CENTRO DE INGENIERÍA Y DESARROLLO INDUSTRIAL

CONACYT CIDESI
CENTRO DE INGENIERÍA Y DESARROLLO INDUSTRIAL
CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN TECNOLÓGICA
Departamento de Formación Académica Posgrado

ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE FALLAS DE FLUJO Y TRANSFERENCIA DE CALOR DE UN HORNO DE NANOTUBOS DE CARBONO

PROYECTO INDUSTRIAL TERMINAL

006948

QUE PARA OBTENER LA ESPECIALIDAD DE

TECNÓLOGO EN MECATRÓNICA

PRESENTA:

LEONEL REYES OCHOA

Dr. Luis Del Llano

TUTOR: DR. LUIS DEL LLANO VIZCAYA

QUERÉTARO, QUERÉTARO SEPTIEMBRE, 2012

Índice.

Resumen....2
Lista de figuras....3
Lista de tablas....3

1. Introducción....4
   1.1 Justificación....4
   1.2 Objetivos....5

2. Antecedentes....6
   2.1 Nanotubos de carbono....6
   2.2 Descripción del horno para síntesis de NTC....8

3. Metodología y desarrollo....11
   3.1 Configuración de parámetros del proyecto....11
      Definición del dominio computacional....12
      Subdominios....12
      Materiales....13
      Condiciones de frontera....13
      Definición de superficies radiativas....15
      Especificación de metas....16
   3.2 Definición del problema....16
      Fuentes de calor....16

4. Resultados....19
   4.1 Simulaciones: Temperatura de fluido....20
   4.2 Configuración de parámetros del proyecto....24

5. Conclusiones....28

Trabajo a futuro....29
Referencias. 30

Resumen.

Como proyecto industrial terminal de la especialidad de tecnólogo en mecatrónica impartida en CIDESI, se presenta en este trabajo, el análisis y simulación de fallas de flujo y transferencia de calor de un horno de nanotubos de carbono con el objetivo de observar la variación de homogeneidad en la distribución de calor del hogar del horno mediante el uso del software de ingeniería, Flow Simulation-SolidWorks, describiendo los criterios que se necesitaron conocer para definir los parámetros de simulación, el problema propuesto y los resultados obtenidos.

Los NTC se sintetizan al elevar el ferroceno a una temperatura entre 880°C y 890°C. Este ferroceno es inyectado junto con un gas inerte en una serie de tubos de cuarzo con el fin de nebulizarlos y así tener condiciones de vacío inerte necesarias para el proceso. Los diez tubos de cuarzo ubicados en el hogar del horno son calentados a través de 12 lámparas de halógeno de 3000 W. El calor dentro del horno depende también de los reflectores de aluminio pulido que rodean a las lámparas y los cuales poseen una curva característica para optimizar la distribución del calor radiado hacia el centro del horno.

Conociendo estos parámetros, se realizaron pruebas piloto para conocer la temperatura que se obtenía en los tubos de cuarzo mediante las simulaciones. Esta temperatura difiere a los datos experimentales debido a la generalización que se maneja en el software utilizado y con base en los resultados piloto se evaluaron 6 diferentes casos críticos, manejando diferentes posiciones para un par de lámparas fundidas en el horno, sin embargo, fungieron de referencia para encontrar la temperatura adecuada para la síntesis de nanotubos de carbono dentro de las simulaciones y a partir de esto, analizar la distribución de calor en el horno.

Posteriormente, se analizó la distribución de calor y la temperatura de fluidos y de sólidos dentro del horno para los distintos casos, revelando que a pesar de existir una relación directa entre la temperatura y la distancia a las lámparas fundidas, se presenta un patrón diferente en la temperatura de sólidos y fluidos.

Lista de figuras.

Fig. 2.1. Proceso CVD.

Fig. 2.2. Componentes principales del horno.

Fig. 2.3. Componentes principales del horno (vista isométrica).

Fig. 2.4. Localización de termopares en el horno para señales de entrada y salida en los controladores.

Fig. 2.5. Respuesta del control de la temperatura en los tubos de cuarzo del horno.

Fig. 3.1. Condición de frontera: Flujo de volumen de entrada en reflectores.

Fig. 3.2. Condición de frontera: Presión estática en reflectores.

Fig. 3.3. Condición de frontera: Presión estática en apertura donde se ubican los tubos de cuarzo.

Fig. 3.4. Puntos indicadores de temperatura.

Fig. 4.1. Temperatura Fluido Caso 1: Lámparas fundidas sin separación.

Fig. 4.2. Temperatura Fluido Caso 2: Lámparas fundidas con 1 lámpara de separación.

Fig. 4.3. Temperatura Fluido Caso 3: Lámparas fundidas con 2 lámparas de separación.

Fig. 4.4. Temperatura Fluido Caso 4: Lámparas fundidas con 3 lámparas de separación.

Fig. 4.5. Temperatura Fluido Caso 5: Lámparas fundidas con 4 lámparas de separación.

Fig. 4.6. Temperatura Fluido Caso 6: Lámparas fundidas con 5 lámparas de separación.

Fig. 4.7. Temperatura Sólido Caso 1: Lámparas fundidas sin separación.

Fig. 4.8. Temperatura Sólido Caso 2: Lámparas fundidas con 1 lámpara de separación.

Fig. 4.9. Temperatura Sólido Caso 3: Lámparas fundidas con 2 lámparas de separación.

Fig. 4.10. Temperatura Sólido Caso 4: Lámparas fundidas con 3 lámparas de separación.

Fig. 4.11. Temperatura Sólido Caso 5: Lámparas fundidas con 4 lámparas de separación.

Fig. 4.12. Temperatura Sólido Caso 6: Lámparas fundidas con 5 lámparas de separación.

Lista de tablas.

Tabla 3.1. Configuración general de parámetros para la simulación.

Tabla 3.2. Dominio computacional.

Tabla 3.3. Materiales.

Tabla 3.4. Condiciones de frontera del sistema.

Tabla 3.5. Definición de superficies radiativas.

Tabla 3.6. Temperatura de puntos indicadores.

Tabla 4.1. Temperatura en puntos indicadores para los 6 casos de lámparas fundidas.

Capítulo 1

Introducción

El presente trabajo como parte del Proyecto Industrial Terminal de la especialidad de tecnólogo en mecatrónica impartida en el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) tiene la finalidad de poner en práctica los conocimientos adquiridos incorporándose al seguimiento de un proyecto previo realizado por el área de Investigación y Posgrado y liderado por el Dr. Luis del Llano Vizcaya, en el cual se diseñó y construyó un horno para síntesis de nanotubos de carbono (NTC) para la Incubadora de Nanotecnología en el estado de Nuevo León.

En este trabajo se presentará el análisis y simulación de fallas de flujo y transferencia de calor de dicho horno de nanotubos de carbono realizado con ayuda del software de ingeniería, Flow Simulation-SolidWorks, los criterios que se necesitaron conocer para definir los parámetros de simulación, el problema propuesto y los resultados obtenidos.

En el capítulo 2 se presentará un breve contexto teórico con respecto a los nanotubos de carbono, su definición, origen, propiedades, aplicaciones y el método de síntesis que resulta de interés para este trabajo. También se presentará una descripción del horno de nanotubos de carbono analizado en este trabajo, sus componentes principales, cómo funciona y cómo se lleva a cabo el control.

En el capítulo 3 se describirá la metodología seguida para el desarrollo del proyecto. Comenzando por la definición de los parámetros generales en la configuración de las simulaciones realizadas, seguido por la descripción de los diferentes casos de interés para el análisis de flujo y transferencia de calor suponiendo dos lámparas fundidas en distintas ubicaciones y finalmente la especificación de puntos indicadores de calor para comparar la temperatura de los tubos de cuarzo durante los diferentes casos.

En el capítulo 4 se expondrán los resultados obtenidos mostrando la distribución de temperatura para cada caso, tanto para fluidos como para sólidos dentro del horno. Finalmente en el capítulo 5, se puntualizarán las conclusiones del trabajo.

1.1 Justificación.

Dadas las propiedades únicas que presentan los nanotubos de carbono, se han encontrado muchos campos de aplicación de estos materiales. Debido a esto, resulta de interés el área de oportunidad que ofrece la producción y desarrollo de estos elementos y como muestra de los esfuerzos que se están realizando actualmente para conseguirlo, CIDESI desarrolló con un horno de síntesis de NTC producidos mediante el método de deposición química en fase de vapor.

Experimentalmente el horno de NTC ha mostrado muy buenos resultados y con base en ello se decidió darle seguimiento a dicho trabajo mediante este proyecto industrial terminal, aplicando herramientas de simulación y análisis de flujo y transferencia de calor para de esta forma contribuir y aportar con información útil en esta área del conocimiento.

El proyecto está acotado a las simulaciones para el flujo y transferencia de calor dentro del horno para observar la distribución y uniformidad de la temperatura suponiendo la falla de dos lámparas dentro del sistema y presentando diferentes casos posibles.

1.2 Objetivos.

El objetivo general de este trabajo es observar la variación de homogeneidad en la distribución de calor del hogar de un horno de nanotubos de carbono mediante el análisis del flujo y transferencia de calor en éste.

Los objetivos particulares son los siguientes:

- Realizar una breve revisión bibliográfica en torno a las aplicaciones de los nanotubos de carbono, sus propiedades, aplicaciones y métodos de síntesis.
- Tener una capacitación introductoria al paquete Flow Simulation del software SolidWorks para la simulación, análisis de flujo y transferencia de calor.
- Simular diferentes casos en el horno bajo la suposición de tener dos lámparas fuera de operación y comparar la distribución de calor.

006948

Capítulo 2

Antecedentes

Como parte de los antecedentes para la mejor comprensión de este trabajo, se presenta un breve contexto teórico de los nanotubos de carbono abarcando su definición, clasificación, propiedades y aplicaciones. Asimismo, se describe el horno para la síntesis de nanotubos de carbono que se analizará en los siguientes capítulos.

2.1 Nanotubos de carbono.

Los nanotubos de carbono es una forma alotrópica del carbono que posee estructuras tubulares cuyo diámetro es del orden de nanómetros. Los NTC fueron descubiertos en 1991 por el ingeniero japonés Sumio Iijima. Según su estructura, los NTC pueden dividirse en dos principales clasificaciones:

Los nanotubos de carbono de pared simple (SWCNT – Single Wall Carbon Nanotubes) están constituidos por átomos de carbono dispuestos en una red hexagonal cilíndrica, con una estructura similar a la de una lámina de grafito enrollada sobre sí misma.

Los nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT – Multiwall Carbon Nanotubes) presentan una estructura que contiene a varios SWCNT con diferentes diámetros concéntricos entre sí.

Dada la elevada relación entre la longitud y el diámetro de la estructura en los NTC, estos presentan un gran número de propiedades físicas que los convierten en un campo de interés muy importante tanto para la ciencia como para la industria.

Por todo lo anterior, los NTC poseen excepcionales propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas, químicas y ópticas que los hacen potencialmente útiles en una gama de aplicaciones que va desde la ciencia y tecnología de materiales, el sector energético y hasta la fotónica. En seguida se describen algunos ejemplos de aplicaciones en diferentes áreas tanto científicas como comerciales.

Materiales. Los materiales nano-reforzados con NTC se consiguen dispersando éstos en una matriz de otro material. Se obtienen así nuevos materiales con

interesantes propiedades mecánicas, eléctricas, electro-reológicas, hidrófobas, ignífugas, ópticas, químicas y térmicas. Entre estos materiales destacan los de uso estructural, que aprovechan las propiedades mecánicas de los nanotubos de carbono dando lugar a compuestos ligeros y con gran resistencia mecánica.

Electrónica. Se emplean para la fabricación de nanocircuitos (interconectores, diodos, transistores, interruptores), emisores de campo (pantallas planas, lámparas, tubos luminiscentes, tubos de rayos catódicos, litografía por haz de electrones, fuentes de rayos X, amplificadores de microondas, tubos de descarga de gas en redes de telecomunicaciones, microscopios electrónicos, nanotriodos, betatrones), filtros RF, memorias, optoelectrónica, grabado y espintrónica.

Sensores. En el desarrollo de sensores químicos/biológicos, mecánicos, térmicos, electromagnéticos y de emisión de campo.

Biotecnología y química. Se utiliza en adsorción y absorción, catálisis, electrosíntesis y medicina.

Energía. En esta área se usa tanto para almacenamiento (de hidrógeno y otros gases, supercondensadores), como para conversión (pilas de combustible, baterías de ión litio, celdas solares).

Mecánica. Para el desarrollo de actuadores, amortiguadores, dispositivos para fluidos, tribología, NEMS y MEMS.

Instrumentación científica. En la fabricación de puntas de sonda de microscopios de sonda de barrido, así como para las membranas de contadores coulter.

Fotónica. En filtros pasa alto para la luz, espejos absorbentes saturables para bloqueadores de modo pasivo en emisores de pulsos láser, supresores de ruido e interruptores.

A partir de su descubrimiento, los distintos métodos de síntesis han ido evolucionando, así como los de caracterización, purificación y separación. Entre algunos de los métodos de producción de NTC podemos señalar el método del sustrato, el método del catalizador flotante, por ablación láser, por descarga de arco, por depósito químico en fase de vapor o CVD (Chemical Vapor Deposition). Éste último resulta de principal interés en este trabajo por lo que se describe a continuación:

En CVD, normalmente, se prepara un sustrato con una capa de metal, como el níquel, cobalto, oro o una combinación de estos. Las nano-partículas de metal se pueden producir también por otros medios, incluidos la reducción de óxidos o soluciones de óxidos sólidos. El sustrato se calienta aproximadamente a unos 700 °C.

Para iniciar el crecimiento de nanotubos se mezclan un gas de proceso (tal como amoníaco, nitrógeno, hidrógeno, etc.) y una substancia a base de ferroceno en el reactor, la cual se usa como fuente de carbono (tal como acetileno, etileno, etanol, metano, etc.).

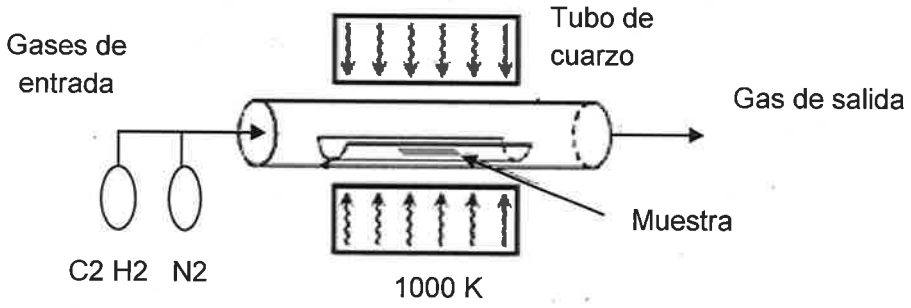


Fig. 2.1 Proceso CVD.

2.2 Descripción del horno para síntesis de NTC.

Para la realización de este trabajo se contó como antecedente el diseño y análisis de prototipos construidos previamente para un horno para síntesis de NTC que opera con el método de CVD descrito anteriormente. Como parte de dichos prototipos se incluyeron la constitución estructural, la elección de los materiales y la metodología llevada a cabo para las simulaciones por el Método de Elemento Finito (MEF).

Los NTC se sintetizan al elevar el ferroceno a una temperatura entre 880°C y 890°C. Este ferroceno es inyectado junto con un gas inerte en una serie de tubos de cuarzo con el fin de nebulizarlos y así tener condiciones de vacío inerte necesarias para el proceso. Los diez tubos de cuarzo ubicados en el hogar del horno son calentados a través de 12 lámparas de halógeno de 3000 W. El calor dentro del horno depende también de los reflectores de aluminio pulido que rodean a las lámparas y los cuales poseen una curva característica para optimizar la distribución del calor radiado hacia el centro del horno.

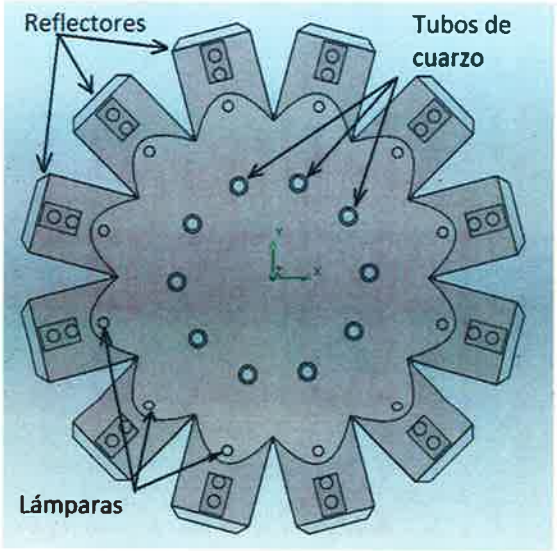


Fig. 2.2 Componentes principales del horno.

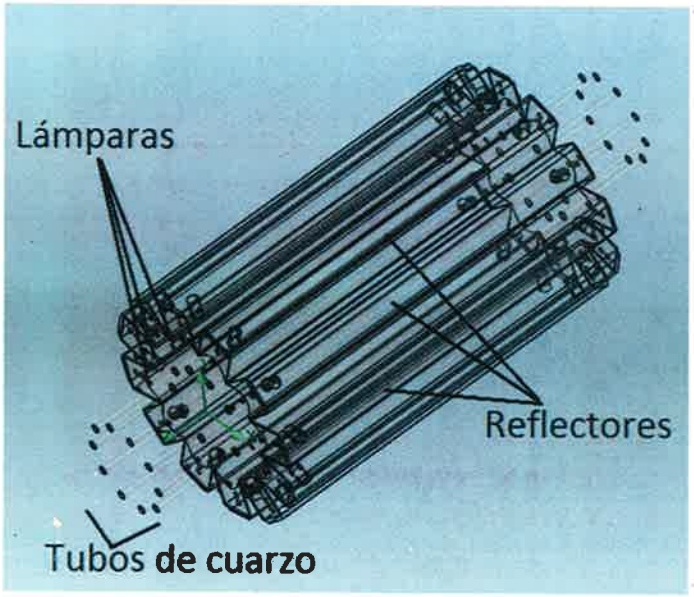


Fig. 2.3 Componentes principales del horno (vista isométrica).

Actualmente el horno posee dos controladores proporcionales de potencia, de diferente marca (ERI y CIDESI), funcionando de manera independientemente. El controlador de la marca ERI cuenta con una capacidad de corriente de 50 A, mientras que el de la marca CIDESI alcanza los 90 A. Cada uno de estos controladores se encarga de entregar potencia a una mitad del horno, es decir, a 6 lámparas, sin embargo, debido a que la resistencia en las lámparas de halógeno del dispositivo oscila entre los 4 y 7 Ω, la potencia suministrada varía.

Dada esta variación por el efecto de carga, se presenta una no uniformidad en el sistema, resultando en diferentes potencias y consecuentemente en una temperatura no homogénea para los tubos de cuarzo.

Adicionalmente, como producto de la diferencia de controladores proporcionales, se muestra una disparidad en las rampas de elevación provocando que una mitad de horno alcance la temperatura de referencia con un retraso de tiempo respecto a la otra, reduciendo el desempeño del horno (Fig. 2.5). Finalmente, se lleva a cabo una etapa de enfriamiento de los tubos y se extraen de las paredes de los tubos de cuarzo, los NTC obtenidos para posteriormente ser reutilizados en el proceso.

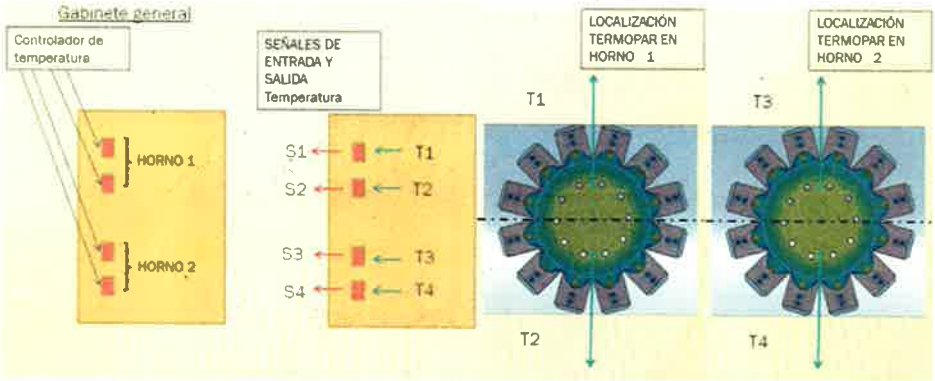


Fig. 2.4 Localización de termopares en el horno para señales de entrada y salida en los controladores.

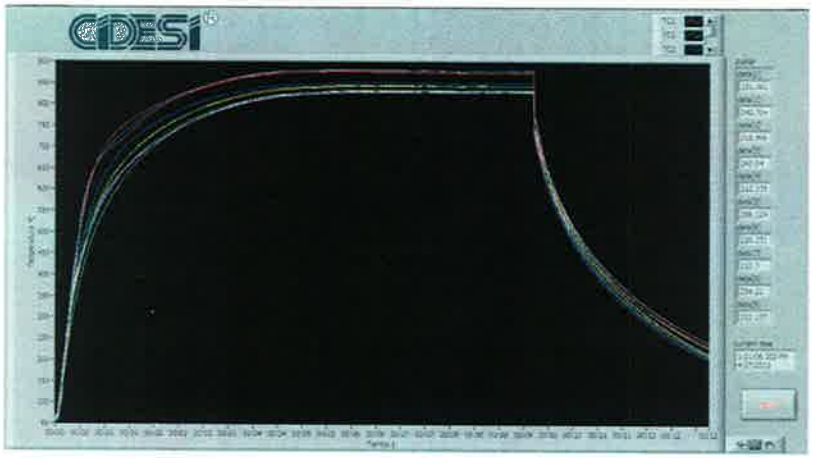


Fig. 2.5 Respuesta del control de la temperatura en los tubos de cuarzo del horno.

En la figura 2.5 se muestra el comportamiento de cada señal de temperatura emitida por termopar introducido al interior de cada tubo de cuarzo. Observándose estabilidad en cada tubo, no obstante se puede diferenciar la rampa de inicio correspondiente a cada controlador. La caída de temperatura corresponde a desconexión eléctrica y efecto de los conductos de enfriamiento.

Capítulo 3

Metodología y desarrollo

En este capítulo se describe a detalle la configuración de los parámetros necesarios para la simulación, incluyendo la definición del tipo de análisis, las condiciones de frontera del sistema, la resolución del mallado, la definición del dominio computacional, las propiedades físicas de los materiales utilizados, entre otras características. Toda esta información resulta de interés ya que con base en ella, se optimizan los cálculos y se obtienen resultados con una mayor certidumbre.

3.1 Configuración de parámetros del proyecto.

A continuación se muestran los ajustes generales al definir el proyecto en el software SolidWorks – Flow Simulation:

Tabla 3.1. Configuración general de parámetros para la simulación.

Configuración general	
Project name	Análisis de Horno NTC
Unit System	SI
Analysis type	Internal. Exclude cavities without flow conditions
Physical features	Heat conduction in solids, Radiation, Environment Radiation: Environment Temperature = 20.05°C;
Project Fluids	Air (Gases) Water (Liquids)
Flow type	Laminar and Turbulent
Default Solid	Aluminum
Wall conditions	Default outer wall thermal condition: Adiabatic wall; Default wall radiative surface: Blackbody wall; Default outer wall radiative surface: Blackbody wall; Roughness = 0 micrometer
Initial and Ambient Conditions	Pressure = 101325 Pa Temperature =20.05 °C Velocity in X, Y, Z direction = 0 m/s

	Turbulence intensity = 2% Turbulence length = 0.00397336306 m Initial solid temperature = 20.05 °C
Result and Geometry Resolution	Result resolution level = 3; Automatic minimum gap size, Optimize thin walls resolution

Definición del dominio computacional.

Con el fin de optimizar el cálculo durante el análisis, se definieron las dimensiones del dominio computacional como se muestra a continuación:

Tabla 3.2. Dominio computacional.

X min = - 0.199065489 m	Y min = - 0.199065489 m	Z min = - 0.836 m
X max = 0.199065489 m	Y max = 0.199065489 m	Z max = 0.166 m

Al establecer este dominio se especifica la región donde se llevará a cabo el mallado y análisis para que no se inviertan recursos computacionales innecesarios y de esta forma, se simplifiquen las operaciones y finalmente se traduzca en un ahorro de tiempo en el proceso.

Subdominios.

De manera complementaria al dominio computacional definido anteriormente, se establecieron dos subdominios de fluido para acotar aún más los recursos específicamente para estos parámetros. El especificar subdominios permite elegir una región cerrada para un fluido, definiendo el tipo de fluido y/o ajustándolo diferente a las especificaciones generales. Las regiones con fluidos diferentes deben estar separadas por sólidos.

En la simulación se maneja un subdominio de Aire y otro de Agua. El de aire, corresponde al fluido calentado al interior del horno mientras que el de agua corresponde al sistema de enfriamiento.

Materiales.

En la tabla a continuación se especifican los 3 tipos de materiales seleccionados para los sólidos del diseño, así como sus correspondientes componentes del horno:

Tabla 3.3. Materiales.

Material	Componente
Aluminio	Reflectores
Vidrio cuarzo	Lámparas
Vidrio cuarzo	Tubos de cuarzo

Cabe aclarar que estos materiales se encuentran predefinidos en el software utilizado y a pesar de estar estandarizado, las propiedades de los materiales utilizados en la práctica pueden diferir. Los 3 materiales se consideran con una transparencia opaca a la radiación.

Condiciones de frontera.

La definición de las condiciones de frontera para el sistema se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.4. Condiciones de frontera del sistema.

Condiciones de frontera	Parámetros en componentes
Inlet Volume Flow 1	Reflectores Volume flow rate normal to face = 70 l/min
Static Pressure 1	Reflectores Pressure = 101325 Pa Temperature = 20.05 °C
Static Pressure 2	Apertura donde se ubican los tubos de cuarzo Pressure = 101325 Pa Temperature = 20.05 °C

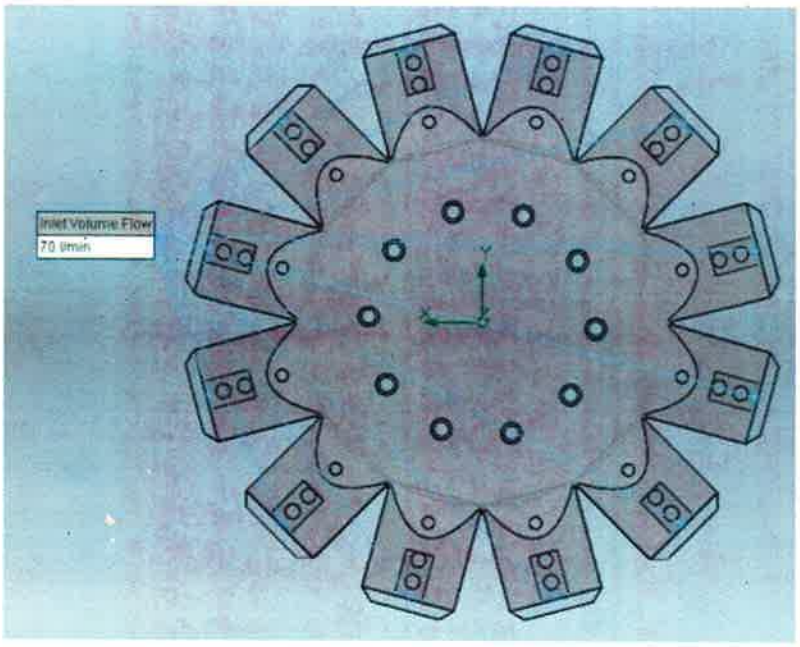


Fig. 3.1. Condición de frontera: Flujo de volumen de entrada en reflectores.

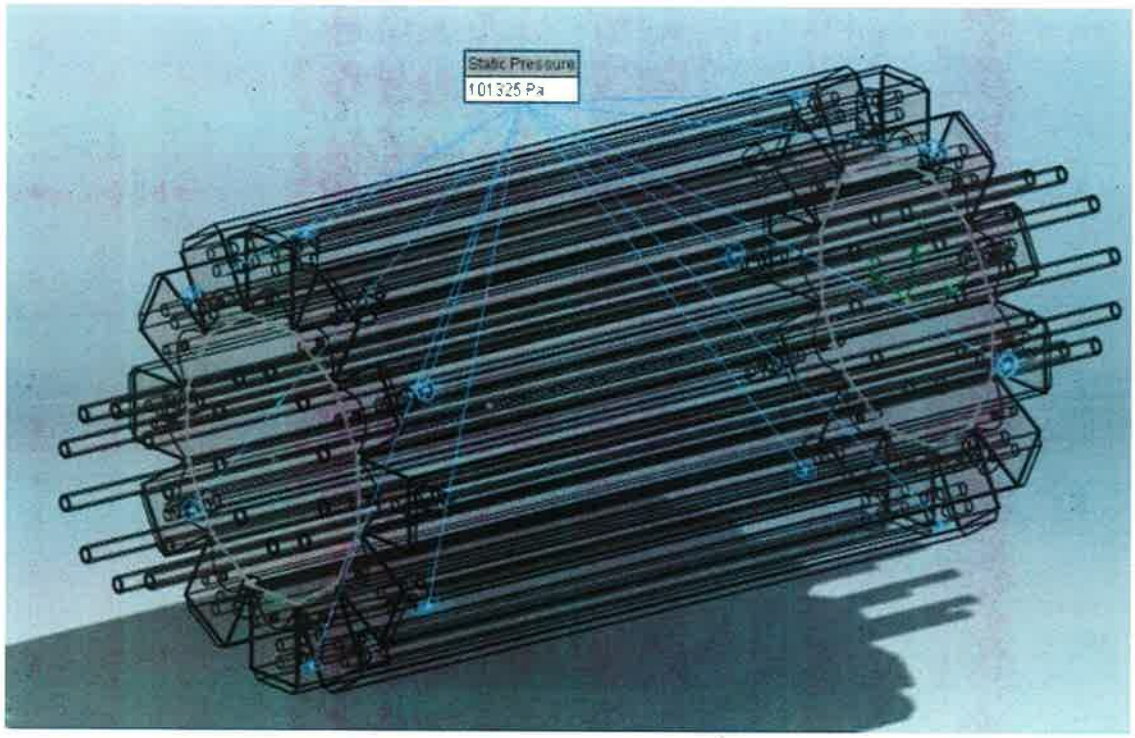


Fig. 3.2. Condición de frontera: Presión estática en reflectores.

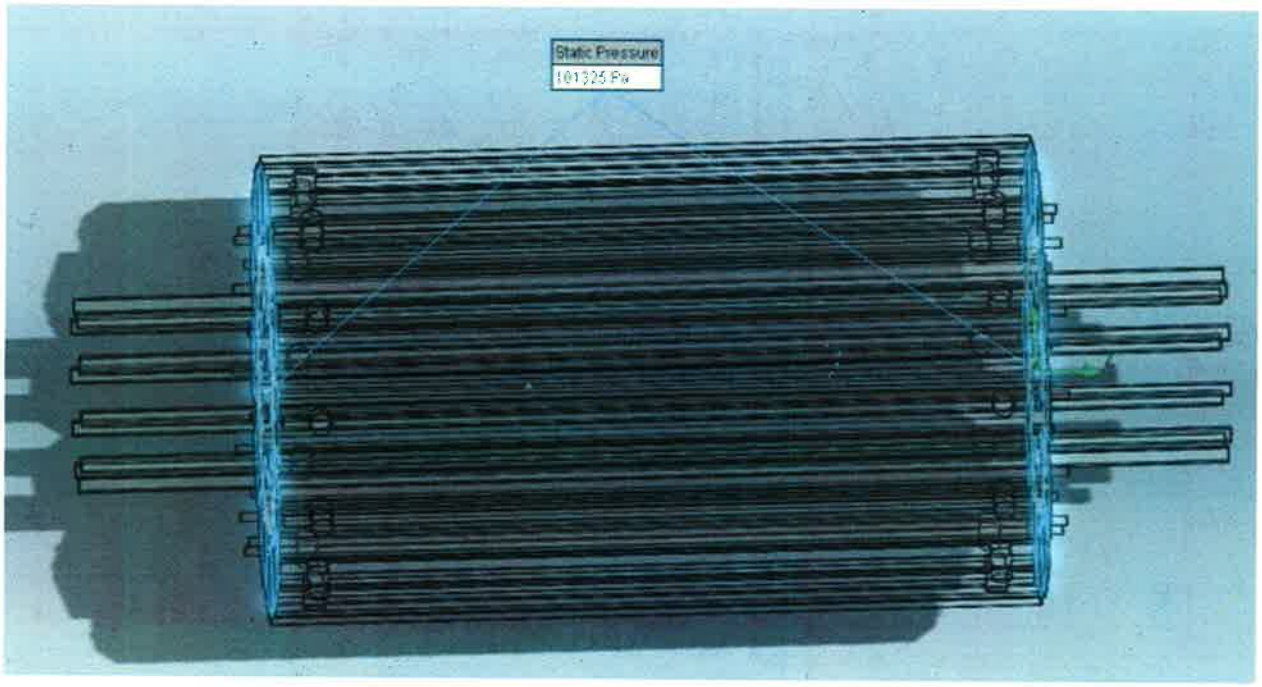


Fig. 3.3. Condición de frontera: Presión estática en apertura donde se ubican los tubos de cuarzo.

Definición de superficies radiativas.

Se eligieron cuatro diferentes superficies radiativas para diferentes componentes del horno con el objetivo de simular las propiedades de dichos elementos lo más fielmente posible de acuerdo a los materiales predefinidos que maneja SolidWorks®. A continuación se indica qué componentes pertenecen a cada superficie radiativa elegida:

Tabla 3.5. Definición de superficies radiativas.

Superficie Radiativa	Componente
Aluminium, rough	Reflectores
Vidrio, cuarzo	Tubos de cuarzo
Vidrio, cuarzo	Lámparas
Aluminium, polished	Curva de reflectores (en dirección a las lámparas)

Si bien, se busca elegir las propiedades más reales de los materiales utilizados, pueden existir variaciones en la práctica ya que las propiedades predefinidas por el software son idealizadas.

Especificación de metas.

Las metas definidas fueron:

GG Min Temperature of Fluid 1.- Temperatura mínima de fluido.
GG Max Temperature of Fluid 1.- Temperatura máxima de fluido.
GG Heat Transfer Rate 1.- Tasa de transferencia de calor.
GG Min Temperature of Solid 1.- Temperatura mínima de sólido.
GG Max Temperature of Solid.- Temperatura máxima de sólido.

3.2 Definición del problema

Fuentes de calor.

Para poder analizar el flujo y transferencia de calor en un sistema es necesario definir las fuentes de calor del mismo. Estas fuentes pueden deberse tanto a volúmenes como a superficies. Una fuente de calor de volumen permite especificar la tasa de generación de calor (en Watts), la tasa de calor volumétrico (en Watts por volumen) o una condición límite de temperatura constante para el volumen. De manera análoga, es posible especificar las fuentes de calor de superficie en términos de la tasa de transferencia de calor (en Watts) o el flujo de calor (en Watts por área).

Para el objeto de estudio de este trabajo resultan de principal interés las fuentes de calor de superficie, las cuales representan las 12 lámparas de halógeno que se encargan de calentar el horno para la síntesis de NTC dentro de los tubos de cuarzo ubicados al interior del horno. Y dado que el horno opera en dos mitades independientes, se manejan dos fuentes de calor separadas para cada grupo de lámparas. Cada grupo está conformado por 3 pares de lámparas las cuales se supone en un caso ideal, igual a 3,000 W de potencia eléctrica, resultando en un total de 18,000 W para cada mitad del horno. Esta información se conoce por los antecedentes experimentales existentes y a partir de ellas se llevaron a cabo las diferentes simulaciones para analizar la distribución de la temperatura y flujo de calor en el horno para observar particularmente, cómo afecta al calentamiento de los tubos de cuarzo donde se sintetizan los NTC.

Dentro de la **metodología seguida** en el presente trabajo, se realizaron las simulaciones de transferencia y flujo de calor del horno **suponiendo un par de lámparas fundidas**. De esta manera se puede apreciar cómo se ve afectada la distribución de calor en diferentes zonas del horno y para los dos grupos de lámparas.

Para que la producción de NTC se lleve a cabo correctamente, es necesario que los tubos de cuarzo se calienten dentro de un rango de temperatura entre 880°C y 890°C. Una temperatura superior o inferior a este rango disminuye la eficiencia en la producción de NTC. Pese a que se había encontrado experimentalmente la potencia promedio bajo la cual operan las lámparas, alcanzando los 36,000 W totales para el horno, fue necesario realizar

algunas simulaciones piloto para probar que los resultados obtenidos con la simulación mantuvieran la misma temperatura para los tubos de cuarzo. En estas pruebas piloto se manejó una potencia promedio para 10 lámparas igual a 30,000 W para la primera simulación; 26,200 W para la segunda; 13,300 W para la tercera; 9,000 W para la cuarta. En cada simulación se definió un par de puntos ubicados en 3 diferentes tubos de cuarzo y los cuales se encuentran distribuidos en dirección interna y externa del horno. Estos puntos son utilizados como indicadores para conocer la temperatura que se registra para los tubos de cuarzo y evaluar si la temperatura se encuentra dentro del rango deseado (880°C – 890°C). A continuación se muestran la ubicación y distribución de los puntos donde se registraron las temperaturas resultantes para cada prueba así como una tabla de dichos valores:

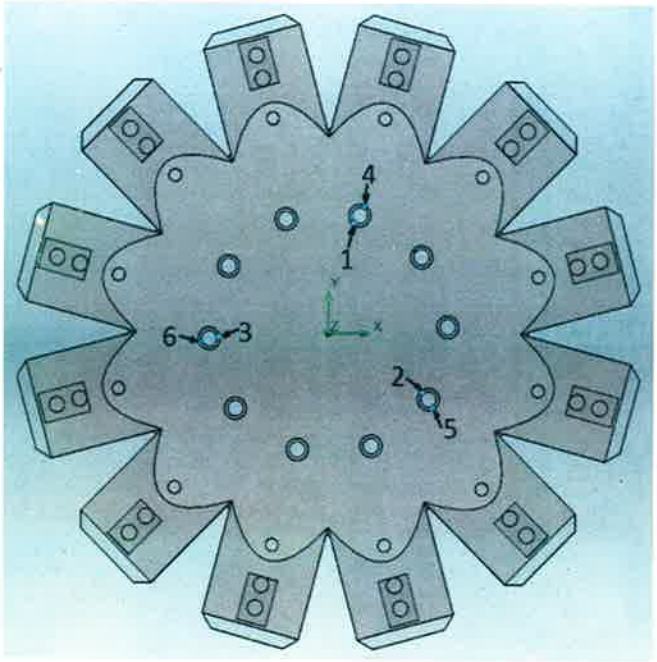


Fig. 3.4. Puntos indicadores de temperatura.

Tabla 3.6. Temperatura de puntos indicadores.

Potencia en 10 lámparas	Temperatura de puntos indicadores (°C)					
	1	2	3	4	5	6
30000 W	1153.18	1156.19	1144.93	1161.57	1158.52	1145.55
26200 W	1100.14	1103.20	1089.65	1110.25	1107.10	1089.99
13300 W	874.48	875.54	868.18	880.50	877.20	868.68
9000 W	756.49	756.42	751.18	760.82	756.46	752.95

Dados los valores de temperatura mostrados en la tabla anterior se encontró que los valores más cercanos al rango deseado fueron los obtenidos con una potencia de 13,300 W, los cuales estuvieron ligeramente debajo de lo esperado. Finalmente, se encontró que un valor aproximado de 1,375°C cae dentro del rango deseado para la temperatura de cada uno de los tubos de cuarzo. Con base en este resultado, se realizaron las posteriores simulaciones para comparar la distribución de calor bajo la suposición de que se fundiera un par de lámparas, existiendo 6 diferentes casos para la posición del par de lámparas.

En el siguiente capítulo se describirán los diferentes casos simulados y se expondrán las temperaturas de los puntos indicadores para cada uno de ellos, así como la distribución de la temperatura de los fluidos y de sólidos en el horno para comparar el cómo se ven afectados los tubos de cuarzo.

Capítulo 4

Resultados

Con base en los parámetros descritos en el capítulo anterior, se presentan los diferentes casos de las simulaciones realizadas en este trabajo. Se detallan los resultados de cada caso y se muestra la distribución de calor en fluidos y sólidos.

A fin de presentar los casos más representativos, se eligieron 6 diferentes casos suponiendo un par de lámparas fundidas. Si bien, el número de lámparas inactivas es el mismo en todas las simulaciones, la variación en la ubicación de las lámparas influye en el cambio de temperatura de los tubos de cuarzo. El Caso 1 corresponde a dos lámparas contiguas fundidas; el Caso 2 corresponde a dos lámparas fundidas separadas por una lámpara operando correctamente; en el Caso 3 hay dos lámparas funcionales de separación entre las dos fundidas; el Caso 4 tiene 3 lámparas de separación; el Caso 5, 4 lámparas de separación; el Caso 6, cinco de separación. Estos 6 casos son suficientes para la suposición de un par de lámparas fundidas debido a que una separación mayor resultaría en un resultado repetitivo, es decir que, por ejemplo, si se tuvieran 6 lámparas de separación equivaldría a resultados simétricos a los del Caso 5.

Tabla 4.1. Temperatura en puntos indicadores para los 6 casos de lámparas fundidas.

Potencia en 10 lámparas (13750 W)	Temperatura de puntos indicadores (°C)					
	1	2	3	4	5	6
Caso 1	886.48	888.82	878.20	892.74	890.69	877.23
Caso 2	883.27	886.49	874.49	890.98	888.66	868.80
Caso 3	883.36	888.11	873.83	889.86	890.72	871.76
Caso 4	878.65	884.03	877.10	886.05	886.85	880.75
Caso 5	876.09	885.82	886.45	881.37	888.86	888.24
Caso 6	871.46	883.13	880.54	870.00	886.24	884.52

En esta tabla se han marcado en rojo aquellos puntos que sobrepasan el rango de temperatura esperado y con color azul los que se encuentran por debajo del mismo. Esto es sólo para indicar qué casos son más críticos que otros. A partir de esta información se puede concluir que los 3 primeros casos resultan ser los más críticos debido a que hay tanto puntos inferiores como superiores a los 880°C y 890°C, respectivamente. Esto se debe a que las lámparas fundidas se encuentra más cercanas entre sí en estos casos, lo que lleva a un calentamiento más acentuado en el extremo opuesto a las lámparas, incrementando notablemente la temperatura en esa zona mientras que los puntos de temperatura más baja corresponden al tubo de cuarzo más cercano a las lámparas fuera de operación. Es evidente que el Caso 1, en el cual no se tiene ninguna lámpara de separación entre las dos fundidas, presenta temperaturas extremas, tanto frías como calientes lo que indica cuál sería la condición más crítica en caso de fundirse un par de lámparas.

En contraste, los últimos 3 casos revelan mejores resultados debido a un flujo de calor ligeramente más uniforme debido a la ubicación más separada de las lámparas fundidas. Resulta interesante destacar los valores obtenidos para el Caso 5 dado que se podría llegar a pensar en una relación directa con respecto a la temperatura de los puntos y la separación de las lámparas fundidas. En caso de ser así, sería el Caso 6 el que presentaría los valores más uniformes, sin embargo, éste presenta una zona más fría comparado con el Caso 5, siendo éste último, el caso óptimo bajo la suposición del par de lámparas fundidas.

4.1 Simulaciones: Temperatura de fluido.

A continuación se presentan los gráficos de las simulaciones de las temperaturas en los fluidos para los 6 diferentes casos mencionados anteriormente. El código de colores está definido en un rango de 100°C, sin embargo, es importante aclarar que aquellas temperaturas superiores a los 900°C también aparecerán en color rojo y de manera análoga, las temperaturas inferiores a los 800°C aparecerán en azul marino.

El horno se divide en 2 partes, cada una de las cuales cuenta con 6 lámparas. La ubicación de las lámparas fundidas cambia en cada imagen y por consiguiente también la distribución del flujo de calor.

A continuación se presentan las 6 imágenes correspondientes a cada caso simulado, de las cuales podemos notar 3 zonas principales de temperatura: una región mayoritaria de entre 820°C y 840°C; otra más cálida entre 840°C y 850°C; una más fría de entre 810°C y 820°C. En algunos de los casos se tienen pequeñas zonas aún más frías o más calientes, sin embargo, son muy pocas y pequeñas.

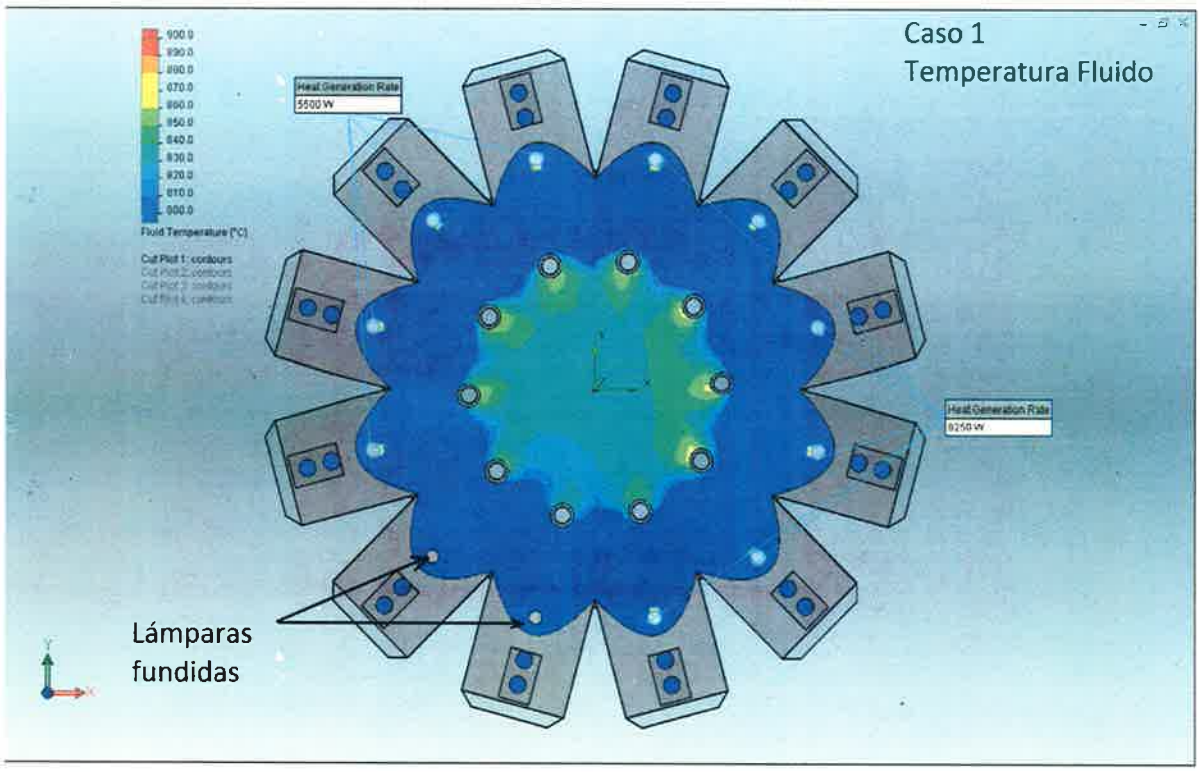


Fig. 4.1. Temperatura Fluido Caso 1: Lámparas fundidas sin separación.

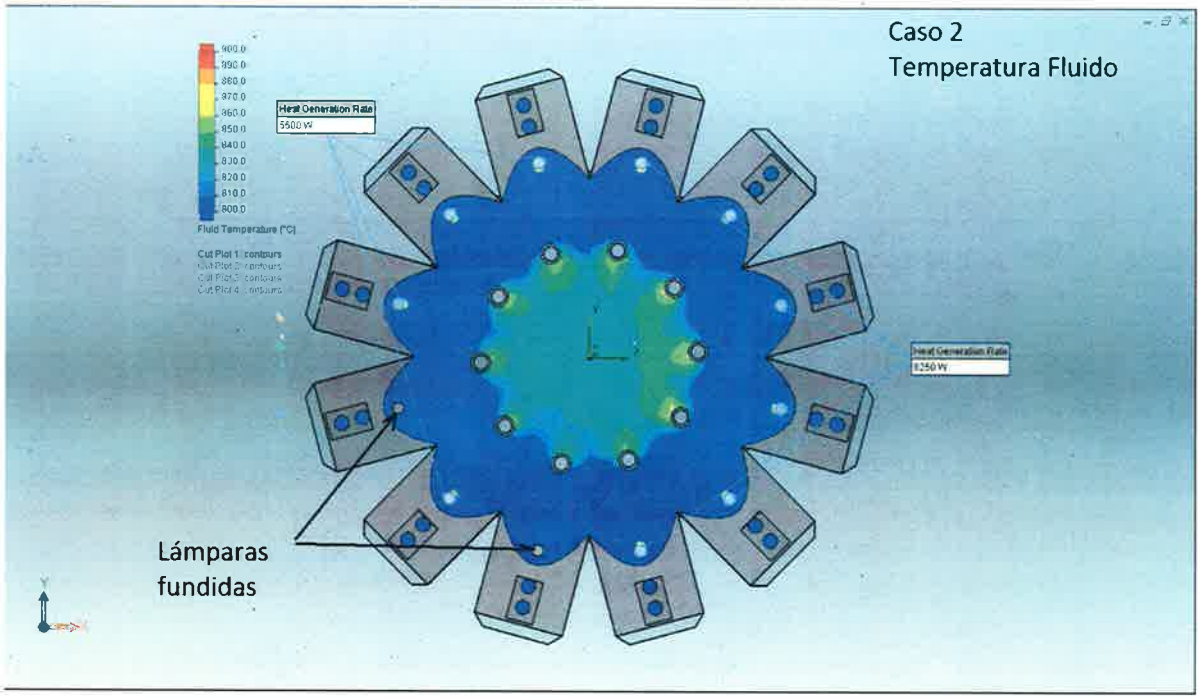


Fig. 4.2. Temperatura Fluido Caso 2: Lámparas fundidas con 1 lámpara de separación.

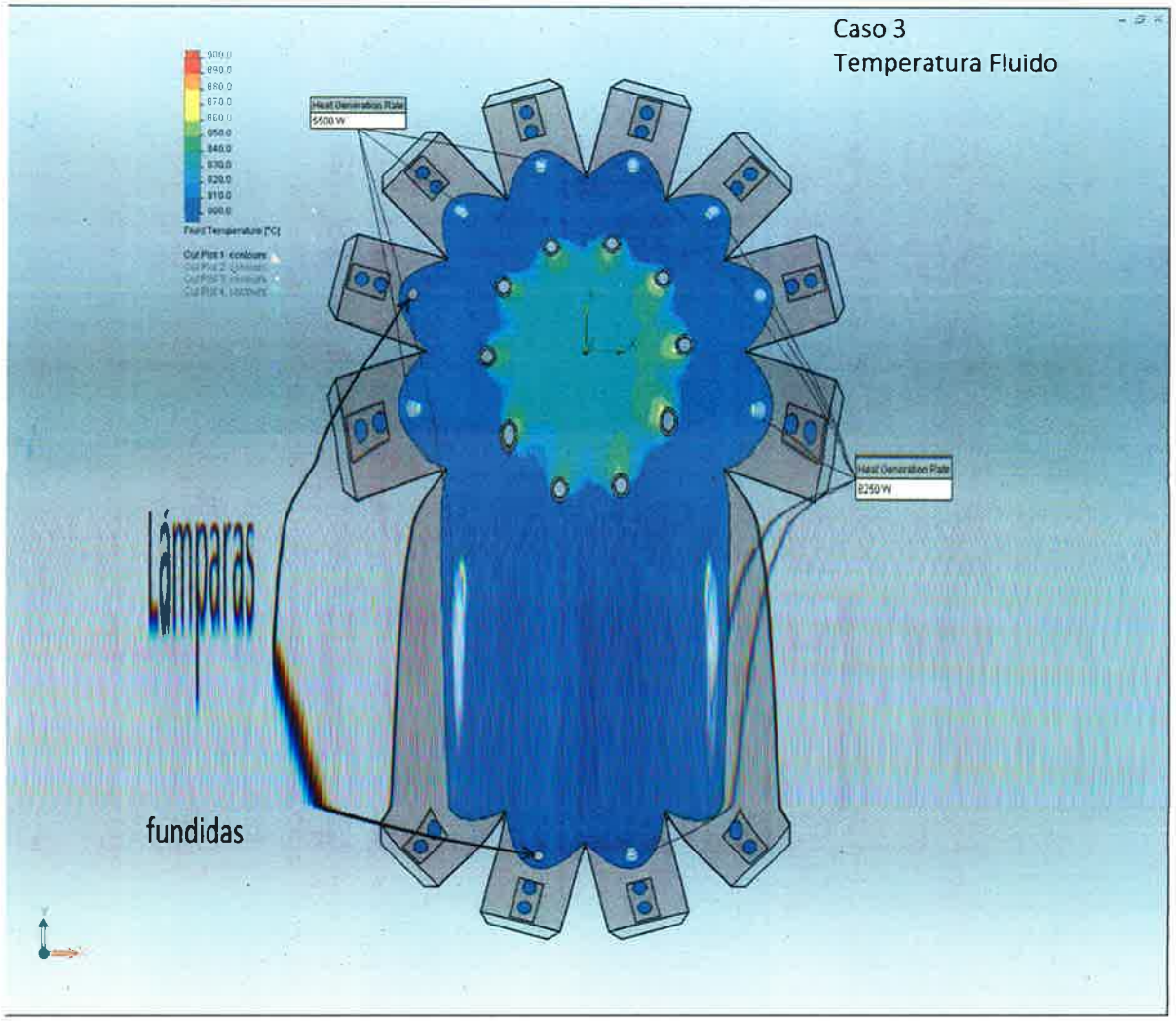
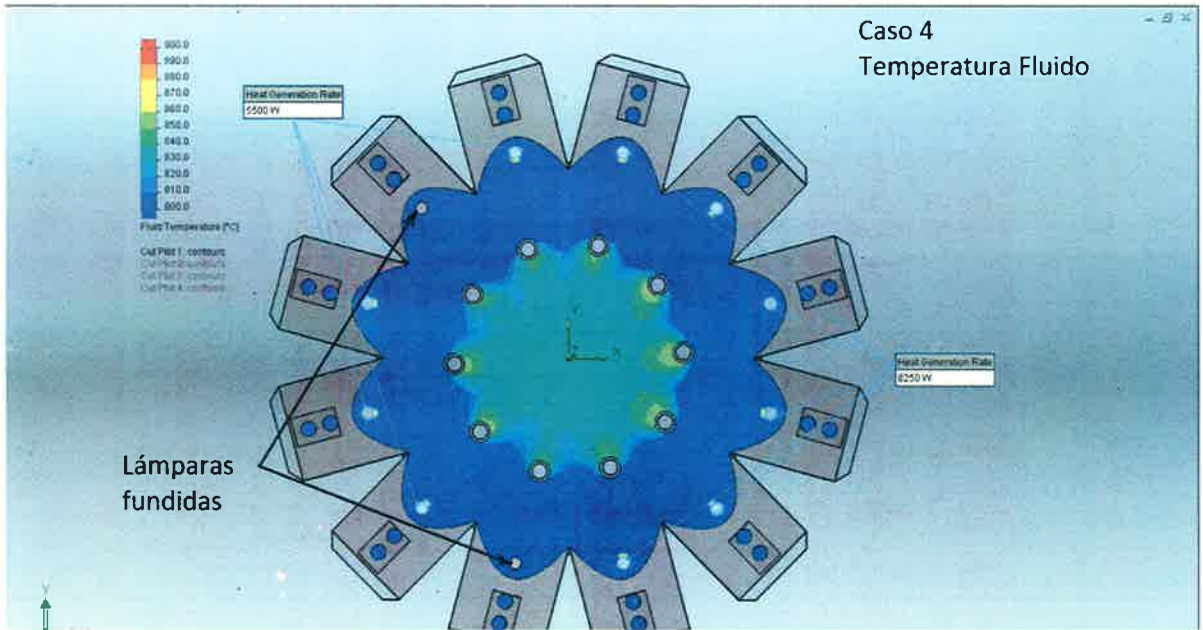


Fig. 4.3. Temperatura Fluido Caso 3: Lámparas fundidas con 2 lámparas de separación.



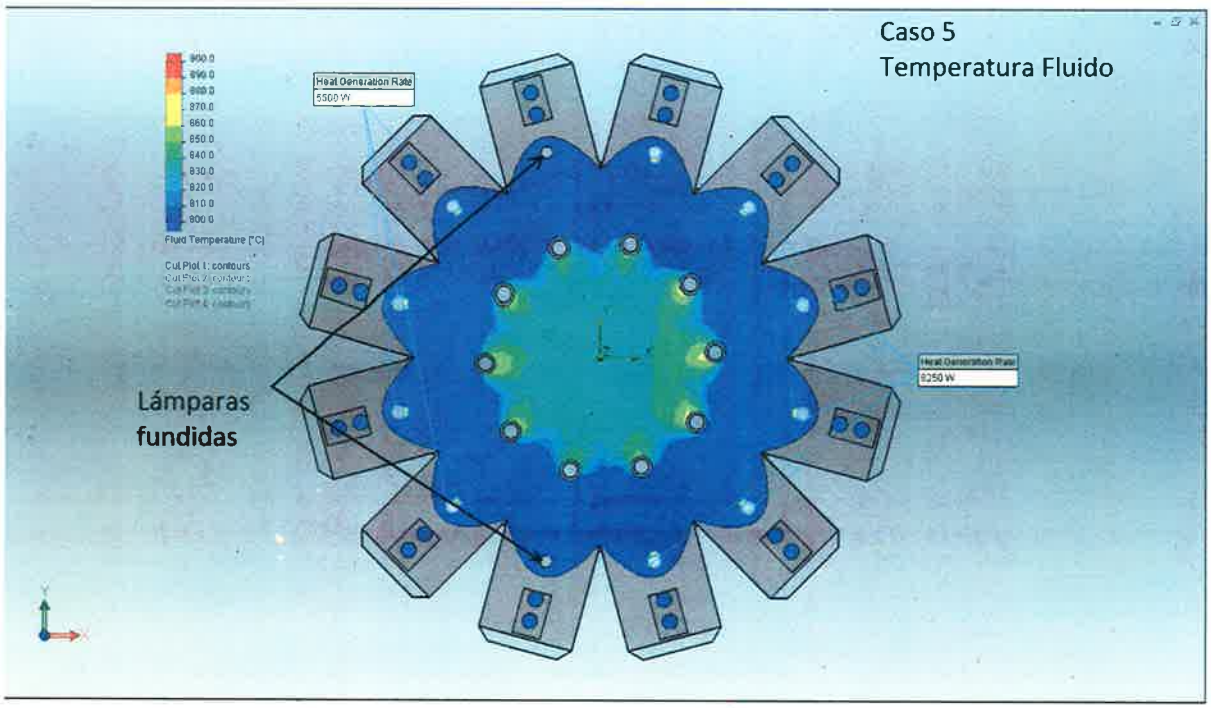


Fig. 4.5. Temperatura Fluido Caso 5: Lámparas fundidas con 4 lámparas de separación.

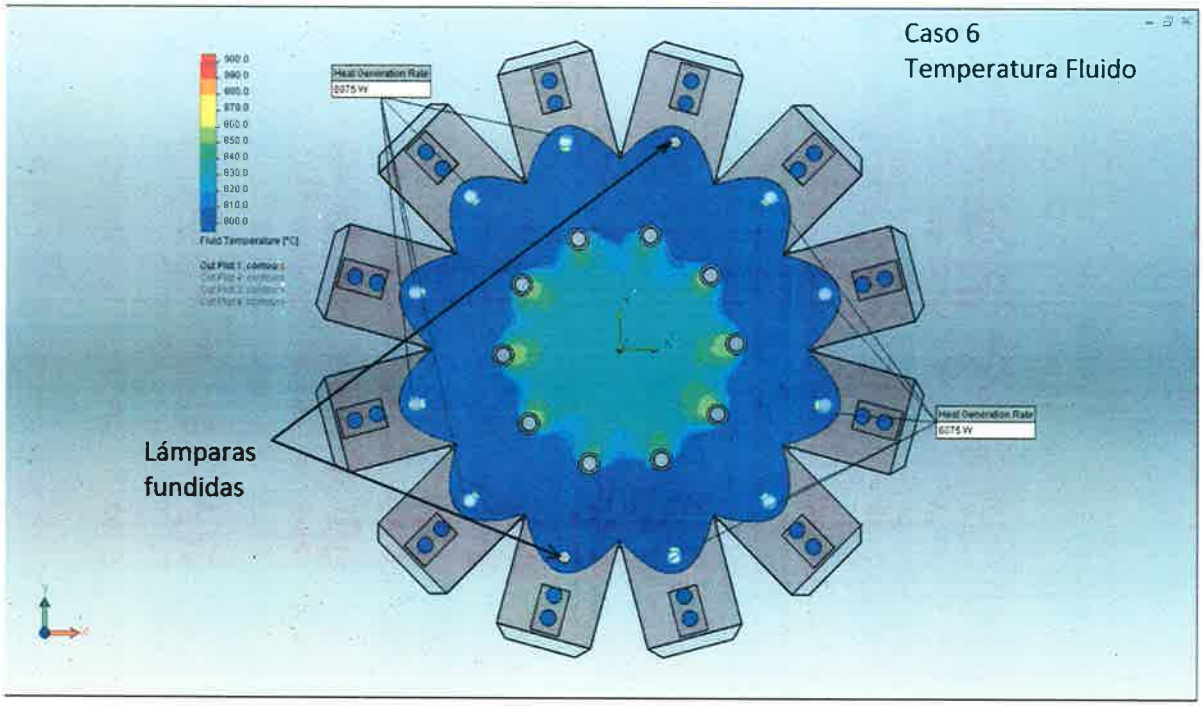


Fig. 4.6. Temperatura Fluido Caso 6: Lámparas fundidas con 5 lámparas de separación.

4.2 Simulaciones: Temperatura de sólido.

De manera complementaria se presentan los gráficos de las simulaciones de las temperaturas en los sólidos para todos los casos. El código de colores es el mismo que el de la sección previa. A diferencia de la temperatura en fluido, el calor en los sólidos del horno (en este caso, los tubos de cuarzo) se distribuye con un patrón diferente, concentrándose más en la zona alejada a las lámparas fundidas y es importante notar, que a pesar de contar con la misma potencia en las 10 lámparas que operan con normalidad, la ubicación de las lámparas fundidas influye en cómo cambian las regiones más calientes.

También resulta útil hacer hincapié que inclusive cuando la Tabla 4.1 muestra la temperatura de diferentes puntos en los tubos de cuarzo, tanto en la zona más cercana al centro del horno como la zona más alejada, éstas difieren entre sí debido a que la temperatura en un mismo tubo de cuarzo resulta no ser homogénea y por lo tanto la temperatura no es uniforme.

A continuación se puede verificar esto para los diferentes casos, observando que la temperatura en un tubo se encuentra más caliente en tanto se encuentre más cercana al reflector.

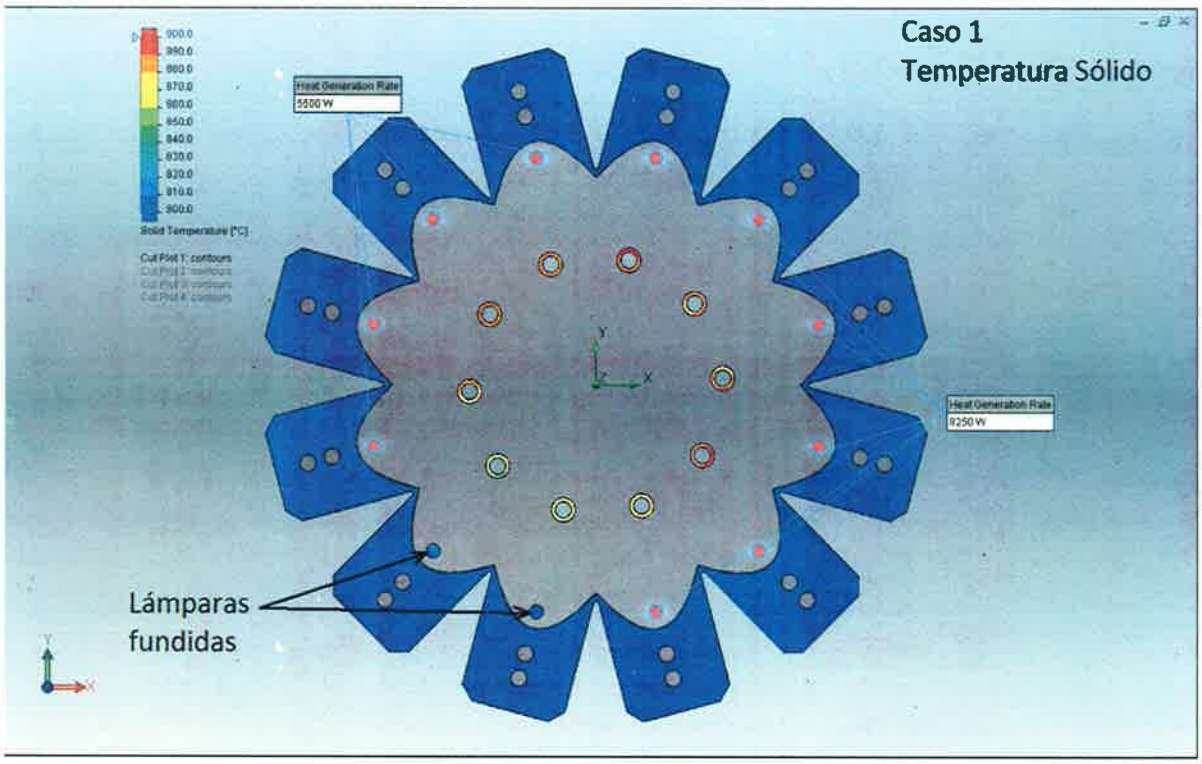


Fig. 4.7. Temperatura Sólido Caso 1: Lámparas fundidas sin separación.

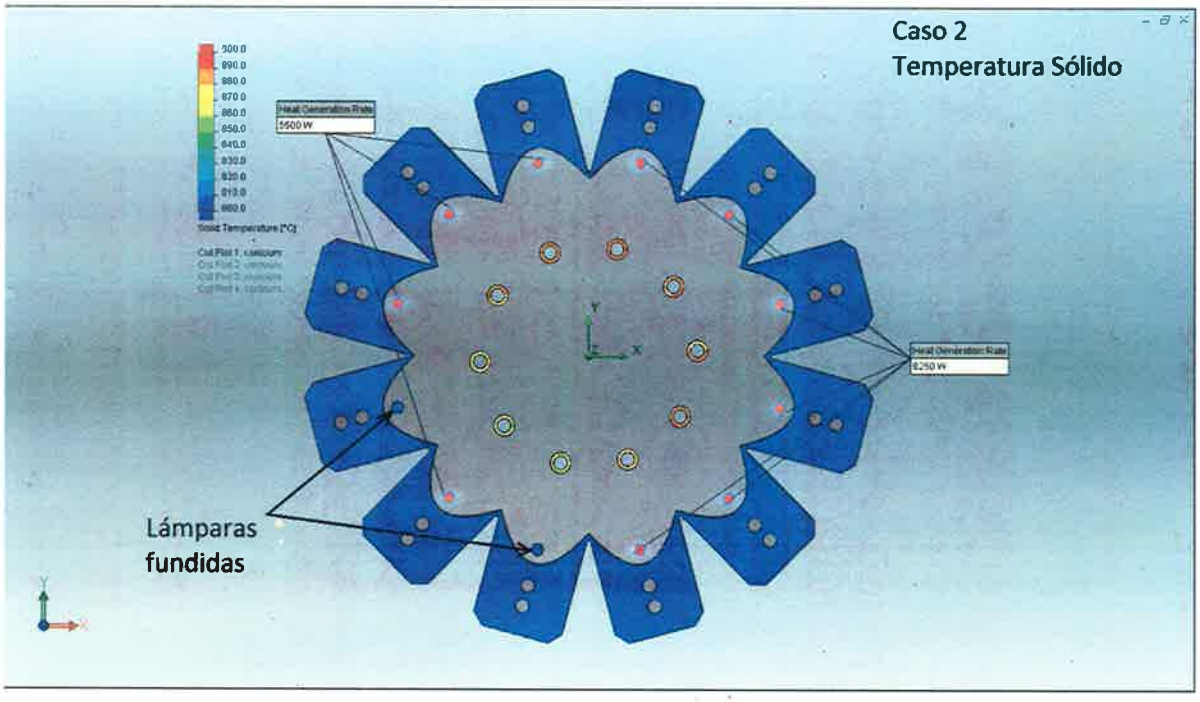


Fig. 4.8. Temperatura Sólido Caso 2: Lámparas fundidas con 1 lámpara de separación.

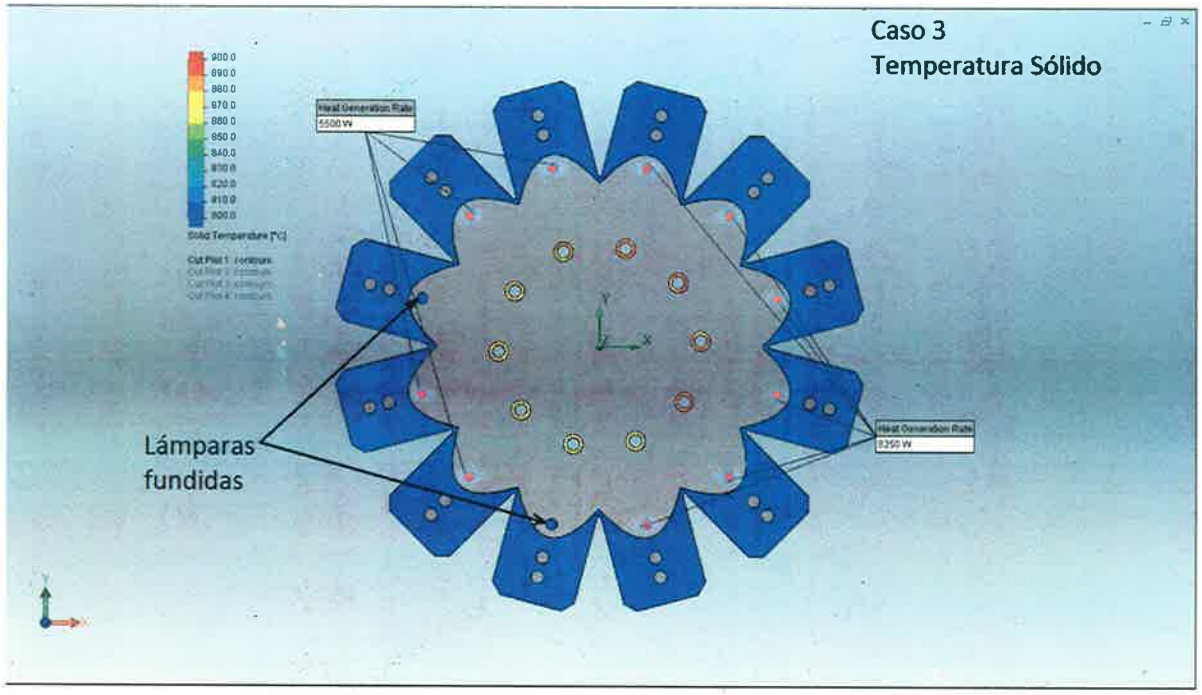


Fig. 4.9. Temperatura Sólido Caso 3: Lámparas fundidas con 2 lámparas de separación.

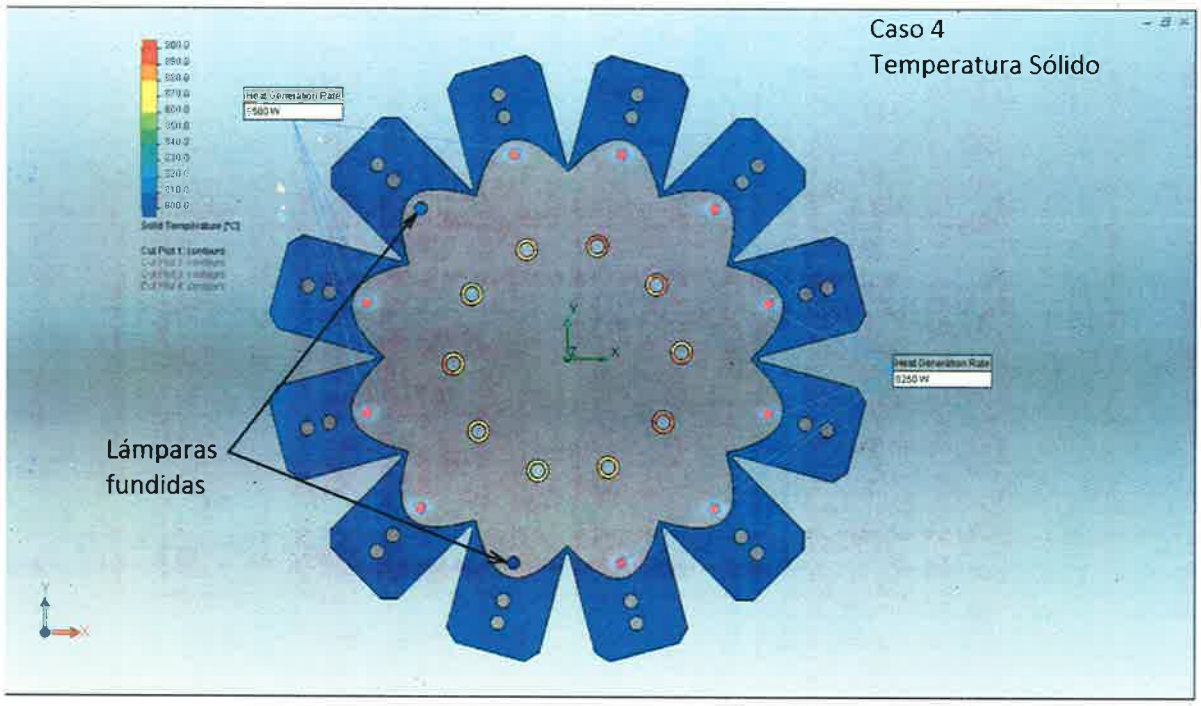


Fig. 4.10. Temperatura Sólido Caso 4: Lámparas fundidas con 3 lámparas de separación.

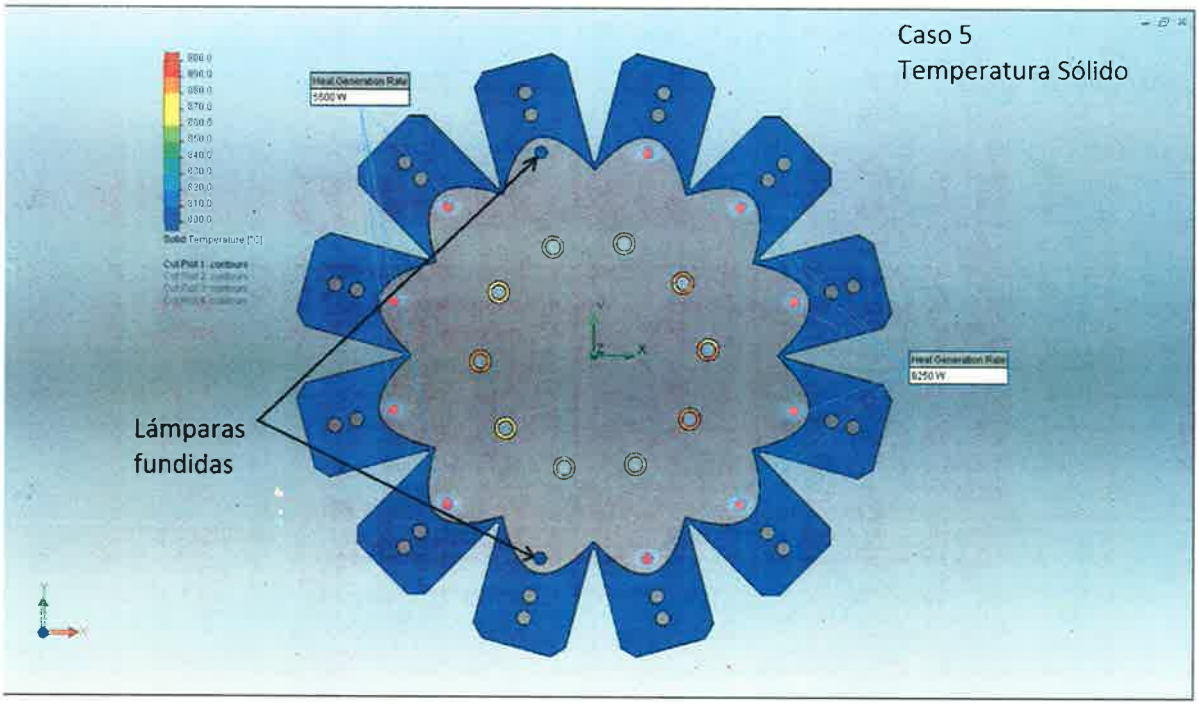


Fig. 4.11. Temperatura Sólido Caso 5: Lámparas fundidas con 4 lámparas de separación.

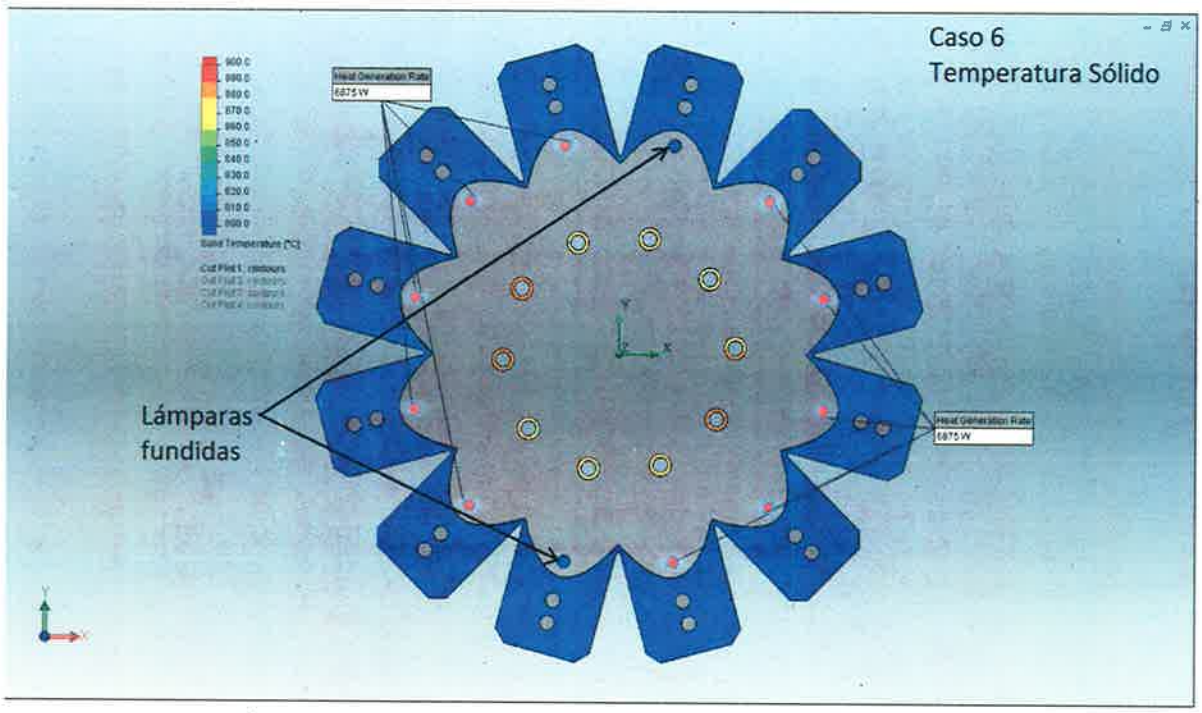


Fig. 4.12. Temperatura Sólido Caso 6: Lámparas fundidas con 5 lámparas de separación.

Como se puede verificar, la temperatura en los tubos de cuarzo coincide con la reportada en los puntos indicadores de temperatura de la tabla de resultados. Es interesante recalcar que la potencia manejada para las simulaciones es inferior a la experimental aproximadamente en un 50%. Esto se debe a que el software maneja propiedades ideales que difieren de las condiciones reales pero que para fines prácticos, utilizamos en este trabajo para el análisis de flujo y la transferencia de calor, asegurándonos que se contara con la temperatura dentro del rango permitido.

Toda la evaluación para este sistema no sólo es importante para darle seguimiento a un proyecto previo de CIDESI sino que también resultó útil para poseer una introducción al manejo de software de CAD y el manejo de las herramientas de elemento finito y mecánica de fluidos y conocer los criterios importantes al configurar los parámetros necesarios para este estudio.

Capítulo 5

Conclusiones

Desde el descubrimiento de los nanotubos de carbono en 1991, así como de sus propiedades únicas, se ha encontrado una extensa gama de aplicaciones en diversos campos del conocimiento, así como en sectores comerciales importantes, de entre los cuales podemos destacar, el desarrollo de materiales, en óptica, electrónica, química, biotecnología, energía, mecánica, etc. Como consecuencia de esto, también ha habido un auge importante en la investigación de los métodos de síntesis de estos materiales. Una prueba de lo anterior fue el diseño y construcción de un horno para síntesis de nanotubos de carbono mediante el método de deposición química en fase de vapor.

Este trabajo dio seguimiento al estudio y análisis de dicho horno con el objetivo de observar la variación de homogeneidad en la distribución de calor del hogar del horno mediante el análisis del flujo y transferencia de calor en éste.

Se encontró que la temperatura óptima para la síntesis de NTC en las simulaciones al comparar la temperatura en diferentes puntos de los tubos de cuarzo tras ser calentados bajo distintas potencias. Habiendo encontrado este rango, se evaluaron 6 diferentes casos para ver los valores más críticos así como el patrón de la distribución del flujo y la transferencia de calor en el horno. Los mapeos resultantes de estas simulaciones muestran un patrón característico para la temperatura de fluidos y otro para la temperatura de sólidos, revelando la relación directa entre la ubicación de las lámparas fundidas y las zonas más cálidas. Asimismo, se observa que en un tubo de cuarzo se pueden presentar diferentes temperaturas, siendo más fría a medida que se acerca al centro del horno.

El estudio realizado no sólo sirvió para darle un seguimiento al proyecto previo realizado por CIDESI sino que también resultó útil para tener mayor práctica en el manejo de software de CAD así como de las herramientas de elemento finito empleadas con la finalidad de contar con una mejor formación académica y profesional así como de contribuir con el crecimiento económico y productivo de México y reducir así la brecha tecnológica entre otros países y el nuestro.

Trabajo a futuro.

Los resultados obtenidos a partir de este trabajo permitieron validar teóricamente una parte de los datos experimentales. La necesidad de seguir estudiando los fenómenos termodinámicos del sistema es muy importante, ya que a medida que se tenga mayor conocimiento experimental del tema en conjunto con las bases teóricas que lo respalden, esto permitirá que las componentes mecánicas y electrónicas alcancen una mejor eficiencia y eficacia, brindando un mejor desempeño general en el horno.

Como expectativa futura para darle continuidad y seguimiento a este proyecto se encuentra la propuesta de utilizar un solo controlador para cada horno a fin de evitar disparidad en la respuesta de estos sistemas y que operen de manera conjunta. De esta manera se busca contar con una mayor homogeneidad tanto en la respuesta del control, así como la temperatura de todos los tubos del cuarzo para como consecuencia, optimizar el proceso para la síntesis de nanotubos de carbono.

Referencias

Aplicaciones actuales y futuras de los nanotubos de carbono. *María Jesús Rivas Martínez, José Ramón Ganzer, María Luisa Cosme Huertas.* Informe de Vigilancia tecnológica madri+d. Fundación madri+d para el Conocimiento Velázquez, 76. E-28001 Madrid. Madrid, 2007.

Funcionalização de Nanotubos de carbono. *Antônio Gomes de Souza Filho, Solange Binotto Fagan.* Quim. Nova, Vol. 30, No. 7, 1695-1703. Brasil, 2007.

Fundamentos de Transferencia de Calor. *Frank Incropera, David DeWitt.* Pearson Educación. México, 1999. pp. 886.

Obtención de nanotubos de carbono por el método de deposición en fase vapor. *Alberto Iglesias Cerveto, Ruth Arias Pérez, Duani Blanco Bea y Oscar E. Ledea Lozano.* Revista CENIC Ciencias Químicas, Vol. 39, No. 3, 2008.

Síntesis de nanotubos de carbono mediante un proceso de deposición química en fase de vapor. *D. Zilli, P. Bozzano, S. N. Goyanes, G. H. Rubiolo, A. L. Cukierman.* Jornadas SAM/ CONAMET/ SIMPOSIO MATERIA. Argentina, 2003.

Tecnologia dos nanotubos de carbono: Tendências e perspectivas de uma área multidisciplinar. *Marcelo Hawrylak Herbst, Maria Iaponeide Fernandes Macêdo e Ana Maria Rocco.* Quim. Nova, Vol. 27, No. 6, 986-992, Brasil, 2004.

Transferencia de calor y de masa. *Yunus A. Çengel.* McGraw Hill, 4ª Ed. México, 2011. pp. 920.

Tutorial SolidWorks Flow Simulation 2009.