de calor, aunque también se debe a la emisividad y convección de las paredes.

En la Figura 5.11 se puede ver cómo se va desarrollando este calentamiento en la superficie.

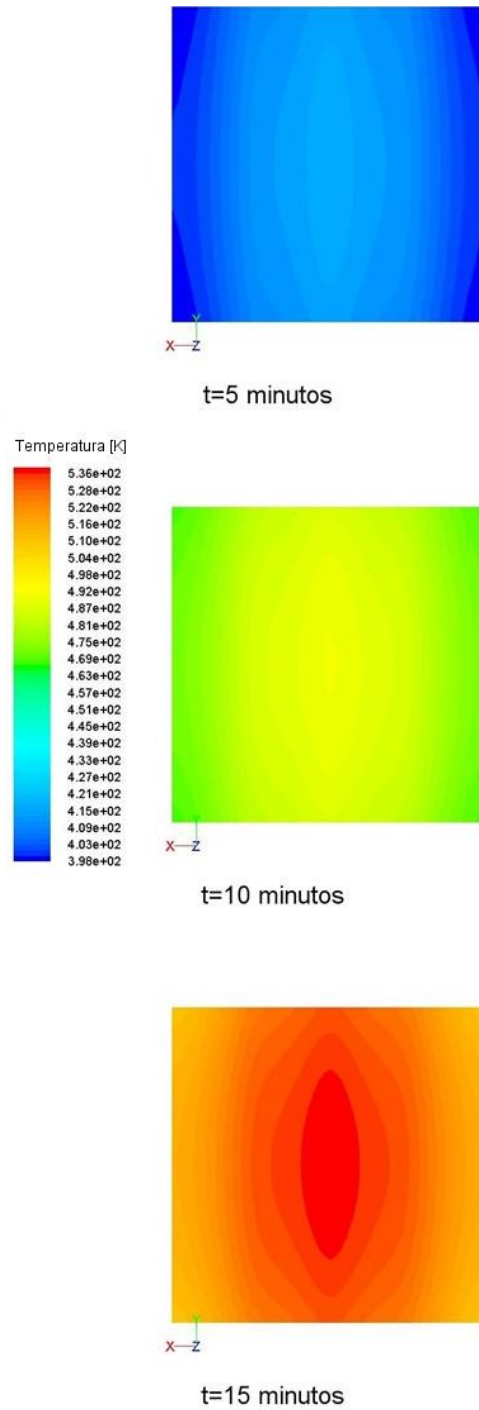


Figura 5.11 Proceso de calentamiento para los tiempos  $t= 5, 10$  y  $15$  minutos, placa con 3 resistencias en paralelo.

En las gráficas de la Figura 5.12 se describe el comportamiento de la temperatura, para los puntos que conforman la línea mostrada en la Figura 5.9. Las graficas corresponden a los tiempos  $t= 5, 10$  y  $15$  minutos respectivamente.

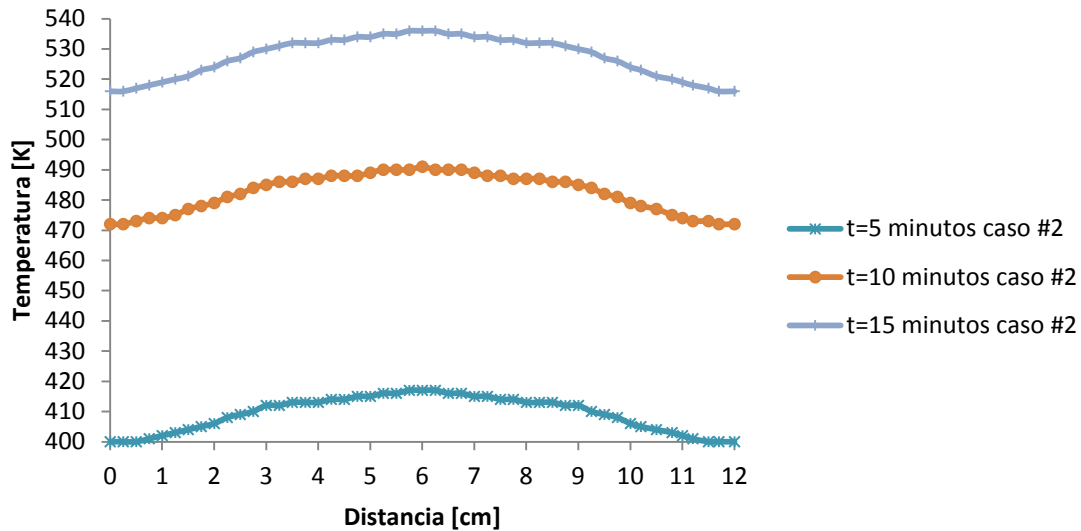


Figura 5.12 Placa con tres resistencias en paralelo con espesor de 25.4 [mm].

En este caso la temperatura máxima alcanzada fue de aproximadamente 536 K (259°C) superior al primer caso donde se tiene la resistencia en forma de senoide, lo que podríamos considerar como una mejora, aunque tenemos que observar que los gradientes de temperatura también son más grandes.

La temperatura máxima alcanzada para el tiempo de 5 minutos es de 417 [K] y la mínima de 400 [K], obteniendo una diferencia de 17° y un promedio de 409 [K]. La temperatura máxima pasados 10 minutos fue de 491[K] y la mínima de 472[K], resultando en una diferencia de 19° y una temperatura promedio de 482 [K]. Después de 15 minutos se tiene una temperatura máxima de 536[K] y una mínima de 516[K], siendo la diferencia de 20° y el promedio de 527 [K].

### Caso #3

Placa con tres resistencias desfasadas

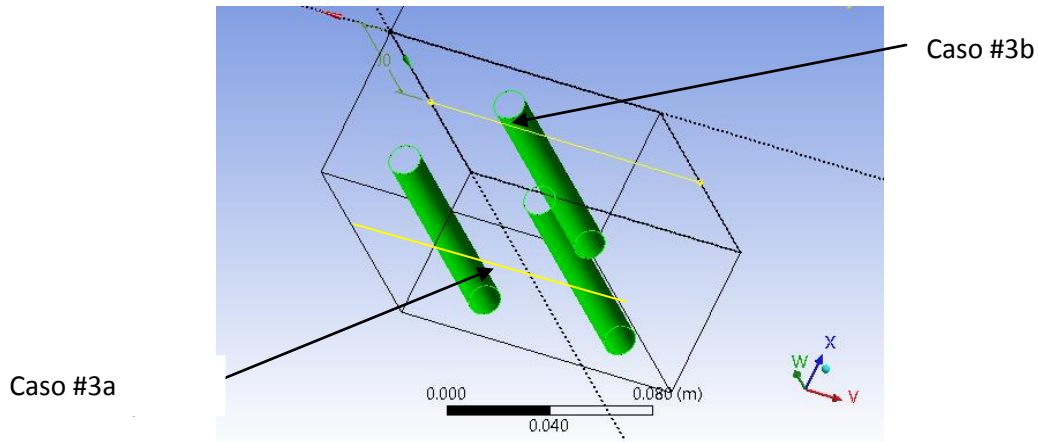


Figura 5.13 Configuración de placa con 3 resistencias con un desfase hacia abajo de la que se encuentra en la parte central.

En esta imagen también se pueden observar las líneas que serán de análisis, localizadas tanto en la pared superior como inferior.

Lo que se buscó en este arreglo de desfase, específicamente en el caso 3#a es eliminar un poco el pico de temperaturas, esto para no tener una temperatura tan elevada en el centro. El perfil de temperaturas a un tiempo de 15 minutos se puede observar en la Figura 5.14

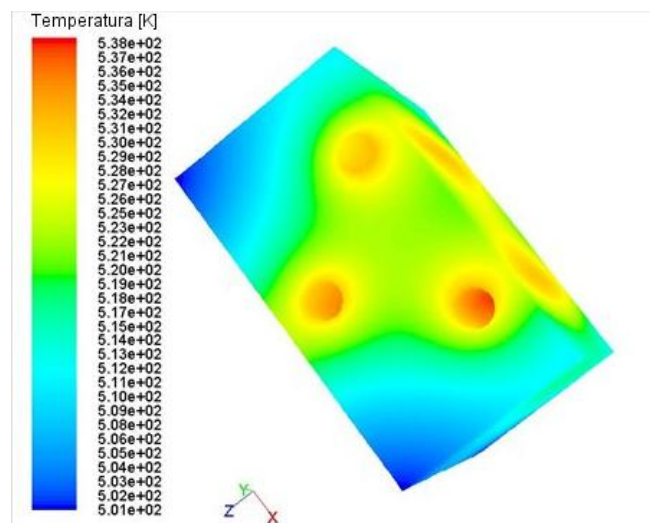


Figura 5.14 Simulación de placa con resistencias desfasadas.

En la secuencia de imágenes (Figura 5.15) se observa cómo se va calentando la superficie del caso #3a después de 5 minutos transcurridos, hasta 15 minutos después.



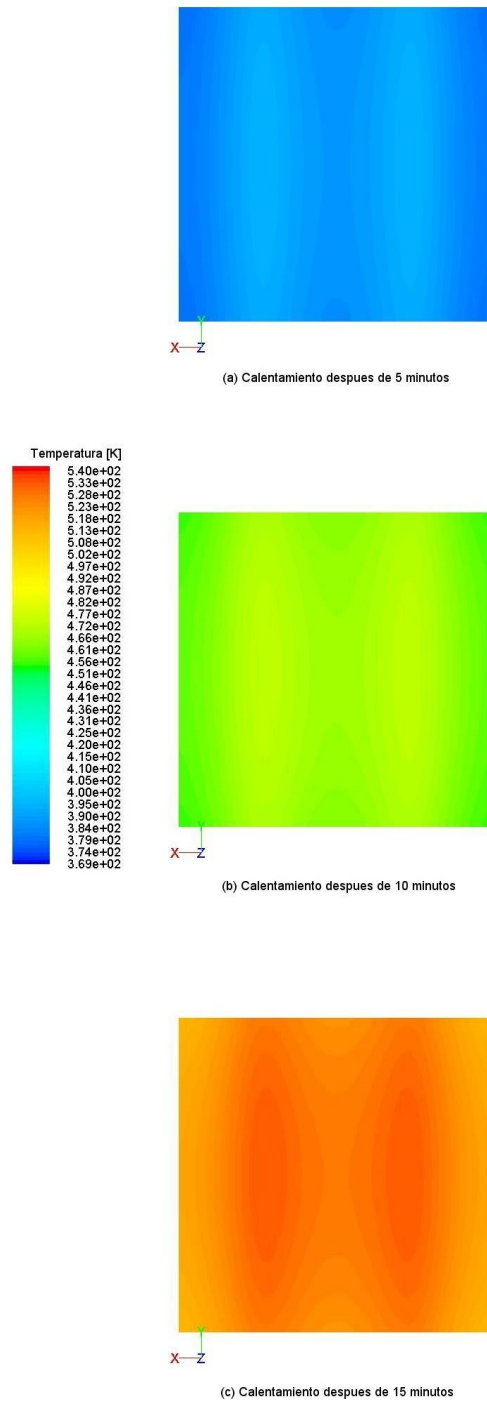


Figura 5.15 Proceso de calentamiento para los tiempos  $t= 5, 10$  y  $15$  minutos, para la placa con 3 resistencias desfasadas, (vista del plano del caso #3a).

En la Figura 5.16 se observa la misma placa con los mismos lapsos de tiempo, pero ahora para la superficie del caso #3b

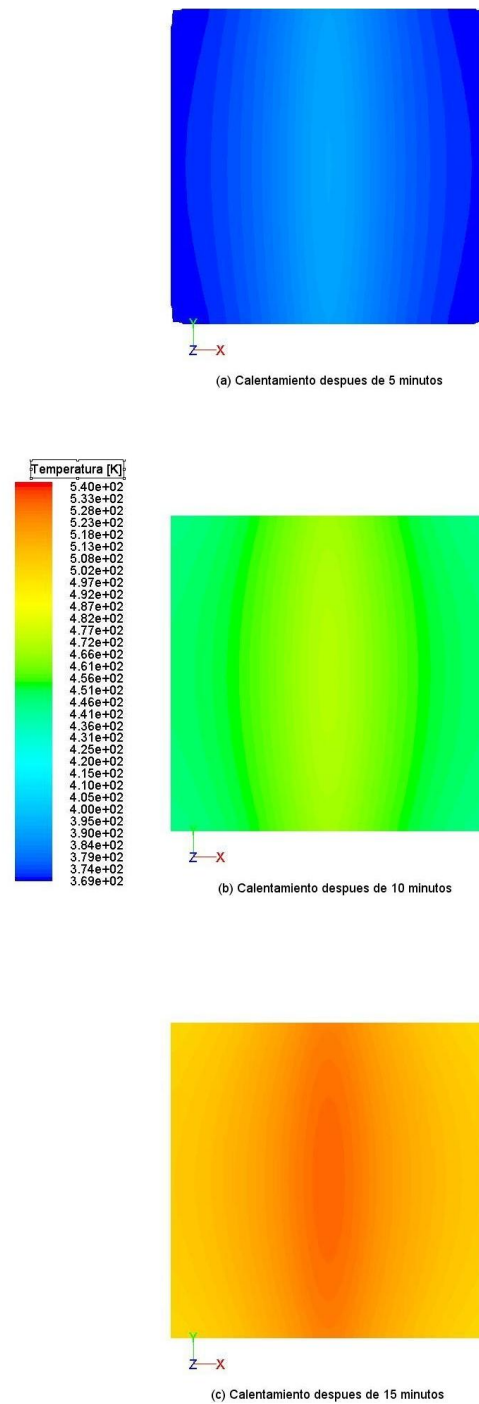


Figura 5.16 Proceso de calentamiento para los tiempos  $t=5, 10$  y  $15$  minutos, para la placa con 3 resistencias desfasadas (vista del plano caso #3b).

En el caso #3a se observa una distribución de temperaturas más homogénea que en el caso #3b aunque con un ligero cambio en la tonalidad en el centro, pero este cambio no es tan drástico como el presentado entre el centro y los extremos del caso #3b.

A continuación en la Figura 5.17 se muestra las graficas de comportamiento de la línea de análisis tanto para el caso #3a como #3b, (roja para el caso #3a y azul para el caso #3b)

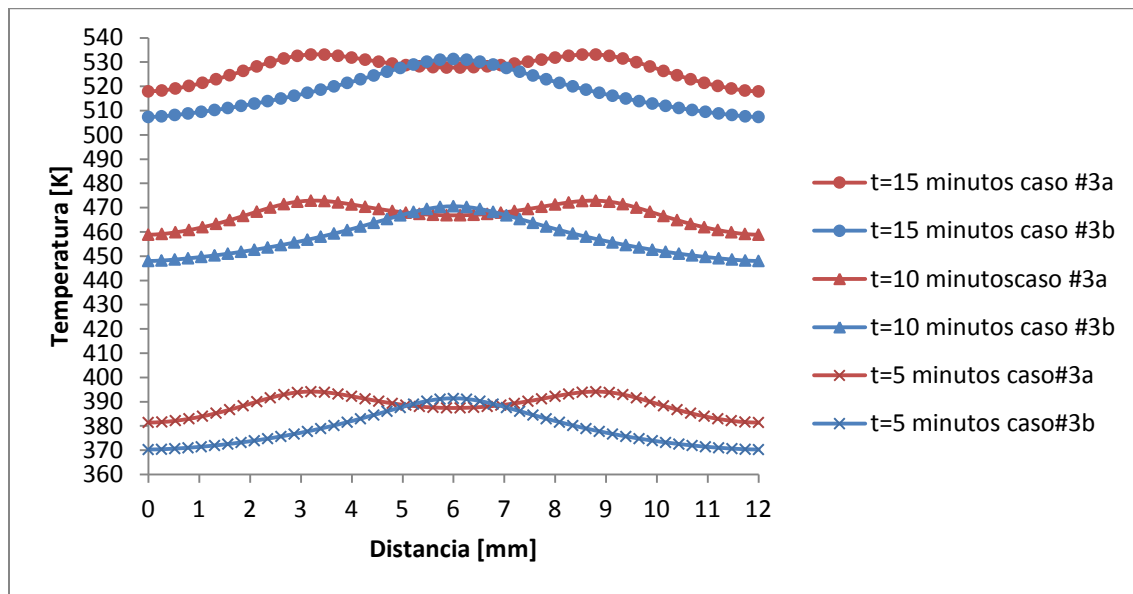


Figura 5.17 Placa con tres resistencias en paralelo para un espesor de 65[mm].

Con la distancia elegida para desfasar la resistencia se obtuvo una ligera disminución de la temperatura en el centro de la superficie del caso #3a, lo que indica que podría buscarse un desfase más corto y lograr que la diferencia entre el centro y el punto más caliente se reduzca.

Para los tres instantes analizados del caso #3a la diferencia de temperaturas entre el centro y el punto con mayor temperatura fue de 5° para t=5 minutos, de 6° para t=10 minutos y 7° para t=15 minutos, mientras que para el caso #3b y para los mismos 5, 10 y 15 minutos resultó una diferencia de 22°, 23° y 24° respectivamente.

La temperatura promedio resulta ser mayor para el caso #3a que para el caso #3b aproximadamente 10° de diferencia entre un caso y otro y para los tres tiempos, pues para

el tiempo  $t=5$  minutos, para el caso #3a se tiene una temperatura promedio de 388 [K] mientras que para el caso #3b es de 378 [K], para el tiempo  $t=10$  y  $t=15$  minutos para el caso #3a se tienen temperaturas de 467 [K] y 527 [K] respectivamente, mientras que para el caso #3b para los tiempos  $t=10$  y  $t=15$  se tienen temperaturas de 457 [K] y 517 [K] respectivamente.

### Caso #4

En este caso donde se tiene una placa con cuatro resistencias como lo muestra la Figura 5.18, se espera que el valor de temperaturas alcanzada sea mayor que en los casos anteriores dado que la carga térmica entregada depende del área superficial neta y con cuatro resistencias en lugar de tres es claro el incremento.

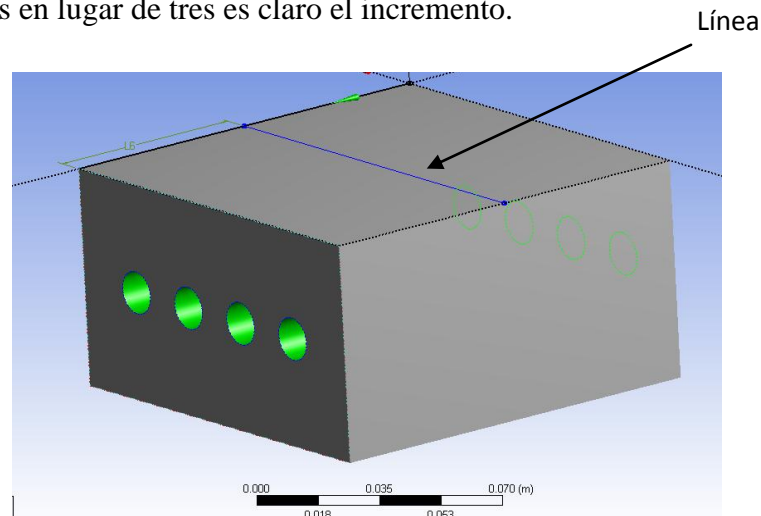


Figura 5.18 Configuración de placa con 4 resistencias en la parte central.

En esta misma Figura 5.18 se puede apreciar la línea usada para analizar su comportamiento térmico.

En la siguiente imagen se muestra el perfil de temperaturas que se tiene en la placa cuando se encuentra en el proceso de calentamiento.

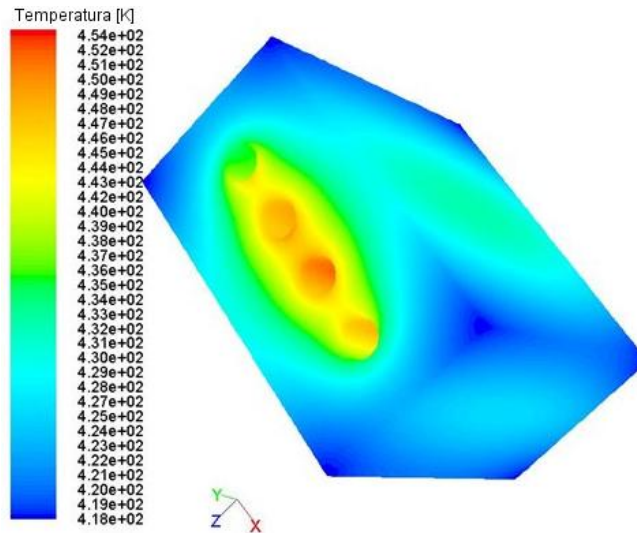


Figura 5.19 Simulación de placa con 4 resistencias en paralelo separadas 11.3 mm.

En la Figura 5.20 se observa el proceso de calentamiento de la superficie para el tiempo  $t=5, 10$  y  $15$  minutos, se observa que la temperatura es muy superior a los casos anteriores, parte de esto se debe a la integración de una cuarta resistencia en el arreglo.

La forma que adquiere el flujo de calor ya no es tan parecido a los casos anteriores, pues en ellas se tenía una trayectoria similar a la resistencia, mientras que en esta va adquiriendo la forma de elipse concentrado en el centro.

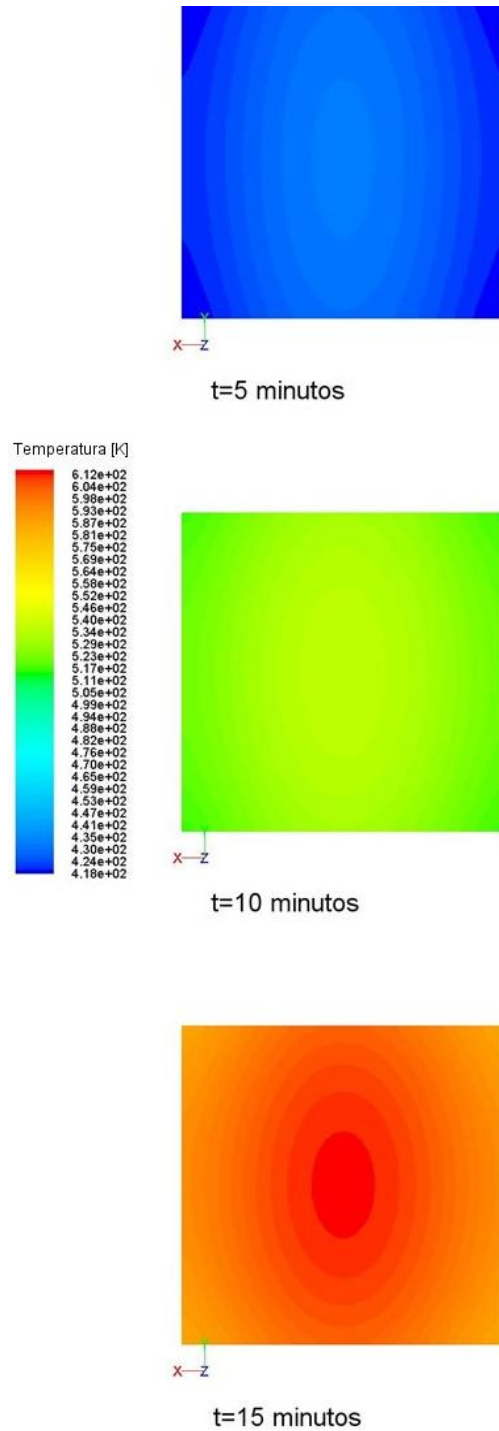


Figura 5.20 Proceso de calentamiento para los tiempos  $t= 5, 10$  y  $15$  minutos, para la placa con 4 resistencias en paralelo.

Las graficas de la Figura 5.21 nos muestran las temperaturas alcanzadas, resultando ser por mucho, mayores que los otros casos.

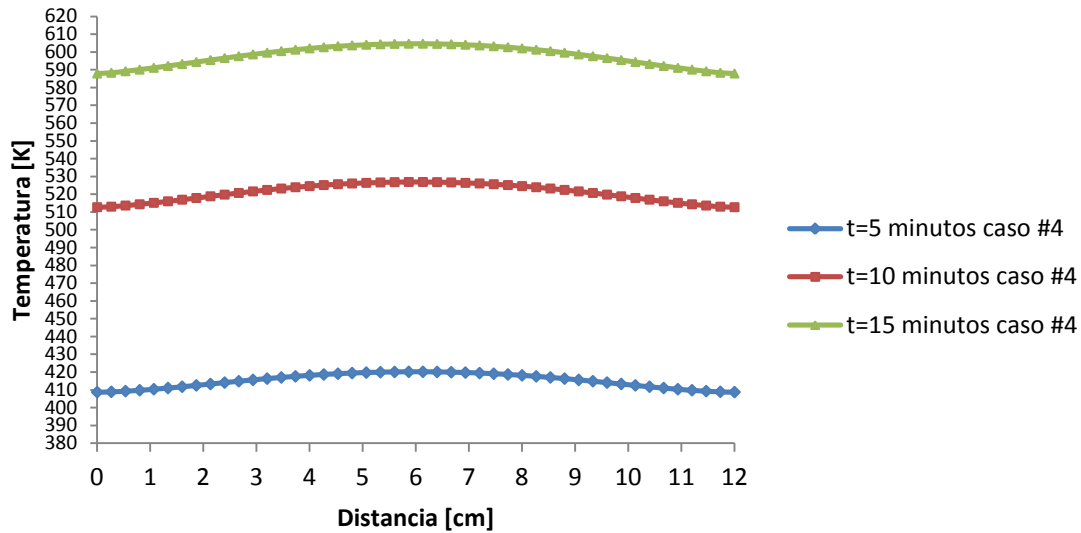


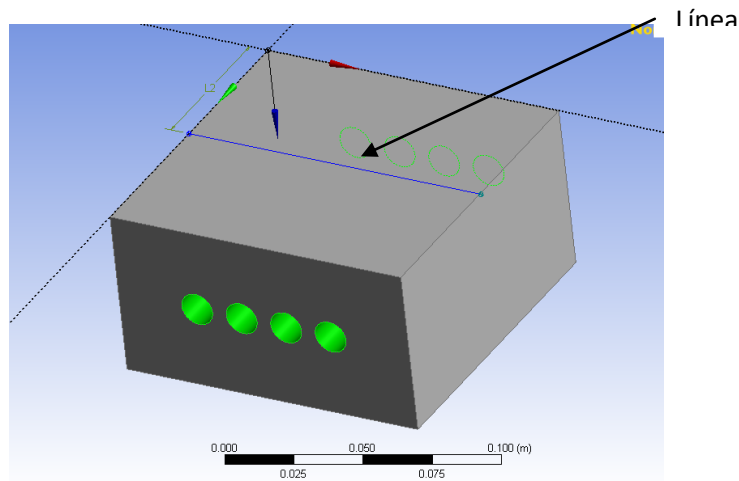
Figura 5.21 Placa con cuatro resistencias en paralelo para un espesor de 65[mm] y 11.3 [mm] de separación entre una resistencia y otra.

Las diferencia resulta ser de  $11^{\circ}$  para el tiempo  $t=5$  minutos, mientras que para el tiempo  $t=10$  minutos es de  $14^{\circ}$  y para el tiempo  $t=15$  minutos de  $17^{\circ}$ , como en los casos anteriores las diferencias de temperaturas ( $\Delta T$ ) aumentaron con el tiempo.

Las diferencias son mayores que en el caso #3a pero menores que en el caso #2 y #3b. En cuanto a las temperaturas promedio resultan superiores a todos los caso ya mencionados y para los tres instantes, pues se tienen 415 [K] para el tiempo  $t=5$ , 520 [K] para  $t=10$  minutos y 597 [K] para  $t=15$  minutos.

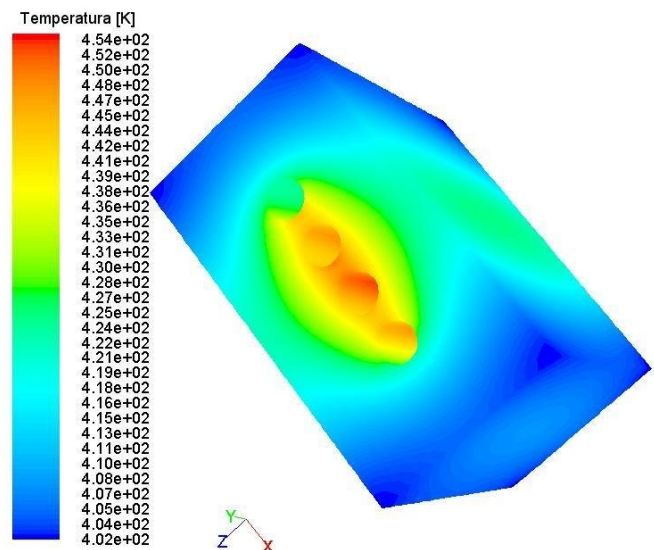
### Caso #5

En esta configuración se busca ver como difiere el comportamiento cuando las resistencias están más próximas una de otra. En las Figuras 5.22 y 5.23 se observa el arreglo establecido en este caso, la ubicación de la línea de análisis y el perfil de temperaturas.



**Figura 5.22** placa con espesor de 65 [mm] y separación entre resistencias de 5.65 [mm].

En esta configuración se conservan las dimensiones de la placa del caso #4, pero la distancia entre las resistencias se reduce de 11.3 [mm] a 5.6 [mm]. Con este arreglo se pretende incrementar la homogeneidad de la temperatura en la parte central de la placa.



**Figura 5.23** Simulación de placa con 4 resistencias en paralelo con una separación menor entre las resistencias.

En la Figura 5.24 se presenta el comportamiento de la superficie para los tiempos  $t=5$  minutos,  $t=10$  minutos y  $t=15$  minutos.



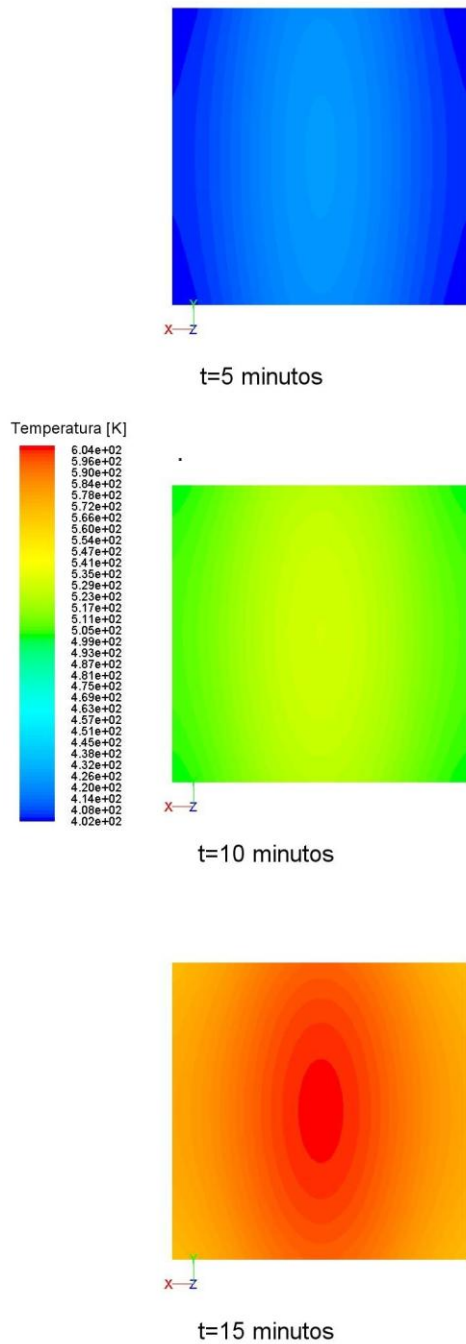


Figura 5.24 Proceso de calentamiento para los tiempos t= 5, 10 y 15 minutos, para la placa con 4 resistencias en paralelo y con una menor separación.

A simple vista se observa que el comportamiento es similar al caso # 4, esto se observará mejor en la Figura 5.26, pues en esta se presentan las graficas de los dos casos (caso #4 y caso #5).

Observando las graficas de la Figura 5.25, la trayectoria de la curva presenta una diferencia de temperaturas mayor que en el caso anterior, se considera que es ocasionada por la gran concentración de energía en el centro. La diferencia para  $t=5$  es de  $20^\circ$  mientras que para  $t=10$  minutos y  $t=15$  minutos es de  $22^\circ$  y  $25^\circ$  respectivamente.

La temperatura promedio para los mismos tres tiempos de análisis (5, 10 y 15 minutos) son 415 [K], 518 [K] y 591[K].

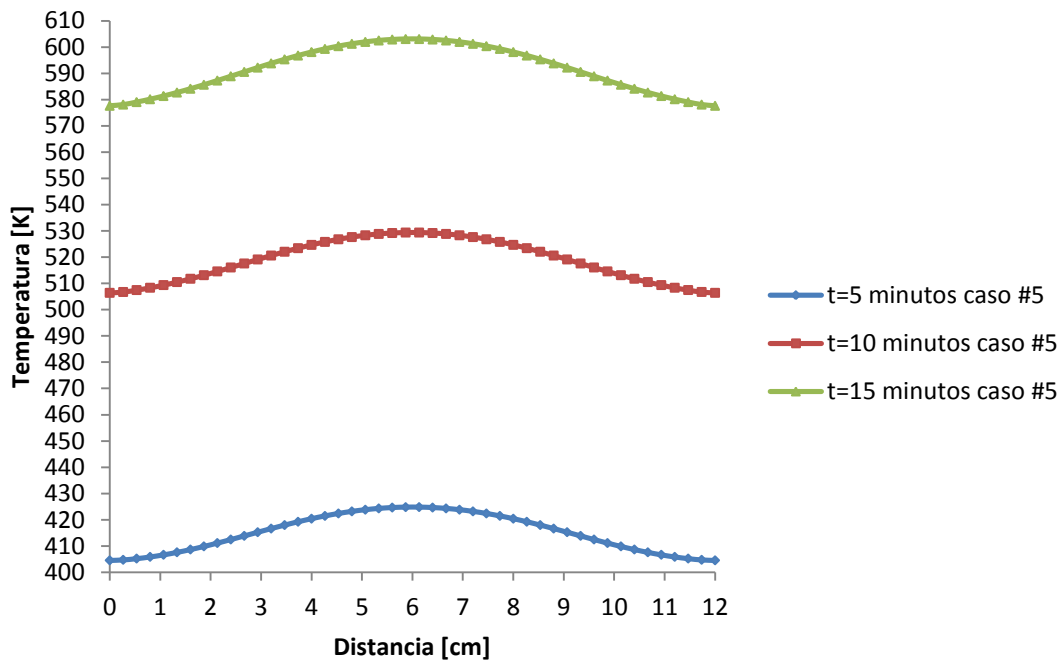


Figura 5.25 Placa con cuatro resistencias en paralelo para un espesor de 65 [mm] y 5.65 [mm] de separación entre una resistencia y otra.

En la siguiente Figura 5.26 se tiene la comparación de los valores de temperatura de las placa con separación entre resistencias de 5.65 [mm] y la placas con separación entre resistencias 11.3 [mm], y con un espesor de 65 [mm] las dos.

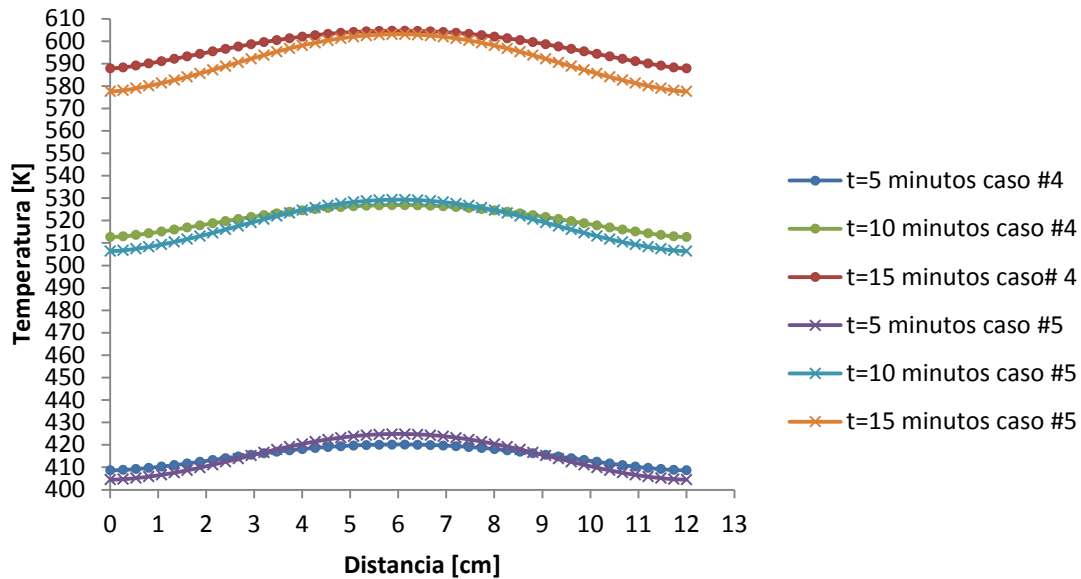


Figura 5.26 Datos de las gráficas con espesor de 65 [mm], con separaciones entre una y otra resistencia de 5.65 [mm] y 11.3 [mm].

Las gráficas de esta imagen muestran con mejor detalle los efectos ocasionados por la modificación de distancias entre resistencias. En la grafica de las resistencias mas unidas para el tiempo  $t=5$  minutos se observa que se alcanzan temperaturas más altas debido al efecto de la concentración de energía en el centro, pero para los tiempos  $t= 10$  y  $15$  minutos esto no se cumple, pues para el tiempo  $t=10$  minutos se tiene una temperatura máxima casi igual al caso de las resistencias mas separadas, mientras que para  $t=15$  se invierte el comportamiento, pues la temperaturas más alta es lograda por el caso de las resistencias mas separadas.

### Caso #6

Placa con cuatro resistencias en paralelo, espesor de 25.4 [mm]. En este arreglo se pretende identificar el efecto que tiene reducir el espesor de la placa.

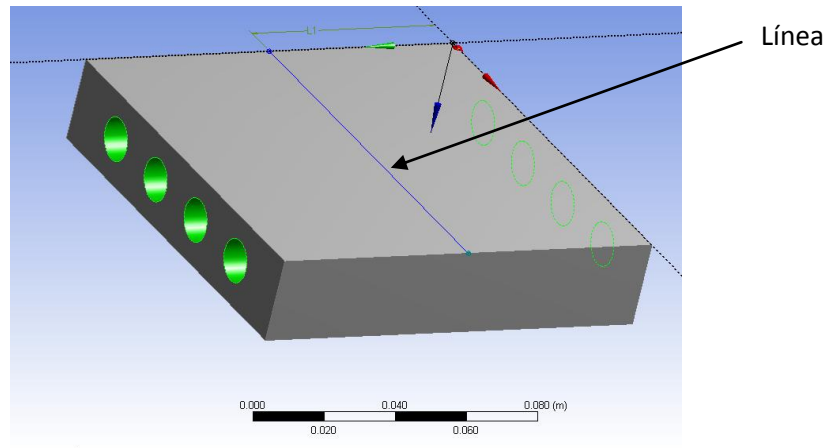


Figura 5.27 Placa con espesor de 25.4 [mm] y separación entre resistencias de 5.65 [mm].

La configuración de Figura 5.27 es diferente al caso #5 en cuanto al espesor e igual en la forma de la colocación de las resistencias, el objetivo es observar cómo se presenta la variación de la distribución de la temperatura con el espesor de la placa. En este caso la placa tiene un espesor de 1" (2.54 [cm]).

La Figura 5.28 se muestra el perfil de temperaturas sobre la placa.

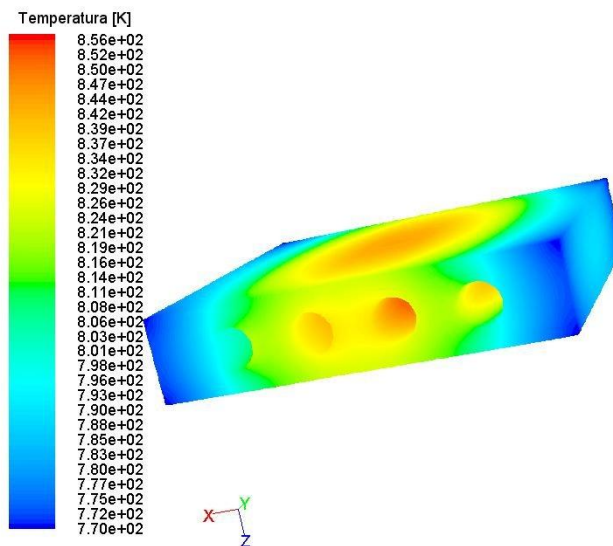


Figura 5.28 Simulación de placa con 4 resistencias en paralelo con un espesor menor.

## ANÁLISIS TÉRMICO DE UNA PLACA PARA UNA PRENSA DE TERMOFORMADO

En la Figura 5.29 se observa el comportamiento adquirido por la superficie, para los mismos tiempos manejados anteriormente, 5, 10 y 15 minutos.

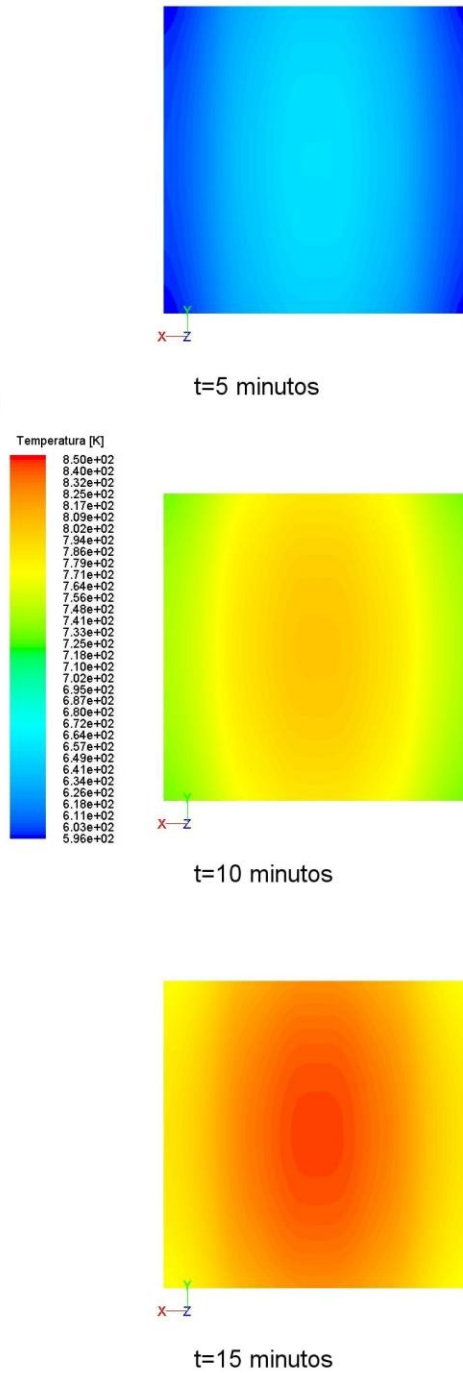


Figura 5.29 Proceso de calentamiento para los tiempos  $t= 5, 10$  y  $15$  minutos, para la placa con 4 resistencias en paralelo y con un espesor menor.

La diferencia de temperaturas entre el centro y los extremos de la superficie de análisis es muy marcada, por lo que consideramos que los gradientes de temperatura alcanzados son superiores a los casos anteriores.

En la Figura 5.30 se observa mejor el aumento de temperatura para los mismos 5, 10 y 15 minutos, encontrando una diferencias de  $51^\circ$  para  $t=5$  minutos,  $60^\circ$  para  $t=10$  minutos y  $57^\circ$  para  $t=15$  minutos, muy por encima de los casos anteriores.

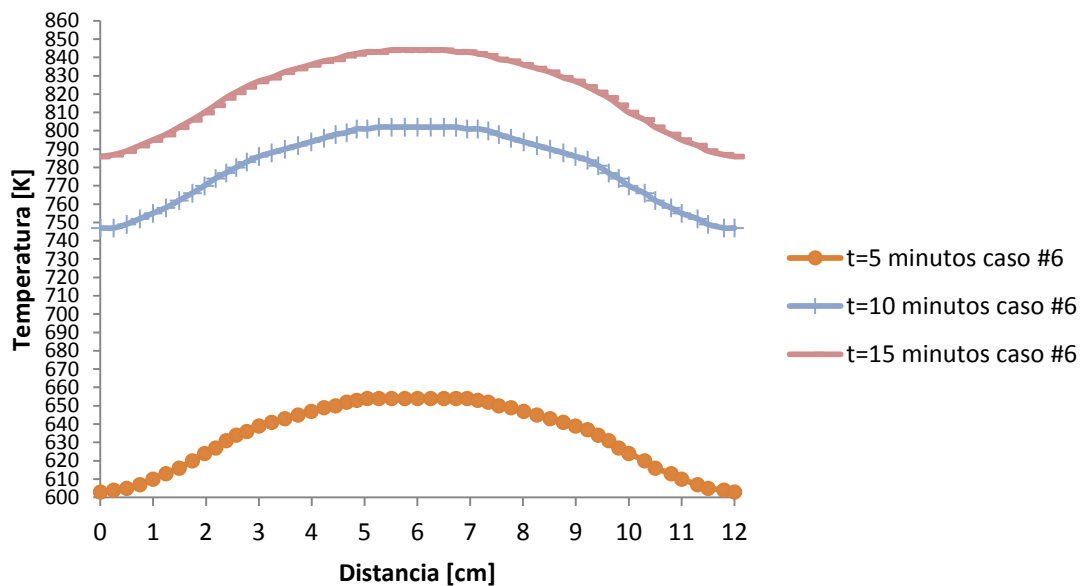


Figura 5.30 Datos de las graficas para la placa con espesor de 25.4 [mm] y separaciones entre cada una de las resistencia de 5.65 [mm].

También se observa, no solo en este caso sino en todas las gráficas anteriores, que el aumento de temperatura entre un tiempo y otro va siendo menor, pues entre las gráficas de 5 minutos y 10 minutos se tiene un cambio de temperaturas de aproximadamente 140 grados, mientras que el aumento de 10 minutos a 15 minutos es de aproximadamente 20 grados.

La Figura 5.31 presenta las gráficas de todos los arreglos propuestos, para el tiempo  $t= 15$  minutos, con la finalidad de observar mejor el cambio adquirido por cada uno de los casos, y la variación entre uno y otro.

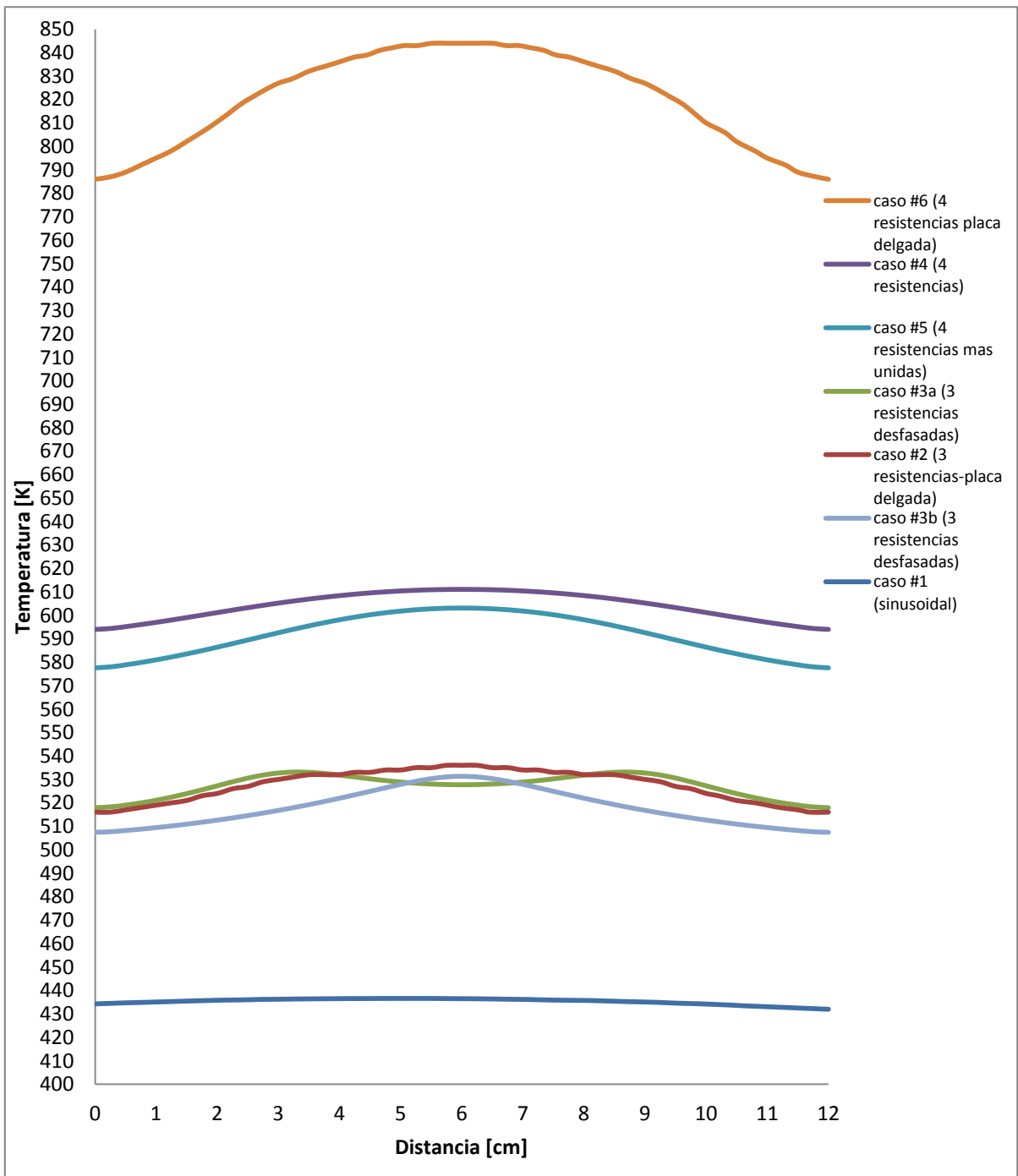


Figura 5.31 Comparación del comportamiento de temperaturas de todos los arreglos presentados, para el tiempo t=15 minutos.

Con esta imagen tenemos una mejor idea de la variación que se tiene en la superficie de la placa, cómo afecta o beneficia y en qué medida la modificación del espesor y la posición de

las resistencias. Claramente, se ve que la placa con la resistencia en forma de senoide es la que tienen los valores de temperatura más bajos para el lapso de 15 minutos, mientras que la que alcanza los valores más altos es la que tiene un espesor menor con cuatro resistencias en paralelo en su interior (caso #6).

La que está por debajo de la que alcanza mayor temperatura es la que tiene cuatro resistencias en la misma posición pero con un espesor mayor, caso # 4, debajo de esta se encuentra la que tiene las resistencias juntas, caso #5, como se mencionó anteriormente la temperatura de la placa con las resistencias más separadas superó a la que tiene las resistencias más unidas, pero solo hasta que se llegó al tiempo  $t=15$  minutos.

Las gráficas que se encuentran por debajo del caso # 5 son del arreglo del caso #3a y #2 presentando una ligera variación, casi despreciable, entre uno y otro, pues en los extremos de la placa del caso #2 se alcanzan temperaturas mayores que en el caso #3a, mientras que en el centro las temperaturas más altas son alcanzadas por el caso #3a, debajo de estas se encuentra la gráfica del caso #3b que presenta una variación de temperatura grande entre el centro y los puntos extremos.

Se puede ver que aunque el espesor de una de las placas es más grande que el otro, y tienen resistencias similares, las temperaturas no difieren mucho, esto se puede deber a que es proporcional la cantidad de energía suministrada, pues en el caso de las placas con espesor mayor, las resistencias a usar son de  $\frac{1}{2}$ " , mientras que en la placa delgada son de  $\frac{1}{4}$ ".

Y en cuanto a los gradientes de temperatura, la placa con resistencia en forma de senoide es la que presenta gradientes más pequeños, aunque también es la que presenta las temperaturas más bajas.



### 6. CONCLUSIONES

El comportamiento que presenta la placa en la simulación se aproxima en gran medida al presentado en el modelo experimental, sin embargo, las temperaturas bajo las cuales se dio este comportamiento difieren debido a que algunas de las propiedades térmicas de la placa se tomaron de tablas, por lo que la cercanía entre ambos resultados es más que aceptable, si consideramos los rangos en que varían las propiedades térmicas en función de las variaciones de composición del material.

Otra de las causas de las variaciones pueden ser por la resistencia, pues suponemos que en toda la superficie tubular que conforma la resistencia se tiene un calentamiento uniforme desde el comienzo, supuesto que no se llega a cumplir como se observo en las imágenes pues el calentamiento no es el mismo desde el comienzo ni en toda la superficie. Este tipo de comportamiento no se considero en las simulaciones, por lo que se supuso uniforme y estable desde el comienzo de las pruebas.

La discrepancia entre los valores teóricos y experimentales de las gráficas podrían también ser justificadas por el hecho de no considerar los pequeños espacios que quedan entre la placa y la resistencia, pues los únicos tomados en cuenta en la simulación son los presentados en los dobleces de la resistencia, por lo tanto en la simulación contamos con una placa con un mayor contacto directo con la resistencia.

Respecto al comportamiento observado en las placas que se usaron en nuestras pruebas concluimos que para alcanzar una mayor temperatura sería viable el uso de óxido de magnesio como recubrimiento pero esto implicaría que se tengan gradientes de temperatura mayores. Por eso es necesario saber cuál es nuestra prioridad: alcanzar mayores temperaturas en un menor tiempo o uniformidad en el calentamiento, en la mayoría de los casos se le da preferencia a la uniformidad.

Otro factor que deberíamos tomar en cuenta sería tener un mayor control en el procesamiento del óxido de magnesio, pues podría ser una de las causas de las grandes diferencias de temperatura.

En las gráficas obtenidas de las pruebas experimentales, se observan pequeños picos de calentamiento a lo largo de toda la superficie, lo que nos lleva a pensar que las propiedades de las placas no son uniformes, contrario a lo que ocurre en las gráficas de las simulaciones, pues en estas si se consideran las mismas propiedades a lo largo de todo el sólido, además de que la cámara asigna temperaturas más altas o más bajas en las zonas donde se tienen irregularidades.

Comparando las gráficas del comportamiento de temperatura en la superficie de cada uno de los arreglos de resistencia, llegamos a la conclusión de que el arreglo de la resistencia en forma de senoide puede ser la mejor opción (considerando solo los arreglos analizados), para ser empleado en la prensa de moldeo, pues presenta una mayor estabilidad en la temperatura a lo largo de la línea de análisis que por lo general y para usos en el conformado de polímeros es lo más deseable.

En los casos de las resistencias en paralelo podemos observar cómo se da la variación de la distribución de temperaturas cuando se modifica el espesor, la posición y la cantidad de resistencias empleadas.

Se logran gradientes de temperaturas mayores, cuando el plano de análisis se encuentra más cercano a las resistencias, por lo tanto es conveniente tener las resistencias más alejadas de la superficie a usar, pero a costa de alcanzar temperaturas más bajas, que se traduce en mayores gastos de energía y espesor de los materiales.

### **Trabajo a futuro**

Por cuestiones prácticas, se ignoraron algunas condiciones, que derivan en discrepancias entre los valores obtenidos de la simulación y los experimentales, por lo tanto para una mejora de los resultados se deberán considerar la mayor cantidad de factores que se verían involucrados en el proceso, como serían el tratar de trabajar en condiciones más controladas al momento de realizar las pruebas experimentales, por ejemplo evitar cualquier corriente de aire posible. Para el caso de la superficie de la placa a la que se realiza la captura de imágenes procurar que la superficie sea completamente lisa, y tratar que el lugar donde se realicen las pruebas tenga la menor cantidad de luz, de la misma manera se debe tener más certeza en las propiedades del material.

## Apéndice A

Cámara termográfica Fluke Ti 45

Especificaciones		
<b>Características del detector</b>	<b>Especificaciones térmicas</b>	
	<b>Campo de visión*</b>	Lentes de 20 mm con campo de visión (FOV) de 23 ° x 17 ° lentes de 10,5 mm, 42 ° x 32 ° lentes de 54 mm, 9 ° x 6 °
	<b>Campo de visión instantáneo*</b>	2,60 mrad
	<b>Distancia focal mínima*</b>	0,15 m
	<b>Sensibilidad térmica (NETD)</b>	Ti45: ≤ 0,08 °C (80 mK) a 30 °C Ti40: ≤ 0,09 °C (90 mK) a 30 °C
	<b>Adquisición de datos / frecuencia de imagen del detector*</b>	30 Hz / 60 Hz
	<b>Enfoque</b>	SmartFocus; enfoque continuo con un dedo
	<b>Zoom digital de la imagen infrarroja</b>	Ti45: 2x Ti40: -
	<b>Tipo de detector</b>	Matriz de plano focal de 160 x 120 de óxido de vanadio (VOx) con microbolómetro no refrigerado
	<b>Banda espectral</b>	De 8 µm a 14 µm
	<b>Mejora de la imagen digital</b>	Realce automático permanente
	<b>Modos de funcionamiento en pantalla</b>	Ti45: Imagen totalmente infrarroja. Imagen totalmente visible. Fundido de imágenes visible y térmica. Imagen en imagen Ti40: Imagen totalmente infrarroja. Imagen totalmente visible. Fundido de imágenes visible y térmica con el software SmartView. Imagen en imagen
	<b>Cámara de luz visible</b>	1280 x 1024 píxeles a todo color
	<b>Zoom digital de luz visible</b>	Ti45: 2x Ti40: -
<b>Medida de la temperatura</b>	<b>Rango calibrado de temperatura</b>	Ti45: de -20 °C a 600 °C (de -4 °F a 1112 °F) en 3 rangos Ti40: de -20 °C a 350 °C (de -4 °F a 662 °F) en 2 rangos
	<b>Rango 1</b>	Ti45: de -20 °C a 100 °C (de -4 °F a 212 °F) Ti40: de -20 °C a 100 °C (de -4 °F a 212 °F)
	<b>Rango 2</b>	Ti45: de -20 °C a 350 °C (de -4 °F a 662 °F) Ti40: de -20 °C a 350 °C (de -4 °F a 662 °F)
	<b>Rango 3</b>	Ti45: de 250 °C a 600 °C (de 482 °F a 1112 °F) Ti40: -
	<b>Opción de alta temperatura</b>	Ti45: hasta 1200 °C (2192 °F) Ti40: -
	<b>Rango 4</b>	Ti45: de 500 °C a 1200 °C (de 932 °F a 2192 °F) Ti40: -
	<b>Precisión</b>	± 2 °C o 2% (la mayor de ambas)
	<b>Modos de medida</b>	Ti45: Punto central, zona central (mínimo, máximo y promedio de área), puntos/zonas desplazables, anotaciones de campo/texto definidas por el usuario, isotermas, detección automática de puntos fríos y calientes, alarma visible a temperaturas por encima y por debajo del valor establecido Ti40: Punto central, zona central (mínimo, máximo y promedio de área)
	<b>Corrección de emisividad</b>	0,1 a 1,0 (en incrementos de 0,01)
<b>Presentación de la imagen</b>	<b>Pantalla digital</b>	Pantalla digital de 5 pulg. de alta resolución
	<b>Retroiluminación de pantalla</b>	Pantalla LCD en color de fácil lectura incluso a la luz del sol
	<b>Salida de vídeo</b>	Vídeo compuesto RS170 EIA/NTSC o CCIR/PAL

## ANÁLISIS TÉRMICO DE UNA PLACA PARA UNA PRENSA DE TERMOFORMADO

	<b>Paletas de color</b>	Escala de grises, escala de grises inversa, azul-rojo, alto contraste, metal caliente, hierro (Ironbow), ámbar, ámbar inversa
<b>Lentes opcionales (sólo disponibles en el momento de compra)</b>	<b>Lente teleobjetivo de 54 mm</b> <b>Campo de visión (FOV)</b> <b>Campo de visión instantáneo (IFOV)</b> <b>Distancia focal mínima</b> <b>Lente gran angular 10,5 mm</b> <b>Campo de visión (FOV)</b> <b>Campo de visión instantáneo (IFOV)</b> <b>Distancia focal mínima</b>	Lente de germanio de alta precisión 9° horizontal x 6° vertical 0,94 mrad 0,6 m Lente de germanio de alta precisión 42° horizontal x 32° vertical 4,9 mrad 0,3 m
<b>Almacenamiento de imágenes y datos</b>	<b>Soporte de almacenamiento</b> <b>Formatos de archivo compatibles</b>	Tarjeta CompactFlash con capacidad para almacenar más de 1.000 imágenes termográficas (tarjeta estándar de 512 MB) Archivo radiométrico con datos de 14 bits. Exportable a JPEG, BMP, PNG, GIF, TIFF.
<b>Interfaces y software</b>	<b>Interfaz</b> <b>Software</b>	Lector de tarjeta CompactFlash incluido SmartView; software completo de análisis y generación de informes incluido
<b>Láser</b>	<b>Clasificación</b> <b>Puntero láser</b>	Clase II Punto láser visible en la pantalla al combinar imágenes visibles y térmicas
<b>Controles y ajustes</b>	<b>Controles de configuración</b> <b>Controles de imagen</b> <b>Indicadores en pantalla</b>	Fecha/hora, unidades de temperatura en C/F, idioma, escala, intensidad de pantalla LCD (alta/normal/baja) Nivel, rango, ajuste automático (continuo/manual) Estado de la batería, emisividad del objetivo, temperatura de fondo y reloj en tiempo real
<b>Potencia, vida útil de la batería</b>	<b>Tipo de batería</b> <b>Vida útil de cada batería</b> <b>Carga de batería</b> <b>Funcionamiento CA</b> <b>Ahorro de energía</b>	Batería inteligente de ión-litio, recargable de sencilla sustitución Funcionamiento continuo durante 3 horas (2 horas con tecnología IR-Fusion activada) Cargador inteligente de 2 puertos con toma de red CA Adaptador de CA de 110/220 V CA, 50/60 Hz (sólo Ti45) Modos "Apagado" y "En espera" automáticos (especificados por el usuario)
<b>Diseño ambiental y mecánico</b>	<b>Temperatura de trabajo</b> <b>Temperatura de almacenamiento</b> <b>Humedad relativa</b> <b>Resistente al agua y al polvo</b> <b>Peso (baterías incluidas)</b> <b>Tamaño de la cámara (L x A x F)</b>	De -10 °C a +50 °C (de 14 °F a 122 °F) De -40 °C a +70 °C (de -40 °F a 158 °F) Del 10% al 95% sin condensación, en funcionamiento y almacenamiento IP54 1,95 kg (4,3 libras) 162 x 262 x 101 mm (6,5 x 10,5 x 4,0 pulg.)

## Bibliografía

- [1] Incropera F. De Witt D. Fundamentos de transferencia de calor. Prentice Hall. 1999.
- [2] Holman, J. Transferencia de Calor. México, 1999.
- [3] Bejan, A. y Kraus A. Heat transfer handbook. John Wiley & Sons, Inc. 2003.
- [4] Hans, F. The Dynamics of Heat. Springer 1996.
- [5] Kay, J. Introducción al estudio de la mecánica de fluidos y transferencias de calor: Con aplicaciones a los procesos mecánicos y de la ingeniería química. Editorial Técnicas marcombo.
- [6] Celay, A. Resistencias Eléctricas, Editorial Sintesis
- [7] Germán, A. Electrotecnia, Editorial Editex
- [8] Fred, B. Ciencia de los polímeros. Editorial Reverté. 1975
- [9] Smith W. Hashemi J. Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales. 4ta Edición.
- [10] Callister, W. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. Editorial Revertá
- [11] Munz, D. Fett, T. Ceramics mechanical properties failure behaviour materials selection. Springer. 2001
- [12] Smart, R. Ceramic Interfaces- Properties and Application. 1998
- [13] Askeland, D. Ciencia e ingeniería de los materiales. International Thomson Editores. 1998
- [14] Brent, A. Plastics: Materials and processing. Prentice Hall.
- [15] Manual técnico de Termoformado. Plastiglas de México, S. A. de C. V.
- [16] Fluke. TiR2, TiR3, TiR4, Ti40, Ti45, Ti50, Ti55. IR FlexCam Thermal Imagers. Manual de uso. 2009
- [17] Tu J. Heng G. Liu C. Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach. 2008

## Mesografía

- [18] Ogden Manufacturing Co. U.S.A. 1997. <<http://www.ogdenmfg.com/home.htm>> [consultado: 25 Ene. 2012 ]

- [19] Ingeniería mecánica FI UBA.  
<<http://materias.fi.uba.ar/6731/inicio/index.php?slab=tablas>> [consultado: 28 Nov. 2011]
- [20] A. Baïri, N. Laraqi. Heat transfer across a solid–solid interface obtained by machining in a lathe *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 169, Issue 1, 30 October 2005, Pages 89-93
- [21] Nadia Aderghal, Tahar Loulou, Ali Bouchoucha, Philippe Rogeon. Analytical and numerical calculation of surface temperature and thermal constriction resistance in transient dynamic strip contact *Applied Thermal Engineering*, Volume 31, Issues 8–9, June 2011, Pages 1527-1535
- [22] Ambrella. Calentamiento por inducción de precisión. 22 May. 2012  
<<http://es.ambrell.com/aboutinduction.php>> [consultado: 10 Jul. 2012]
- [23] Te Technology. Inc. Traverse City. 2010 <<http://www.tetech.com/>> [consultado: 11 Jul. 2012]
- [24] Termokew S. A. de C. V. México. 2012 <<http://www.termokew.mx/resistencias-calentamiento.php#>> [consultado: 15 Ener. 2012]