 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Estudio de eficiencia de calentamiento de termoformadora

Juan Diego Cardona

Jhon Mauricio Bahos

Ingeniería electromecánica

M. Ing. Luis Fernando Cardona

Asesor

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

2018

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

En este trabajo se realizó un estudio térmico a la campana de calentamiento de la termoformadora del ITM. El objetivo de este trabajo fue determinar la distribución de temperatura y flujo de calor del sistema y a partir de ello se pudo realizar una propuesta de mejora en la parte estructural de la campana.

Primero se identificó la función específica de cada uno de los instrumentos que componen la máquina termoformadora. Se tomaron medidas en campo y con esta información se simuló en el programa Ansys Fluent la termoformadora. En las simulaciones se incorporaron los datos de cada una de las variables tomadas durante la operación de la máquina, definiendo factores que inciden en el calentamiento como son el tipo de material, medidas del equipo y condiciones externas que influyan en el proceso.

Con estas condiciones se obtuvo el escenario ideal para simular el calentamiento más asertivo posible con la realidad, en donde se lograron simulaciones en 2D de patrones de temperatura cambiantes en el tiempo y comportamientos de absorción de calor en la lámina arrojando resultados que fueron el punto de partida para proponer mejoras estructurales.

PALABRAS CLAVES: Termoformado, Proceso, Campana, Simulación, eficiencia, transferencia de calor.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo va dedicado a nuestras familias, las cuales estuvieron presentes de principio a fin brindándonos su apoyo en este arduo proceso y también a todas aquellas personas que de alguna u otra manera aportaron en nuestra formación profesional.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

In Hg: pulgadas de mercurio

kPa: kilopascales

psi: libras por pulgada cuadrada

CFD: Computacional Fluid Dynamics (Dinámica de Fluidos Computacional)

DO: ordenadas discretas

HMI: interface hombre maquina

∇ .: Operador divergente

P: Densidad

\vec{v} : Vector velocidad

T: Tiempo

P: Presión

\vec{g} : Vector gravedad

$\bar{\tau}$: Tensor de esfuerzos viscosos

μ : Viscosidad dinámica

I: Matriz de identidad

$\nabla \vec{v}^T$: Transpuesta del gradiente de vector velocidad

k_{eff} : Conductividad térmica efectiva

S_h : Generacion de calor volumetrico debido a radiación

T: Temperatura

E: Energía

H: Entalpía

V: Velocidad

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

V_o : Voltaje

I : Intensidad espectral de radiación

I_o : Corriente

P : Potencia eléctrica

a : Coeficiente de absorción

σ_s : Coeficiente de dispersión

σ : Constante de Stefan-Boltzmann

\vec{r} : Vector de posición

\vec{s} : Vector de dirección

n : Índice de refracción

ϕ : Función de fase

Ω' : Ángulo sólido

A : Área superficial transversal a \dot{Q} [m^2]

\dot{Q} : Tasa de transferencia de calor [W]

k : Conductividad térmica [W/(m K)]

T : Temperatura [K]

ε : emisividad de la superficie

σ : constante de Stefan-Boltzmann

T_s : temperatura en la superficie del cuerpo

T_a : temperatura de los alrededores del cuerpo

A_s : área del cuerpo en contacto con el fluido

x : Eje coordenado a lo largo del cual fluye el calor (se puede ver como el espesor de pared) [m]

h : coeficiente de convección

T_∞ : temperatura promedio del fluido

 ITM Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	8
1.1	OBJETIVOS	9
1.1.1	General	9
1.1.2	Específicos	9
2.	MARCO TEÓRICO	10
2.1	Transferencia de calor	10
2.2	Proceso de termoformado	12
2.3	Pasos del proceso de termoformado	14
2.3.1	Mecanismos de sujeción de la lámina.....	14
2.3.2	Calentamiento de la lámina	16
2.3.3	Sistemas de calentamiento	18
2.3.4	Formado	19
2.4	Piezas fabricadas por termoformado	19
2.4.1	Industria del empaque	19
2.4.2	Transporte y señalización	20
2.4.3	Artículos para el hogar	21
2.4.4	Industria médica.....	22
2.4.5	Construcción y vivienda	22
2.5	Ventajas y desventajas del termoformado	23
2.6	Simulación del proceso	24
2.6.1	Introducción a CFD	24
2.6.2	Ecuaciones usadas por ANSYS FLUENT	26
3.	METODOLOGÍA.....	29
3.1	Termoformadora ITM.....	29
3.2	Datos y mediciones de la termoformadora	34
3.3	Creación de geometría y simulación en ANSYS FLUENT	36
3.3.1	Características de las resistencias y dimensiones de la campana.....	36

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.3.2 Preparación	37
3.3.3 Creación de geometría	39
3.3.4 Creación de malla	41
3.3.5 Configuración de la simulación “SETUP”	51
3.3.6 Inicio de simulaciones “Solution”	61
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	63
a. Resultados de las simulaciones realizadas.....	63
4.2 Propuestas de reformas estructurales para la campana y ubicación de las resistencias.	66
4.2.1 campana cóncava con dos resistencias adicionales.....	66
4.2.2 Campana cóncava con un radio mayor y diez resistencias adicionales.	67
4.2.3 Geometría original con diez resistencias adicionales.	69
4.3 Propuesta de aislante para mejorar transferencia de calor hacia el exterior.....	70
4.3.1 Cotización de manta cerámica en calorcol.....	73
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	75
REFERENCIAS	77

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

El laboratorio de diseño del ITM tiene una máquina termoformadora que fabrica piezas a través de calor; esta tiene una recámara donde ocurre el proceso de moldeo por temperatura mediante el uso de lámparas incandescentes. Se realizaron pruebas y se evidenció que no se presenta un patrón de calentamiento uniforme, tal como se puede observar en la figura 1.



Figura 1. Quemado no uniforme de tabla de madera al ser calentada por la termoformadora del ITM. (Fuente: autores)

Una termoformadora con baja eficiencia en el aprovechamiento del calor generado por las resistencias representa un mayor consumo energético, a la vez que se vuelve incómoda e insegura para operar, sumada a la no distribución uniforme del calor lo cual afecta directamente el termoformado. Se resume este como un proceso ineficiente, por lo cual se hace necesario un análisis del sistema para identificar el origen de estas falencias y así realizar mejoras para corregirlas.

La recámara que suministra calor por medio de radiación en el proceso de termoformado se simula utilizando el software ANSYS FLUENT probando diferentes configuraciones en pro de mejorar la eficiencia. En este se podrá identificar la distribución de calor por medio de simulaciones y así realizar una evaluación del sistema y de los diferentes parámetros que intervienen en el proceso.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 General

Analizar el proceso de termoformado realizando estudios numéricos que permitan calcular la distribución de temperatura y flujo de calor del sistema térmico. A partir de ello realizar propuesta de modificaciones en la parte estructural de la campana tanto en los materiales utilizados para la transferencia térmica como en los componentes que la emiten.

1.1.2 Específicos

- Identificar los componentes estructurales de la campana y de acuerdo con ello hacer un análisis de sus características para las cuales fueron instalados en función del proceso de termoencogido.
- Realizar simulaciones a través del software ANSYS-FLUENT que permitan identificar el patrón de calentamiento de la transferencia de calor emitida por la campana.
- Proponer una campana de termoformado con nuevos materiales y reformas estructurales para mejorar la transferencia de calor por radiación.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Transferencia de calor

Podemos hablar de transferencia de energía en forma de calor cuando hay una diferencia de temperatura entre dos cuerpos. Este fenómeno puede darse en estado transitorio o estable, dependiendo de si cambia o no en función del tiempo. La conservación de la energía siempre será un principio fundamental en el estudio de la transferencia de calor sin importar el tipo de sistema que estemos estudiando. La energía que entra siempre estará presente en el sistema ya sea que se transforme o se almacene cumpliendo a cabalidad con la conservación de energía y materia. (Mendez, 2012).

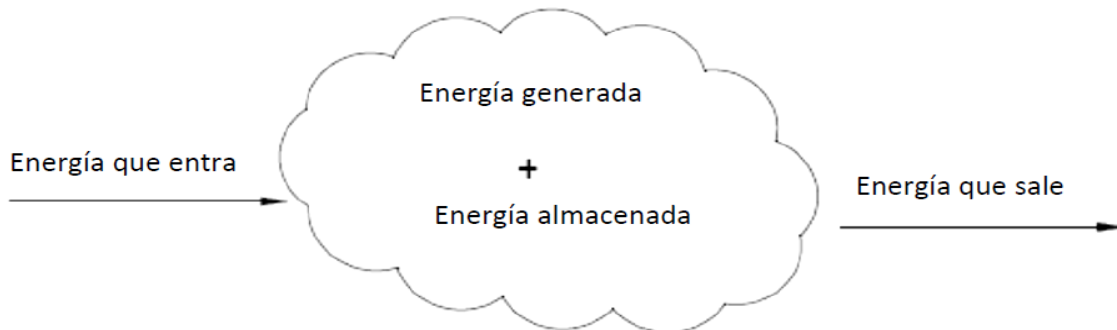


Figura 2. Transferencia de energía en un medio sólido o fluido. (Mendez, 2012).

Debemos resaltar en cualquier proceso térmico la cantidad de energía y la rapidez con la que se transfiere de un cuerpo a otro en forma de calor. Existen tres mecanismos fundamentales que explican esta transferencia de calor: conducción, convección y radiación.

Cuando se tiene un contacto directo entre la zona de mayor y menor temperatura, las vibraciones moleculares de los átomos hacen que la energía fluya desde los que tienen mayor temperatura hacia los de menor. Este fenómeno se denomina transferencia de calor por conducción y su tasa se puede calcular con la siguiente ecuación (Ley de Fourier):

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dt}{dx}$$

Donde:

A: Área superficial transversal a \dot{Q} [m^2]

\dot{Q}_{cond} : Tasa de transferencia de calor [W]

k: Conductividad térmica [$W/(m K)$]

T: Temperatura [K]

x: Eje coordenado a lo largo del cual fluye el calor (se puede ver como el espesor de pared) [m]

Se le llama convección a la transferencia de calor que está dada por sustancias en movimiento (gases o líquidos) a diferente temperatura respecto a la superficie con la que está en contacto. Se puede calcular la tasa de transferencia de calor utilizando la ley de enfriamiento de Newton:

$$\dot{Q}_{conv} = h A_s (T_s - T_\infty)$$

Donde:

h: es el coeficiente de convección [$W/(m^2K)$]

\dot{Q}_{conv} : Tasa de transferencia de calor por convección [W]

A_s: es el área del cuerpo en contacto con el fluido [m^2]

T_s: es la temperatura en la superficie del cuerpo [K]

T_∞: es la temperatura promedio del fluido [K]

La radiación por su parte es la transferencia de energía en forma de calor que ocurre por la capacidad que tiene todo cuerpo de emitir ondas electromagnéticas, proporcional a su temperatura superficial elevada a la 4. Esta capacidad varía según las propiedades ópticas del elemento emisor, del material y su acabado superficial. La tasa de transferencia de calor por radiación depende

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

además del cuerpo receptor, comúnmente asumido como el entorno que rodea a la superficie emisora. La tasa neta de transferencia de calor se calcula con la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{al}^4)$$

Donde:

\dot{Q}_{rad} : Tasa de transferencia de calor por convección [W]

ε : emisividad de la superficie [adimensional]. Siempre se cumple que $0 \leq \varepsilon \leq 1$.

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

T_s : Temperatura en la superficie del cuerpo [K]

T_{al} : Temperatura de los alrededores del cuerpo [K]

A_s : Área del cuerpo en contacto con el fluido [m^2]

2.2 Proceso de termoformado

El nombre termoformado define un proceso en el que un film o lámina de un polímero termoplástico se calienta de manera controlada a temperaturas por encima de la temperatura de transición vítrea y próxima al punto de fusión; con ayuda de un flujo de aire, de vacío, de manera mecánica e incluso con acciones combinadas, se deforma la lámina plástica en una forma geométrica definida. La máquina que realiza el proceso de termoformado se denomina termoformadora. En la figura 3 se muestra una termoformadora típica.

Normalmente, los procesos de termoformado implican la utilización de moldes y presión para mantener una muestra en una forma específica durante el calentamiento que suaviza el material y facilita la conformación. Bajo esta deformación se enfría hasta temperatura ambiente, de tal manera que la forma lograda en tres dimensiones mantiene su forma en la temperatura de uso. Un molde típico de termoformado se presenta en la figura 4.



Figura 3. Termoformadora de sistema de control por pulsado de encendido y apagado manualmente sin un control preciso de temperatura. (Termoformadoras Osorno, 2017)



Figura 4. Moldes de empaque producidos por termoformado de acuerdo al producto específico. (Termoformados Osorno, 2017)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La caracterización de los materiales y las propiedades mecánicas finales del producto se dan en función de la temperatura de termoformado. Dentro de este rango de temperaturas (mostrados en la tabla 1) las cadenas poliméricas experimentan una movilidad acorde al producto deseado y están sometidas a la reorganización inducida térmicamente, a altas temperaturas mayor rigidez estructural, lo que se atribuye al incremento de la cristalinidad del polímero. Variando los parámetros del proceso de termoformado, la forma final del polímero puede ser mecánica y estructuralmente compuesta para una amplia gama de aplicaciones

2.3 Pasos del proceso de termoformado

En el termoformado podemos observar cinco pasos que son la sujeción de la lámina, calentamiento, formado, enfriamiento y corte (remoción); resaltándose lo sencillo y práctico del proceso, ver figura 5.

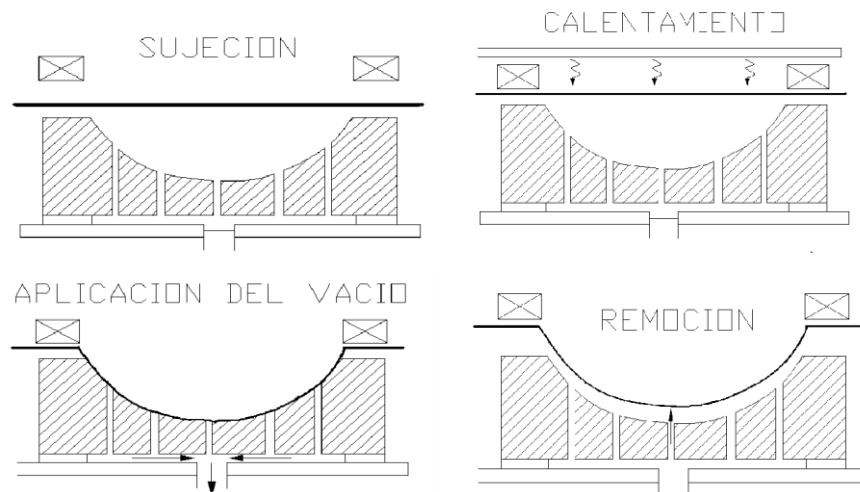


Figura 5. Pasos del proceso de termoformado (España, 2005)

2.3.1 Mecanismos de sujeción de la lámina

La sujeción de la lámina se refiere a todo el proceso antes del calentamiento. Los mecanismos de sujeción son de gran importancia para soportar la lámina firmemente durante el calentamiento, transportar la lámina mediante mecanismos móviles y removibles.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Hay dos tipos básicos de mecanismos de sujeción que son: marco de sujeción, y mecanismo de cadena transportadora.

El marco de sujeción tiene como característica la sujeción de la lámina entre dos marcos machos, uno estático y uno portátil, donde la sujeción de la lámina debe tener la suficiente presión para soportar el molde en el momento que penetre la lámina sin sufrir ninguna alteración que modifique el resultado final. Se utiliza en termoformadoras donde la producción en serie no es la prioridad ya que se debe sacar una figura a la vez. En este tipo de marco profundizaremos más adelante, ya que es el método utilizado en la termoformadora del ITM

El mecanismo de sujeción por cadena es más usado en líneas de producción en serie. La sujeción es por pines en donde un par de cadenas paralelas pasan primero por un horno y luego por el molde, ver figuras 6 y 7.



Figura 6. Fotografía de una cadena de arrastre de film. (GPS Reisacher, 2018)



Figura 7. Sistema de arrastre para polímero en cadena. (España, 2005)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.3.2 Calentamiento de la lámina

Probablemente el calentamiento es el paso más importante del proceso, porque un recalentamiento puede llevar a resultados inesperados afectando el resultado final del producto y modificando sus características.

Lo que se busca cuando se quiere termoformar por radiación es alcanzar una temperatura que se mantenga en una línea lo más estable posible en el tiempo de formado sin sufrir alteraciones de valores planeados. El formado por radiación requiere un calentamiento rápido e intenso desde el centro hasta los extremos logrando abarcar toda la pieza uniformemente. Se busca que la temperatura de la lámina nunca se eleve por encima de los valores permitidos ya que puede ocasionar un defecto de la pieza haciendo que esta sea rechazada. La máxima temperatura permitida durante el proceso será definida por el tipo de polímero a intervenir (ver Tabla 1).

Tabla 1. Temperatura de trabajo de distintos polímeros. (Plastiglas de Mexico S.A.)

POLÍMEROS	TEMPERATURA DE DEFLECCIÓN AL CALOR			TEMPERATURA DE TERMOFORMADO		
	A 264 PSI (°C)	A 66 PSI (°C)	SIN CARGA (°C)	TEMP. DE LA HOJA (°C)	TEMP DEL MOLDE (°C)	TEMP DE AYUDA (°C)
Acrílico extruido	94	98		135-175	65-75	
Acrílico cell-cast	96	110		160-180	65-75	
Acetobutirato de celulosa	65-75	75-80	120-150	140-160		
Polietileno de alta densidad		60-80	100	145-190	95	170
Polipropileno	55-65	110-115	140	145-200		
Poliestireno	70-95	70-100	100	140-170	45-65	90
Poliestireno alto impacto	85-95	90-95	120	170-180	45-65	90
SAN	100	105		220-230		
ABS	75-115	80-120	95	120-180	70-85	90
Polivinilo de cloruro (RV.C.)	70	75	110	135-175	45	80
Policarbonato	130	140	160	180-230	95- 120	140

La figura 8 ilustra la curva de calentamiento de una lámina termoplástica haciendo énfasis en las temperaturas mínimas y máximas permitidas y el punto en donde la lámina empezará a sufrir una transformación desde su superficie hasta su línea central. Gradientes pequeños de temperatura resultan en piezas con mejores propiedades mecánicas. En piezas donde el espesor sea más delgado

será mucho más fácil de lograr temperaturas uniformes, ya que la lámina tendrá un mínimo tiempo de calentamiento en comparación con láminas más gruesas.

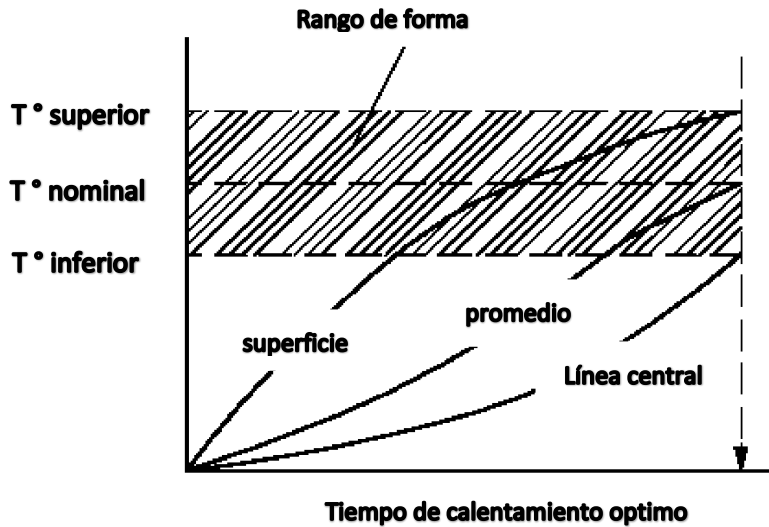


Figura 8. Ejemplo del perfil de calentamiento de una lámina (España, 2005)

Por lo regular en procesos de termoformado por radiación ocurre que el gradiente de temperatura es más fuerte en el centro de la campana, ver figura 9. Este factor se puede controlar dimensionando la campana de forma que la temperatura no muestre cambios significativos para las dimensiones de la lámina, además de la distribución de la fuente de energía.

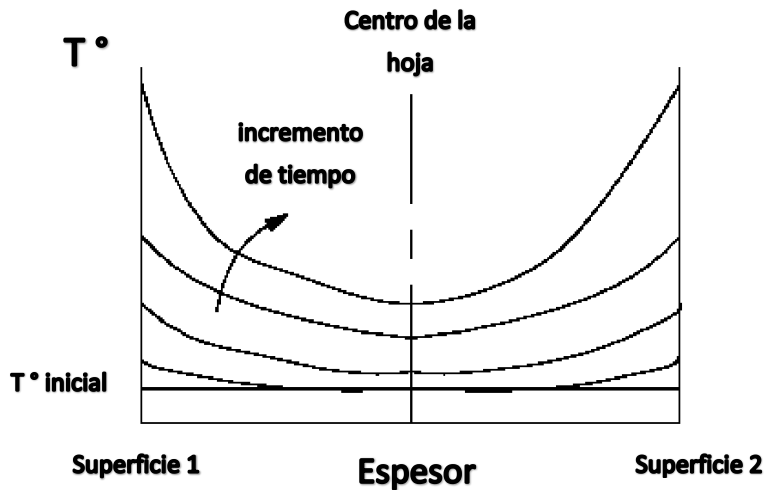


Figura 9. Ejemplo de perfil de calentamiento de lámina; gradiente de temperatura a través del espesor

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Cabe resaltar que en piezas termoformadas no necesariamente se requiere un calentamiento uniforme ya que habrá procesos donde un calentamiento zonificado sea una alternativa viable para el proceso (España, 2005).

2.3.3 Sistemas de calentamiento

La etapa recalentamiento es crucial en el proceso de termoformado ya que dependiendo de una aplicación de calor adecuada podremos llegar a los resultados proyectados en la planeación. Cuando hablamos de reducir costos en la obtención de un producto por medio de termoformado, la aplicación del calor es el foco de concentración ya que esta parte del proceso se consume más del 80% de la energía utilizada en el ciclo.

Las fuentes de energía más comunes en procesos de termoformado son combustión a gas y por medio de electricidad. La más utilizada es la energía eléctrica ya que la eficiencia de este medio de alimentación es mucho mejor que el gas y también ofrece un mejor control de temperatura.

Los hornos de convección a gas son muy utilizados en calentamientos de láminas grandes ya que se reducen costos en materia de suministro de energía, pero cabe resaltar que son operaciones de trabajo medidas en horas y de las cuales no se esperan resultados que tengan una especificación muy precisa en propiedades del polímero fina.

Los calentadores radiantes sin duda son los más populares por su gran eficiencia, ya que cuando la lámina a termoformar absorbe energía infrarroja el calor entra directamente en la lámina. En su punto óptimo operan a una temperatura que produce energía infrarroja concentrada en una longitud de onda entre 3 a 3.5 μm . En este método nos concentraremos en este proyecto ya que es el utilizado por la termoformadora del ITM.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.3.4 Formado

El formado se puede decir que es la etapa más importante del proceso de termoformado. Como ya se mencionó antes, en el formado se transmite la forma a la lámina a través de moldes macho o hembra pero el objetivo común será el mismo: una distribución del material uniforme, que es la finalidad del proceso.

El vacío es un componente vital para lograr la excelencia de la pieza mientras esta es penetrada por el molde caliente. El vacío terminará de dar forma ángulos, relieves y esquinas. Esta presión diferencial mantendrá la pieza en su sitio hasta enfriarla.

Se recomienda manejar un suministro de vacío de aproximadamente 25 in Hg (85 kPa). Un vacío por debajo de este valor se verá reflejado en piezas con malos acabados. Al final del formado se recomienda utilizar aire comprimido para evitar fisuras al retirar la pieza de la lámina.

2.4 Piezas fabricadas por termoformado

La cantidad de formas y utilidades vistas hoy en la aplicación de termoformado son innumerables; aquí se mostrarán algunas de las más utilizadas en la industria.

2.4.1 Industria del empaque

Actualmente los atributos que ofrece el termoformado para la industria del empaque en términos de productividad y costo han revolucionado este mercado, ya que la alta demanda ha generado equipos de empacado de alta velocidad de alimentación en serie. Un ejemplo de los empaques que se pueden realizar por termoformado se presenta en la figura 10.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 10. Recipientes para fruta fabricados por termoformado. (Tecnología del plástico, 2017)

2.4.2 Transporte y señalización

La industria del transporte utiliza numerosas piezas de distinta aplicación. La mayoría de estas son usadas para partes externas y acabado de interiores. La industria de las caravanas y los proveedores de accesorios de automóvil han integrado desde hace tiempo las ventajas del termoformado en su programa de producción y fabrican cantidades importantes de piezas como portaequipajes, alerones y otras partes de la carrocería de los automóviles.

La característica principal en la reproducción de piezas por termoformado para autos es alcanzar los parámetros de regulación de las velocidades, presiones y recorridos estipuladas para el vehículo en el ensamble con el resto de los componentes mecánicos. En la figura 11 se muestran piezas típicas automotrices fabricadas por termoformado.



Figura 11. Pieza automotriz fabricada por termoformado. (Alcántara, 2017)

El gremio del sector de las señales de tránsito ha sido otro beneficiado por los atributos del termoformado ya que son piezas que se fabrican en gran volumen, con atributos como su resistencia a los ambientes abrasivos y su bajo peso para la manipulación. En la figura 12 se muestra un ejemplo de este tipo de señales (conos).



Figura 12. Conos termoformados. (Conos viales LTDA, 2017)

2.4.3 Artículos para el hogar

Todos los días en nuestros hogares interactuamos con productos sin saber que tienen piezas que fueron producidas por este método, existe una gran cantidad de artículos para el hogar que tienen partes termoformadas; de hecho, son producciones de alto volumen. Los electrodomésticos de mayor volumen como la nevera y la lavadora tienen incorporadas piezas que cumplen labores tanto de aislamiento térmico como recipientes de separación, ver figura 13.



Figura 13. Tina de lavadora y molduras internas de neveras termoformadas en industria Haceb. (Fuente: autores)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.4.4 Industria médica

La medicina ha potenciado de manera radical los equipos de termoformado por la alta calidad que requieren productos y empaques con especificaciones estrictas. Además de la impecabilidad por el grado de esterilización que conllevan los medicamentos. En la figura 14 se muestran algunos ejemplos de estos tipos de empaques.



Figura 14. Recipientes termoformados utilizados en la industria medica (Empaques Tregtar, 2017)

2.4.5 Construcción y vivienda

Hay una gran cantidad de productos que fácilmente se han sustituido por piezas termoformadas en la industria de la construcción, acelerándose rápidamente la popularidad de éstos. Podríamos afirmar que hay piezas que no se podrían concebir por otro método, como los domos (ver figura 15). El acrílico en este sector se ve ampliamente utilizado por sus propiedades de resistencia a la intemperie y su maleabilidad.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 15. Artículos para el hogar fabricados por proceso de termoformado. (Ravisa, 2017)

2.5 Ventajas y desventajas del termoformado

Para resaltar algunas de las cualidades más relevantes del termoformado podríamos hablar de costos de los equipos utilizados, ya que es mucho más bajo comparado con otros procesos. En particular, los moldes usados para termoformado son relativamente simples, y por eso no son excesivamente costosos. Además, otra de sus ventajas es que podemos utilizar diferentes tipos de polímeros. No podemos dejar de mencionar la facilidad que da este proceso para producir piezas mucho más grandes que las producidas por otros procesos.

Algunas de las limitantes más grandes que da el termoformado es que aún se tienen muchas restricciones en cuanto a moldes para fabricar piezas más complejas, aunque el avance es cada vez mayor; los desperdicios que deja la operación son grandes lo cual significan sobrecostos del material, aunque hay casos en que se puede recuperar.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.6 Simulación del proceso

2.6.1 Introducción a CFD

La Dinámica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics, CFD) es el conjunto de conocimientos y herramientas mediante los cuales se resuelven los modelos matemáticos que gobiernan los fenómenos de la fluido-dinámica utilizando un software informático. Esto permite crear modelos de un proceso en particular y así obtener conocimientos de este, para evaluar que nuevos conceptos se pueden aplicar en pro de mejorar dicho proceso.

Dentro de los métodos usados en los programas computacionales se encuentran los métodos de volumen finito, diferencias finitas, elemento finito, métodos espectrales, entre otros. Para el desarrollo de este proyecto se utilizará el software ANSYS FLUENT, el cual utiliza el método de volúmenes finitos. Este método permite discretizar el dominio y resolver numéricamente ecuaciones diferenciales parciales (ecuaciones de transporte).

El discretizar significa que tenemos que aplicar las ecuaciones diferenciales para cada diferencial de volumen de control de la geometría; el número de volúmenes de control se definen en el mallado. Entre más fino sea el mallado, mayor será el número de puntos donde deben resolverse las ecuaciones, pero mayor tiempo de computo será necesario.

El método de volumen finito consiste en:

- Descomponer el dominio en volúmenes de control (Malla), de tal manera que el volumen total del fluido es igual a la suma de los volúmenes de control considerados.
- Formular las ecuaciones diferenciales de conservación para cada volumen de control.
- Integrar las ecuaciones diferenciales sobre los volúmenes de control individuales para construir un sistema de ecuaciones algebraicas.
- Ensamblar el sistema de ecuaciones algebraicas de todos los volúmenes de control y resolver el sistema algebraico obtenido.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La ventaja del método de volumen finito es que puede ser utilizado con geometrías complejas. Por ejemplo, para el caso de tres dimensiones se pueden tener geometrías como tetraedros y hexaedros.

Dentro del Ansys Fluent se pueden escoger dos técnicas, solver segregado y solver acoplado. El primero consiste en un algoritmo que realiza la solución de las ecuaciones diferenciales de transporte de forma secuencial, mientras que la segunda técnica las realiza de manera simultánea. La interacción de cada técnica consta de una serie de pasos los cuales se pueden observar en los esquemas de las figuras 16 y 17.

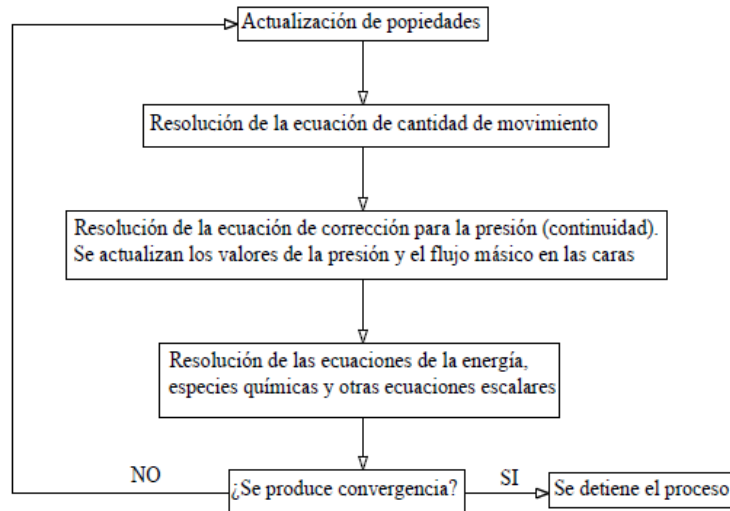


Figura 16. Esquema de cálculo técnica SOLVER SEGREGADO (Méndez Martínez, 2012)

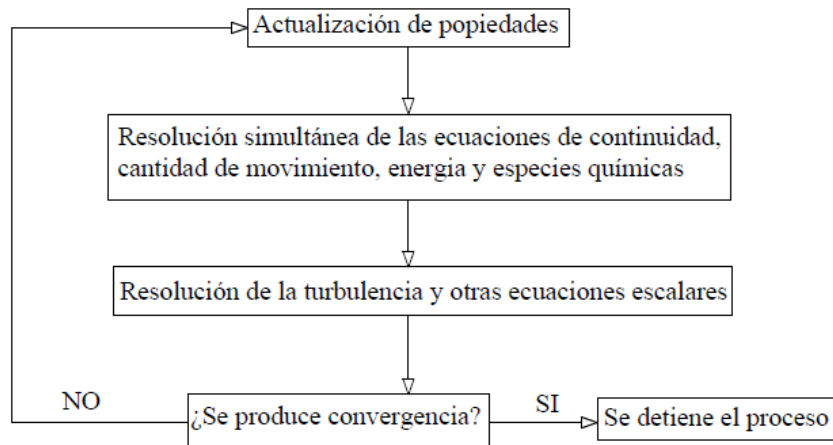


Figura 17. Esquema de cálculo técnica SOLVER ACOPLADO (Méndez Martínez, 2012)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.6.2 Ecuaciones usadas por ANSYS FLUENT

A continuación, se exponen las ecuaciones que aplican a cada volumen de control y que fueron resueltas en este trabajo por el software ANSYS FLUENT:

Ecuación de la conservación de la masa o ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

Donde,

∇ = Operador divergente

ρ = Densidad

\vec{v} = Vector velocidad

t = Tiempo

Ecuación de conservación de momento:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g}$$

Donde $\bar{\tau}$ es

$$\bar{\tau} = \mu [(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I]$$

Donde,

p = Presión

\vec{g} = Vector gravedad

$\bar{\tau}$ = Tensor de esfuerzos viscosos

μ = Viscosidad dinámica

I = Matriz identidad

 ITM Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$\nabla \vec{v}^T = \text{Transpuesta del gradiente de vector velocidad}$

Ecuación de conservación de la energía:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot [k_{eff} \nabla T] + S_h$$

Donde E es,

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2}$$

Donde,

$E = \text{Energía}$

$k_{eff} = \text{Conductividad térmica efectiva}$

$S_h = \text{Generación de calor volumetrico debido a radiación}$

$T = \text{Temperatura}$

$E = \text{Energía}$

$h = \text{Entalpía}$

$V = \text{Velocidad}$

Ecuación del modelo radiación de ordenadas discretas:

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega'$$

Donde,

$I = \text{Intensidad espectral de radiación}$

$a = \text{Coeficiente de absorción}$

$\sigma_s = \text{Coeficiente de dispersión}$

$\sigma = \text{Constante de Stefan-Boltzman}$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

\vec{r} = Vector de posición

\vec{s} = Vector de dirección

n = Índice de refracción

ϕ = Función de fase

T = Temperatura

Ω' = Ángulo sólido

El modelo de radiación de ordenadas discretas (DO) resuelve la ecuación de transferencia radiativa para un número finito de ángulos discretos, cada uno asociado a una dirección vectorial \vec{s} en el plano cartesiano (x,y,z) . El sistema coordinado angular utilizado en este modelo se muestra en la figura 18.

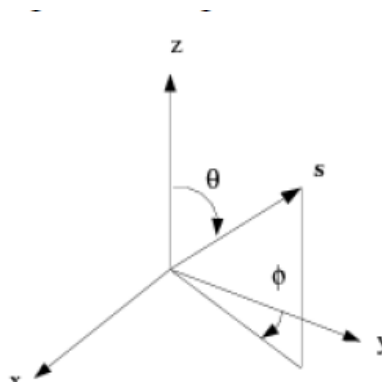


Figura 18. Sistema coordinado angular (ANSYS, Inc., 2013)

El método discretiza los ángulos θ - ϕ y resuelve la ecuación para cada una de las subdivisiones; entre mayor número de subdivisiones se realicen más preciso es el resultado, pero el tiempo de análisis que toma el programa aumenta considerablemente.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. METODOLOGÍA

3.1 Termoformadora ITM

El presente trabajo se realizará en base a la termoformadora ubicada en el laboratorio de diseño industrial del ITM (figura 19), la cual es usada por los estudiantes de la universidad para distintos proyectos.



Figura19. Termoformadora ITM (Fuente: Autores)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La termoformadora cuenta con varios procesos automatizados los cuales son controlados desde la una pantalla táctil HMI conectada a un PLC, desde la cual se definen todos los parámetros del termoformado y donde se procede a manipular cada componente de la termoformadora de forma manual dando una a una las órdenes para el proceso.

Esta pantalla cuenta con el manejo total de todos los componentes industriales que conforman el equipo, operando cada una de las variables que hacen parte del proceso como lo son temperatura, vacío, presión de aire y manipulación tanto de porta mesa como de carro resistencia (ver figura 20)



Figura 20. pantalla táctil HMI (fuente: autores)

El termoformado se inicia ajustando la lámina a la mordaza de sujeción, la cual presenta una presión suministrada por un compresor de aire regulado hasta 90 psi. Esta presión es necesaria para fijar de forma permanente la lámina del polímero durante el proceso, tanto en el calentamiento como en el formado de la lámina. Esta mordaza se muestra en la figura 21.



Figura 21. Mordaza de sujeción operando con lamina de polímero a punto de iniciar operación
(Fuente: Autores)

El paso a seguir es el calentamiento de la lámina. Se gradúa la temperatura de acuerdo al material a intervenir, la superficie de la lámina absorbe energía infrarroja de los calentadores y el calor es entonces conducido desde la superficie hasta el interior de la lámina sometiendo la lámina a este calor hasta llegar al punto que el material se encuentre maleable y con las características definidas para el formado. En la figura 22 se muestra el aspecto de las lámparas durante el calentamiento.



Figura 22. Aspecto de la campana de la termoformadora del ITM en operación (Fuente: autores)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La plataforma neumática o porta-mesa tiene como función subir el molde macho y es impulsada por un cilindro pistón neumático, después de ser accionada de forma manual desde la pantalla HMI, dándole la orden de superponer el molde hasta penetrar el polímero. El porta-mesa se muestra en la figura 23.

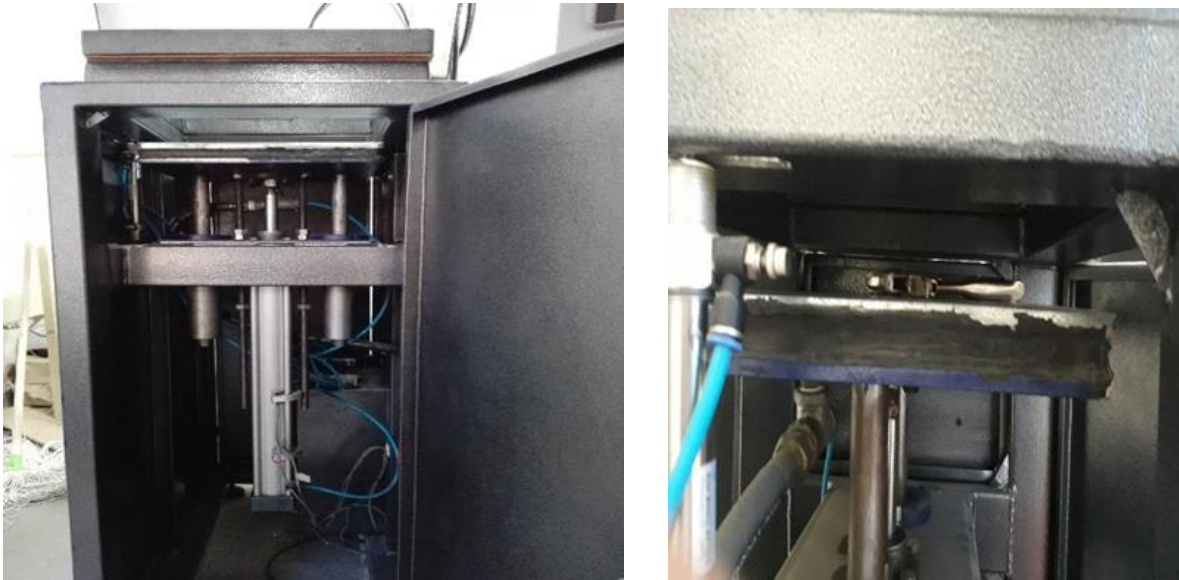


Figura 23. porta mesa neumático y molde a termoformar (Fuente: autores)

Tras calentar la lámina, el molde macho se desplaza verticalmente, de esta manera se logra que la lámina se adapte a la forma del molde. A continuación, se necesita un vacío entre la lámina y el molde para que pueda tomar la forma completamente y posterior a esto se inyecta aire para liberar el vacío y lograr el resultado esperado.

Se debe dejar enfriar la pieza hasta que quede sólida (Ver figura 24); un desprendimiento apresurado puede ocasionar una deformación del material. También se recomienda manejar enfriamientos lentos o en algunos casos forzados minimizando el tiempo de la rigidez con el fin de obtener diferentes propiedades mecánicas de la pieza.

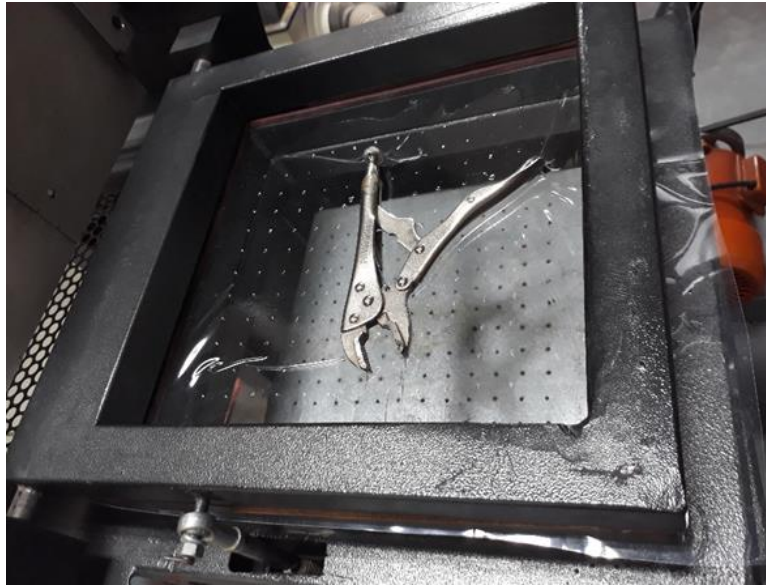


Figura 24. Termoformado de hombre solo figura de ensayo (Fuente: autores)

La máquina cumple con un sistema de vacío óptimo para los ciclos de formado propuestos en el diseño, formando piezas con un buen acabado, copiando los más finos detalles del molde (Ver figura 25).



Figura 25. Termoformado por adaptación tras ensayos hechos en la maquina (Fuente: autores)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.2 Datos y mediciones de la termoformadora

Para este proyecto se está tomando como referencia la termo formadora que se encuentra en los laboratorios del ITM, en la cual se tomaron distintos datos para así poder crear el modelo en ANSYS FLUENT. A continuación, se describen los principales datos tomados:

- TOMA DE MEDIDAS DE LA CAMPANA:** Se tomaron medidas de la campana termoformadora para la creación de la geometría en ANSYS FLUENT. Estas medidas se realizaron con un flexómetro. Esta toma de medidas se muestra en la figura 26.

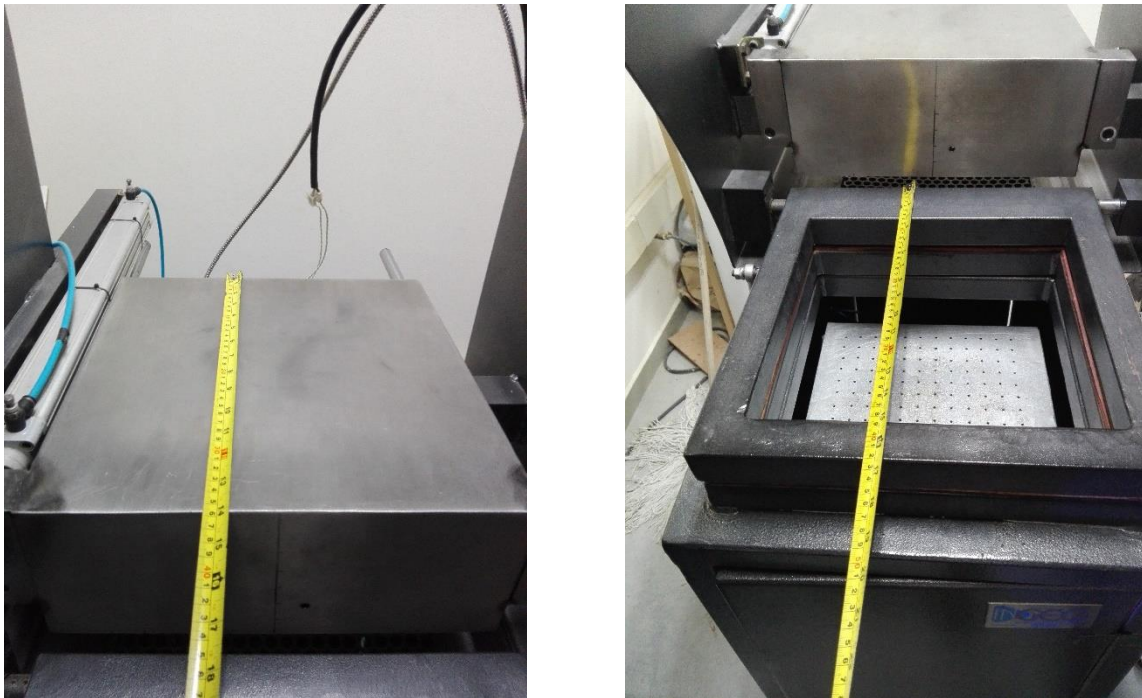


Figura 26. Medidas de la campana (fuente: autores)

- TOMA DE CORRIENTE DE LAS RESISTENCIAS:** Variable medida en la alimentación de las resistencias, las cuales se encuentran conectadas en paralelo, medida tomada con pinza voltiamperimétrica UNI-T UT202. Esta pinza se muestra en la figura 27.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 27. Toma de medida de amperaje (Foto: autores)

- **TEMPERATURA EN CAMPANA (EXTERIOR E INTERIOR):** Se mide temperatura al interior y al exterior de la campana, con pinza voltiamperimétrica UNI-T (ver figura 28).



Figura 28. Comparación del set point de la máquina con medición tomada de pinza (fuente autores)

La medición de la temperatura de la campana en su exterior se realizó con el fin de registrar el calor emitido al medio circundante y que resulta en una pérdida para el proceso.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 29. Temperatura tomada en pared metálica de la campana (fuente autores).

3.3 Creación de geometría y simulación en ANSYS FLUENT

3.3.1 Características de las resistencias y dimensiones de la campana

- *Características de las resistencias:*

Diámetro = 0,012 m

Largo = 0,315 m

Corriente total = 8,31 A

Corriente de cada resistencia = 1,18 A

Voltaje = 220 Vac

$$P = V_o \cdot I_o = 220V \cdot 8,31A = 1828.2W$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$Potencia\ de\ cada\ resistencia = 1828.2W / 7 = 259,6W$

$\acute{A}rea\ superficial\ de\ cada\ resistencia = \pi \cdot D \cdot L = \pi * 0,012m * 0,315m = 0.0118m^2$

$\acute{A}rea\ superficial\ Total = 0.0831m^2$

$Flujo\ de\ calor\ (\dot{q})\ de\ cada\ resistencia = \frac{w}{\pi DL} = \frac{259,6\ W}{0.0118\ m^2} = 22000 \frac{W}{m^2}$

- *Dimensiones de la campana: Las dimensiones de la campana se muestran en la figura 30.*

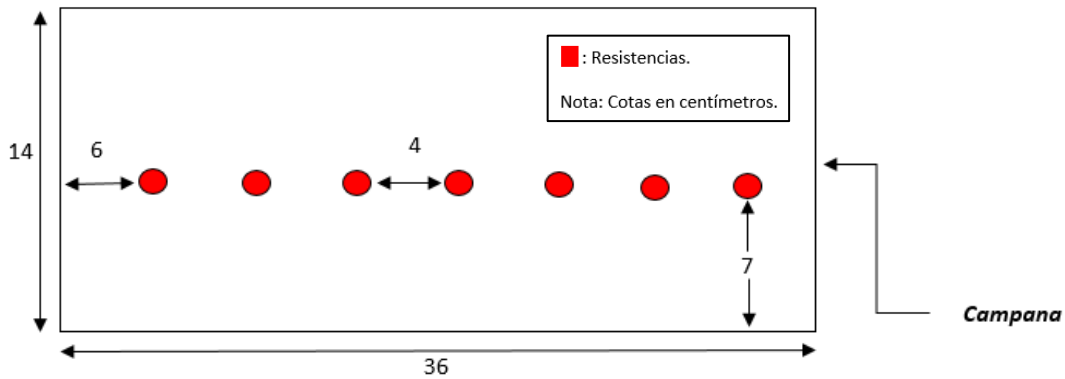


Figura 30. Esquema en 2D de la campana de la termoformadora.

3.3.2 Preparación

ANSYS WORKBENCH se inicia haciendo click en el menú inicio de Windows, seleccionando WORKBENCH 17.0 en el grupo de programas de ANSYS. Cuando abrimos WORKBECH 17.0 aparece la ventana que se muestra en la figura 31.

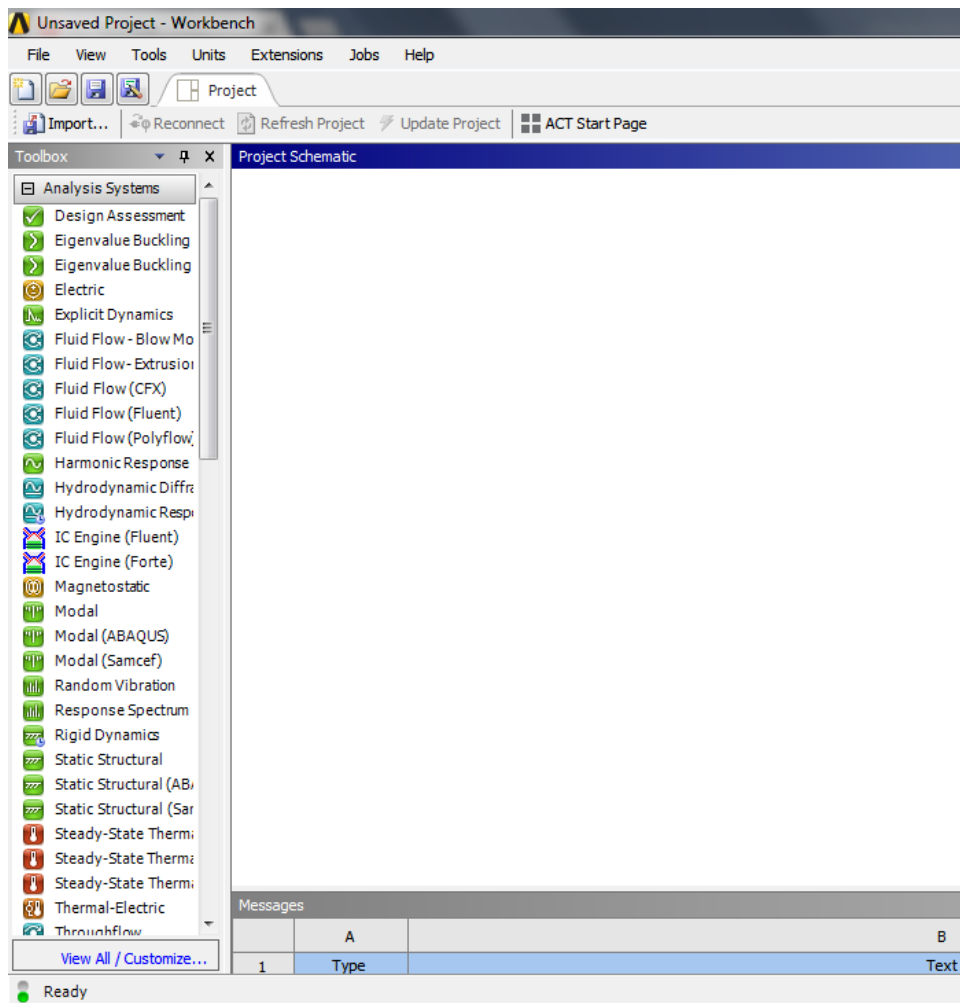


Figura 31. Ventana principal de ANSYS WORKBECH 17.0.

Al lado izquierdo tiene la caja de herramientas “Toolbox” la cual contiene aplicaciones para el análisis de distintos sistemas. Al lado derecho se mostrará el esquema del proyecto “Project schematic”.

Se selecciona Fluid Flow(Fluent) de la caja de herramientas con un click sostenido y se arrastra hacia Project schematic, figura 32. Con esto creamos un nuevo sistema de análisis de fluidos.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

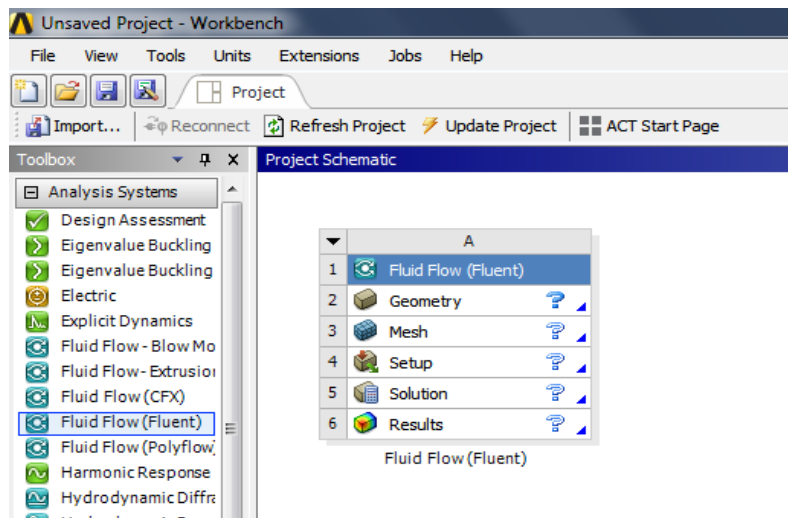


Figura 32. Sistema de análisis de fluidos(Fluent).

Las características, condiciones y simulaciones del sistema se deben configurar en el orden que aparece en Fluid Flow(Fluent).

- 1- Geometry (Geometría).
- 2- Mesh (Malla)
- 3- Setup (configuración)
- 4- Solution (solución)
- 5- Results (Resultados)

3.3.3 Creación de geometría

En este caso la geometría se creará en ANSYS DesignModeler. Para ingresar a DesignModeler se presiona click derecho sobre geometría y se selecciona DesignModeler. Como se observa en la figura 33. ANSYS también ofrece la opción de importar geometría desde otro programa de dibujo seleccionando la opción Import Geometry.

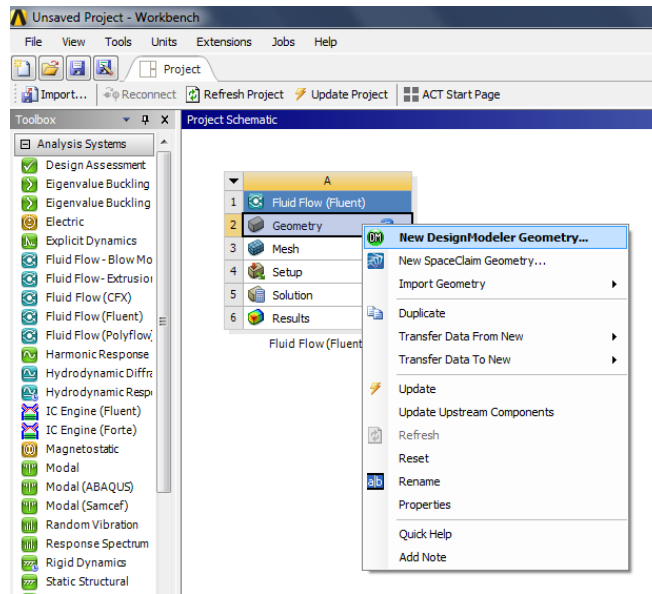


Figura 33. Selección DesignModeler.

A continuación, se abre la aplicación desingModeler la cual cuenta con todas las herramientas de dibujo para crear la geometría con la cual se va a trabajar. En la figura 34 se puede ver el aspecto de la geometría 2D que se describió previamente en la figura 30.

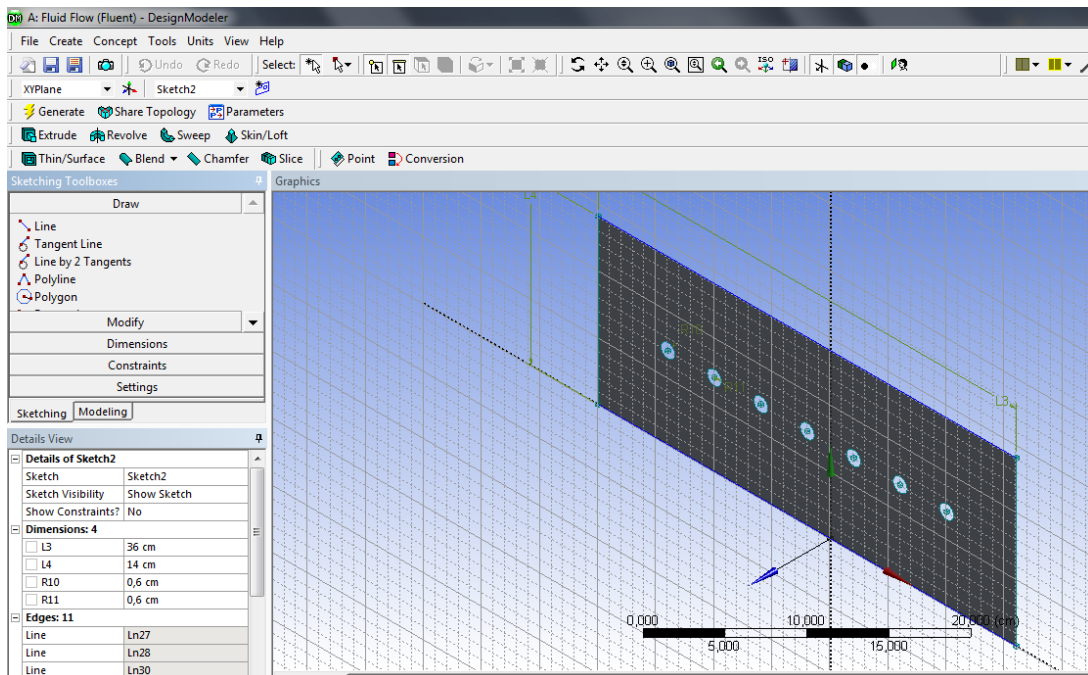


Figura 34. Geometría creada en DesignModeler.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Como se puede observar en la figura 35, el bloque de geometría aparece con este símbolo (✓), esto significa que la geometría esta lista sin ninguna falla y se puede continuar con el siguiente paso. En el bloque de la malla apareció este símbolo el cual significa que es lo próximo que se debe configurar. (↻)

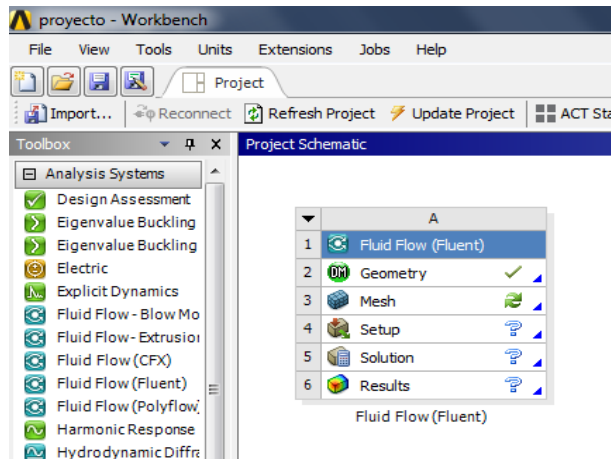


Figura 35. Pantalla principal de ANSYS luego de crear geometría.

3.3.4 Creación de malla

Para ingresar a configurar la malla se presiona doble click izquierdo sobre el bloque mesh y a continuación aparecerá la siguiente aplicación para crear la malla, tal como se muestra en la figura 36.

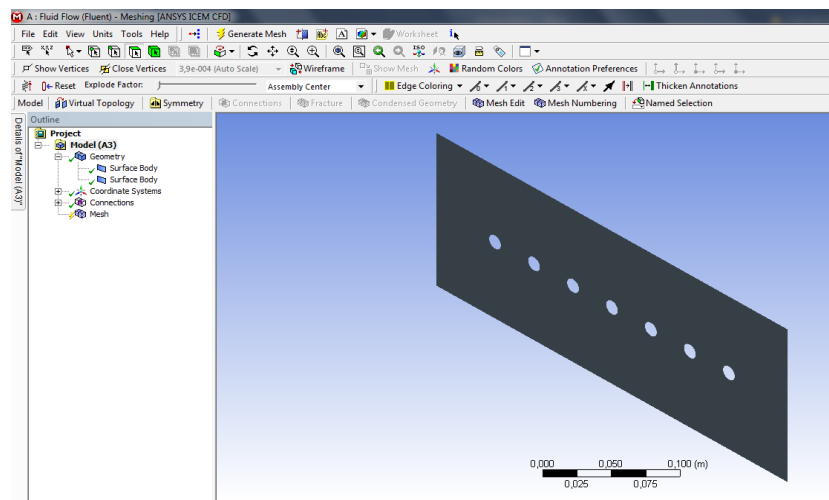
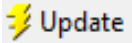


Figura 36. Inicio de configuración de la malla.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Para iniciar a configurar la malla se selecciona actualizar  en el menú ubicado en la parte superior izquierda, tal como se muestra en la figura 37.

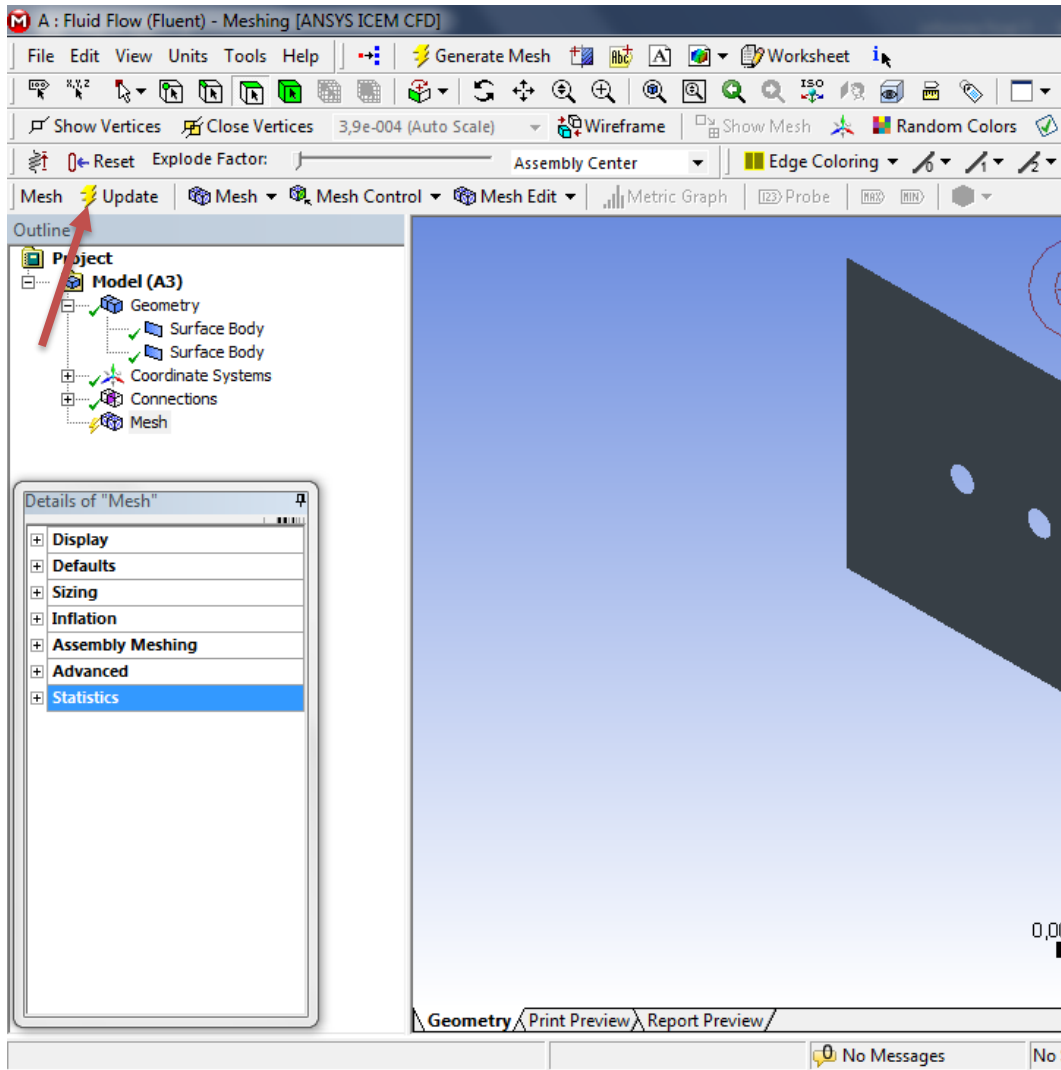
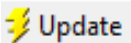


Figura 37. Selección de update.

Cuando se presiona  el programa automáticamente genera una malla preliminar a partir de la cual se inicia una configuración más precisa. La figura 38 muestra la malla generada con los parámetros por defecto del programa. Se ve que la malla tiene muy pocas subdivisiones (elementos).

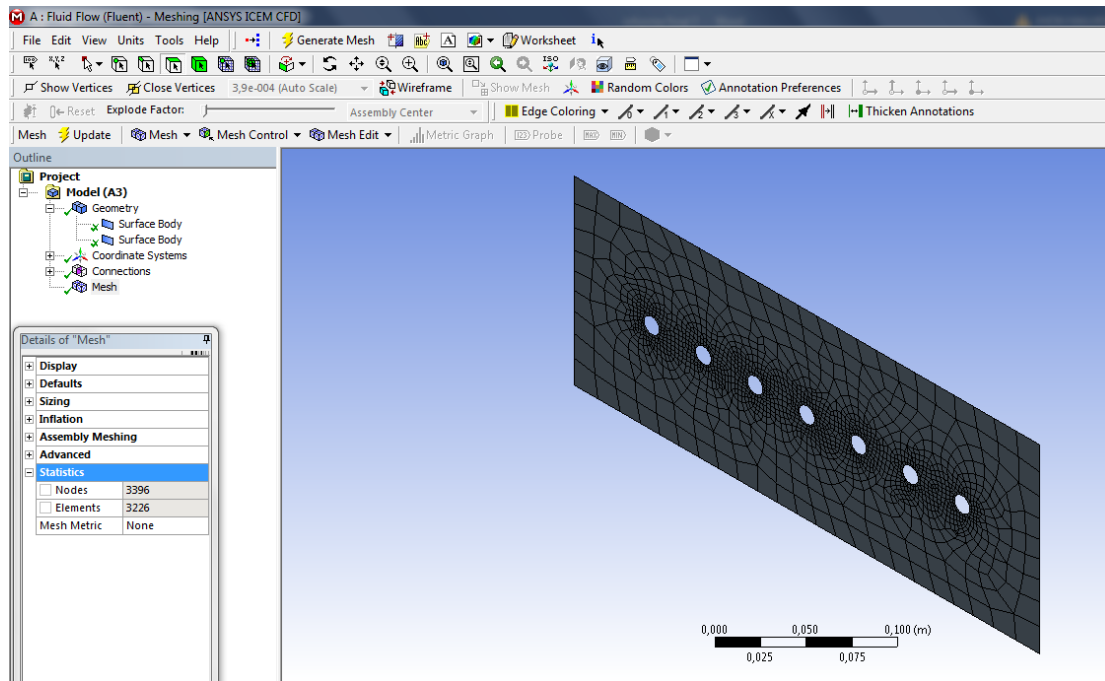


Figura 38. Malla generada por medio de update.

En la parte inferior izquierda de la anterior figura se muestra el número de elementos en los que está dividida la geometría. En este caso 3226 elementos, los cuales son muy pocos (ver figura 39). La versión académica del ANSYS FLUENT permite hasta 500 mil subdivisiones. En este caso trabajaremos con un rango entre 200000 y 250000 elementos.

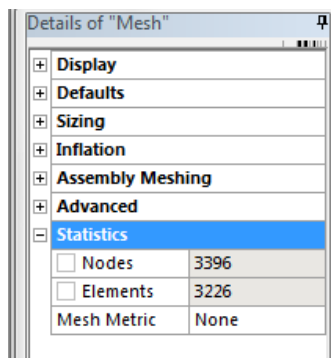


Figura 39. Número actual de elementos.

Para aumentar el número de elementos en la ventana detalles de la malla (Details of "Mesh"), se despliega la opción valores predeterminados (defaults) y en relevancia (Relevance) se sube a 100. A continuación, se despliega el menú dimensionamiento (sizing) y en la opción centro de relevancia

(relevance center) se selecciona “fine” (ver figura 40). Estas modificaciones a la “relevancia” permiten un refinado rápido del malla.

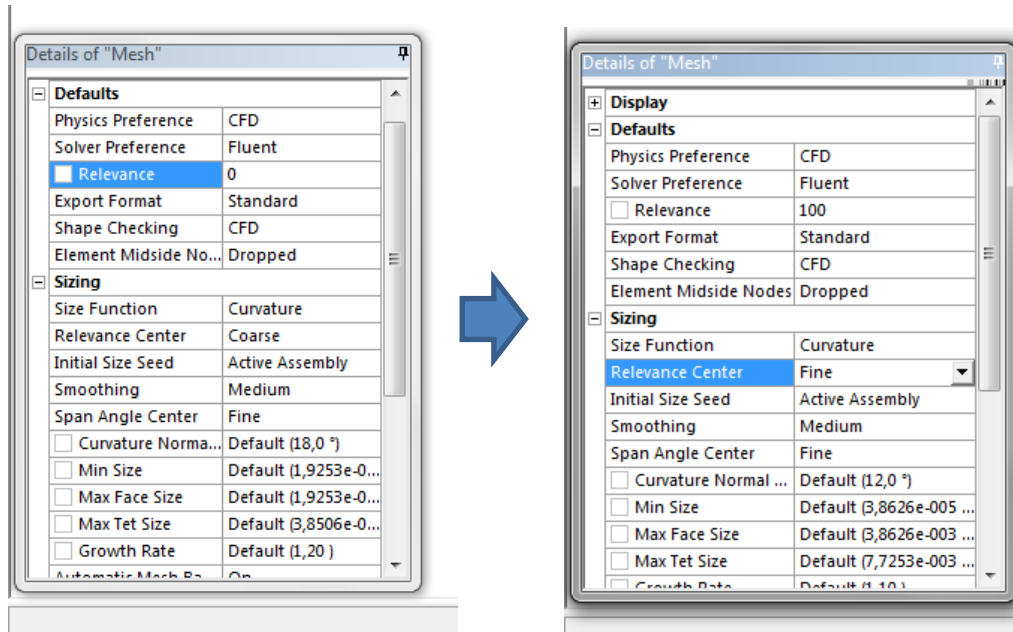
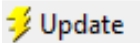


Figura 40. Configuración de malla (a la izquierda antes, a la derecha después de configurada la relevancia).

A continuación, se presiona  para actualizar la malla. Como se puede observar en la figura 41 el número de elementos pasó de 3226 a 12098.

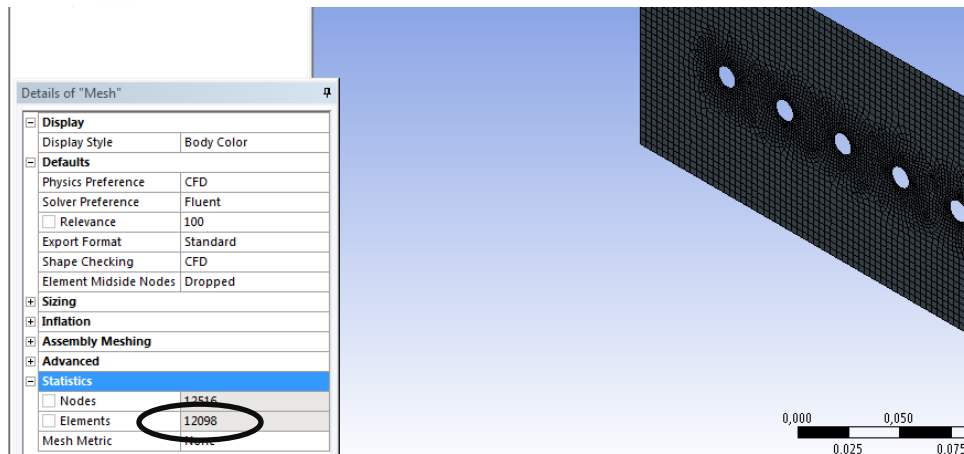


Figura 41. Visualización del número de elementos con nueva configuración.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Como al aplicar estos dos pasos los elementos no son los suficientes para realizar las simulaciones se procede a modificar los parámetros Min size, max face size y Max test size (ver figura 42) disminuyéndolos de manera proporcional hasta que nos dé la cantidad de elementos necesitados.

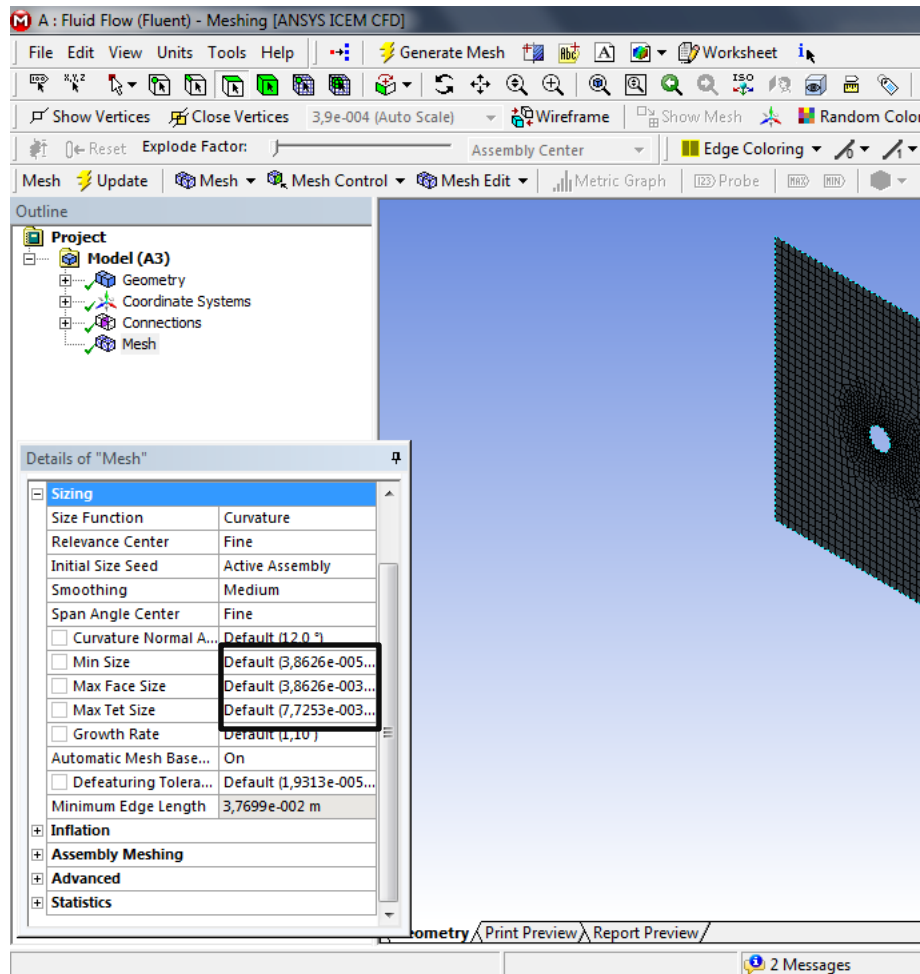


Figura 42. Valores por defecto de los parámetros Min size, max face size y Max test size.

Estos parámetros controlan el tamaño mínimo y máximo de un elemento, así como el tamaño máximo de cara. Estos tres datos se fueron disminuyendo de manera proporcional hasta obtener 214768 elementos como se muestra en la figura 43.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

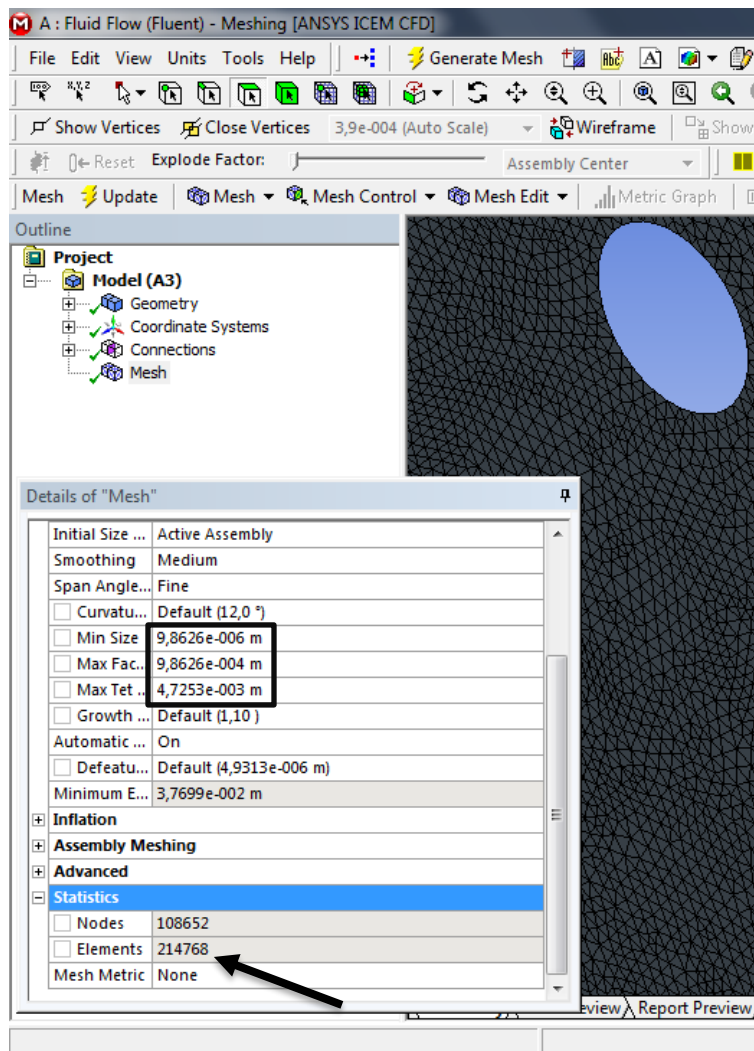


Figura 43. Valores finales de parámetros y números de elementos.

Ya por último se definen y nombran los límites geométricos (condiciones de borde). Esto servirá más adelante para configurar y parametrizar dichos límites definiendo su papel en el sistema.

Para definir un límite geométrico se realizan los siguientes pasos:

- Seleccionar el límite que se desea nombrar (ver figura 44)
- Presionar click derecho y en el recuadro que se abre seleccionar “create named selection”. (ver figura 45)
- Por último, se nombra el límite geométrico y se presiona OK (ver figura 46)

En este caso los límites superiores se nombrarán paredesexternawalls, las resistencias se nombran resistenciaswalls y la parte inferior se nombra laminawalls. La parte llamada laminawalls es la que

simula el patrón de calentamiento de la lámina que se desea termoformar. Es importante que en el nombre de cada frontera aparezca la palabra “walls”, ya que esto ayuda al ANSYS FLUENT a identificar mejor que tipo de condición de borde se ajusta mejor a estas paredes.

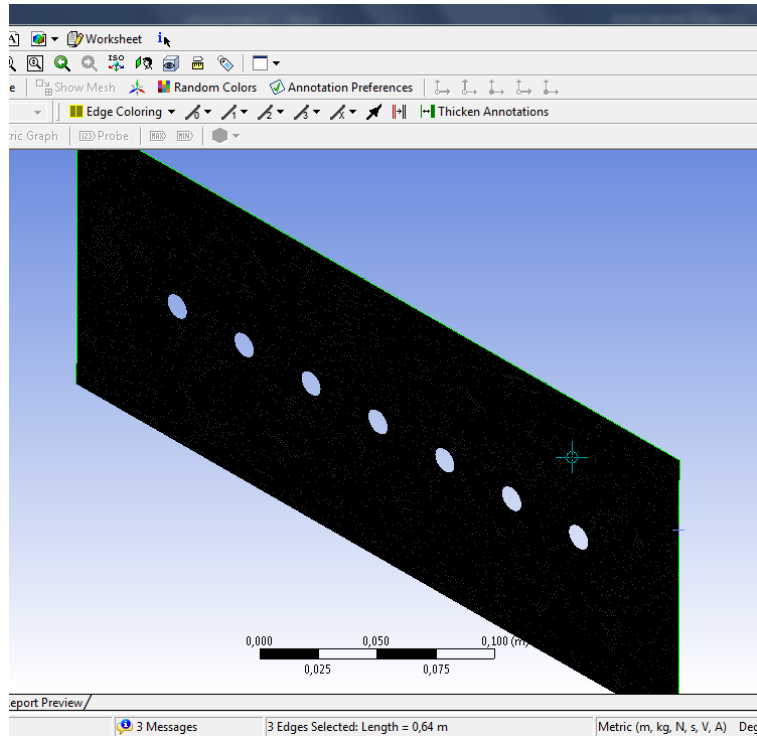


Figura 44. Selección del límite, se observa en verde.

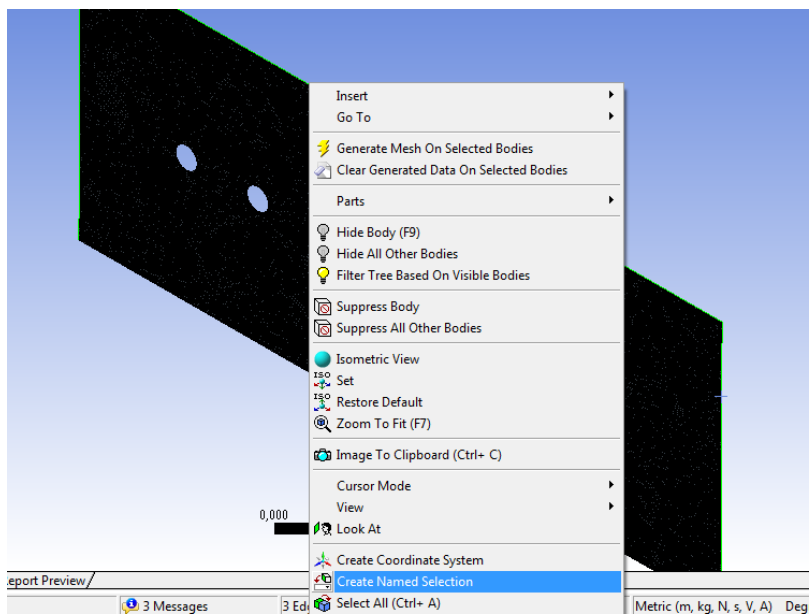


Figura 45. Selección de create named selection.

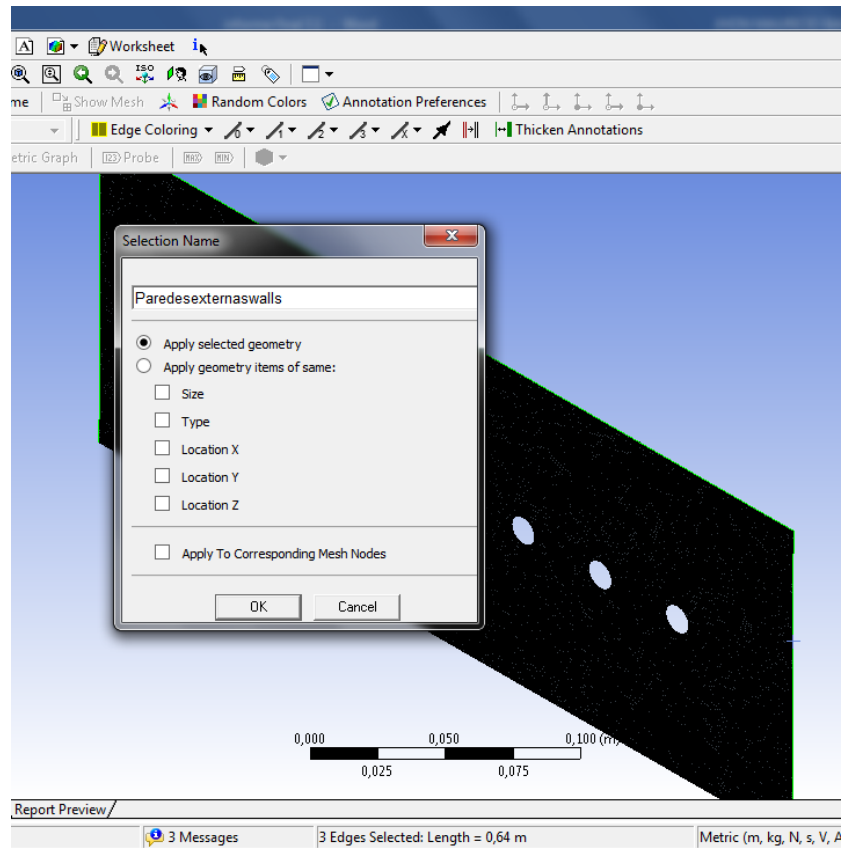
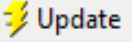


Figura 46. Nombramiento de los límites de la geometría.

Luego de nombrar todos los límites geométricos en la parte superior izquierda se muestra un árbol de operaciones llamada “named selection”, donde se pueden observar los nombres dados a los límites de la geometría (ver figura 47). En esta opción se puede seleccionar cada nombre dado y el esquema muestra en rojo la sección que fue nombrada, como se puede observar en las figuras 50, 51 y 52. Para finalizar se hace click de nuevo en “update” . Este paso es importante, ya que hace no solo genera la malla sino que también la manda al programa ANSYS FLUENT, lista para ser simulada.

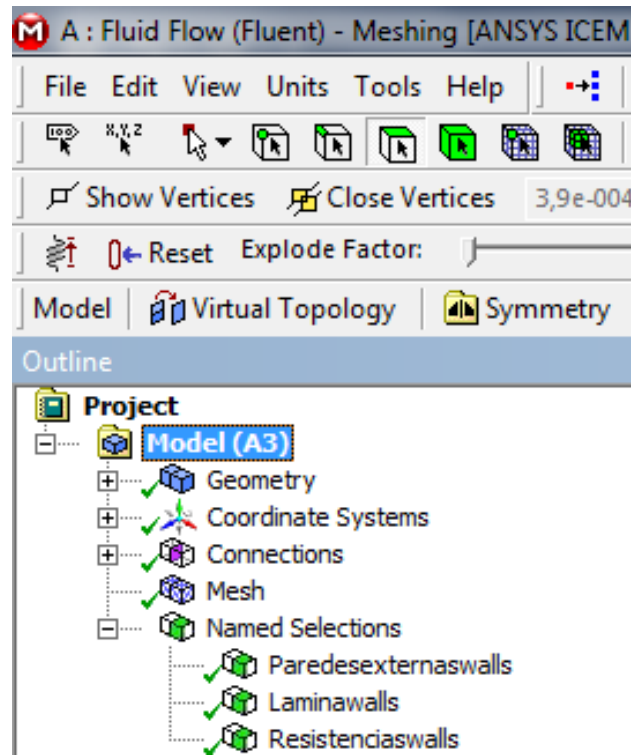


Figura 47. Visualización de nombres dados a los limites geométricos.

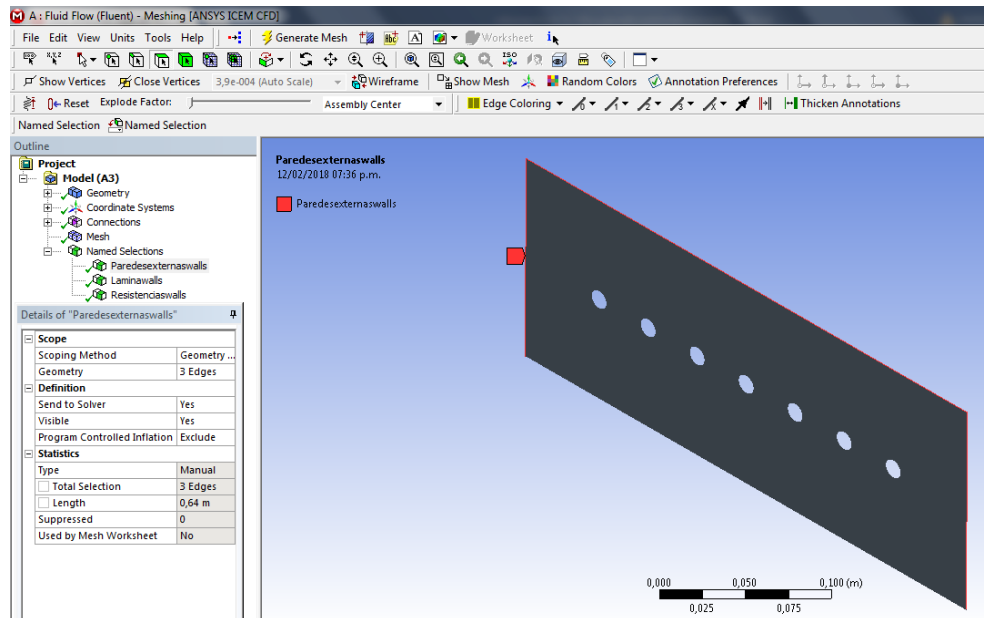


Figura 48. Limite geométrico nombrado Paredesesternaswalls.

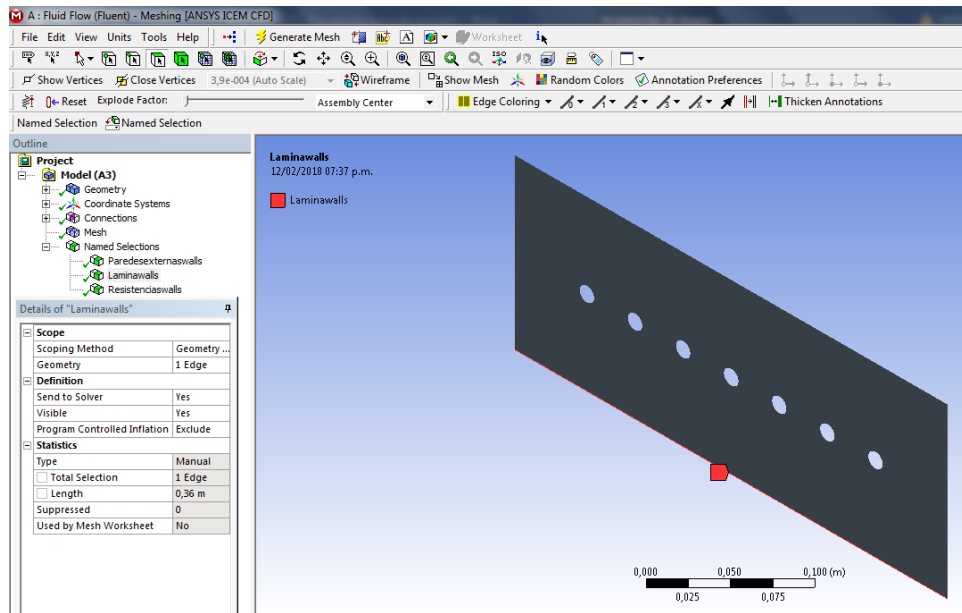


Figura 49. Limite geométrico nombrado Laminawalls.

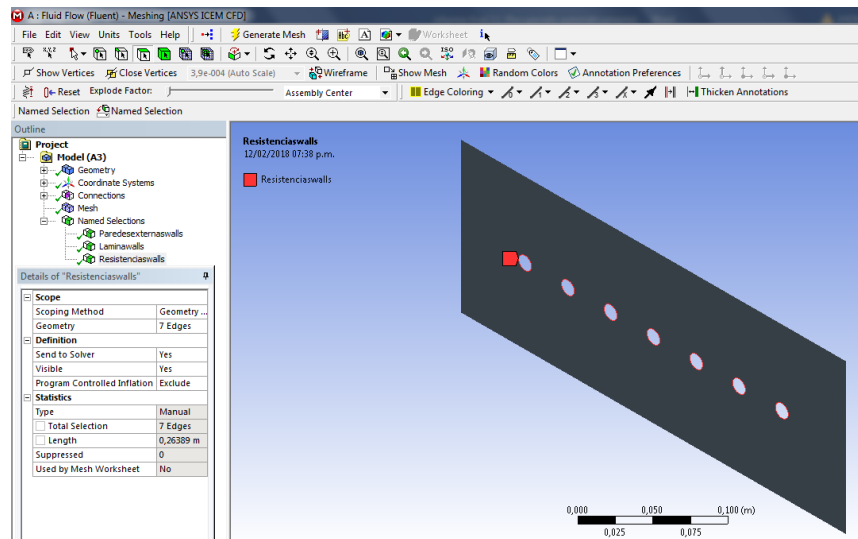


Figura 50. Limite geométrico nombrado Resistenciaswalls.

Con esto se concluye la construcción y la configuración de la malla. Como se puede observar en la figura 51 la sección de malla está marcada por este símbolo (✓) lo cual indica que se puede continuar al siguiente paso, que en este caso sería la configuración del sistema (setup).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

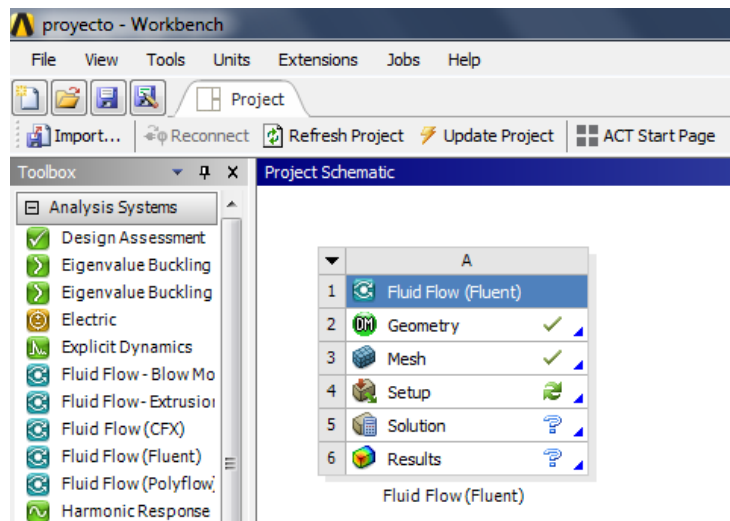


Figura 51. Pantalla principal luego de configurar la malla.

3.3.5 Configuración de la simulación “SETUP”

Para iniciar con la configuración se selecciona setup, a continuación, y con doble click se abre una ventana llamada “Fluent Launcher”, figura 52. Allí se selecciona doble precisión (el nivel de precisión de los cálculos) y en processing options se marca en paralelo y a continuación se selecciona el número de núcleos del computador disponibles. Debido a las características del computador con el que se va a trabajar se selecciona 2. Por último, presionamos Ok.

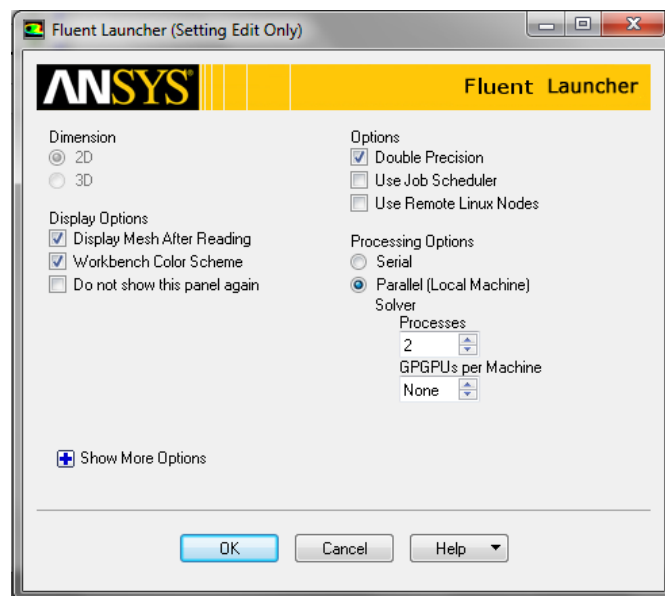


Figura 52. Ventana de configuración inicial.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Luego de la configuración inicial nos aparece la siguiente pantalla, figura 53. Al lado izquierdo nos muestra los parámetros a configurar iniciando por “General”, en donde se ingresa la gravedad en el eje Y negativo. En esta sección se puede configurar el tipo de simulación: se puede seleccionar en estado transitorio que es básicamente la operación por un periodo de tiempo determinado o en estado estable que es la simulación operando sin límite de tiempo. Como se muestra en el siguiente capítulo, en este trabajo también se consideraron simulaciones transitorias para determinar el patrón de calentamiento de la campana con el tiempo. Sin embargo, a continuación, se muestra la configuración solo de las simulaciones en estado estable.

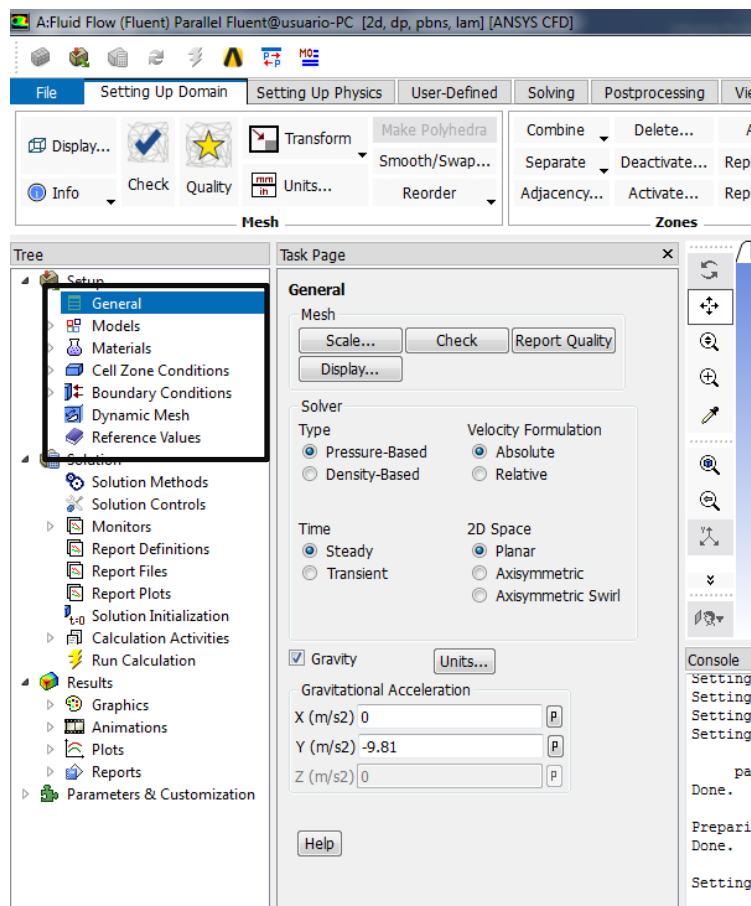


Figura 53. Ventana de los parámetros generales.

Continuamos la configuración de los modelos. Iniciamos seleccionando “Models” en el menú setup ubicado al lado superior izquierdo, figura 54. Aquí aparecen los modelos que se pueden utilizar; para las simulaciones que realizaremos utilizaremos los modelos de energía y radiación de ordenadas discretas.

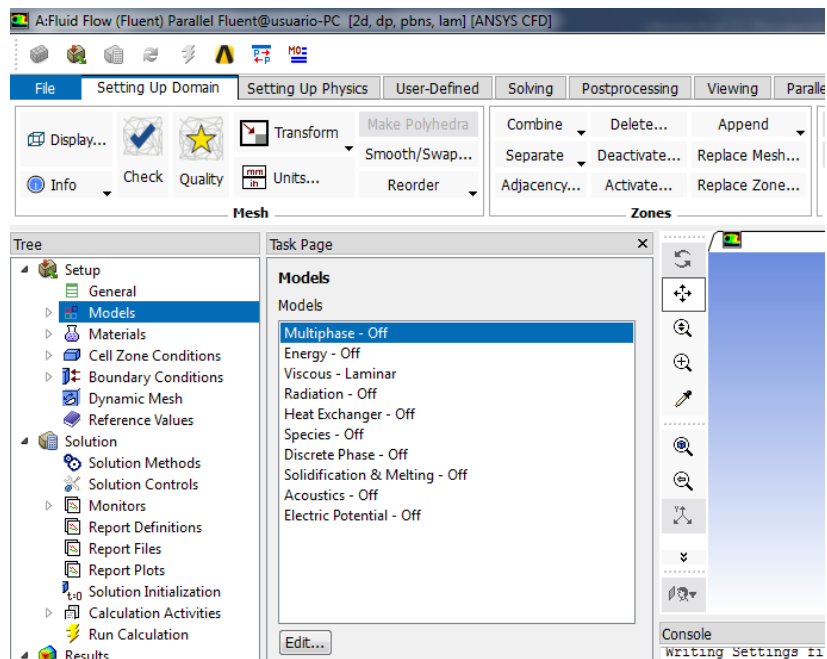


Figura 54. Ventana de modelos que pueden ser utilizados en ANSYS.

Para activar la ecuación de energía se presiona doble click izquierdo en Energy y en la ventana que se despliega se activa como se muestra en la figura 55. A continuación, se presiona OK y el modelo cambiara de estado de OFF a ON como se observa en la figura 56.

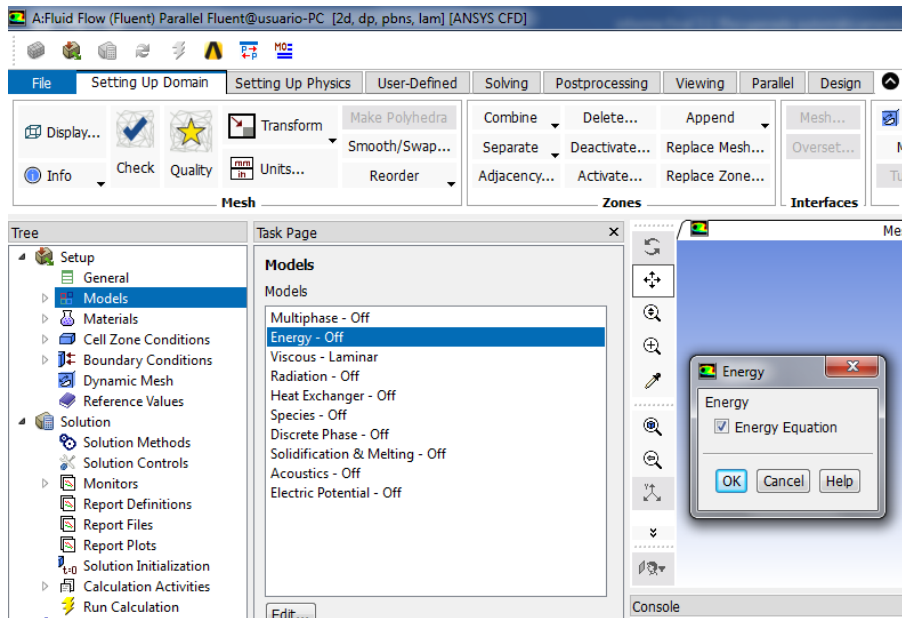


Figura 55. Activación de ecuación de energía.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Para activar la ecuación de radiación de ordenadas discretas presionamos doble click izquierdo en Radiation, y en la ventana que se abre, Figura 56, se selecciona Discrete Ordinates (DO), por último, se presiona Ok y el modelo cambia de estado OFF a Discrete ordinates (DO).

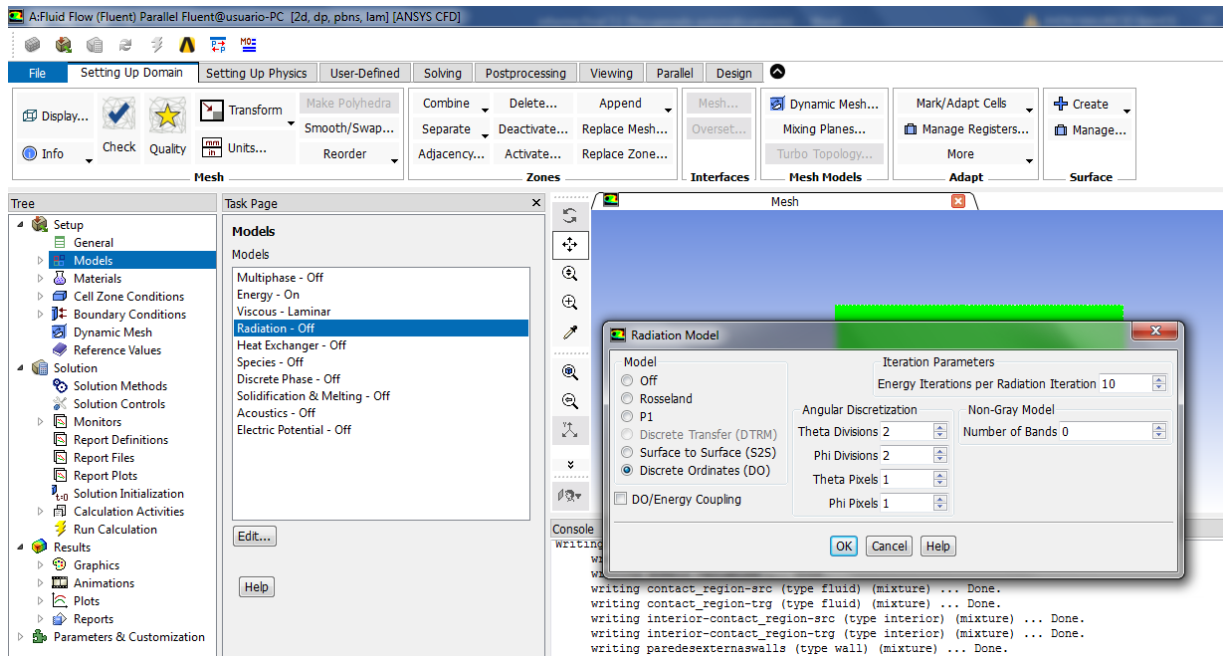


Figura 56. Activación de ecuación de radiación de ordenadas discretas.

Se continua la configuración con “Materials”, seleccionando “Materials” en el menú setup ubicado al lado izquierdo. En este apartado se configura el material de las paredes externas. Se inicia seleccionando “Create/Edit...” tal como se ve en la figura 57.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

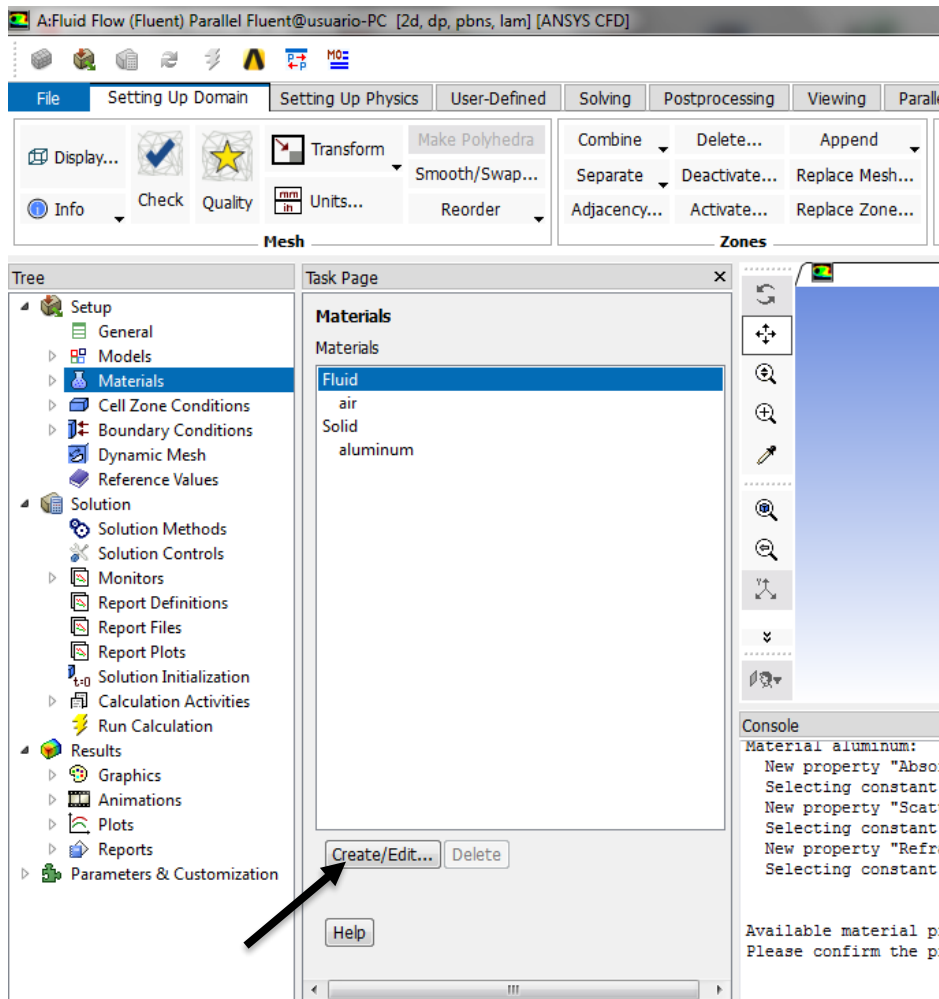


Figura 57. Pantalla principal del submenú “Materials”.

Esto abrirá una ventana, figura 58, donde se puede crear un nuevo material ingresando las características de este o por el contrario ANSYS también ofrece la opción de buscar en la base de datos de Fluent. Iniciamos seleccionando “Solid” en la opción “Material Type” y luego presionando click izquierdo sobre “Fluent Database”. Esto abrirá una ventana nueva, figura 59, donde es posible escoger el material del cual está compuesta las paredes externas en este caso acero. En esta ventana se selecciona Steel (acero), se presiona copy y se cierra la ventana. De igual manera se cierra la ventana para para crear y editar materiales “Create/Edit materials”.

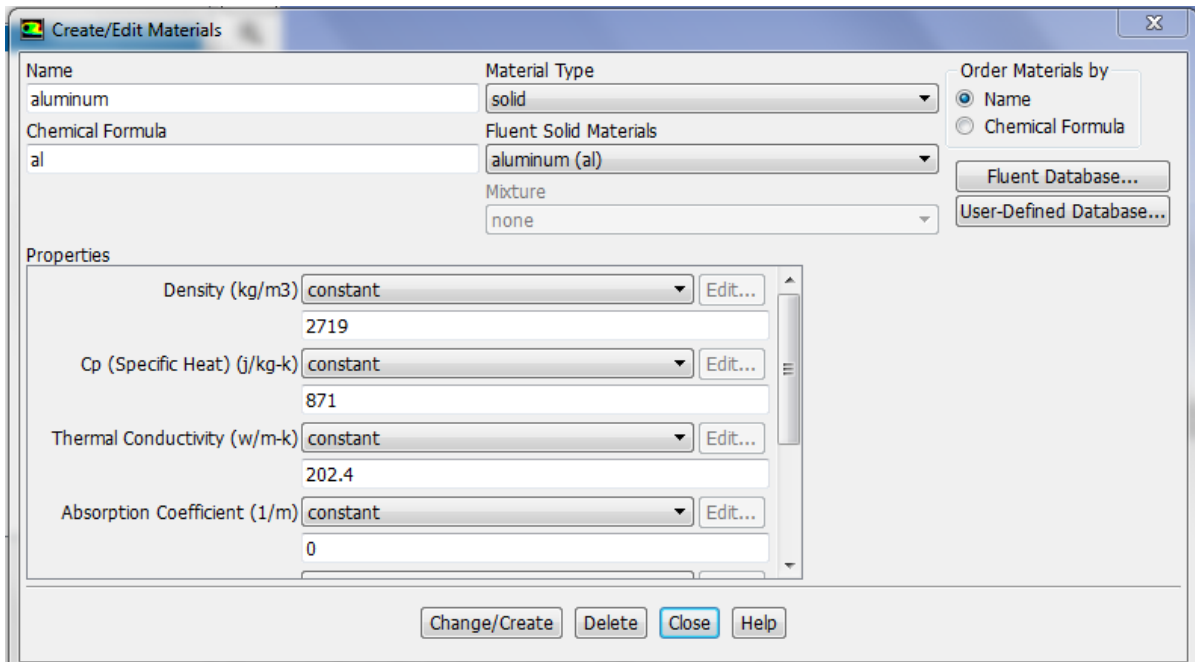


Figura 58. Ventana para editar y crear materiales.

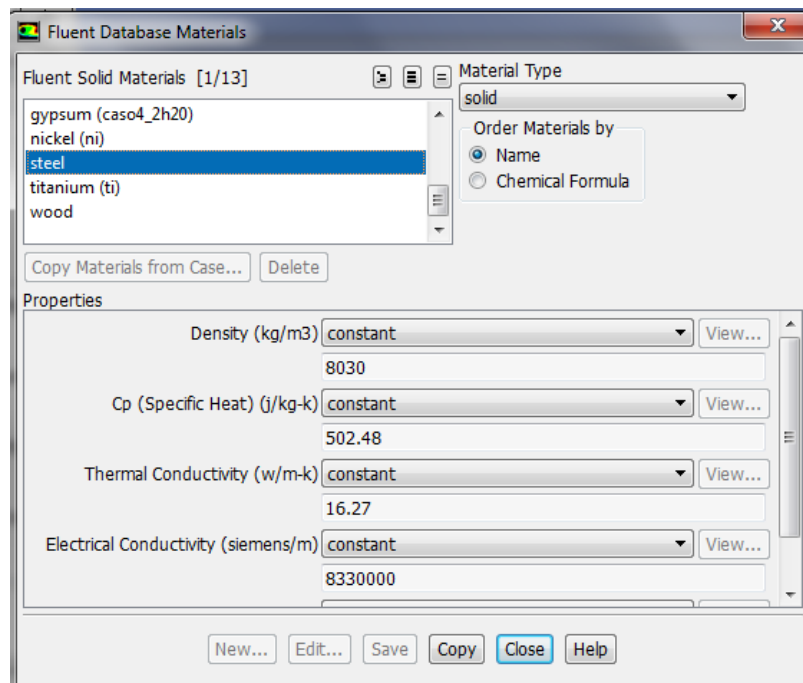


Figura 59. Ventana correspondiente a la base de datos de Fluent.

Como se puede observar en “Materials”, ya aparece Steel, figura 60. Esto indica que más adelante se puede seleccionar como material de construcción de algún componente de la geometría.

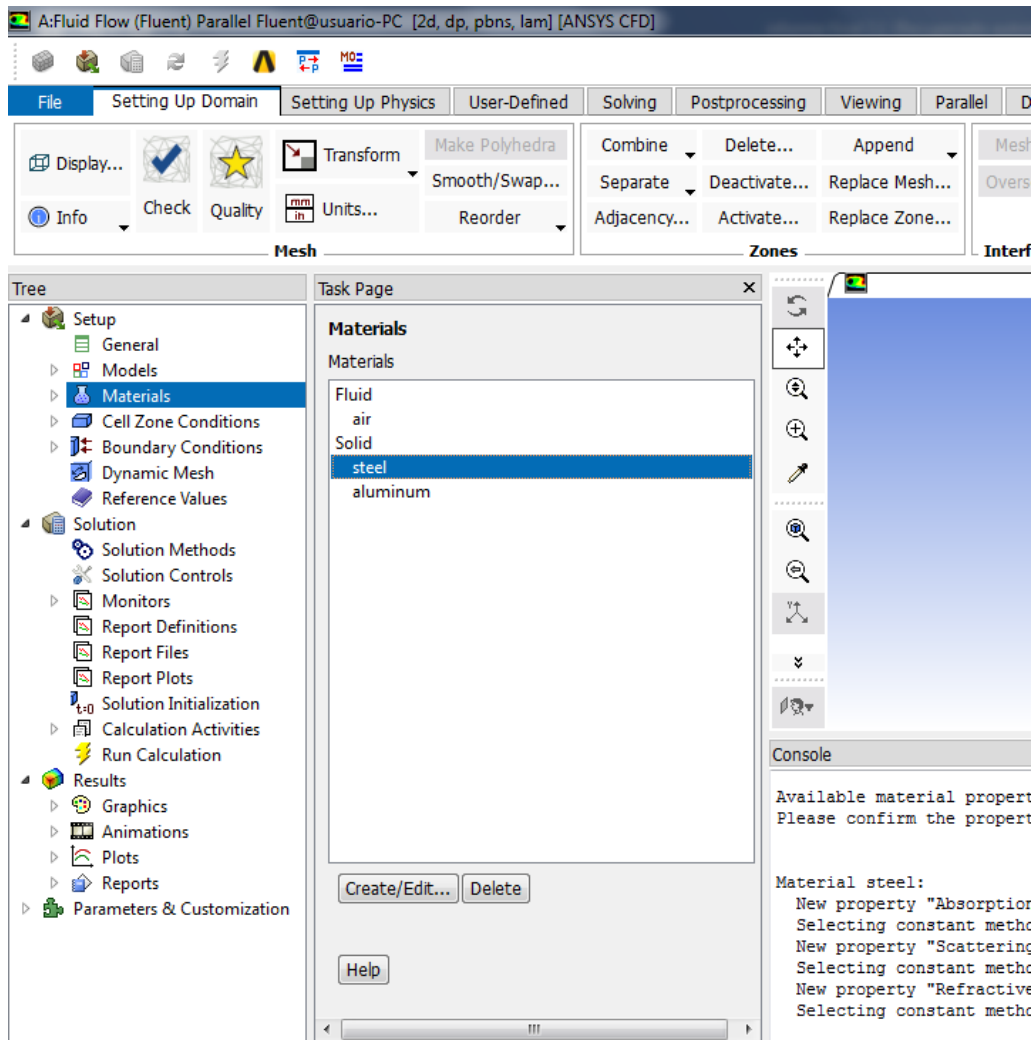


Figura 60. Visualización del nuevo material “Steel”.

Por último, se cambian algunas características de las propiedades del aire para que cambien con la temperatura; esto se realiza presionando doble click izquierdo sobre “air” y abre de nuevo la ventana “Create/Edit Materials”, donde se selecciona teoría cinética para las propiedades de Cp (calor específico), viscosidad y conductividad térmica, así como la ecuación de gas ideal para la densidad, tal como se muestra en la figura 61. Ya con estas modificaciones realizadas se presiona el botón “change/create” y se finaliza cerrando esta ventana.

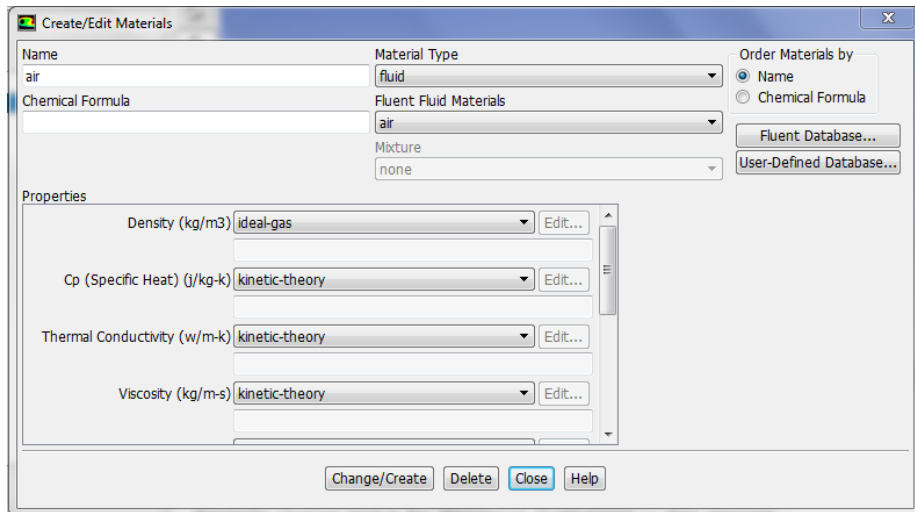


Figura 61. Características de las propiedades modificadas para el aire.

Se continua con la configuración con las condiciones de borde o “Boundary Condition”, donde se configuran las propiedades de los límites de la geometría y la presión local; en este caso 85000 Pascales (Presión atmosférica de Medellín). Se selecciona “Operating Condition” y en la ventana que aparece se ingresa 85000 Pascales en la celda “operating pressure”, tal como se muestra en las figuras 62 y 63, y se finaliza presionando OK.

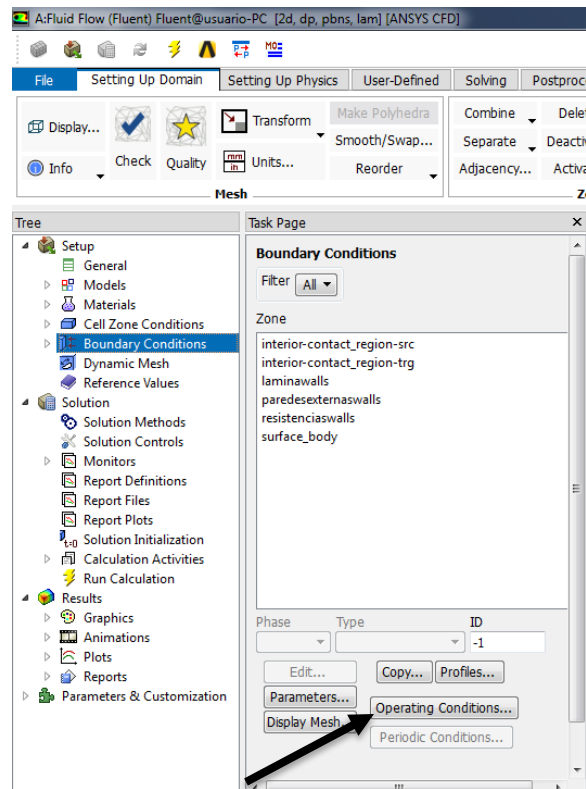


Figura 62. Ventana principal “Boundary Conditions”

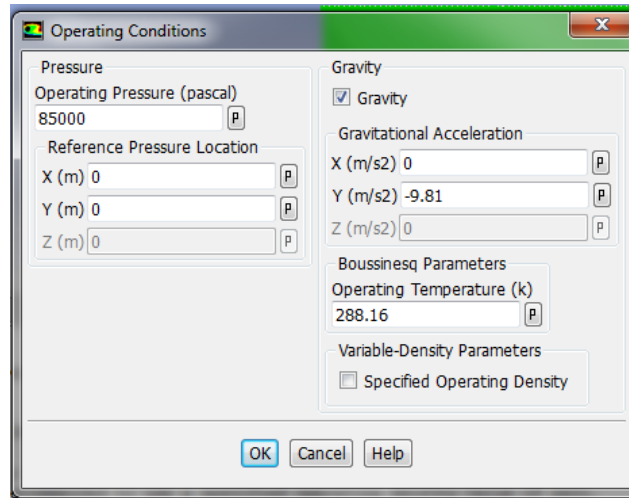


Figura 63. Ventana donde se observan las condiciones de operación.

Se continúa ingresando las propiedades de los límites de la geometría nombrados anteriormente como laminawalls, paredesexternaswalls y resistenciaswalls.

Se inicia seleccionando “Laminawalls”; en la ventana que aparece al hacer doble click sobre el nombre de la frontera se ingresa las condiciones de operación de este límite geométrico, tal como aparece en la figura 64. La simulación se realizará analizando el patrón de calentamiento de una lámina de acero la cual tiene una emisividad térmica (ϵ) de 0,17 la temperatura ambiente es de 300 Kelvin y el sistema está bajo convección natural cuyo coeficiente convectivo puede ser asumido como $5 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ (Cengel & Ghajar, 2011).

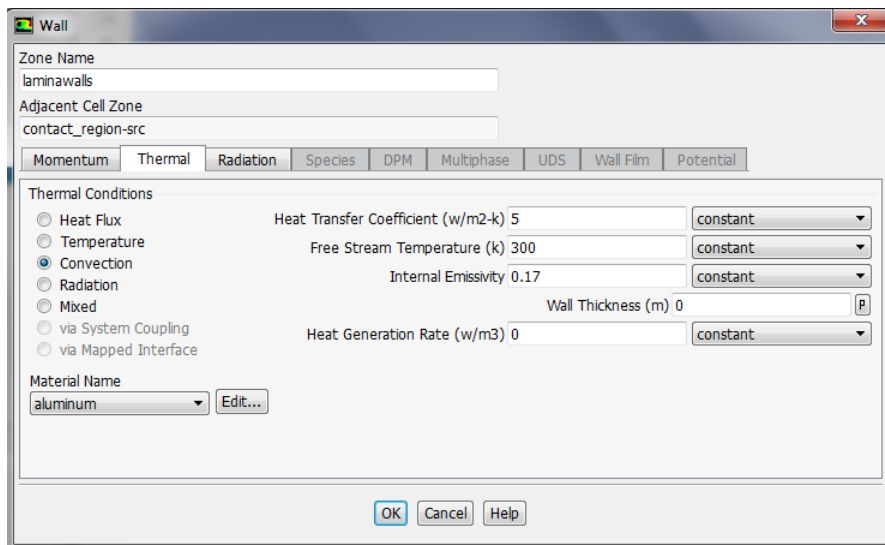


Figura 64. Configuración de “Laminawalls”.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Se continúa configurando “Paredesexternaswalls”. Esta sería el exterior de la campana la cual está construida en acero el cual tiene una emisividad térmica (ϵ) de 0,17. Se ingresa este valor y se selecciona Steel (acero) en “material name”. Las demás condiciones continúan siendo iguales, tal como se puede ver en la figura 65.

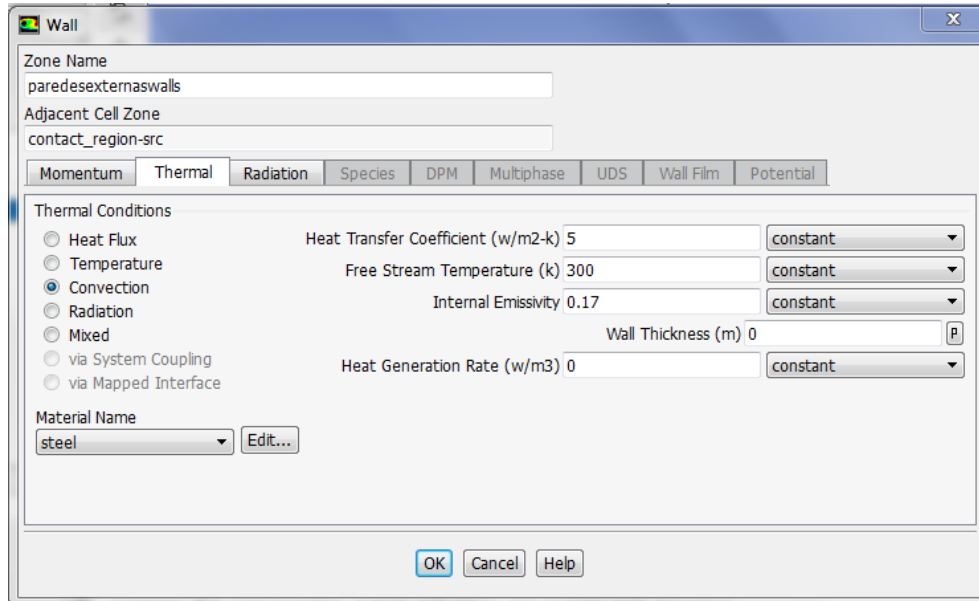


Figura 65. Configuración de “Paredesexternaswalls”

Por último, se configura “Resistenciaswalls”, el cual corresponde a las características de las resistencias. El flujo de calor de cada resistencia corresponde a $22000 \frac{w}{m^2}$, valor calculado en la sección 3.3.1. La figura 66 muestra como queda configurada esta frontera.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

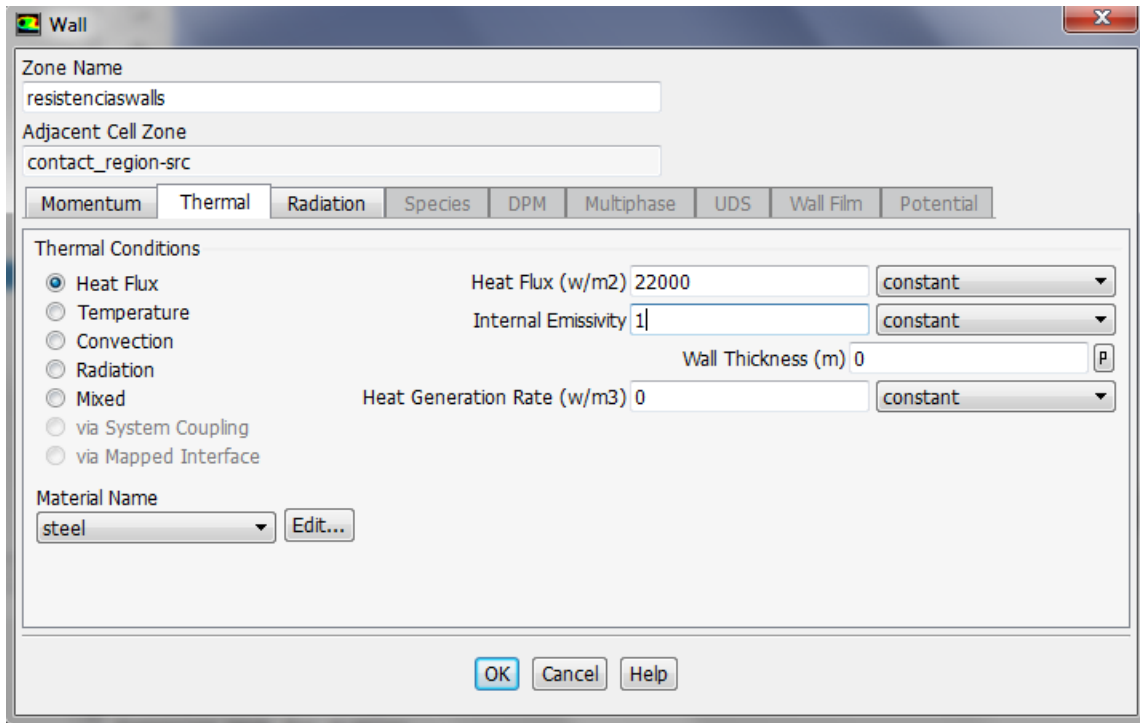


Figura 66. Configuración de “Resistenciaswalls”

3.3.6 Inicio de simulaciones “Solution”

Con esto se termina la configuración del sistema. Lo siguiente es iniciar con las simulaciones en estado estable lo cual se realiza en el apartado de “Solution” en la opción Run Calculation donde se ingresan los numero de iteraciones que deseamos realizarle al sistema. Tal como se muestra en la figura 67 se realizaron 5000 iteraciones, tras las cuales el sistema alcanza estado estable.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

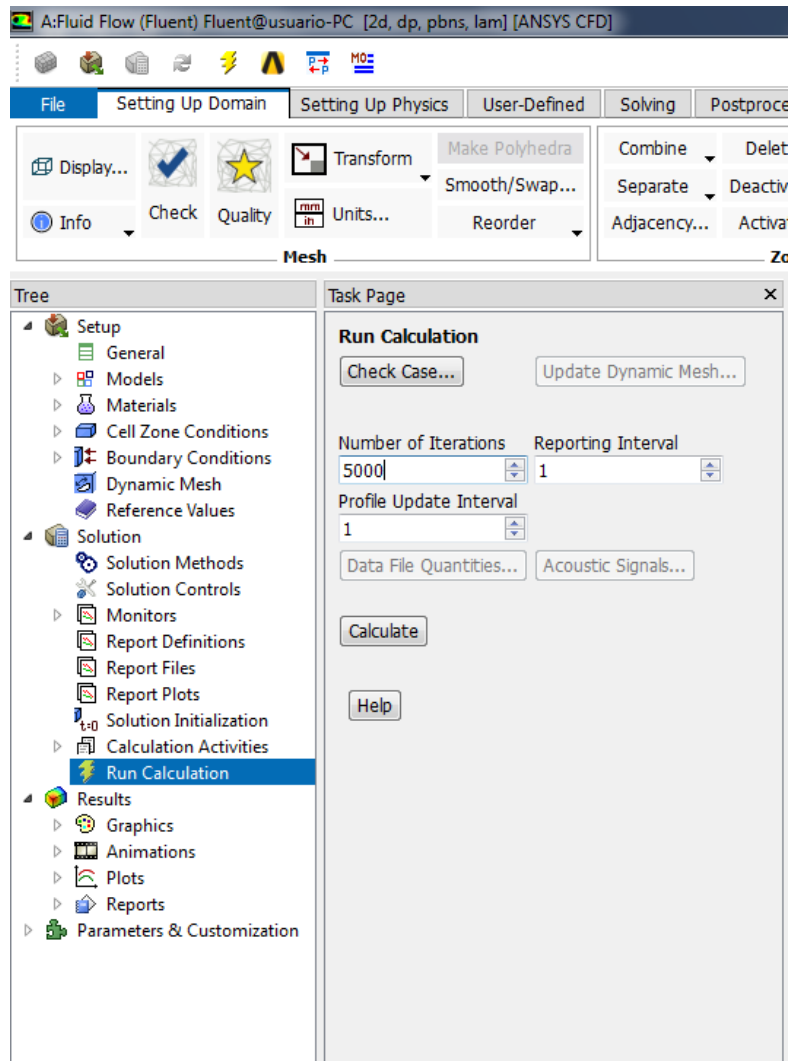


Figura 67. Configuración de las interacciones del sistema.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados de las simulaciones realizadas.

A continuación, se presenta el patrón de calentamiento de las resistencias en el tiempo (Temperatura en °C).

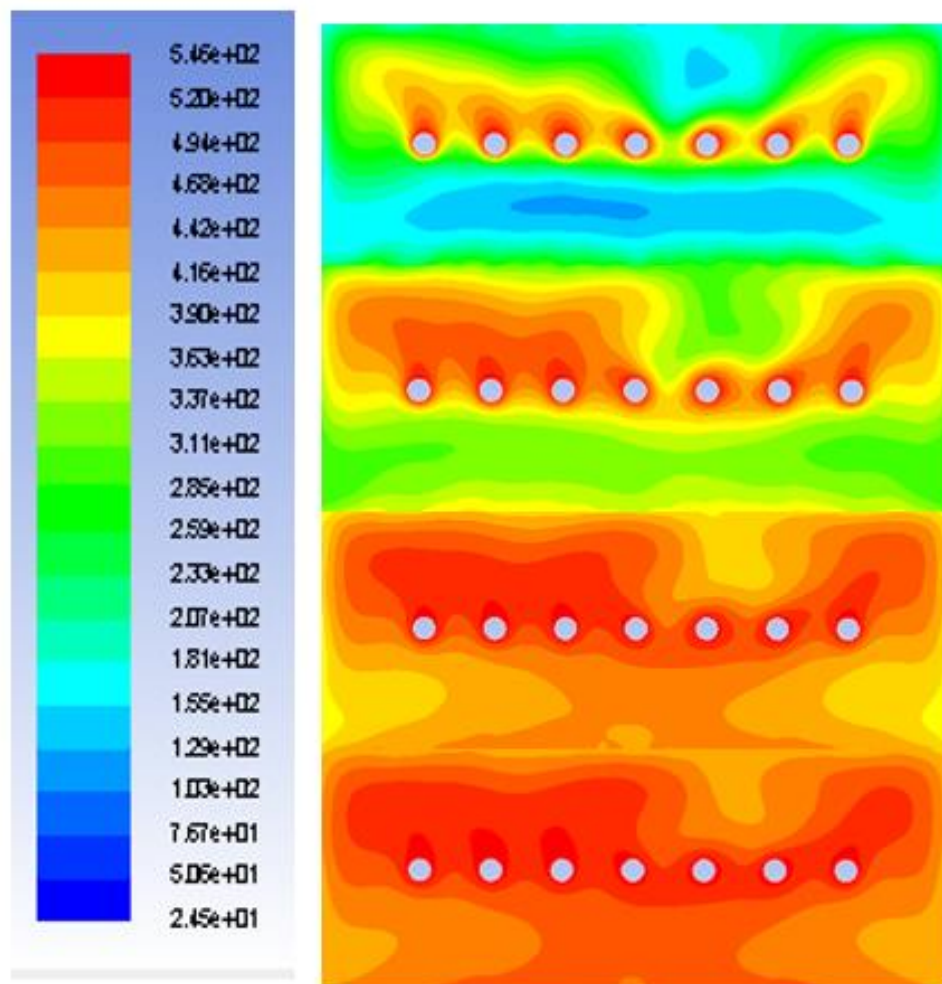


Figura 68. Patrón de calentamiento en el tiempo.

En la figura 68 se observa el patrón de calentamiento a partir de 10, 20, 40 y 60 segundos respectivamente. Se puede observar que la parte que primero tiende a calentarse es la superficie

que se encuentra por encima de las resistencias. Posteriormente se comienza a expandir el calor generado por las resistencias hasta llegarle a la lámina que se pretende termoformar.

En la figura 69 se puede observar cómo se encuentra distribuido el calor dentro de la campana después de 30 segundos de funcionamiento. En la figura 70 se observa la distribución de temperatura en la lámina en el mismo periodo de tiempo. Se observa una oscilación de la temperatura a lo largo de la lámina con diferencias de hasta 50 °C.

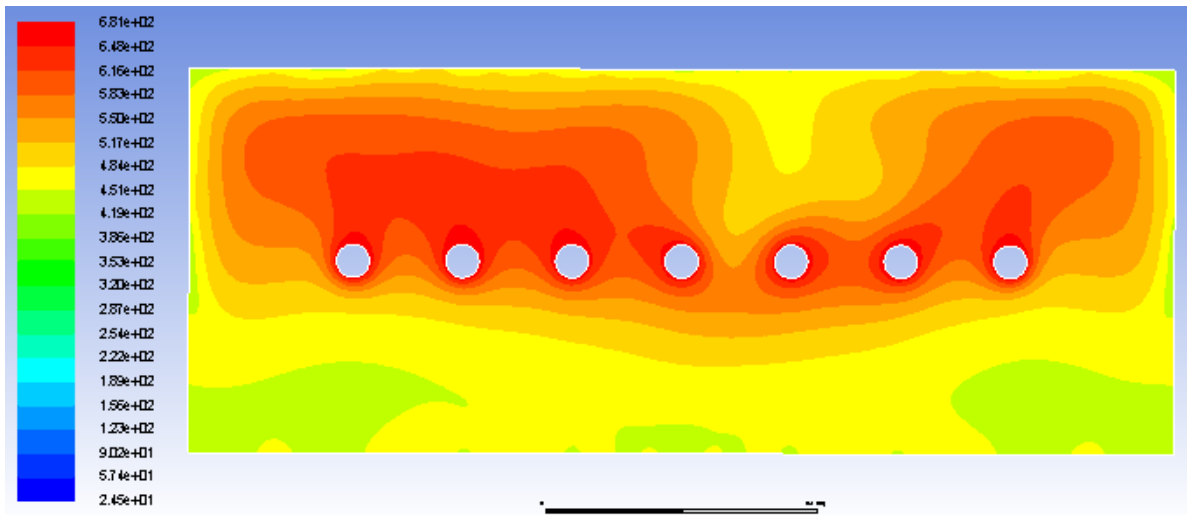


Figura 69. Distribución de calor dentro de la campana.

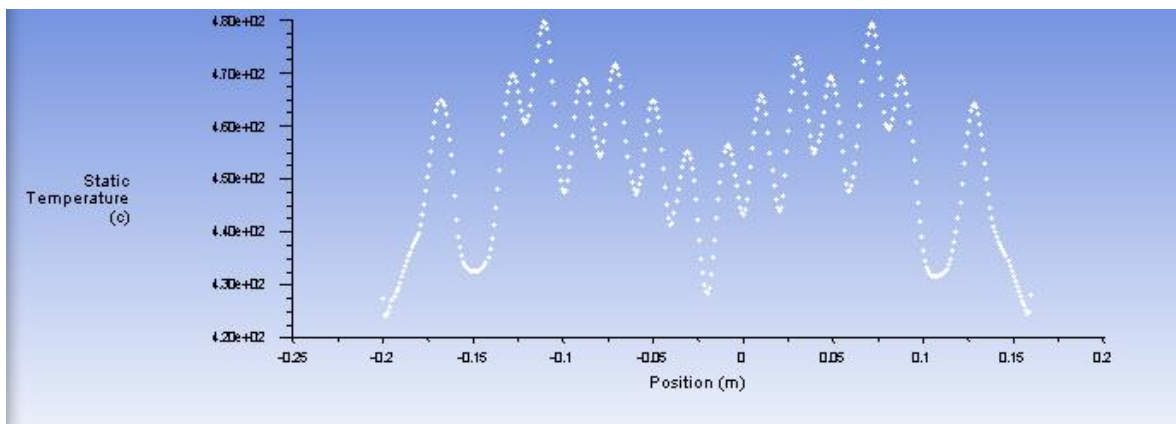


Figura 70. Distribución de temperatura a lo largo de la lámina.

Cabe aclarar que el dato de consumo de las resistencias se tomó en un punto intermedio entre el inicio del calentamiento de estas y la llegada al set point definido, en este punto la corriente es estable, ya que se encuentra en proceso de calentamiento y el PLC aún no realiza control alguno.

Caso contrario sucede cuando se alcanza la temperatura definida en el set point; en este caso el PLC comienza a regular la corriente y esta se vuelve variable lo cual dificulta tomar este dato. Lo anterior significa que esta corriente es la máxima, por tanto, la potencia calculada es la máxima y en la simulación se verán reflejadas altas temperaturas más rápidamente.

En la figura 71, se observa la transferencia de calor reportada en el sistema para cada frontera. Donde las resistencias emiten 2087.65 W en forma de radiación, las paredes externas absorben 1064.95 W y la lámina que se pretende termoformar 599.67 W. La potencia restante correspondiente a 423.02 W es la que calienta el aire circundante dentro de este asumiéndose como pérdidas. Estos datos fueron tomados después de simular el funcionamiento de la campana por 2 minutos 20 segundos.

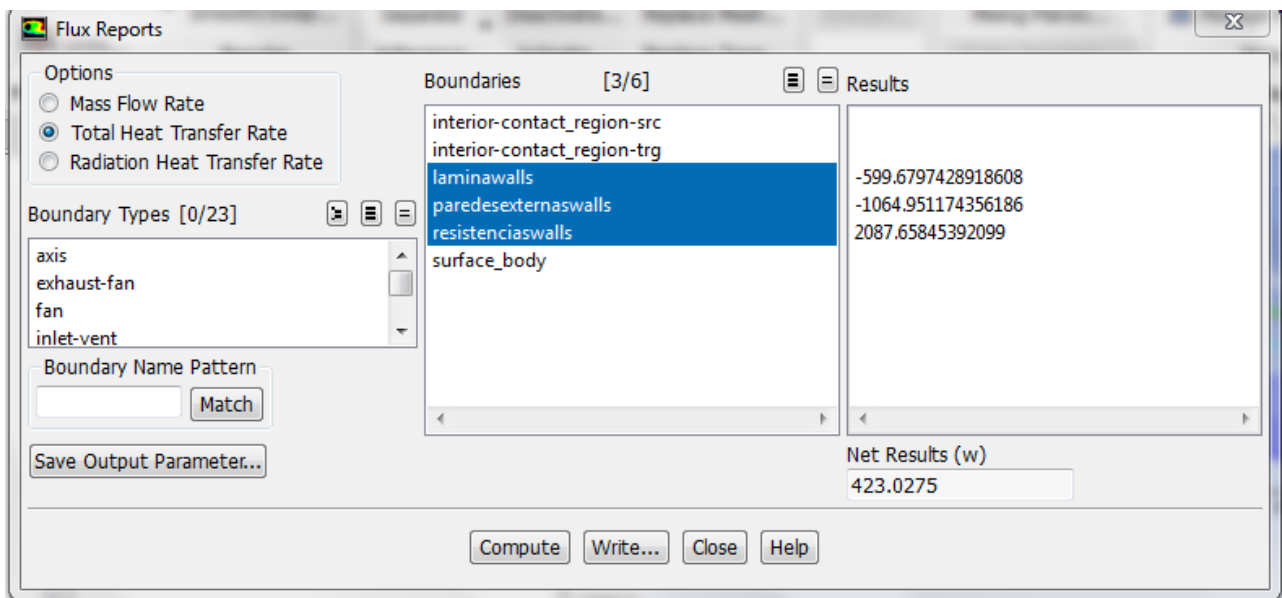


Figura 71. Transferencia de calor dentro de la campana.

A partir de los datos arrojados por el programa se puede calcular la eficiencia actual de la campana:

$$Eficiencia = \frac{\dot{Q}_{OUT}}{\dot{Q}_{IN}} \times 100\% = \frac{\dot{Q}_{Laminawalls}}{\dot{Q}_{Resistenciaswalls}} = \frac{599.67W}{2087.65W} \times 100\% = 28.7\%$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Con la configuración actual la eficiencia de la campana es del 28.7%, esto quiere decir que del total de calor generado por las resistencias solo el 28.7% llega a la lámina que se pretende termoformar.

Como se indicó anteriormente la mayor cantidad de calor la absorbe las paredes externas; esto es de esperarse ya que como se puede observar en las figuras 68 y 69 primero tiende a calentarse la parte superior de la campana. Para evitar estas pérdidas se hace necesario la instalación de un aislante.

Como resultado de estas simulaciones se evidencias dos grandes fallas en la construcción estructural de la campana:

- La primera es la distribución no uniforme del calor sobre la lámina de termoformado.
- La segunda son las pérdidas de calor por las paredes externas.

4.2 Propuestas de reformas estructurales para la campana y ubicación de las resistencias.

Luego de revisar la campana, su geometría y la ubicación de las resistencias, se definieron tres distintas configuraciones en pro de mejorar la distribución de calor que recibe la lámina que será termoformada. En los tres casos se realizaron las simulaciones con los mismos parámetros, un tiempo promedio de 40 segundos de operación de la termoformadora y una potencia de 259,6 W en cada resistencia.

4.2.1 Campana cóncava con dos resistencias adicionales.

Se modificó la geometría de la campana por una forma cóncava, con un radio de 29,8 cm, y se añadieron dos resistencias en pro de lograr una mejor distribución de calor y que el patrón de calentamiento sea más uniforme en la lámina a termoformar. En la figura 72 y 73 se pueden observar la distribución de calor dentro de la campana y la temperatura a lo largo de la lámina respectivamente.

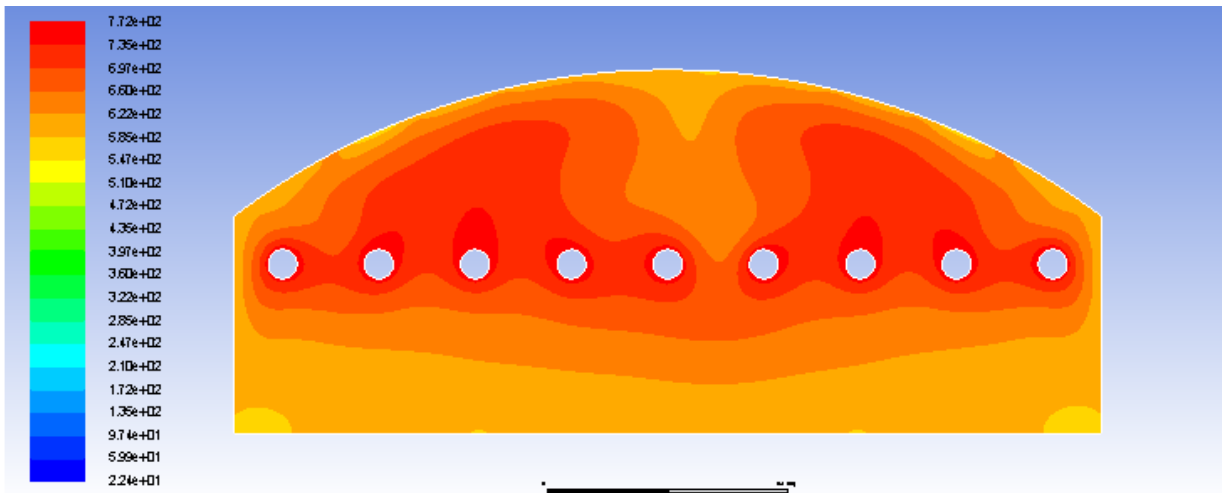


Figura 72. Distribución de calor en dentro de la campana en configuración 1.

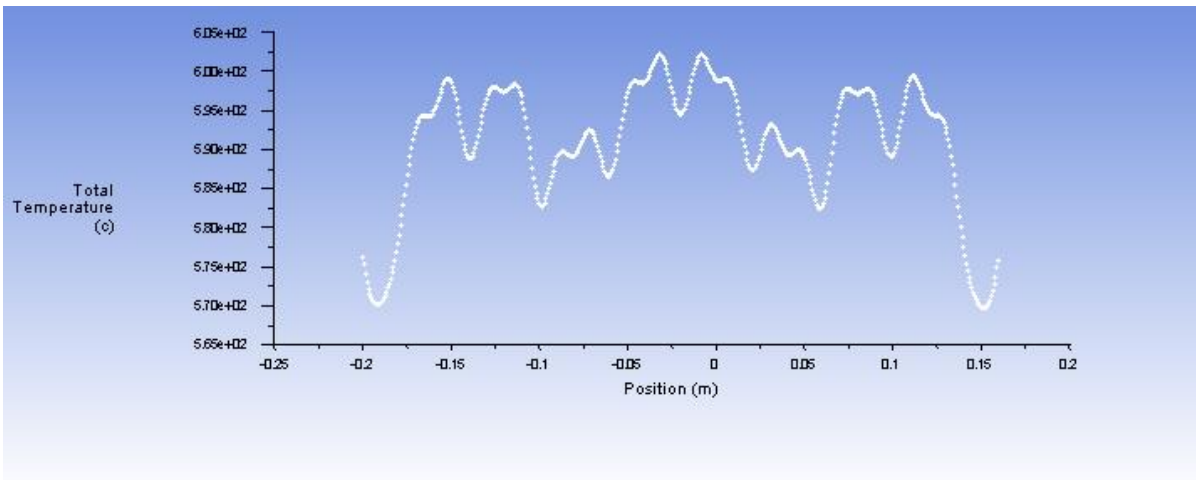


Figura 73. Distribución de temperatura a lo largo de la lámina en configuración 1.

En la figura 73 se observa una mejora con respecto a la distribución de temperatura en comparación a la configuración original. Dado que con la configuración original la temperatura tiene una variación de más o menos 50 °C mientras que con esta nueva configuración presenta una variación de más o menos 25°C. Pero este resultado no es satisfactorio ya que la variación de temperatura a lo largo de la lámina sigue siendo considerable.

4.2.2 Campana cóncava con un radio mayor y diez resistencias adicionales.

Partiendo de las simulaciones anteriores se plantearon dos cambios el primero es incrementar el número de resistencias para lograr más uniformidad en la temperatura a lo largo de la lámina y el

segundo aumentar el radio pasando de 29,8 cm a 47,5 cm. Con esto se reduce la recámara superior, ya que se nota que el calor tiende a expandirse primero a la parte superior de la campana. Los resultados de las simulaciones de esta configuración se observan en las figuras 74 y 75.

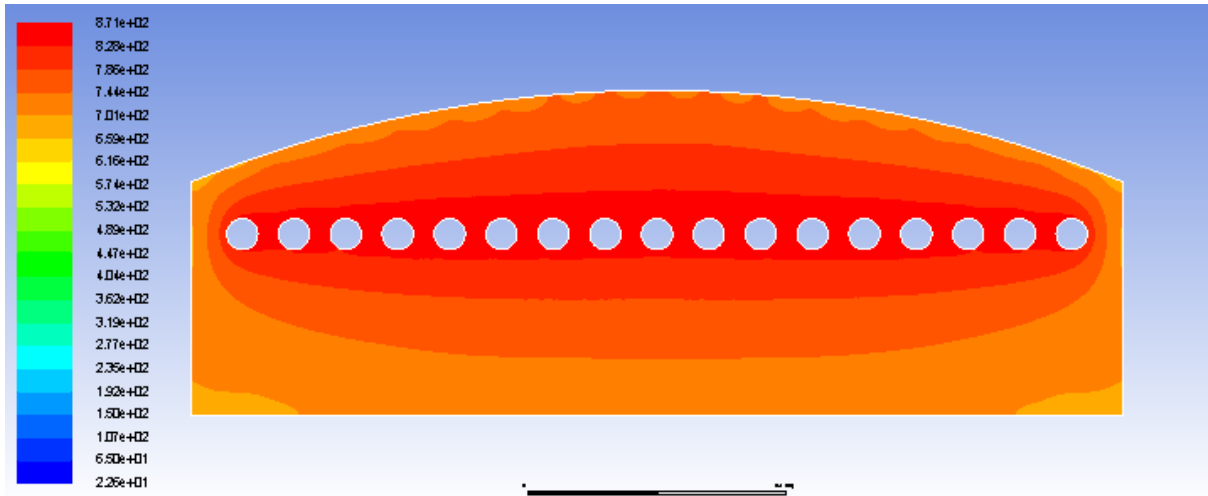


Figura 74. Distribución de calor dentro de la campana en configuración 2.

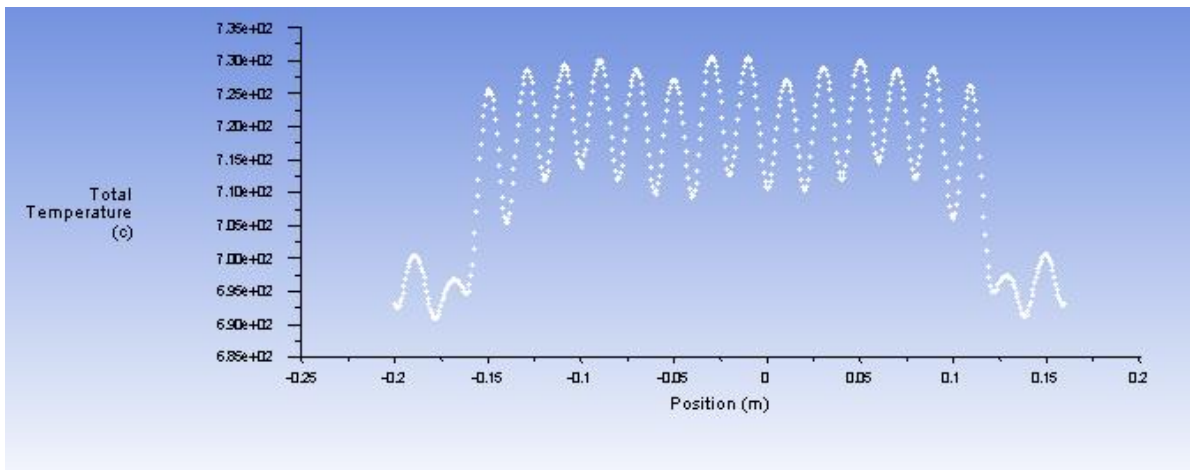


Figura 75. Distribución de temperatura a lo largo de la lámina en configuración 2.

Como se observa en la figura 75 la distribución de temperatura a lo largo de la lámina mejora considerablemente, lo que nos indica que al ubicar resistencias con menos separación entre si la temperatura que se refleja en la lámina es más uniforme. Pero la temperatura presenta una

variación de más o menos 25°C para lo cual se presenta una nueva geometría en pro de mejorar este apartado.

4.2.3 Geometría original con diez resistencias adicionales.

Tomando como referencia lo observado en las dos configuraciones anteriores se retoma la geometría original, añadir más resistencias y evaluar su comportamiento. Los resultados de las simulaciones se observan en las figuras 76 y 77.

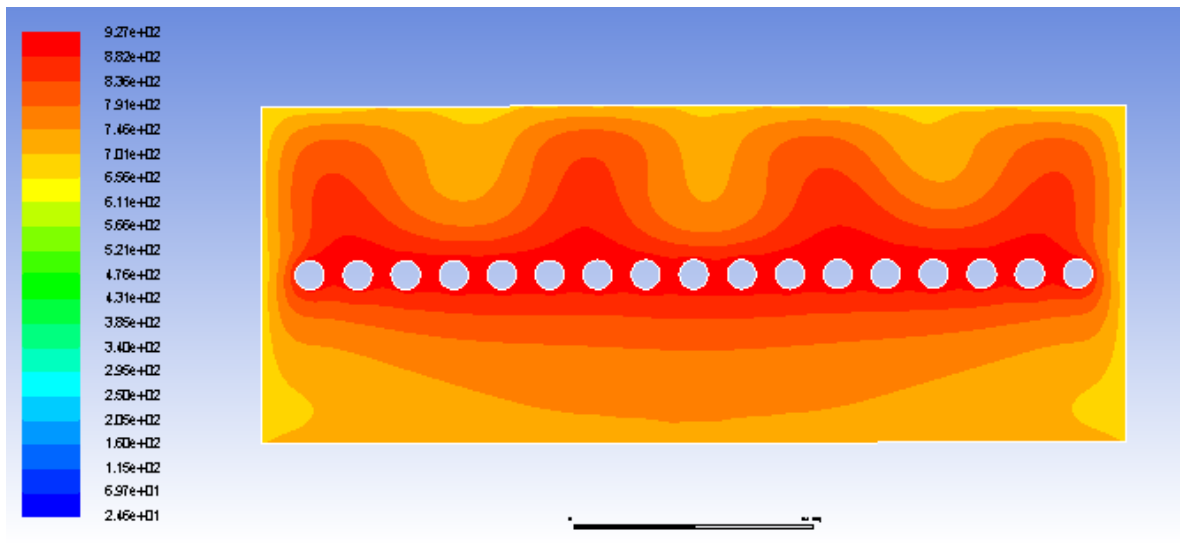


Figura 76. Distribución de calor dentro de la campana en configuración 3.

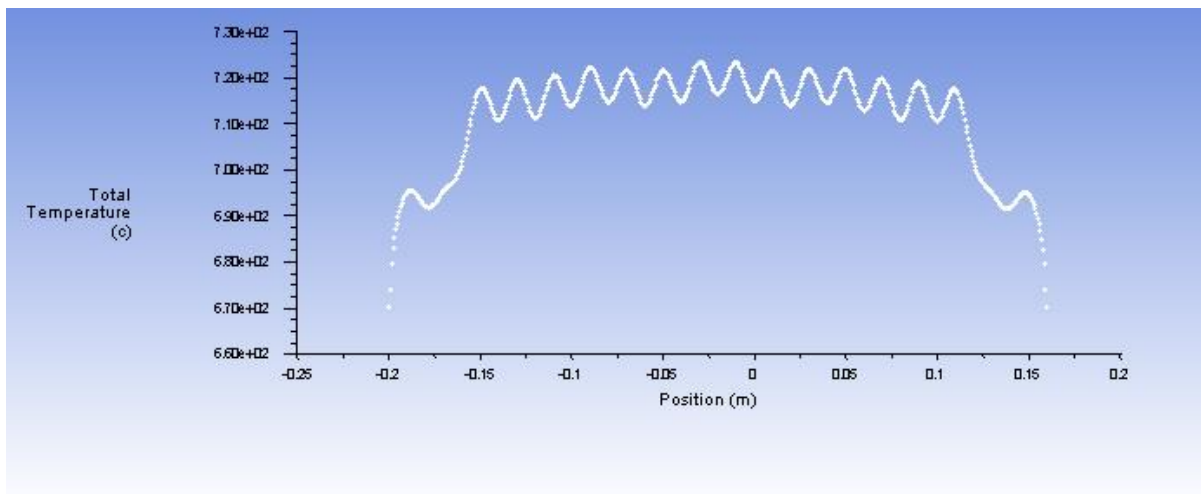


Figura 77. Distribución de temperatura a lo largo de la lámina en configuración 3.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Esta configuración es la más acertada de las tres ya que como se observa en la figura 77 la temperatura tiende a la uniformidad en la lámina, con una variación de más o menos 8 °C. Con esta configuración se demuestra la viabilidad de la geometría rectangular en cuanto al aporte en la distribución uniforme del calor dentro de la campana de termoformado. Con respecto a las resistencias y su ubicación se observa que entre más cerca estén las resistencias mejor será la uniformidad de temperatura que se refleja en la lámina.

Por tanto, queda demostrado que la geometría no es necesario modificarla ya que la existente, basados en las simulaciones realizadas, funcionan correctamente. Con respecto a las resistencias se deben ubicar 17 resistencias en total de manera simétrica dentro de la campana para lograr la distribución de calor mostrado en la figura 77.

4.3 Propuesta de aislante para mejorar transferencia de calor hacia el exterior.

A partir de la fórmula de transferencia de conductividad se definirá el espesor de la lámina del aislante térmico.

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx}$$

Despejamos el dx el cual está definido como el espesor del aislante necesario:

$$dx = -kA_{total} \frac{dT}{\dot{Q}_{cond}}$$

Definimos el dT a partir de la temperatura medida en parte externa de la campana $T1$ y la temperatura ambiente del recinto $T2$

$$dT = (T2 - T1) \quad T1 = 111^\circ \quad T2 = 25^\circ$$

$$dT = (25^\circ - 111^\circ) = -86^\circ$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Definición del área de la campana:

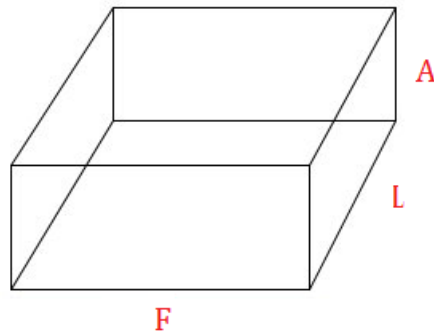


Figura 78. Diagrama en 3d de la campana.

F: 0,36 m

L: 0,36 m

A: 0,14m

Se hallan las áreas de cada cara, excepto la inferior que no hace parte de la campana, y se suman para hallar el área total.

$$A_{total} = (F \times A \times 2) + (L \times A \times 2) + (F \times L)$$

$$A_{total} = (0,36 \times 0,14 \times 2) m^2 + (0,36 \times 0,14 \times 2) m^2 + (0,36 \times 0,36) m^2$$

$$A_{total} = 0,3312 m^2$$

Definimos el \dot{Q}_{max} emitido por la campana:

$$\dot{Q}_{max} = 1064,95 W \text{ (Dato tomado de la figura 71)}$$

Se define como aislante térmico la manta cerámica por sus condiciones de eficiencia a altas temperaturas y se selecciona su coeficiente de conductividad de la siguiente ficha técnica:


 Expertos en Ingeniería de Aislamientos

Térmica
Acústica
Cortafuego
Cubiertas y Fachadas
Puertas





Manta Cerámica

- Industrial
- Institucional
- Naval
- Productos a la medida
- Catálogo
- Casos Exitosos



ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Conductividad térmica	0,26 BTU.Plg/ pie ² .hr.°F
Diámetro promedio de la fibra	2,8 micrones
Temperatura de operación	Hasta 1260°C
Punto de fusión	1600°C

Figura 79. Ficha técnica de conductividad térmica para el aislante seleccionado (calorcol, 2018)

Conversión de unidades del sistema americano al sistema ingles

$$k = \frac{0,26 \text{ BTU.Plg}}{\text{pie}^2.\text{hr.}^\circ\text{F}} \times \frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ Plg}}$$

$$k = \frac{0,02167 \frac{\text{BTU}}{\text{pie}.\text{hr.}^\circ\text{F}}}{0.5778}$$

$$k = 0,0375 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

Nota: este factor de conversión fue tomado del libro transferencia de calor de Cengel y Ghajar (Cengel & Ghajar, 2011)

Después de recolectar la información de cada variable se halla el espesor del material.

$$dx = -kA_{total} \frac{dT}{\dot{Q}_{cond}}$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$dx = -0,0375 \frac{W}{m^{\circ}C} \times 0,3312m^2 \frac{-86^{\circ}C}{1064,95W}$$

$$dx = 0,001002m$$

$$dx = 1,002mm$$

Se instala una manta con un grosor de mínimo 1,002mm. Este es el espesor necesario para evitar que en la superficie exterior de la campana se vea reflejada la misma temperatura del interior. Dado que la campana está construida en acero inoxidable, paredes con un grosor de 1mm y este material es un buen conductor de calor, significa que no ofrece ninguna resistencia al paso de calor hacia el exterior de la campana y se pueden producir accidentes por quemaduras.

4.3.1 Cotización de manta cerámica en calorcol.

Según información brindada por calorcol empresa experta en el tema de aislantes térmicos para equipos industriales, ya que ellos tienen estandarizados sus productos, las dimensiones mínimas que ofrecen son de:

- Un espesor de 1 pulgada.
- Medida de ancho 0,61 m
- Medida de largo 7,2m
- Área total 4,39 metros cuadrados.

El costo total del aislante para la campana sería de 113250 pesos + IVA.

Teniendo en cuenta las dimensiones que ofrecen en calorcol se calculan las pérdidas de calor nuevamente:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx}$$

$$\dot{Q}_{cond} = -0,0375 \frac{W}{m^{\circ}C} \times 0,3312m^2 \times \frac{-86^{\circ}C}{0,0254m}$$

$$\dot{Q}_{cond} = 42,05W$$

Con el dato anterior se calcula la nueva eficiencia.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$Eficiencia = \frac{\dot{Q}_{OUT}}{\dot{Q}_{IN}} \times 100\% = \frac{\dot{Q}_{Laminawalls}}{\dot{Q}_{Resistenciawalls} - \dot{Q}_{Ahorro}} =$$

$$\frac{599.67W}{(2087.65W - (1064.95W - 42.05W))} \times 100\% = 56.32\%$$

En este caso, al instalar la manta aislante se puede subir notablemente la eficiencia térmica del sistema, manteniendo al mismo tiempo una temperatura superficial externa segura.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1 Conclusiones

Se realizó un estudio completo de todos los componentes de la termoformadora dando claridad al proceso de termoformado que se efectúa en la máquina, mostrando el manejo y la función de cada instrumento insertado en el equipo. Cabe resaltar su automatización además del enlace de múltiples subprocesos electromecánicos que hacen del equipo un híbrido completo para la concepción de un producto termoformado.

Tuvimos como punto de partida la toma de datos dimensionales de la campana y mediciones de variables de funcionamiento enfocadas en hallar la potencia de cada resistencia, ya que en la simulación era necesario ingresar las dimensiones de la campana y el flujo de calor de cada resistencia.

La profundidad del análisis térmico nos permitió hacer una inmersión en el programa ANSYS FLUENT para posteriormente exponer una guía de introducción al simulador con el fin de explicar el paso a paso de cómo es configurada la simulación.

Se observó que el comportamiento del equipo en operación, según los datos trasladados a ANSYS FLUENT tiene una distribución de la temperatura a lo largo de la lámina con oscilaciones de hasta 50°C lo que indicó un patrón de calentamiento inestable.

Buscando obtener el mayor desempeño posible en el proceso de termoformado se realizaron pruebas con diferentes diseños de campanas como alternativas de mejora, obteniendo avances significativos en el patrón de calentamiento, logrando disminuir la brecha del rango de temperatura. Con la renovación de cada diseño se concluye que el mejor patrón de calentamiento posible, se logra con el diseño original aumentando el número de resistencias pero con la diferencia de disminuir el tiempo de calentamiento y con un rango de temperatura muy uniforme ya que se logra una disminución de tolerancia con picos no mayores a 8°C, además de esto con la implementación

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

de la manta cerámica como aislante y el patrón de calentamiento logrado se puede pasar de una eficiencia de 28.7% a 53,4% .

5.2 Recomendaciones y trabajo futuro

Se recomienda realizar un estudio termográfico periódicamente para comprobar si se producen pérdidas de temperatura o sobrecalentamientos, además es práctico para comprobar si se producen pérdidas de aislamiento o resistencias quemadas, lo que permitir tener un control exhaustivo de la temperatura de los elementos de la campana y en caso de que se produzca una anomalía, encontrar el lugar exacto donde se ha producido.

Se recomienda implementar un plan de mantenimiento que incluya todos los sistemas electromecánicos que componen la termoformadora entre los que se destacan los ciclos de trabajo de la bomba de vacío, el compresor sistema neumático y todo lo relacionado con el control eléctrico.

Se recomienda la implementación de un nuevo sistema de control realizando una reprogramación y cableado de cada resistencia con señales análogas o digitales que permita la verificación del funcionamiento de cada una de estas, generando alarmas en el momento de una falla en la pantalla con el fin de tener el proceso mucho más controlado. Adicional realizar un estudio del consumo eléctrico de la campana y así analizar cómo se puede mejorar en este aspecto.


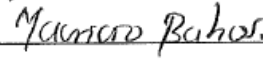
	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

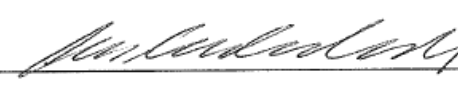
- Alcántara, V. (20 de 11 de 2017). *Tecnología del plástico*. Obtenido de <http://www.plastico.com/temas/Crece-la-demanda-de-poliamida-en-la-industria-automotriz+109392>
- ANSYS, Inc. (2013). *ANSYS Fluent theory guide*. Canonsburg: ANSYS, Inc.
- calorcol. (11 de 3 de 2018). Obtenido de <http://calorcol.com>
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa - Fundamentos y aplicaciones*. Mexico: McGraw Hill.
- Conos viales LTDA. (21 de 11 de 2017). Obtenido de <http://www.conosviales.com.co>
- Empaques Tregtar. (22 de 11 de 2017). Obtenido de <http://www.empaquestregtar.com/termoformado.html>
- España, J. D. (2005). *Termoformadora al vacío alimentada por rodillo. Diseño y Construcción*. Bucaramanga: Universidad industrial de Santander .
- Méndez Martínez, F. Y. (2012). *Análisis térmico para una prensa de termoformado*. México DF: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mendez, F. (2012). *Análisis térmico de una placa para prensa de termoformado*. Mexico D.F: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Plastiglas de Mexico S.A. (s.f.). *Manual técnico de termoformado*. Mexico: Plastiglas de Mexico S.A.
- Ravisa. (22 de 11 de 2017). Obtenido de <http://domosravisa.blogspot.com.co/2013/07/instalaciones-con-acrilico.html>
- Tecnología del plástico. (17 de 11 de 2017). Obtenido de <http://www.plastico.com/temas/Desarrollan-envases-biodegradables-para-exportacion-de-fruta+98613>
- Termoformadoras Osorno. (16 de 11 de 2017). *Maquinas Termoformadoras Osorno*. Obtenido de <http://empaquesytermoformados.com/maquinas-para-termoformado.html>
- Termoformados Osorno. (16 de 11 de 2017). *Termoformados Osorno*. Obtenido de <http://empaquesytermoformados.com/termoformados/moldes/molde-para-chocolates-1.jpg>

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES

FIRMA ASESOR



INFORME FINAL TRABAJO
 DE GRADO APROBADO

5:00 PM FECHA ENTREGA: 16-08-2018

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO____ ACEPTADO____ ACEPTADO CON MODIFICACIONES____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____