



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

---

**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍAS  
LICENCIATURA EN SISTEMAS COMPUTACIONALES**

**DETERMINACIÓN DEL PERFIL DE  
TEMPERATURA DE UN HORNO MUFFLA,  
MEDIANTE COMSOL 3.2**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
LICENCIADO EN SISTEMAS COMPUTACIONALES**

**PRESENTA:**

**GÓMEZ VEGA ROSA MARIA**

**DIRECTORA:**

**DRA.: MARISSA VARGAS RAMIREZ**

**PACHUCA DE SOTO, HGO.**

**JULIO DE 2007.**



## INDICE

	<b>PAGINA</b>
NOMENCLATURA	i
LISTA DE FIGURAS	ii
LISTA DE TABLAS	iv
RESUMEN	v
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1	
ANTECEDENTES	6
1.1 EFICACIA DE LA SIMULACIÓN	6
1.2 COMSOL 3.2	15
1.3 VISUAL BASIC	22
1.4 HORNOS	28
CAPITULO 2	
TRANSFERENCIA DE CALOR	39
2.1 TRANSMISIÓN DEL CALOR.	39
2.2 TRANSFERENCIA DE CALOR EN ESTADO ESTABLE	42
2.3 LEY DE JOULE	43
2.5 RESISTENCIA $MOSI_2$	47
CAPITULO3	
SIMULACIÓN	48
3.1 APLICACIÓN EN COMSOL 3.2	48
3.2 VISUAL BASIC	56
CAPITULO 4	
RESULTADOS	64
4.1 RESULTADOS EN MUFLA	64
4.2 RESULTADOS DE COMSOL	66
4.2 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN VISUAL BASIC	69
CONCLUSIONES	72
GLOSARIO	75
REFERENCIAS	76
ANEXOS	79

---



---

**NOMENCLATURA**

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
A	Área	m <sup>2</sup>
Cp	Calor específico a presión constante	J/Kg°K
D	Diámetro	m
k	Conductividad térmica	W/m°K
K	Conductancia térmica	W/°K
Q	Cantidad de calor	J
l	Longitud	m
T	Temperatura	°K o °C
P	Densidad	Kgm <sup>3</sup>
H	Coefficiente de transferencia de calor	W/m <sup>2</sup> K
Thick	Espesor, Ancho, conductividad	m, m, oms
s	Constante de radiación	W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup>
W	Trabajo	Julios
F	Fuerza	Newtons
D	Distancia	Metros
P	Potencia	Vatios
t	Tiempo	Segundos
V	Tensión	Voltios
I	Intensidad	Amperios
R	Resistencia	Ohmios
ρ	Resistividad	Ohmios * metro
L	Longitud	Metro
S	Sección	Metros <sup>2</sup>



---

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA		PAGINA
1.	Horno Thermolyne 46000	2
2.	Crisolos de Alumina, que sufrieron fractura en la sinterización en la muffle Thermolyne 46000	5
3.	Navegador modelo	18
4.	Clasificación de los hornos	33
5.	Horno Kasseler	34
6.	Hornos de cámara de dos pisos	35
7.	Paredes de los hornos mufla.	36
8.	Hornos de gas	38
9.	Horno eléctrico	38
10.	Resistencia $\text{MoSi}_2$	47
11.	Resistencia de $\text{MoSi}_2$	49
12.	Vista tridimensional de la resistencia y volumen del horno	51
13.	Condiciones físicas de la resistencia	52
14.	Propiedades físicas del volumen del horno (aire).	53
15.	Propiedad eléctrica de la resistencia.	54
16.	Condiciones límite de la resistencia para el modulo Electro Therma- Joule Heating	54
17.	Condiciones límite de la resistencia y volumen de horno (aire), modulo Heat Transfer by Conduction	55
18.	Pantalla de inicio de la aplicación	56
19.	Pantallas que muestran los menús de la aplicación	57
20.	Pantalla de acceso de datos	58
21.	Pantalla de corrida que muestra los valores	59
22.	Pantalla de resultados	62
23.	Pantalla de resultados de la grafica tiempo contra temperatura	63
24.	Perfil de temperatura de corridas directas en la muffle, a 60 min de calentamiento donde <b>A</b> es la temperatura del sensor y <b>B</b> es la temperatura del programa del horno.	65
25.	Perfil de temperatura de corridas directas en la muffle, a 90 min de calentamiento donde <b>A</b> es la temperatura del sensor y <b>B</b> es la temperatura del programa del horno.	65
26.	Perfil de temperatura de corridas directas en la muffle, a 120 min de calentamiento donde <b>A</b> es la	66



	temperatura del sensor y <b>B</b> es la temperatura del programa del horno	
27.	Predicción de distribución de Temperatura a 60, 90 y 120 min en horno muffla, COMSOL 3.2.	67
28.	Corridas en COMSOL3.2, perfiles de temperatura respecto a la longitud inferior del horno a los tiempo de 60, 90 y 120min de calentamiento	68
29.	Corridas en COMSOL3.2, perfiles de temperatura respecto a la longitud superior del horno a los tiempo de 60, 90 y 120min de calentamiento.	68
30.	Corridas en COMSOL3.2, perfiles de temperatura respecto a la longitud superior del horno a los tiempo de 60, 90 y 120min de calentamiento	69
31	Predicción de distribución de Temperatura 60 min de calentamiento en horno muffla, Programa en Visual Basic.	70
32.	Predicción de distribución de Temperatura 90 min de calentamiento en horno muffla, Programa en Visual Basic	70
33.	Predicción de distribución de Temperatura 120 min de calentamiento en horno muffla, Programa en Visual Basic.	71
34.	Volumen donde la temperatura es constante	73
35.	Volumen con temperatura constante para la sinterización de material cerámico muffla Thermolyne 4600.	74



## LISTA DE TABLAS

<b>TABLA</b>		<b>PAGINA</b>
1.	Clasificación de simuladores	12
2.	Propiedades termodinámicas del aire seco a presión atmosférica	50
3.	Descripción de constantes	52



## RESUMEN

El siguiente trabajo se enfoca a realizar una simulación en el software Comsol 3.2 y un algoritmo en Visual Basic para conocer la distribución de la temperatura en función del tiempo en un horno muffle, esto con el fin de obtener resultados óptimos al realizar la cohesión de cerámica, con la intención de que esta no presente ruptura alguna.

El desarrollo experimental consistió en conocer el perfil de temperatura de la resistencia  $\text{MoSi}_2$  y saber su distribución en el horno para encontrar el lugar mas perfecto para la cohesión de cerámica, teniendo en cuenta que la temperatura mas alta fue de  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  y en tiempos diferentes de: 60, 90 y 120 minutos y ejes diferentes: x, y, z.

Aunado lo anterior se demostró con los resultados experimentales la altura optima de la resistencia para que se efectuó la cohesión de cerámica y esta no sufra ninguna ruptura y se determino que si existe el lugar preciso al igual que se determino que existen lugares donde la temperatura no se distribuye equilibrada, si no que esta es variante.



## INTRODUCCIÓN

Los elementos de calefacción eléctricos disilicido del molibdeno ( $\text{MoSi}_2$ ) son resistencias que generan los componentes de la calefacción. Se utiliza en temperatura alta bajo atmósfera la cual oxida. Así este elemento tiene efecto único de la resistencia de la oxidación en grados de la temperatura alta (1300 a 1700 °C). El  $\text{MoSi}_2$  tiene una estructura laminar cristalina en forma de capas, en donde entre dos laminillas de azufre se encuentra una de molibdeno; cada laminilla es tan fina que aproximadamente 1,630 de ellas superpuestas alcanzan solamente un espesor de una micra. Se utilizan en las industrias del cristal de la metalurgia, del material refractario de cerámica, de los dispositivos electrónicos cristalinos, y de la fabricación del horno como elementos de calefacción ideales. Un horno es un compartimiento cerrado que se utiliza para calentar, cocer o secar. Se usa habitualmente en cocina y cerámica. No sólo se aplica a las industrias de silicatos, si no también a artículos y recubrimientos aglutinados por medio del calor, con suficiente temperatura como para dar lugar al sinterizado. Este campo se está ampliando nuevamente incluyendo en él a cementos y esmaltes sobre metal. Su uso inicial fue, fundamentalmente, como recipiente para alimentos; más adelante se utilizó para hacer figuras supuestamente de carácter mágico o religioso. También se empleó como material de construcción en forma de ladrillo, teja, baldosa o azulejo, tanto para paramentos como para pavimentos.

En el área de Académica de Materiales y Metalurgia (AAMyM) de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo se cuenta con un horno muffle thermolyne 46000, figura 1, del cual se sospecha que existe una mala distribución de la temperatura, ocasionando que las piezas cerámicas de cocción se fracturen.



**Figura 1.** Horno Thermolyne 46000

Para la solución de dicho problema se propone hacer un estudio de la distribución de temperatura en el horno, por medio del modelado en el software comercial COMSOL 3.2 y la programación en Visual Basic, bajo diferentes condiciones límite.

El modelo de simulación considera los mecanismos de calentamientos por conducción, convección y por corriente eléctrica (Ley de Joule). De donde la meta



de este trabajo fue determinar el perfil de temperatura dentro de un horno muffle thermolyne 46000, el cual es usado para el tratamiento térmico de cerámicos.

Los investigadores del AAMyM fabrican piezas cerámicas, especialmente de alumina, las cuales en el proceso de sinterizado, en la muffle thermolyne 46000, sufren fractura figura 1, estos crisoles soportan temperaturas de hasta 1800°C, son utilizados para la fundición de metales en proyectos de investigación.



## **Objetivo General**

- ❖ Realizar un estudio teórico, del perfil de temperatura en horno muffla thermolyne 46000, mediante la aplicación del software de simulación COMSOL 3.2 y la programación en Visual Basic.

## Objetivos específicos

- ❖ Determinar los perfiles de temperatura por medio de la transferencia de energía en las resistencias (conducción- convección, ley de joule).
- ❖ Determinar los perfiles de temperatura mediante la transferencia de energía dentro del horno (conducción).
- ❖ Concluir respecto a los resultados la posición de temperatura homogénea dentro del horno.

## Justificación

Este trabajo es significativo por la solución del problema a nivel económico, las piezas cerámicas o crisoles tienen un precio de \$ 1200 en el mercado, el costo de la fabricación de estas piezas en el AAMyM es de \$ 500.

Los resultados que se obtengan en este trabajo también pueden impactar en la sinterización de otras piezas cerámicas, que utilicen los investigadores en esta área académica.

Con este trabajo se obtendrán las bases teóricas para el estudio de transferencia de calor en hornos tipo muffle para la aplicación de sinterización de cerámicos, figura 2, ya que este tema se está estudiando en otras instituciones a nivel nacional para la cocción de cerámica artesanal decorativa (Puebla, Oaxaca, etc.).



**Figura 2.** Crisoles de alumina, que sufrieron fractura en la sinterización en la muffle thermolyne 46000



## CAPITULO 1

### ANTECEDENTES

#### 1.1 EFICACIA DE LA SIMULACIÓN

El uso de simuladores computarizados data de la segunda mitad del siglo pasado. El motor intelectual de su uso se asigna a la contribución de John Dewey<sup>1</sup> en su obra "Education and Experience" en donde argumentaba en contra del exceso de teoría. La primera simulación gerencial fue auspiciada por la American Management Association en 1957. Bass<sup>2</sup>, diseñador de un simulador especialmente interesante (U. of Pittsburg Production Organization Experiment) estimó en 1964 que existían más de 100 simulaciones. Graham y Gray<sup>3</sup> publican una descripción en 1969 de 180 simuladores computarizados. Fue en ese mismo año 1969 cuando se publica la primera colección anotada de simuladores<sup>4</sup>. Diez años más tarde aparecía la cuarta edición<sup>5</sup> describiendo tres veces más simulaciones. La cuarta parte de las simulaciones listadas en esa 4ta edición fueron completamente nuevas. Otro estudio fechado en 1973 por Zuckerman<sup>6</sup> catalogó 215 simuladores. Al año siguiente en 1974, Schriesham<sup>7</sup> localizó 400 simuladores. Parte de este gran crecimiento fue el estándar de acreditación impuesto por la American Association of Collegiate Schools of Business (AACSB) al exigir que el plan de estudios de los MBA's debía concluir con un curso integrador de Estrategia y Política, un curso ideal para el uso de simuladores y en donde se ha concentrado su uso<sup>8</sup>.



Durante los años 80 las simulaciones crecieron especialmente en complejidad. Sin duda la más compleja fue la simulación usada en el Ejercicio Ace de la Organización del Atlántico Norte en 1989 en la que participaron tomando decisiones 3,000 comandantes durante once días seguidos. Hacia 1996, una encuesta dirigida por Anthony J. Faria<sup>9</sup>, encontró en los Estados Unidos a 11,386 instructores universitarios usando simuladores en las universidades americanas y a 7,808 empresas usando simuladores en la capacitación de su personal.

En América Latina la primera universidad en usar simulaciones en 1963 fue el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, poco después de organizar la primera Maestría en Administración. Fue allí donde surgió el concepto integral de LABSAG como un laboratorio que pudiera administrar el flujo de alumnos y participantes por Internet.

En los años siguientes, los simuladores fueron desarrollados, modificados y acrecentados con un “upgrade” en Londres, México D.F. y Lima, Perú para servir en línea a muchos usuarios universitarios y ejecutivos. Habiendo comenzado con tres simuladores ahora LABSAG incorpora a nueve simuladores con operación enteramente automática y transparente por Internet, en el sentido de no requerir la intervención continua y constante de personal de Ingeniería de Sistemas para cada proceso de decisiones.



El último adoptador universitario de LABSAG ha sido en el 2003, la Universidad Tecnológica de México (Unitec) con sus 5 “campi” en el DF, en donde educa a 45,000 alumnos

### **1.1.1 Eficacia educacional de los simuladores**

A pesar de su gran difusión, la efectividad de los simuladores tardó varios años en ser explorada. Uno de los primeros estudios fue realizado en 1962 en Harvard por el Prof. James McKenney usando un simulador de producción<sup>10</sup>. Aplicando metodología experimental el Prof. McKenney concluyó: los alumnos que usaron el simulador obtuvieron puntajes significativamente más altos a los que usaron solo casos, cuando se midieron objetivamente varios conceptos claves. El estudio más riguroso y más citado fue el conducido por Anthony Raia<sup>11</sup> en 1966. El Dr. Raia contrastó el comportamiento de tres grupos de alumnos. En uno sólo se usaron casos, el método tradicional, mientras que en los otros dos se usaron casos combinados con un simulador ajustado a dos niveles de complejidad. Raia concluyó que los simuladores eran herramientas educacionales efectivas. Corroborándolo, Meier, Newell y Paser dictaminaron en un libro publicado en 1969, “existe considerable evidencia que los simuladores, tanto los de gerencia general cuanto de una función específica, tienen valor educacional”<sup>12</sup>



Años más tarde Wolfe<sup>13</sup> en la Universidad de Illinois, realizaría una serie de experimentos contrastando un curso en donde se mezclaron casos con un simulador, con otro curso en donde solo se usaron casos. Wolfe midió el conocimiento previo a la clase en varias dimensiones tales como la comprensión de conceptos y conocimiento de hechos mediante un examen en base a ensayo tan preciso que pudo ponerle un puntaje a cada alumno. La misma medición se realizó después de terminado cada curso. Comparando exámenes pre con post, Wolfe concluyó que la mezcla de casos con el simulador produjo resultados de aprendizaje muy superiores al uso de casos por sí solos, especialmente en cuanto a conocimiento conceptual. Wolfe más tarde realizó otro experimento<sup>14</sup> para localizar las variables claves en el éxito de cada equipo gerencial simulado, usando una técnica de incidentes críticos. El análisis de 1,453 incidentes críticos permitió establecer que la atmósfera grupal de toma de decisiones fue clave para explicar el éxito en los simuladores siendo el segundo factor clave la formulación de una estrategia y plan a largo plazo. Las firmas simuladas exitosas fueron capaces de emplear flexiblemente una gran variedad de reacciones a los problemas que se enfrentaban en un simulador. Wolfe reportó: los alumnos reconocieron al simulador, pues recompensaba estrategias consistentes e integradas, tal como lo hubiera hecho la realidad del mundo de los negocios.

Desde entonces se han publicado dos *metas análisis* (estudios que sintetizan cuantitativamente los resultados de muchos estudios), uno en 1981 y otro en 1999, de los muchos estudios realizados sobre la efectividad de las simulaciones en



general y no solo las usadas en administración de negocios. En el estudio de Dekkers y Donatti<sup>15</sup>, publicado en 1981, estos dos académicos australianos analizaron todas las publicaciones en inglés sobre la efectividad de simuladores en varias áreas, incluyendo ciencias y administración, publicados entre 1969 y 1979. Sintetizaron el efecto estadísticamente positivo de los simuladores en tres factores pedagógicos: retención de conceptos, desarrollo de actitudes y desarrollo cognoscitivo. Concluyendo que los simuladores eran efectivos en el desarrollo y cambio de actitudes, mucho menos en el desarrollo cognoscitivo y muy pobres en retención. Sin embargo, Jude Lee<sup>16</sup> en un estudio muy reciente, publicado en 1999 arguye que estos resultados ocurrieron porque se mezclaron en una sola categoría los varios tipos de simulación que existen. Lee definió una simulación como “un programa de cómputo que temporalmente crea un conjunto de factores asociados a través de relaciones de causa y efecto”. Cuando se usan como herramienta educacional directamente como son las simulaciones, dice, “permiten tender un puente entre la realidad y lo abstracto por medio del método del descubrimiento, para mejorar la motivación y acrecentar el aprendizaje vía la interacción activa del alumno”. A estas simulaciones, muy usadas en las ciencias, las denomina Jude Lee “simulaciones de presentación” pero básicamente, afirma se deben clasificar a las simulaciones en tres tipos básicos: simulaciones de presentación, simulaciones de práctica, y simulaciones híbridas.

Las simulaciones de *presentación* se usan para enseñar nuevo conocimiento, este sería el caso del lanzamiento de un satélite en una órbita polar errónea para que el



alumno “descubra” como colocarlo en la órbita ecuatorial correcta. En [www.sciencesimulations.com](http://www.sciencesimulations.com) hay varios ejemplos aplicables a las ciencias diseñados por King’s College, University of London. También sería una simulación de *presentación* la simulación Macroajustes de Labsag, que se presenta en esta ponencia, en donde los alumnos descubren como funcionan los agregados macroeconómicos a partir del comportamiento de empresas simuladas que ellos mismos manejan.

En las simulaciones de *práctica*, en contraste, los alumnos finalizan un módulo de instrucción por exposición continuando con una simulación donde se practica en la aplicación de lo teóricamente aprendido. Tal sería el caso de Marklog en Labsag, donde es menester aprender de conceptos de logística previamente a ingresar al simulador.

En las simulaciones *híbridas*, la simulación programa instrucción y práctica al mismo tiempo a través del desarrollo de un escenario con eventos pre-planeados a lo largo de un cierto número de periodos simulados. Este sería el caso de Markestrat, Brandestrat y Simdef en LABSAG porque los Manuales son verdaderos textos sobre el tema y, además, el desarrollo en el tiempo simulado lleva a una serie de incidentes íntimamente ligados a los conceptos teóricos que al mismo tiempo el alumno va aprendiendo.



Jude Lee, también introduce varias de las tareas que hoy sabemos pueden hacer las simulaciones, pues no resuelven todo ni lo hacen todo. Citando un estudio de Thomas y Hooper<sup>17</sup>, quienes analizaron 29 estudios sobre simuladores clasificándolos dependiendo del tipo de rol de cada simulador, ver en tabla 1: experienciador o “madurador”, informador, reforzador o integrador, Lee argumenta que el rol de informador encaja bien con el simulador tipo *presentación* mientras que los demás papeles los cumplen bien los simuladores de *práctica* o híbridos:

**Tabla 1.** Clasificación de simuladores

<b>Rol del Simulador:</b>	<b>Presentación</b>	<b>Práctica</b>	<b>Híbrido</b>
Experienciador		X	X
Informador	X	X	X
Reforzador		X	X
Integrador	X		X

Las principales conclusiones del estudio de Thomas y Hooper fueron que los efectos de los simuladores no se revelan en las pruebas de conocimiento puro, la “retención de conceptos” de la que escribieron Dekker y Donatti, sino más bien en pruebas de transferencia y aplicación y que las simulaciones de práctica o híbridas se usan más frecuentemente para reforzar e informar. Jude Lee en su “meta-analysis” ubicó 19



estudios en donde se medía la efectividad de las simulaciones, todos ellos publicados después 1976 y 1992.

En una de dos variables de resultados, logro académico, Lee encontró que el 66 % de los alumnos que usaron simuladores mostraron significativamente mayores logros académicos (“academic achievement”) reflejado en puntajes de exámenes post simulación, el promedio de los alumnos en grupos de control donde no se usaron simuladores. Al separar las simulaciones tipo presentación de las de práctica o híbridas resultó que las de presentación mostraron mucho menores logros académicos, incluso menores a los del grupo de control. Otra conclusión fue que si los alumnos reciben alguna guía y asesoramiento durante la simulación, ello los ayudará a obtener mejores logros académicos

El estudio más reciente sobre la efectividad de las simulaciones incide directamente en el contexto del e-learning en línea, una modalidad que se ha visto plagada por altas tasas de deserción de los alumnos. Fue publicado por Brian H. Cameron de la Pennsylvania State University en el 2003<sup>18</sup>. El Prof. Cameron diseñó un experimento alrededor del tema de su especialidad: redes de computadoras o “computer networking”, tema tan complejo que tradicionalmente se había enseñado sólo mediante la práctica con el apoyo de un instructor pero, gracias a adelantos en simulación, podía fácilmente modelarse en una PC. El objetivo fue comparar el desempeño de 85 alumnos de pre-grado en un curso basado en simulación



(NetCracker Tech) frente al mismo curso con contenidos gráficos estáticos representacionales (Microsoft Visio), ambos en un contexto de enseñanza en línea. Toda la interacción con los alumnos fue en línea siendo el único contacto cara-a-cara las presentaciones de los proyectos por equipos. El impacto diferencial fue medido a través de exámenes de opciones múltiples, resultados de proyecto, y una encuesta a los alumnos. Los resultados estadísticos mostraron que el grupo usando simulación logró mejores resultados estadísticamente significativos, el grupo usó presentaciones estáticas con mejor comprensión de conceptos y mejor retención de información. Los alumnos que usaron simulación reportaron haber invertido más tiempo en las tareas del curso (3.5 horas) en contraste con los que usaron Visio (2 horas) y además que “gastaron más tiempo en las tareas asignadas primordialmente porque la simulación les permitía experimentar con diferentes configuraciones de redes y verificar la funcionalidad de los diseños”<sup>19</sup>. Varios estudiantes dijeron que la simulación les había permitido comprender los complejos conceptos de redes mientras los estudiantes en el otro grupo informaron que no había forma de verificar si sus diseños de redes funcionarían correctamente.

La tasa de deserción fue nula en el grupo con simulador, mientras que en el de enseñanza estática en línea tres alumnos de 40 desertaron con calificaciones inaceptables. Para Cameron sus resultados confirmaron los resultados de otros investigadores en el sentido que las simulaciones:



- ❖ Permiten la aplicación de conocimiento a la solución de problemas<sup>20</sup>
- ❖ Mejoran la transferencia de conocimiento<sup>21</sup>
- ❖ Aumentan la comprensión de conceptos abstractos.
- ❖ Aumentan la motivación de los alumnos

Estas contribuciones a la educación en línea hicieron atractivo el concentrar varios simuladores en una sola plataforma: el Laboratorio de Simuladores en Administración y Gerencia, (LABSAG)

Partiendo de lo anterior se puede determinar que una de las aplicaciones más importantes de la simulación en computadoras es la simulación visual sin duda alguna todo proyecto se debería basar en la simulación para que se tenga la certeza de que lo implementado tendrá las características adecuadas y así evitar gastos infructuosos, en el presente se aplicará el software comercial COMSOL 3.2, la cual es una de las herramientas especializada en ingeniería.

## 1.2 COMSOL 3.2

Es una herramienta de modelado y análisis para prototipaje virtual de fenómenos físicos, puede modelar virtualmente cualquier fenómeno físico que un ingeniero o científico pueda describir con ecuaciones diferenciales parciales (EDPs), incluyendo transferencia de calor, movimiento de fluidos, electromagnetismo y mecánica



estructural, soportando la integración de problemas de diferentes campos multifísicos.

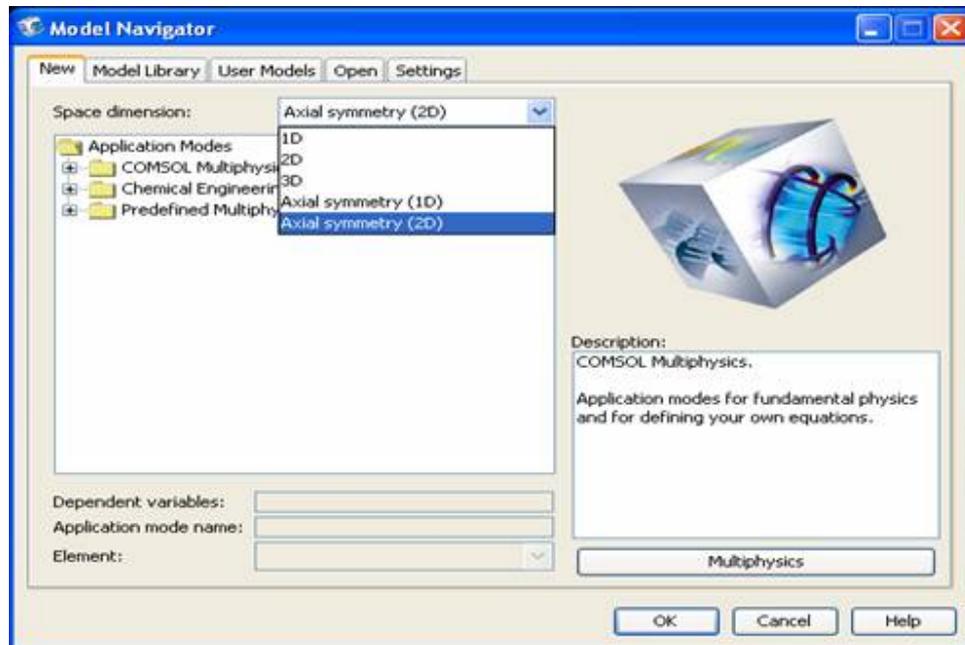
### **1.2.1 Visión General**

Las prestaciones de multifísica integradas en COMSOL 3.2 capacitan al usuario para simultáneamente modelar cualquier combinación de fenómenos. A través de estas prestaciones, COMSOL 3.2 integra las dos formas posibles de modelar (a través de aplicaciones predefinidas las cuales permiten crear el modelo fijando las cantidades físicas que caracterizan el problema y a través de las ecuaciones modelan el problema) y permite combinarlas. La estructura sobre la cual trabaja COMSOL 3.2 es un sistema de Ecuaciones Diferenciales Parciales (PDEs), una descripción matemática de varios fenómenos físicos basados en las leyes de la ciencia. Cualquier experto en su campo que sepa como crear simulaciones usando PDEs puede ampliar aquellos sistemas modelando explícitamente en términos de estos tipos de ecuaciones. COMSOL 3.2 simplifica el desarrollo de aplicaciones a través del uso de la Biblioteca de Modelos, que incorpora ejemplos de diversas áreas de aplicación. A través de ellos, los usuarios, sin necesidad de poseer profundos conocimientos en matemáticas o análisis numérico, podrán construir sus modelos.



### 1.2.2 Características principales <sup>[22]</sup>

- ❖ Interfaz gráfica "amigable" e interactiva para todas las etapas del proceso de modelado.
- ❖ Formulación general para un modelado rápido y sencillo de sistemas arbitrarios de PDEs.
- ❖ Multifísica multidimensional para modelado simultáneo de sistemas en 1D, 2D y 3D.
- ❖ Incorpora herramientas CAD para modelado sólido en 1D, 2D y 3D. ver en la figura 3.
- ❖ Permite importar y reparar la geometría de archivos CAD en formato DXF y IGES. En particular, permite la importación de archivos creados en AutoCAD y CATIA.
- ❖ Generación automática y adaptativa de mallas, con un control explícito e interactivo sobre su tamaño.
- ❖ Extensa biblioteca de modelos que documentan y muestran más de 80 ejemplos resueltos.
- ❖ Disponibles los "solvers" más novedosos; entre ellos destacan, "solvers" iterativos para problemas estacionales lineales y no lineales, dependientes del tiempo, y de valores propios.
- ❖ Postprocesado interactivo que permite visualizar cualquier función de la solución.
- ❖ Integración total con MATLAB y sus toolboxes.



**Figura 3.** Navegador modelo

### 1.2.3 Áreas de aplicación

Las prestaciones de modelización y simulación de COMSOL, junto con las librerías disponibles para él, lo convierten en una herramienta aplicable en amplio abanico de áreas, entre las que destacamos:

- ❖ Acústica, electromagnetismo, sistemas microelectromecánicos (MEMS), ingeniería de microondas, componentes de radiofrecuencia, dispositivos semiconductores, propagación de ondas.
- ❖ Reacciones químicas, difusión, dinámica de fluidos, fluidos en medios porosos, transferencia del calor, fenómenos de transporte.
- ❖ Mecánica de estructuras.



- ❖ Física, geofísica, óptica, fotónica, mecánica cuántica.
- ❖ Sistemas de control.
- ❖ Modelización de componentes.
- ❖ Matemática aplicada.

### 1.2.4 Librerías de COMSOL 3.2

#### *Librerías de Comsol*

**CAD Import Module:** Una estrecha colaboración entre los diseñadores y los modeladores requiere de buenas herramientas para manipular geometrías. COMSOL Multiphysics introduce un potente e importante módulo, el CAD Import Module que simplifica en gran medida la transición entre los diseños geométricos que los ingenieros crearon con herramientas CAD especializadas al modelado matemático en COMSOL Multiphysics (antes FEMLAB).

**Chemical Engineering Module:** módulo para ingeniería química que proporciona una manera poderosa de modelar procesos y equipos en el campo de ingeniería química por medio de una interfaz interactiva de uso gráfico. Se caracteriza por sus aplicaciones para transporte de masa, calor y momentum agrupados con reacciones químicas en geometría 1D, 2D y 3D. El módulo de ingeniería química aplica la tecnología más reciente para solucionar ecuaciones parciales diferenciales (PDEs) a su experiencia en ingeniería química.



**Earth Science Module:** este módulo consta de un gran número de interfaces de modelado predefinidas y listas para usar en el análisis de flujos subsuperficiales. Estas interfaces permiten la rápida aplicación de las ecuaciones de Richard, ley de Darcy, la extensión de Brinkman de la ley de Darcy para flujos en medios porosos y las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo libre. Además, el módulo puede modelar el transporte y reacción de solutos así como el transporte de calor en medios porosos. La librería de modelos incluye ejemplos que abarcan desde flujos de petróleo y gas en medios porosos a la distribución de trazadores en flujos de acuíferos.

**Electromagnetics Module:** módulo proporciona un entorno único para la simulación de propagación de ondas y electromagnética AC-DC en 2D y 3D. Aplica la tecnología más reciente a su experiencia en electromagnética.

**Heat Transfer Module:** este módulo resuelve problemas que involucran cualquier combinación de fenómenos de conducción, convección y radiación. Una amplia variedad de interfaces para el modelado permiten por ejemplo realizar estudios de radiación superficie a superficie, flujo no isotérmico, transferencia de calor en tejidos vivos y transferencia de calor en capas finas y corazas. Los detallados modelos ilustran ejemplos para diversas áreas de aplicación como enfriamiento electrónico y sistemas de potencia, procesado y producción térmica o tecnología médica y bioingeniería.



**MEMS Module:** incluye aplicaciones listas para usar que cubren aspectos como microfluídica más electromagnético estructurales, interacciones térmico estructurales y fluídico estructurales. La librería de modelos adjunta aporta detallados ejemplos que muestran como modelar mecanismos micro electromecánicos como actuadores, sensores, y dispositivos microfluídicos. Los modelos, a menudo, tratan deformaciones grandes de piezas sólidas, que el software tiene en cuenta para los contornos móviles.

**Structural Mechanics Module:** módulo de mecánica estructural que proporciona un entorno de modelación especializado donde se complementa el poder de análisis de elementos finitos con su experiencia en mecánica estructural. Combinado con la modelación basado en ecuaciones de FEMLAB, ofrece combinaciones multifísicas ilimitadas y análisis tradicional de mecánica estructural en 2D y 3D.

#### 1.2.4 Plataformas soportadas y requisitos del sistema

##### Requerimientos generales para todas las plataformas:

- ❖ Unidad CD-ROM para la instalación
- ❖ TCP/IP requerido en todas las plataformas cuando se utilice un gestor de licencias
- ❖ Adobe Acrobat Reader 5.0 o superior para visualizar e imprimir la documentación de COMSOL en formato pdf.



- ❖ El espacio en el disco duro requerido para la instalación varía dependiendo del tamaño de la partición y la instalación opcional de los ficheros de ayuda en línea. El instalador de COMSOL informará de los requisitos de espacio en el disco duro para su instalación particular.

#### Recomendaciones generales del sistema

- ❖ Para el modelado de grandes modelos 3D, se recomienda una cantidad mínima de 512 MB de memoria.

#### Licencias en red flotante

- ❖ Las licencias en red flotante son soportadas en redes heterogéneas de ordenadores Windows, Linux, UNIX y MacC OS X. Tanto el gestor de licencias como la aplicación COMSOL pueden correr tanto en Windows, Linux, UNIX o Mac OS X y un ordenador puede correr ambos.

### 1.3 VISUAL BASIC

**BASIC** es una familia de lenguajes de programación. Fue originalmente ideado como una herramienta de enseñanza. El lenguaje de programación BASIC es el acrónimo de *Beginners All-purpose Symbolic Instruction Code* <sup>23</sup> (en español 'código de instrucciones simbólicas de propósito general para principiantes' fue inventado en 1964 por John George Kemeny (1926-1993) y Thomas Eugene Kurtz (1928-) en el



Dartmouth College. El BASIC original de Kemeny y Kurtz era conocido como *BASIC Dartmouth*.

Nació como una herramienta destinado a principiantes, buscando una forma sencilla de realizar programas, empleando un lenguaje casi igual al usado en la vida ordinaria y con instrucciones muy sencillas y escasas (en inglés). Teniendo en cuenta el año de su nacimiento, este lenguaje cubría casi todas las necesidades para la ejecución de programas.

La evolución del BASIC por los años 70 fue escasa, dado el auge que tomaron en aquella época lenguajes de alto nivel como el FORTRAN y el COBOL. En 1978 se definió una norma para unificar los Basics existentes creándose la normativa BASIC STANDARD.

### **1.3.1 Los ocho principios de diseño de BASIC fueron:**

- ❖ Ser fácil de usar para los principiantes.
- ❖ Ser un lenguaje de propósito general.
- ❖ Permitir que los expertos añadieran características avanzadas, mientras que el lenguaje permanecía simple para los principiantes.
- ❖ Ser interactivo.
- ❖ Proveer mensajes de error claros y amigables.
- ❖ Responder rápido a los programas pequeños.
- ❖ No requerir un conocimiento del hardware de la computadora.



- ❖ Proteger al usuario del sistema operativo.

**Visual Basic** es un lenguaje de programación, así como el único IDE visual y compilador que existen para él, desarrollado por Alan Cooper para Microsoft <sup>24</sup>. El lenguaje de programación es un dialecto de BASIC, con importantes añadidos. Su primera versión fue presentada en 1991 con la intención de simplificar la programación utilizando un ambiente de desarrollo completamente gráfico que facilitara la creación de interfaces gráficas y en cierta medida también la programación misma.

Es un lenguaje de fácil aprendizaje (pero algunos son más complicados debido a que la persona que lo usa tenga conocimiento de este programa amplio) pensado tanto para programadores principiantes como expertos, guiado por eventos y centrado en un motor de formularios poderoso que facilita el rápido desarrollo de aplicaciones gráficas. Su principal innovación, que luego fue adoptada por otros lenguajes, fue el uso de un tipo de dll, llamado inicialmente vbx y posteriormente ocx, que permiten contener toda la funcionalidad de un control y facilitar su rápida incorporación a los formularios.

Su sintaxis, derivada del antiguo BASIC, ha sido ampliada con el tiempo al agregarse las características típicas de los lenguajes estructurados modernos. Se ha agregado una implementación limitada de la Programación Orientada a Objetos (los propios formularios y controles son objetos). Posee varias bibliotecas para manejo de bases



de datos, pudiendo conectar con cualquier base de datos a través de ODBC (Informix, DBase, Access, MySQL, SQL Server, PostgreSQL, etc) a través de ADO.

Es utilizado principalmente para aplicaciones de gestión de empresas, debido a la rapidez con la que puede hacerse un programa que utilice una base de datos sencilla, además de la abundancia de programadores en este lenguaje.

El compilador de Microsoft genera ejecutables que requieren una DLL para sus funciones ejecutables, en algunos casos llamada MSVBVMxy.DLL (acrónimo de "Microsoft Visual Basic Virtual Machine x.y", siendo x.y la versión) y en otros VBRUNXXX.DLL ("Visual Basic Runtime X.XX"), que provee todas las funciones implementadas en el lenguaje. Además existen un gran número de bibliotecas (DLL) que facilitan el acceso a muchas funciones del sistema operativo y la integración con otras aplicaciones.

Con la versión 5.0 se implementó por primera vez la posibilidad de compilar a código nativo, obteniendo una mejora de rendimiento considerable. Tanto ésta como la posterior 6.0 soportaban características propias de los lenguajes orientados a objetos, aunque careciendo de algunos ítems importantes como la herencia, el polimorfismo y la sobrecarga.

Las versiones actuales de Visual Basic se basan en la plataforma .NET, teniendo poco que ver con el lenguaje original, acercándose más a una traducción de C++ que



al antiguo VB, el lenguaje nativo de .NET. Por eso hay un debate sobre la validez de este "nuevo" lenguaje, sus pocas ventajas sobre C++ y sobre la posible desaparición en futuras versiones. Está integrado en el mismo entorno de desarrollo que los demás: Visual Studio .NET.

### **1.3.2 Características Generales de Visual-Basic**

VB es una herramienta de diseño de aplicaciones para Windows, en la que éstas se desarrollan en una gran parte a partir del diseño de una interfase gráfica. En una aplicación VB, el programa está formado por una parte de código puro y otras partes asociadas a los objetos que forman la interfaz gráfica.

Es por tanto un término medio entre la programación tradicional, formada por una sucesión lineal de código estructurado y la programación orientada a objetos. Combina ambas tendencias. Ya que no podemos decir que VB pertenezca por completo a uno de esos dos tipos de programación, debemos inventar una palabra que la defina: PROGRAMACIÓN VISUAL.

### **1.3.3 La creación de un programa bajo Visual Basic lleva los siguientes pasos:**

- ❖ Creación de una interfase de usuario. Esta interfase será la principal vía de comunicación hombre-máquina, tanto para salida de datos como para entrada.



Será necesario partir de una ventana -Formulario- a la que le iremos añadiendo los controles necesarios.

- ❖ Definición de las propiedades de los controles - Objetos - que hayamos colocado en ese formulario. Estas propiedades determinarán la forma estática de los controles, es decir, como son los controles y para qué sirven.
- ❖ Generación del código asociado a los eventos que ocurran a estos objetos. A la respuesta a estos eventos (click, doble click, una tecla pulsada, etc.) le llamamos procedimiento y deberá generarse de acuerdo a las necesidades del programa.
- ❖ Generación del código del programa. Un programa puede hacerse solamente con la programación de los distintos procedimientos que acompañan a cada objeto. Sin embargo, VB ofrece la posibilidad de establecer un código de programa separado de estos eventos. Este código puede introducirse en unos bloques llamados Módulos, en otros bloques llamados Funciones, y otros llamados Procedimientos. Estos Procedimientos no responden a un evento acaecido a un objeto, sino que responden a un evento producido durante la ejecución del programa.

### Ventajas

- ❖ Permite programar un microcontrolador de forma BASIC\* <sup>25</sup>
- ❖ Visual Basic es un lenguaje **simple** y por tanto **fácil de aprender**.



- ❖ Su **mayor facilidad** radica en el **dibujado de formularios**, mediante el **arrastre de controles**.
- ❖ La **sintaxis** es cercana al **lenguaje humano**.
- ❖ Es un lenguaje RAD, centrado en conseguir en el menor tiempo posible los resultados deseados, por eso mismo su mayor uso está en las **pequeñas aplicaciones**, como gestión de bares, empresas, restaurantes.
- ❖ Tiene una **ligera implementación de POO**.
- ❖ Permite el **tratamiento de mensajes de Windows**.
- ❖ Gran parte del trabajo en el diseño de formularios está realizado, gracias a la **gran gama de controles incorporados** junto al lenguaje que ahorran costes de tiempo de desarrollo.
- ❖ Soporta el uso de componentes **COM** y **ActiveX**.
- ❖ Permite crear **controles personalizados** fácilmente del **mismo modo** que el diseño de formularios.
- ❖ Permite **generar librerías dinámicas (DLL) ActiveX** de forma nativa y **Win32** (no ActiveX, sin interfaz COM) mediante una reconfiguración de su enlazador en el proceso de compilación.

## 1.4 HORNOS<sup>26</sup>

Es posible que el descubrimiento del fuego sea el más importante que ha realizado la humanidad. Entre otros usos, gracias a él el hombre primitivo se dio cuenta que el



agua no afectaba a los recipientes de arcilla cocida. Quizá esta observación se realizó al verter arcilla en un nido de pájaro utilizado para transportar cenizas todavía calientes. O tal vez se revistió de arcilla un hoyo en el suelo en el cual se iba a encender fuego, el cual la convirtió en un rudimentario recipiente. Se cree que los primeros descubrimientos que pusieron con relación a la arcilla y el fuego se efectuaron hace unos diez o doce mil años. Los primeros hornos se construyeron en Oriente Medio. Estaban contruidos por un hogar situado bajo una "parrilla" de arcilla sobre la cual se guardaban los recipientes. Luego se construía una especie de cámara amontonando encima vasijas viejas o haces de hierba entre los cuales se dejaba una chimenea. El calor que retenía la cámara hacía posible alcanzar temperaturas más elevadas que las conseguidas con una hoguera. Éste fue el primer horno de tiro de la Historia. Gradualmente se convirtieron los hornos en estructuras permanentes y se protegió de las llamas a los recipientes, con lo que se pudo decorarlos y esmaltarlos sin temor a que el fuego los alterara. También se consiguió ejercer un control sobre la temperatura interior. Los hornos romanos eran circulares; en su interior había una plataforma perforada situada sobre una columna central. Se quemaba el combustible en la cámara de debajo de la plataforma, sobre la que se disponían los recipientes; la madera utilizada como combustible se introducía por un conducto recto que también regulaba la entrada del aire.

Los alfareros chinos construyeron distintos tipos de hornos, que por lo general situaban en la pendiente de una colina. Se encendía el fuego en la parte inferior, en donde las cámaras en que se hallaban los recipientes formaban parte, en realidad,



de la chimenea. Un regulador de tiro situado en la cámara superior servía para regular la salida de los gases calientes y el horno retenía el calor. Los hornos de este tipo proporcionaban elevadas temperaturas, que gracias al aislamiento de la tierra y al regulador de gases alcanzaban unos 1200° C en zonas próximas al hogar. A esta temperatura la mayoría de las arcillas se vitrificaban y se convierten en gres. Al hacerse más complejos, se construyeron estos hornos en una serie de escalones, parte debajo de tierra y parte en la superficie; algunos estaban divididos en pequeñas cámaras. Se abrieron unos pequeños agujeros en las paredes para añadir combustible, de forma que las temperaturas se mantuvieran constantes. Estos hornos se difundieron por todo el Lejano Oriente, aunque representasen ligeras variantes de un lugar a otro. Hasta hace relativamente poco tiempo continuaban siendo más eficaces y capaces de alcanzar temperaturas más elevadas que los construidos en Occidente. En el siglo XVII aún se utilizaban en Europa hornos de ladrillos de una sola cámara.

#### **1.4.1 Generalidades**

La cocción constituye el último paso en el proceso de producción de la cerámica. En esta operación se necesita utilizar una cantidad de calor muy superior a la que proporciona un horno doméstico. Es posible emplear, de todas formas, un horno de confección más o menos casera, pero resulta mejor adquirir un pequeño horno



eléctrico. Los hornos cerámicos pueden clasificarse en diferentes grupos, según su forma de trabajo, figura 4.

#### 1.4.2 Caldeo directo o indirecto.

También se conocen como hornos de llama directa o de llama indirecta. Los hornos de **caldeo directo o llama directa** son los que se emplean para cocer manufacturas bastas, normalmente sin barniz, como pueden ser ladrillos, tejas macetas de pasta de arcilla y chamota, algunos tubos etc. Los objetos aquí cocidos pueden someterse a la llama directa.

Los hornos de **caldeo indirecto o llama indirecta** son los empleados en el caso de que las manufacturas estén barnizadas ya que, las mismas, no deben exponerse a la llama directa, humo o cenizas, pues influiría negativamente en el resultado final, por lo que, los objetos cocidos en este tipo de hornos deben aislarse en cápsulas cerradas que se estiban una encima de otra, o bien se emplea un horno que tenga un departamento interior, donde las llamas no tengan ningún tipo de incidencia dentro de esta cámara y solamente, las llamas incidirán en las paredes exteriores de este compartimento calentando el interior de la cámara. El caldeo indirecto requiere siempre un mayor consumo térmico.



### **1.4.3 Hornos periódicos y continuos.**

Los hornos de **caldeo periódico** son aquellos que deben calentarse en cada cochura, dejándose enfriar antes de colocar la siguiente. Mientras los hornos de **caldeo continuo** o interrumpido, como su nombre indica, son aquellos que nunca dejan enfriarse.

El primer sistema es el más antiguo y el que sigue siendo más empleado en la pequeña industria pero para las empresas con grande y constante producción, una cocción continuada ofrece grandes ventajas, siendo la principal el ahorro de energía.

### **1.4.4 Hornos de laboratorio.**

Hornos experimentales o de ensayo, se usan para hacer pequeñas pruebas de cochura de cualquier tipo de pasta o barniz, comprobar la temperatura de fusión, frita o muestra de un pigmento o colorante. Los hornillos eléctricos son especialmente prácticos. Empleando gas como combustible, pueden utilizarse hornillos con quemadores de Bunsen o quemadores Méker para temperatura de 1200 a 1300°. Con ventiladores se pueden alcanzar temperaturas más elevadas.

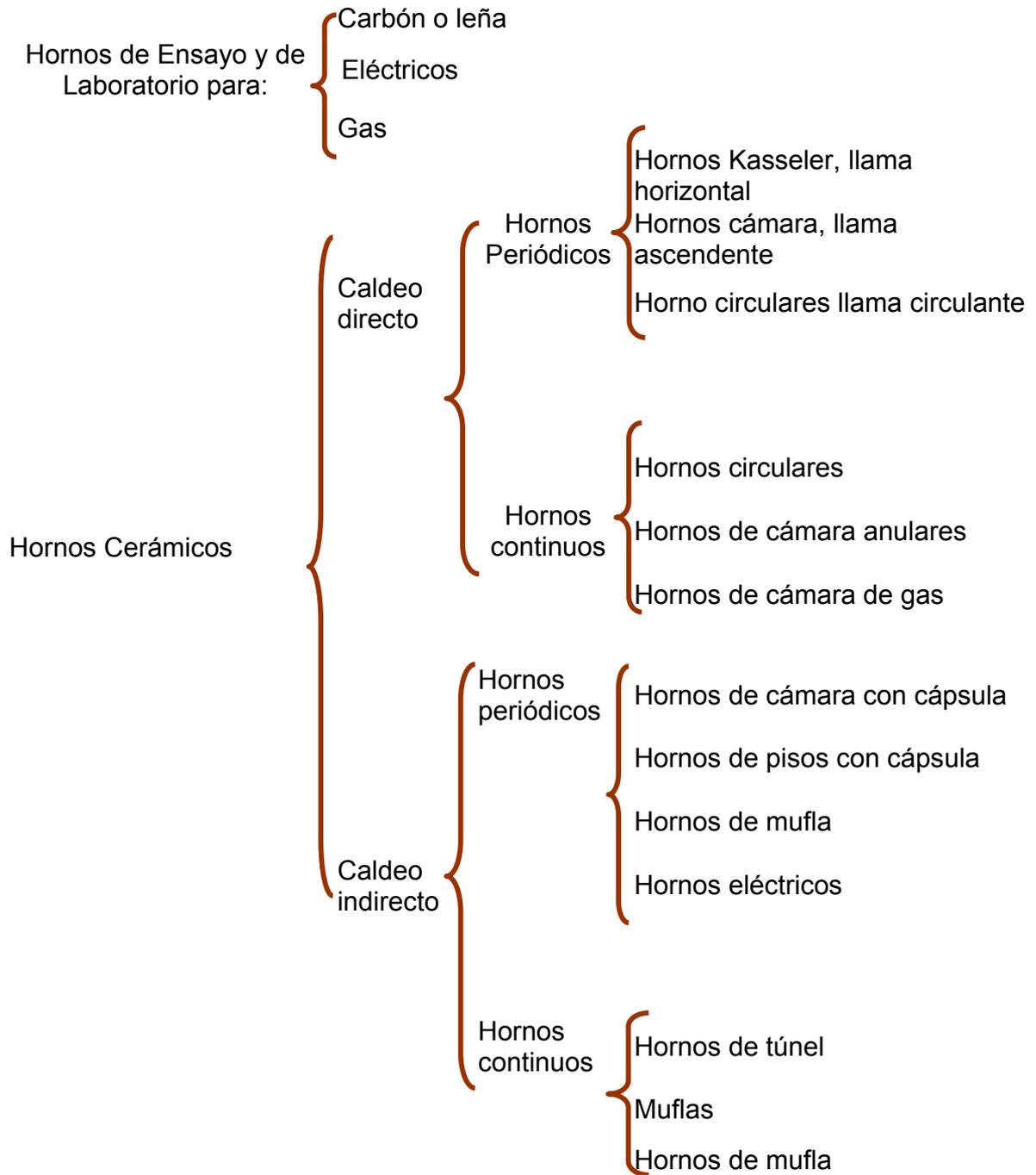
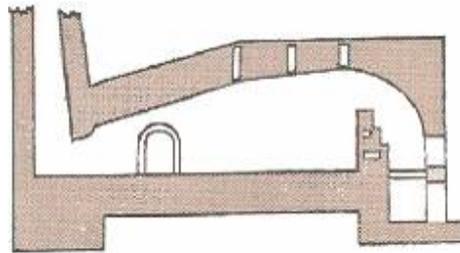


Figura 4. Clasificación de los hornos.

### 1.4.5 Hornos Kasseler

Un tipo de hornos antiguo para la cochura de tejas y alfarería, es el llamado horno Kasseler. El espacio interior es alargado y se extiende del hogar a la chimenea. La llama es horizontal y pasa por encima o a través de un puente en el fogón, figura 5.



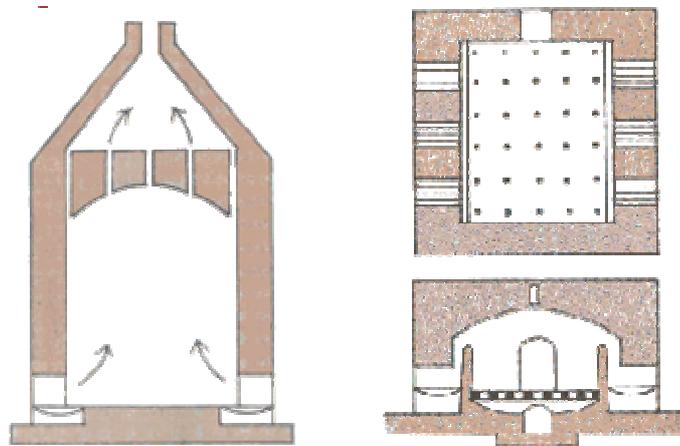
**Figura 5.** Horno Kasseler

### 1.4.6 Hornos de cámara y hornos redondos.

Estos hornos pueden tener distintas formas (redondos o cuadrados) y usar los principios de llama ascendente o de llama reversible, es más práctico usar hornos de llama reversible que distribuyen de forma más uniforme el calor obteniendo un caldeo uniforme. Los hornos de llama reversible se usan, especialmente, para la cochura de gres.

Los hornos **de cámara de dos pisos**, figura 6, hallan especialmente empleo para cocer fayenza. En la cámara inferior y más cálida se hace la primera cocción. En

torno a este piso inferior, hay un número de hogares, de los que el fuego pasando por puentes, desciende al suelo y se reúne en canales verticales practicados en el muro, que conducen al piso o cámara para la cocción de cápsulas o la de barniz de 1000 - 1100°. Puede regularse la temperatura del horno abriendo directamente los canales del piso inferior.

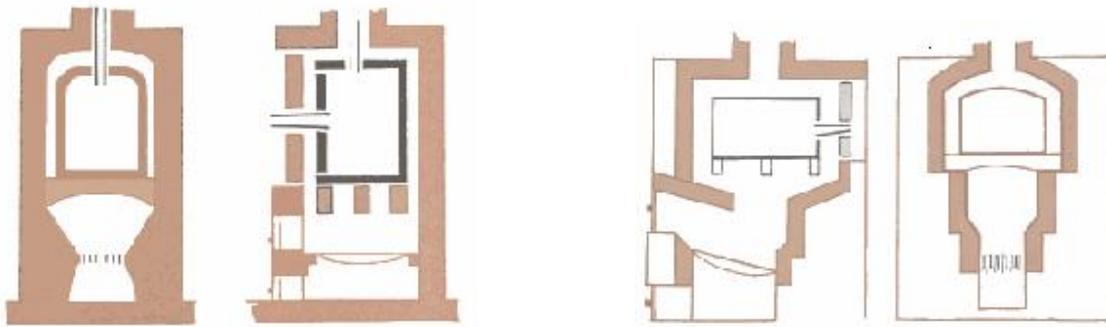


**Figura 6.** Hornos de cámara de dos pisos

#### 1.4.7 Hornos de muffla.

Una muffla, en realidad es una cámara cerrada construida con materias refractarias. Su construcción es relativamente sencilla empleándose todo tipo de combustibles. Consta de una puerta por la que se accede al interior de la cámara de cocción, en la que existe un pequeño orificio de observación. En el techo se ubica un agujero por donde salen los gases de la cámara, figura 7. Estos hornos pueden usarse para la

cocción de arcilla, mayólica, para el cocido de pinturas encima del barniz en la porcelana.



**Figura 7.** Paredes de los hornos muffla.

#### 1.4.8 Hornos de túnel.

Al contrario de los hornos anulares, en los que los artículos a cocer permanecen quietos y el fuego se mueve, el principio del horno de túnel es que la zona de fuego es fija, mientras la mercancía a cocer se mueve, atravesando dicha zona. Por lo demás, los dos métodos tienen muchas características comunes. Estos hornos consisten en un largo canal por el que se empuja un tren de carros sobre rieles. La armazón inferior de los carros está protegida por un grueso revestimiento de material aislante y refractario, tiene un tope que resbala en una correspondiente ranura en las paredes del horno. Una plancha en el canto inferior del carro resbala encima de arena para crear mayor hermeticidad. Para proteger enteramente las ruedas contra el calor, se puede dar acceso a aire frío debajo de los carros, a lo largo de los rieles y



las ruedas igualmente los carros están ajustados unos a otros, sin espacios libres intermedios y se empujan en el túnel mediante un dispositivo especial.

#### **1.4.9 Hornos de Gas.**

La técnica, cada vez más avanzada, ha permitido conceder a los hornos de gas un papel destacado en el uso y posibilidades que nos brinda su uso, mostrándose muy eficaces, tanto por que los tiempos de cocción se ven reducidos y por los gastos se ven reducidos, como por su manejo, figura 8. Nos resulta fácil regular la atmósfera interior del horno, simplemente variando la inyección de la mezcla de gas y aire, por lo que resultan muy útiles para hacer reducciones. Otra ventaja digna de mención es que podemos alcanzar altas temperaturas en menos tiempo. Estos tipos de horno también pueden funcionar con gas ciudad.

El inconveniente más destacable el cual presentan estos hornos, es que las botellas de gas que tienen, deben estar debidamente aisladas y separadas del horno, normalmente colocadas en el exterior.



**Figura 8.** Hornos de gas

#### 1.4.10 Hornos Eléctricos.<sup>27</sup>

Dispositivo que se calienta por electricidad, empleado en la industria para fundir metales o cocer cerámica, figura 9.



**Figura 9.** Horno eléctrico



## CAPITULO 2

### TRANSFERENCIA DE CALOR

#### 2.1 TRANSMISIÓN DEL CALOR.

En física, la transferencia de calor se define como el proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura. El calor se transfiere mediante convección, radiación y conducción

##### 2.1.1 Conducción

En los sólidos, la única forma de transferencia de calor es la conducción. Si se calienta un extremo de una varilla metálica, de forma que aumente su temperatura, el calor se transmite hasta el extremo más frío por conducción. No se comprende en su totalidad el mecanismo exacto de la conducción de calor en los sólidos, pero se cree que se debe, en parte, al movimiento de los electrones libres que transportan energía cuando existe una diferencia de temperatura. Esta teoría explica por qué los buenos conductores eléctricos también tienden a ser buenos conductores del calor. En 1822, el matemático francés Joseph Fourier<sup>28</sup> determina una expresión matemática precisa que hoy se conoce como ley de Fourier de la conducción del calor. Esta ley afirma que la velocidad de conducción de calor, ( $q$ ) a través de un cuerpo por unidad



de sección transversal, ( $x$ ), es proporcional al gradiente de temperatura que  $T$ , existe en el cuerpo (con el signo negativo)

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

El factor de proporcionalidad se denomina conductividad térmica del material  $K$  resulta necesario conocer la velocidad de conducción del calor a través de un sólido en el que existe una diferencia de temperatura conocida. Para averiguarlo se requieren técnicas matemáticas muy complejas, sobre todo si el proceso varía con el tiempo; en este caso, se habla de conducción térmica transitoria. Con la ayuda de ordenadores (computadoras) analógicos y digitales, estos problemas pueden resolverse en la actualidad incluso para cuerpos de geometría complicada.

### **2.1.2 Convección**

Si existe una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o un gas, es casi seguro que se producirá un movimiento del fluido. Este movimiento transfiere calor de una parte del fluido a otra por un proceso llamado convección. El movimiento del fluido puede ser natural o forzado. Si se calienta un líquido o un gas, su densidad (masa por unidad de volumen) suele disminuir. El fluido más caliente y menos denso asciende, mientras que el fluido más frío y más denso desciende. La convección



forzada se logra sometiendo el fluido a un gradiente de presiones, con lo que se fuerza su movimiento de acuerdo a las leyes de la hidrodinámica.

$$q = hA\Delta T \quad (2)$$

**Donde:**

**q** flujo de calor [J/s].

**h** coeficiente de convección [cal/s.cm<sup>2</sup>.°C].

**A** superficie de contacto.(cm<sup>2</sup>)

### 2.1.3 Radiación

La radiación es un término que se aplica genéricamente a toda clase de fenómenos relacionados con ondas electromagnéticas. Algunos fenómenos de la radiación pueden describirse mediante la teoría de ondas, pero la única explicación general satisfactoria de la radiación electromagnética es la teoría cuántica.

$$q = AesT^4 \quad [\text{Watt}] [\text{cal/h}] \quad (3)$$

**Donde:**

**e** Poder-emisor, número no dimensional, que esta entre 0 y 1.



**s** Constante de radiación ( $s = 5,6699 \cdot 10^{-8} \cdot \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ ).

El factor de proporcionalidad ( $s$ ) se denomina constante (de radiación) de Stefan-Boltzmann<sup>28</sup>. Según la ley de Planck<sup>28</sup>, todas las sustancias emiten energía radiante sólo por tener una temperatura superior al cero absoluto. Cuanto mayor es la temperatura, mayor es la cantidad de energía emitida. Además de emitir radiación, todas las sustancias son capaces de absorberla. Las superficies opacas pueden absorber o reflejar la radiación incidente. Generalmente, las superficies mates y rugosas absorben más calor que las superficies brillantes y pulidas, y las superficies brillantes reflejan más energía radiante que las superficies mates. Además, las sustancias que absorben mucha radiación también son buenos emisores (superficie negra ideal o cuerpo negro ( $e = 1$ ); las que reflejan mucha radiación y absorben poco son malos emisores ( $e = 0$ ). Una consecuencia de la ley de Planck es que la longitud de onda a la que un cuerpo emite la cantidad máxima de energía radiante disminuye con la temperatura.

## 2.2 TRANSFERENCIA DE CALOR EN ESTADO ESTABLE <sup>29</sup>

Cuando la velocidad de entrada de energía térmica es igual a la velocidad de salida de la misma energía, se tiene un proceso en estado estable, que se puede tipificar además porque en cada punto de un alimento sometido a un proceso térmico, no cambia en el tiempo la temperatura.



Inicialmente se abordarán los problemas de transferencia de calor en estado estable se usará la ley de Fourier<sup>28</sup> para los diferentes tipos de mecanismos para obtener expresiones para el perfil de temperaturas y el flujo de calor.

### **2.3 LEY DE JOULE <sup>30</sup>**

Podemos describir el movimiento de los electrones en un conductor como una serie de movimientos acelerados, cada uno de los cuales termina con un choque contra alguna de las partículas fijas del conductor.

Los electrones ganan energía cinética durante las trayectorias libres entre choques y ceden a las partículas fijas, en cada choque, la misma cantidad de energía que habían ganado. La energía adquirida por las partículas fijas (que son fijas sólo en el sentido de que su posición media no cambia) aumenta la amplitud de su vibración o sea, se convierte en calor. Para deducir la cantidad de calor desarrollada en un conductor por unidad de tiempo, hallaremos primero la expresión general de la potencia suministrada a una parte cualquiera de un circuito eléctrico. Cuando una corriente eléctrica atraviesa un conductor, éste experimenta un aumento de temperatura. Este efecto se denomina “efecto Joule”.

Es posible calcular la cantidad de calor que puede producir una corriente eléctrica en cierto tiempo, por medio de la ley de Joule.



Supongamos, como en un calentador eléctrico, que todo el trabajo realizado por la energía eléctrica es transformado en calor. Si el calentador funciona con un voltaje  $V$  y una intensidad  $I$  durante un tiempo  $t$ , el trabajo realizado es:

$$W = V \times I \times t \quad (4)$$

Y como cada J equivale a 0.24 cal, la cantidad de calor obtenido será:

$$Q = 0.24 \times V \times I \times t \quad (5)$$

$V$  debe medirse en volts,  $I$  en amperes y  $t$  en segundos, para que el resultado esté expresado en calorías.

La ley de Joule enuncia que:

***" El calor que desarrolla una corriente eléctrica al pasar por un conductor es directamente proporcional a la resistencia, al cuadrado de la intensidad de la corriente y el tiempo que dura la corriente "***

$$Q = I^2 R t \quad (6)$$

### 2.3.1 Resistencia

Es la oposición de un material al flujo de electrones. La resistencia  $R$  del conductor esta dada por:

$$R = \frac{V}{I} \quad (7)$$



De este resultado se ve que la resistencia tiene unidades en el SI de volts por ampere. Un volt por un ampere se define como un ohm ( $\Omega$ ):

$$1\Omega = 1 \text{ V/A} \quad (8)$$

Es decir, si una diferencia de potencial de 1 volt a través de un conductor produce una corriente de 1 A, la resistencia del conductor es  $1\Omega$ . Por ejemplo, si un aparato eléctrico conectado a 120 V lleva corriente de 6 A, su resistencia es de 20.

Las bandas de colores en un resistor representan un código que representa el valor de la resistencia. Los primeros dos colores dan los dos primeros dígitos del valor de la resistencia el tercer color es el exponente en potencias de diez de multiplicar el valor de la resistencia. El último color es la tolerancia del valor de la resistencia. Por ejemplo, si los colores son naranja, azul, amarillo y oro, el valor de la resistencia es  $36 \times 10^4$  o bien 360K, con una tolerancia de 18K (5%).

### 2.3.2 Resistividad

**La resistividad** se conoce también como **resistencia específica**. La resistividad es una característica propia de un material medido, con unidades de ohmios – metro, que indica que tanto se opone éste (el material) al paso de la corriente.

La resistividad [ $\rho$ ] (rho) se define como



$$\rho = R \cdot A / L \quad (9)$$

**Donde:**

$\rho$  = es la resistividad medida en ohmios - metro

$R$  = es el valor de la resistencia eléctrica en Ohmios

$L$  = es la longitud del material medida en metros

$A$  = es el área transversal medida en metros<sup>2</sup>

$\hat{\sigma}$  = El inverso de la resistividad se llama **conductividad** [sigma]

El inverso de la conductividad de un material se le llama resistividad  $\rho$  :

$$\rho = \frac{1}{\hat{\sigma}} \quad (10)$$

**La resistividad depende de la temperatura:** La resistividad de los metales aumenta al aumentar la temperatura al contrario de los semiconductores en donde este valor decrece.



## 2.4 RESISTENCIA $\text{MoSi}_2$

El tipo  $\text{MoSi}_2$  figura 10, del elemento de calefacción del disilicido del molibdeno de ZIRCAR es un elemento eléctrico que contiene principalmente el disilicido del molibdeno para el uso en hornos industriales y del laboratorio.



**Figura 10.** Resistencia  $\text{MoSi}_2$



## CAPITULO 3

### SIMULACIÓN

#### 3.1 APLICACIÓN EN COMSOL3.2

En esta sección se presenta la solución del problema de distribución de temperatura en el horno muffla thermolyne 46000 mediante la aplicación del software comercial COMSOL 3.2.

Se presenta el modulo de transferencia de calor por conducción, convección y radiación. También se ve la distribución de la corriente eléctrica así como la resistencia total como función del tiempo. Así mismo se utilizan las condiciones limite para la especificación de las propiedades del la resistencia  $\text{MoSi}_2$  (Ley de Joule, y conducción) y las de la caja simulando el horno, siendo estas las del aire (convección y conducción).

##### 3.1.1 Definición del modelo

Para la aplicación del software COMSOL 3.2 se hizo la geometría en 3D de la resistencia y del volumen del horno, basado en las características reales del horno muffla thermolyne 46000, las dimensiones son  $X=25$ ,  $Y=27.5$ , y  $Z=25.5$ , en la parte de la caja interna se tiene que el compartimiento dimensional en  $X=15\text{cm}$ , compartimiento dimensional  $y=15\text{cm}$ , compartimiento dimensional  $z=15$ . Así mismo este horno tiene la capacidad de calentar hasta  $1700^\circ\text{C}$  en 40 minutos, utiliza

elementos calentadores de disilicato de molibdeno ( $\text{MoSi}_2$ ) para una larga vida a elevadas temperaturas, rango de temperatura:  $800\text{-}1700^\circ\text{C}$ ,<sup>31</sup>

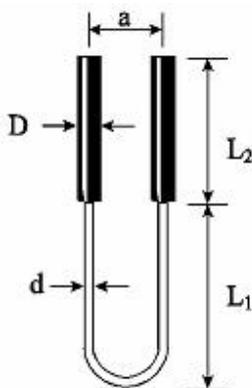
La resistencia es en forma de “U”, se muestra en la figura 11, el horno cuenta con ocho resistencias de las cuales se consideró solo una para el análisis del problema sus dimensiones son,  $D = .003\text{mts}$ ,  $d = 0.007\text{mts}$ ,  $a = .02\text{mts}$ ,  $L_1 = .12\text{mts}$ ,  $L_2 = .219\text{mts}$ .

Para determinar las expresiones de la capacidad calorífica ( $C_p$ ), densidad ( $\rho$ ) y la conductividad térmica ( $k$ ) del aire, se hizo a partir de los datos de la tabla 2. Utilizando el método de mínimos cuadrados, obteniendo las expresiones 11-13.

$$C_p = 975.1971 + 0.12468T + 0.33 \times 10^{-5}T^2 \quad \text{J/kgK} \quad (11)$$

$$\rho = 1.9049 - 0.304 \times 10^{-2}T^2 + 0.138 \times 10^{-5}T^2 \quad \text{Kg/m}^3 \quad (12)$$

$$K = 0.00395 + 0.772 \times 10^{-4}T - 0.1608 \times 10^{-7}T^2 \quad \text{W/mK} \quad (13)$$



Donde:

- D** Diámetro mayor
- d** Diámetro menor
- L1** Longitud inferior
- L2** Longitud superior
- a** Distancia entre terminales

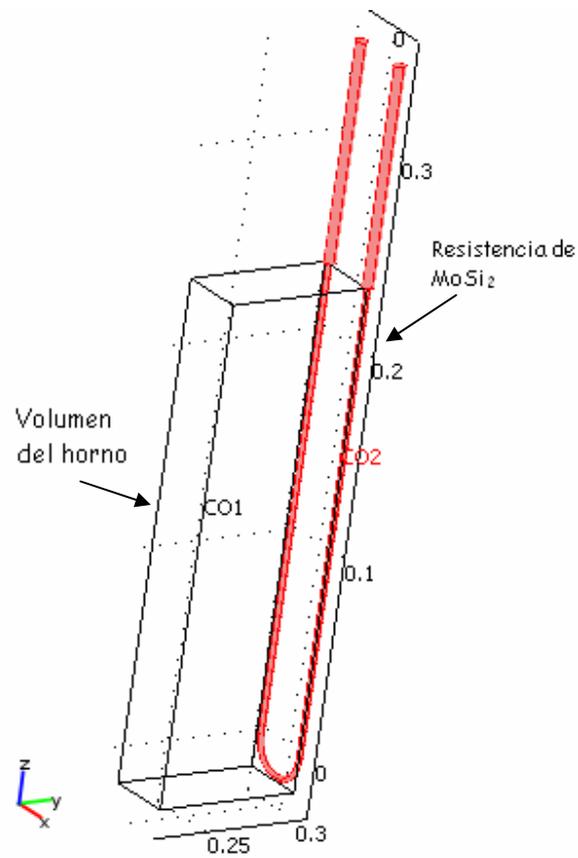
**Figura 11.** Resistencia  $\text{MoSi}_2$

**TABLA 2.** Propiedades termodinámicas del aire seco a presión atmosférica.<sup>3</sup>

<i>Temperatura</i> °K	Densidad, $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Calor especifico, $C_p$ (J/Kg °K)	Conductancia térmica, $K$ (W/m °K)
273	1.252	1011	0.0237
293	1.164	1012	0.0251
313	1.092	1014	0.0265
333	1.025	1017	0.0279
353	0.968	1019	0.0293
373	0.916	1022	0.0307
473	0.723	1035	0.0370
573	0.596	1047	0.0429
673	0.508	1059	0.0485
773	0.442	1076	0.0540
1273	0.268	1139	0.0762

### 3.1.2 Modelo

Se aplicó una geometría 3D, que fue realizada en COMSOL 3.2, figura 12, el Chemical Engineering Module, de donde se seleccionó el modulo Electro Thermo - Joule Heating, para determinar el flujo de calor generado por la corriente eléctrica y el modulo Heat Transfer by Conduction, donde calcula la transferencia de calor por conducción, convección y radiación.

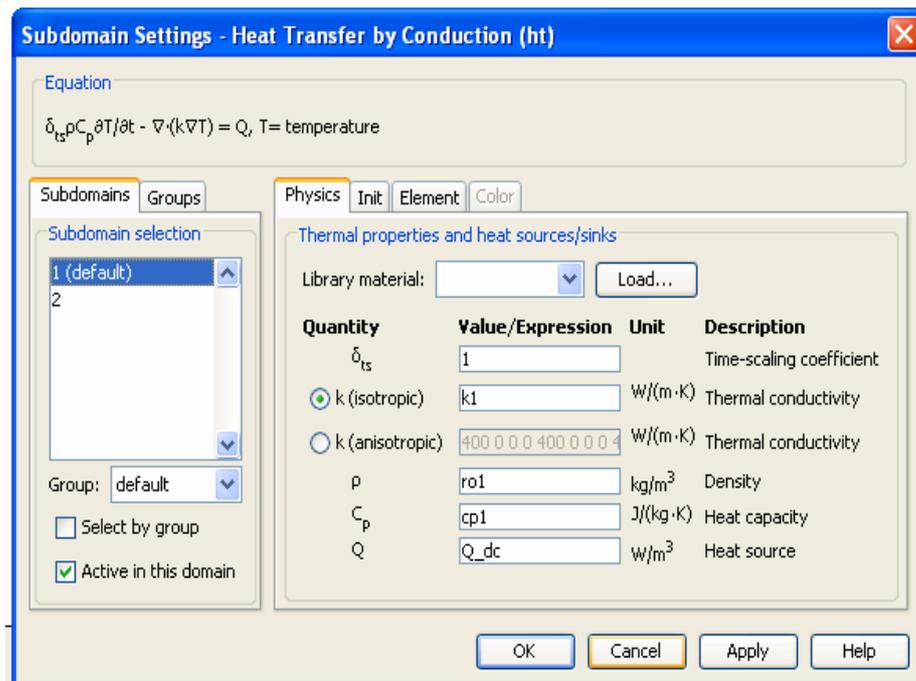


**Figura 12.** Vista tridimensional de la resistencia y volumen del horno

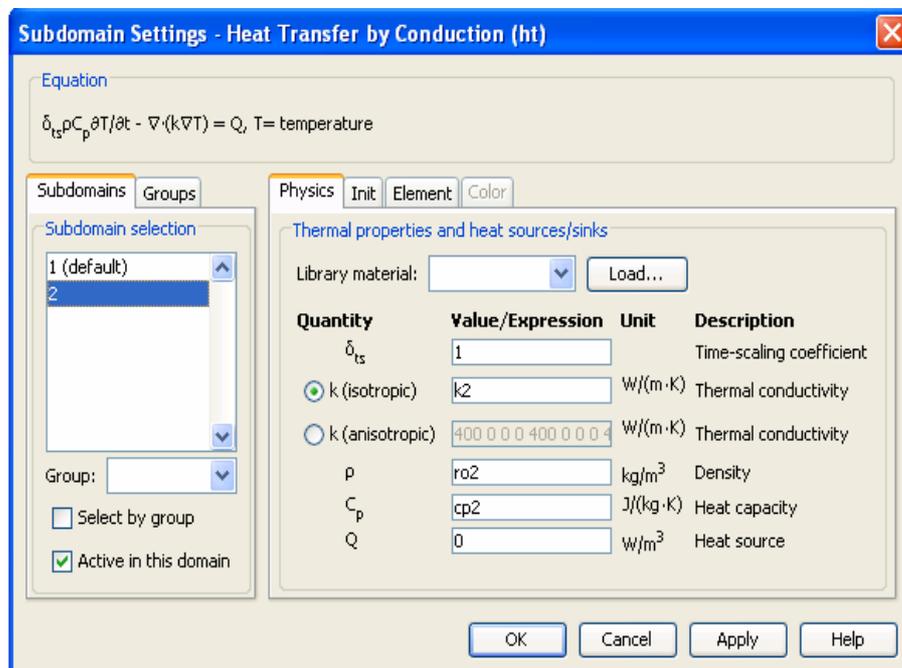
En la tabla 3, se encuentran las condiciones físicas de la resistencia de MoSi<sub>2</sub>, que son consideradas en el software, figura 13, y para el volumen del horno figura 14.

**TABLA 3.** Descripción de constantes.<sup>2</sup>

<b>NOMBRE</b>	<b>EXPRESIÓN</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
ro1	6290	densidad Kg/m3
Cp1	437	capacidad calorifica J/(kgK)
k1	66.2	Conductividad termica W/mK
H1	20	Coefficiente de transferencia de calor W/m2 K
Tinf	298	Temperatura Inicial K
Thick	0.003*3.1416	espesor m
side	.25*2	Ancho m
Sig	2.5e7	conductividad /oms m
Em	.8	Emisividad
Delta	5.67e-8	constante de stefan-boltzman W/m2 K4
In	10	



**Figura 13.** Condiciones físicas de la resistencia.



**Figura 14.** Propiedades físicas del volumen del horno (aire).

La resistencia eléctrica es función de la temperatura, que se considera como propiedad eléctrica de la resistencia, figura 15.

$$res = (-0.35e-1 + 0.3245e-3 \cdot (T)) \tag{14}$$

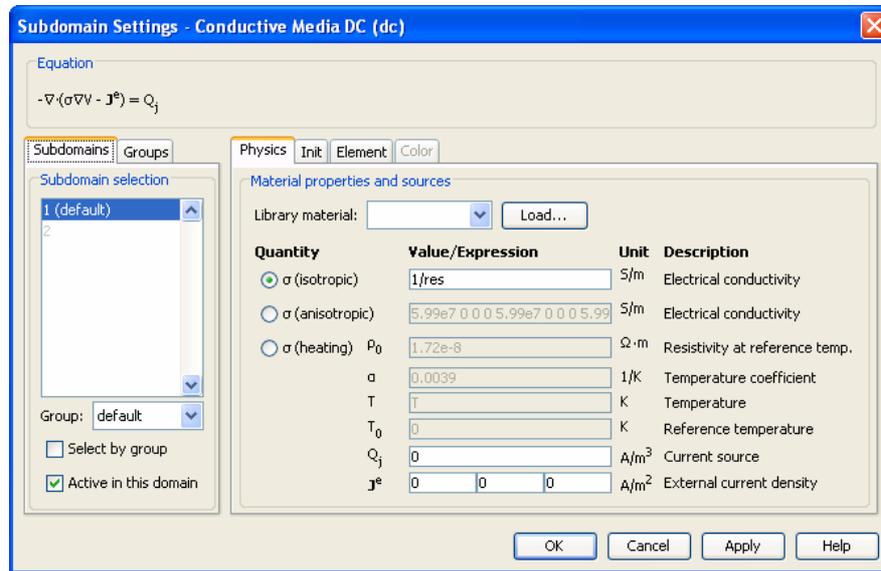


Figura 15. Propiedad eléctrica de la resistencia.

En la figura 16 se presentan las condiciones límite, consideradas en el modulo Electro Therma- Joule Heating.

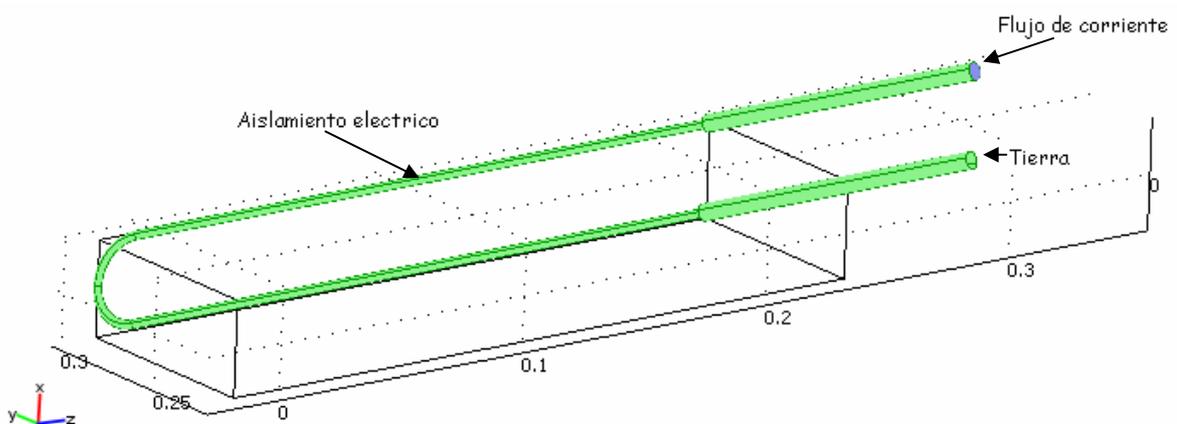
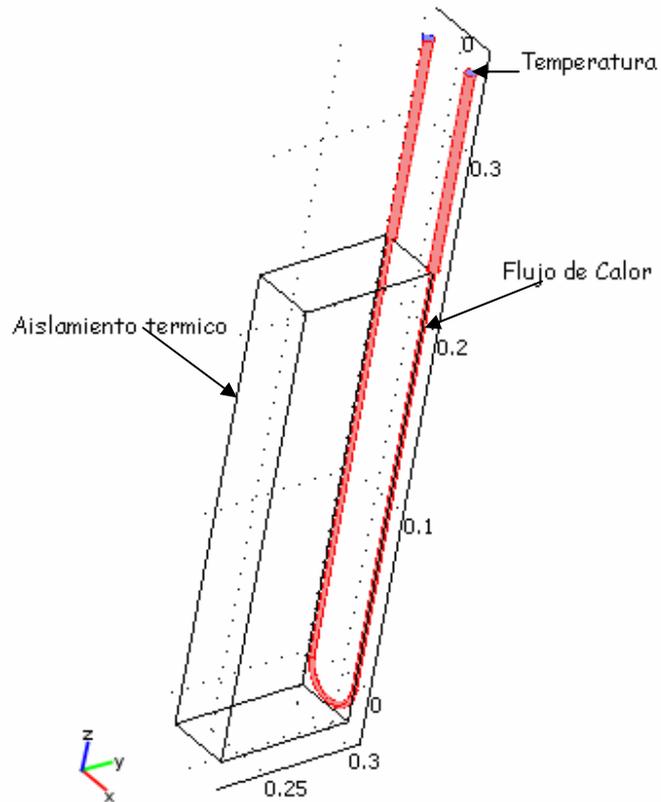


Figura 16. Condiciones límite de la resistencia para el modulo Electro Therma- Joule Heating

En la figura 17 se presentan las condiciones límite, consideradas en el modulo Heat Transfer by Conduction.



**Figura 17.** Condiciones límite de la resistencia y volumen de horno (aire), modulo Heat Transfer by Conduction

Los modelos se resuelven haciendo un mallado triangular que consiste de 5159 nodos, bajos los tres tiempos de calentamiento (60, 90 y 120 min.),

### 3.2 VISUAL BASIC (TDHM 4600)

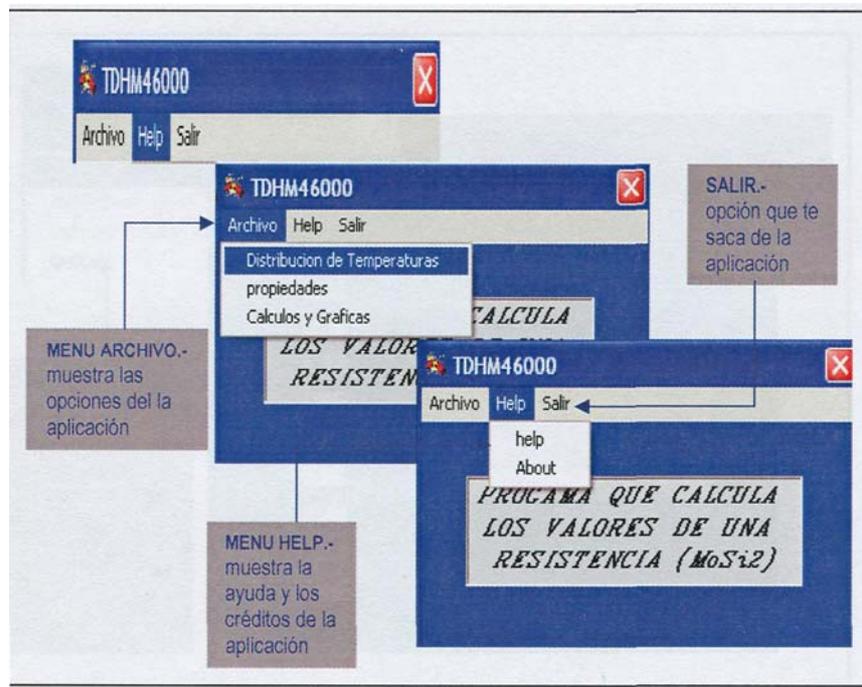
Para el desarrollo en Visual Basic de la simulación del calentamiento del horno muffle y sus resistencias se implementaron varios algoritmos de programación.

Esta es una de las pantallas que muestran el trabajo realizado; figura 18, en esta pantalla se muestra el inicio de la aplicación *TDHM* y contiene un menú de las funciones que realiza la aplicación además de la ayuda para navegar en la misma:



**Figura 18.** Pantalla de inicio de la aplicación

En la figura 19 se muestra como están distribuidos los menús y cual es su aplicación dentro de la misma.

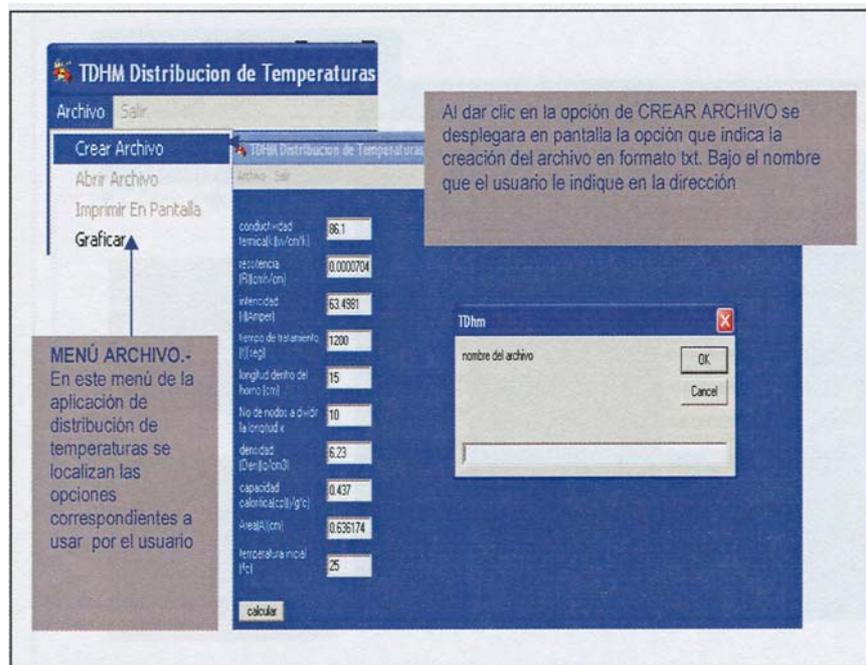


**Figura 19.** Pantallas que muestran los menús de la aplicación

Estas pantallas facilitan la navegación por la aplicación del programa que más se ajuste a las necesidades del usuario final.

Esta es la primera opción del menú la aplicación *TDHM*, figura 20 que muestra en pantalla la distribución de temperaturas dentro del horno muffle thermolyne 4600.

Al realizar un clic en las opciones del menú de esta función se desplegarán en pantalla las aplicaciones correspondientes a la opción.



**Figura 20.** Pantalla de acceso de datos

Estas opciones hacen que el usuario interactúe más con la aplicación, dándole la oportunidad de decidir los valores a manejar.

En la parte de aplicación, figura 21, se muestra en pantalla las propiedades de la resistencia.

En el menú archivo de la aplicación *TDHM* se desplegarán en pantalla las opciones que el usuario puede elegir, conveniente a sus necesidades, además de poder modificar los valores para hacer otros cálculos.



**Figura 21.** Pantalla de corrida que muestra los valores

También se muestra de forma ordenada los valores de los resultados y las propiedades de una resistencia de MoSi<sub>2</sub> utilizada en un horno muffle thermolyne 46000.

### 3.2.1 Definición del modelo

Para el desarrollo del modelo en Visual Basic, se consideró que las pérdidas por radiación son insignificantes de modo que la razón neta del flujo de calor por convección  $q_c$  dentro del volumen de aire, es igual a la razón de transferencia de calor perdido del alambre,  $q_{salida}$ .

$$q_{salida} = h_c A_{sup} (T_{Alambre} - T_{Aire}) = h_c \pi DL (T_{Alambre} - T_{Aire}) \quad (15)$$



Donde:

- $h_c$  Coeficiente de transferencia de calor por convección promedio a través del área A.  
 $D$  diámetro de la resistencia  
 $L$  longitud de la resistencia  
 $T$  temperatura

La razón de generación de energía (o disipación eléctrica) en el volumen de control del alambre se define con la ecuación (6).

La razón de almacenamiento de energía interna en el volumen de control es:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{d\left[\left(\pi D^2 / 4\right) L C p \rho T_{Alambre}(t)\right]}{dt} \quad (16)$$

Donde:

- $C_p$  calor específico  
 $\rho$  densidad de  $MoSi_2$   
 $t$  tiempo

Aplicando la relación de conservación de energía para un sistema cerrado:

$$q_G - q_{salida} = \frac{\partial E}{\partial t} \quad (17)$$

Sustituyendo las relaciones apropiadas de los tres términos de energía en la ley de conservación de la energía se obtiene la ecuación diferencial.

$$I^2 R - (h_c \pi D L)(T_{Alambre} - T_{Aire}) = \left(\frac{\pi D^2}{4} L C p \rho\right) \frac{dT_{Alambre}(t)}{dt} \quad (18)$$



Considerando el calor específico y la densidad constantes, la solución de esta ecuación para la temperatura del alambre como una función del tiempo,  $T(t)$  es:

$$T_{Alambre}(t) - T_{Aire} = C_1(1 - e^{-C_2 t}) \quad (19)$$

Donde:

$$C_1 = \frac{I^2 R}{h_c \pi D} \quad (20)$$

$$C_2 = \frac{4h_c}{C_p \rho D} \quad (21)$$

Con respecto a la temperatura del aire ( $T_{Aire}$ ) dentro del volumen del horno, se aplica la ecuación de Laplace en una dimensión:

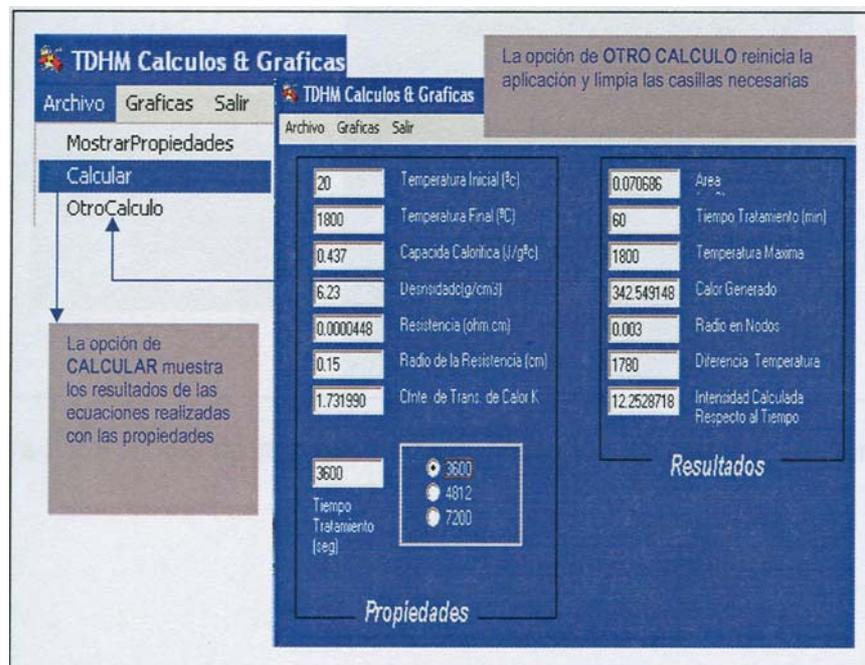
$$\frac{\partial T_{Aire}}{\partial x} = 0 \quad (22)$$

$$T_{Aire(i)} = \frac{T_{Aire(i+1)} + T_{Aire(i-1)}}{2} \quad (23)$$

Solucionándolo por el método de diferencia finita, considerando 1D con 10 nodos, con la aplicación de eliminación Gauss, se encuentran las temperaturas dentro de los nodos del volumen de aire.

### 3.2.2 Cálculos y Resultados

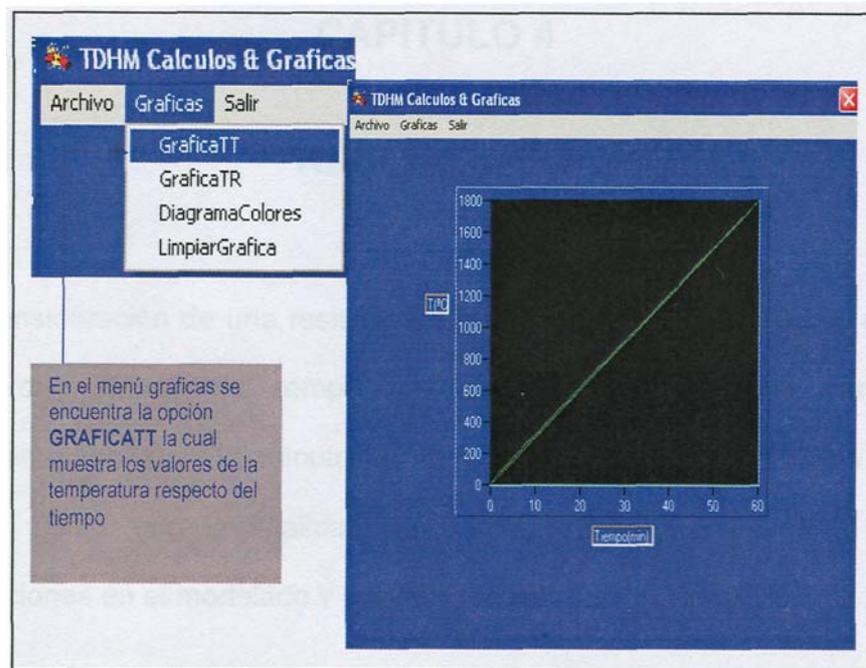
La figura 22 muestra en pantalla los cálculos y las graficas de la resistencia. Que son una función de la aplicación *TDHM*, al entrar se encuentran varios menús donde el usuario interactúa con la función.



**Figura 22.** Pantalla de resultados

En la figura 23 se muestra una grafica tiempo contra Temperatura, distribuida en el volumen del horno.

Los puntos que están graficados dependerán del cálculo de los valores asignados por el usuario en la parte de propiedades.



**Figura 23.** Pantalla de resultados de la grafica tiempo contra temperatura.



## CAPITULO 4

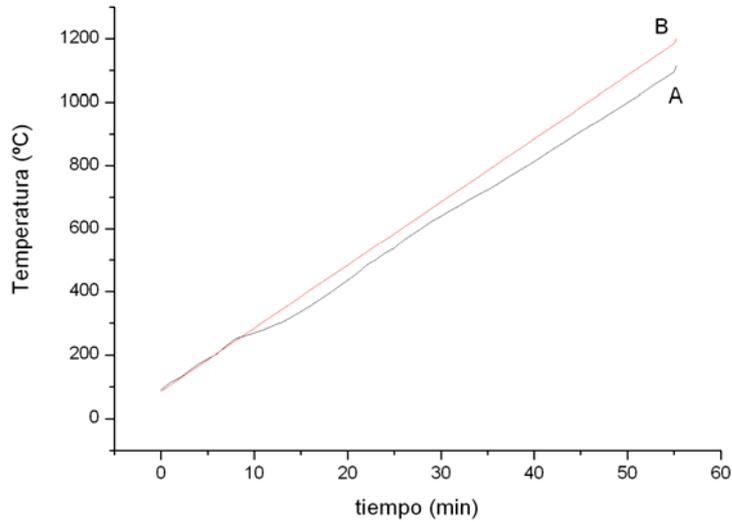
### RESULTADOS

Bajo la consideración de una resistencia de  $\text{MoSi}_2$  dentro de un horno muffle, se determinaron perfiles de temperatura con respecto a tres tiempos de calentamiento, 60, 90 y 120 minutos en el software COMSOL3.2 y en un algoritmo en Visual Basic, con la finalidad de observar comportamientos y comparar consideraciones en el modelado y programación.

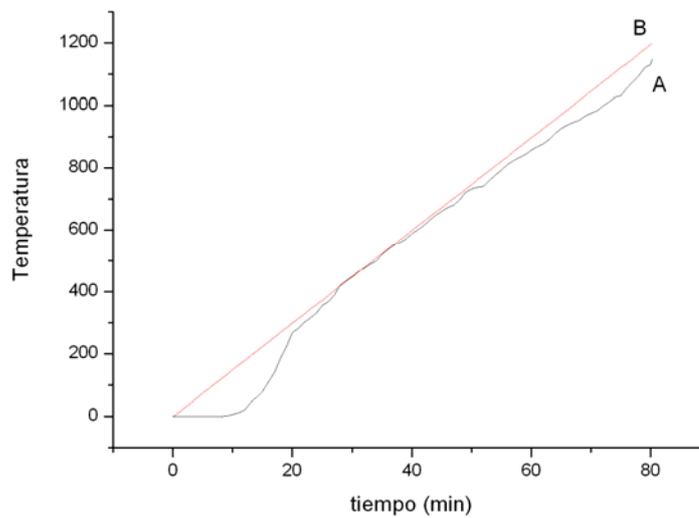
#### 4.1 RESULTADOS EN MUFFLA

En las figuras 24, 25 y 26 se muestra la distribución de temperatura a 60, 90 y 120 minutos de calentamiento, respectivamente, de las corridas directas en la muffle. El perfil **A** es la temperatura del programa del horno y el **B** es la temperatura del sensor.

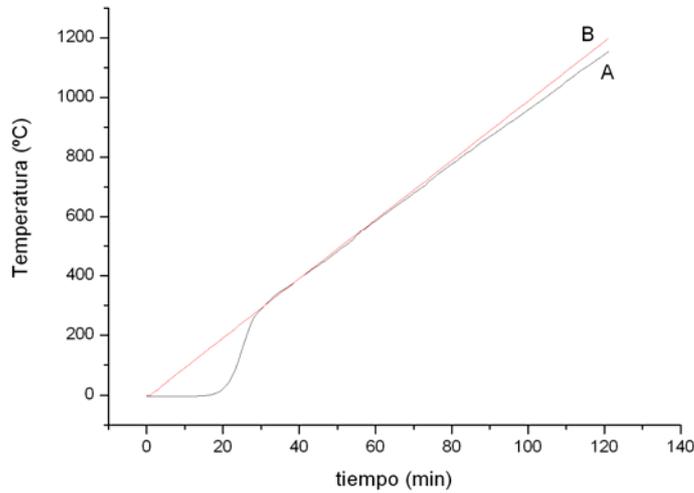
Observamos un comportamiento lineal en los tres casos de la grafica **B**, y con respecto a la grafica **A** existen pequeñas variaciones de pendiente en los primeros minutos de calentamiento, y posteriormente el comportamiento es lineal.



**Figura 24.** Perfil de temperatura de corridas directas en la muffle, a 60 min de calentamiento donde **A** es la temperatura del sensor y **B** es la temperatura del programa del horno.



**Figura 25.** Perfil de temperatura de corridas directas en la muffle, a 90 min de calentamiento donde **A** es la temperatura del sensor y **B** es la temperatura del programa del horno.

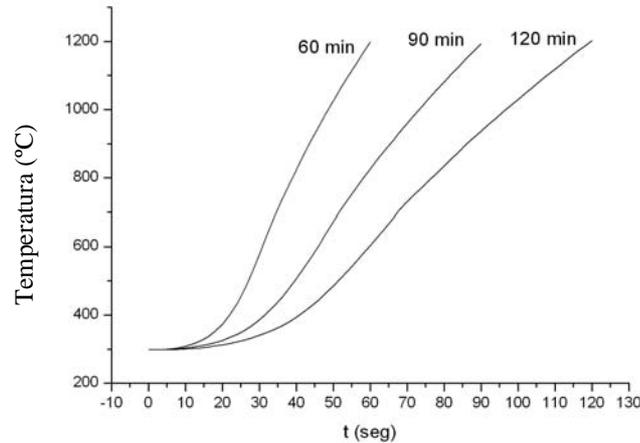


**Figura 26.** Perfil de temperatura de corridas directas en la muflla, a 120 min de calentamiento donde **A** es la temperatura del sensor y **B** es la temperatura del programa del horno.

## 4.2 RESULTADOS DE COMSOL

La figura 27 muestra la distribución de temperatura a 60, 90 y 120 min de calentamiento de la muflla, calculados con COMSOL 3.2.

Donde observamos un comportamiento semejante en los tres casos, desplazados por los tiempos de calentamiento, bajo la consideración de la contribución de la radiación.



**Figura 27.** Predicción de distribución de Temperatura a 60, 90 y 120 min en horno muffle, COMSOL 3.2.

Podemos observar un comportamiento similar al del perfil **A**, de las figuras 24, 25 y 26, determinado por el sensor del horno muffle.

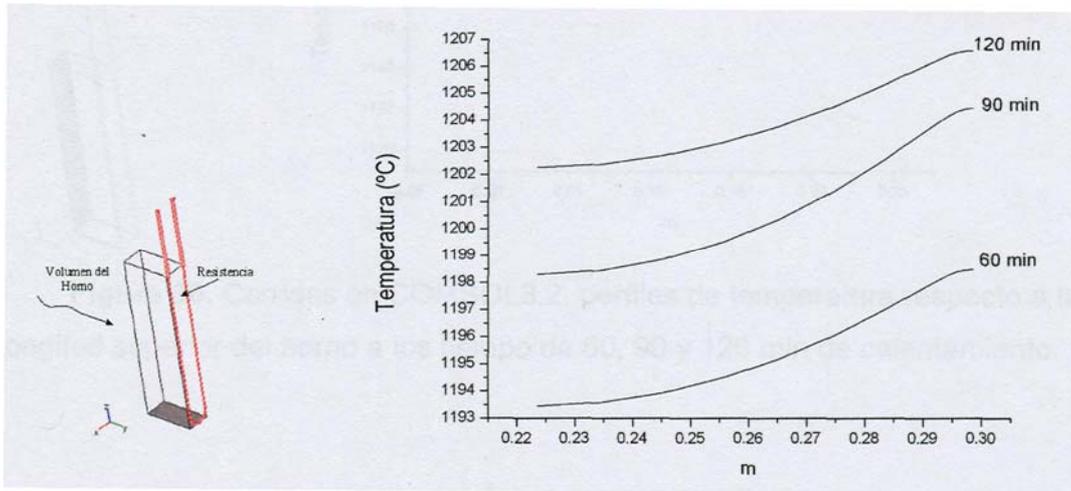
La figura 28 muestra el perfil de temperatura a lo largo de la superficie inferior del volumen del horno, en promedio tiene una variación de  $5^\circ$  de un extremo al otro, en los tres casos de calentamiento.

La figura 29 muestra el perfil de temperatura a lo largo de la superficie superior del volumen del horno, donde observamos una disminución de la temperatura. En el extremo donde se encuentra la resistencia, la temperatura es aproximada de  $900^\circ\text{C}$  y en el extremo del volumen de aire del horno la temperatura es de  $1200^\circ\text{C}$ , teniendo un gradiente de temperatura de  $300^\circ$ .

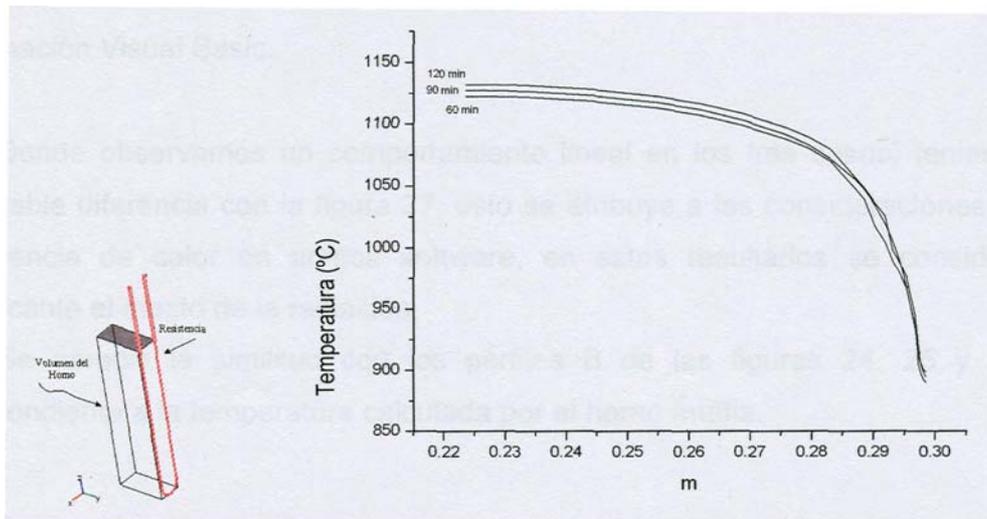
La figura 30 muestra el perfil de temperatura a lo largo de la superficie lateral, del volumen de aire en el horno. Donde observamos que el punto inferior de la superficie lateral tiene una temperatura promedio de  $1200^\circ\text{C}$ , mientras que el

punto superior tiene una temperatura promedio de  $1130^{\circ}\text{C}$ , esto da un gradiente de  $70^{\circ}$  promedio en toda la superficie.

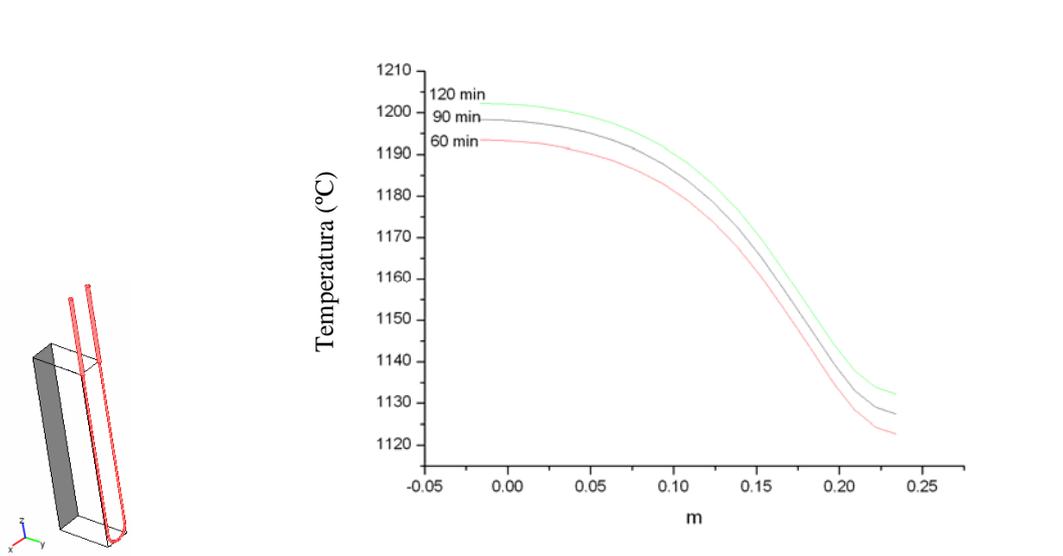
Observando así la variación de temperatura en el volumen del horno.



**Figura 28.** Corridas en COMSOL3.2, perfiles de temperatura respecto a la longitud inferior del horno a los tiempo de 60, 90 y 120 min de calentamiento.



**Figura 29.** Corridas en COMSOL3.2, perfiles de temperatura respecto a la longitud superior del horno a los tiempo de 60, 90 y 120 min de calentamiento.



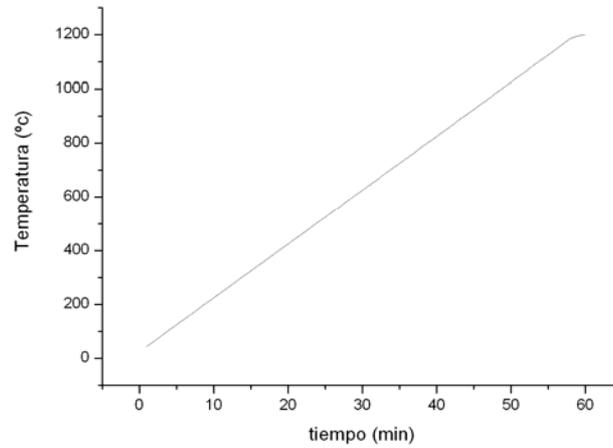
**Figura 30.** Corridas en COMSOL3.2, perfiles de temperatura respecto a la longitud superior del horno a los tiempo de 60, 90 y 120 min de calentamiento.

#### 4.3 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN VISUAL BASIC

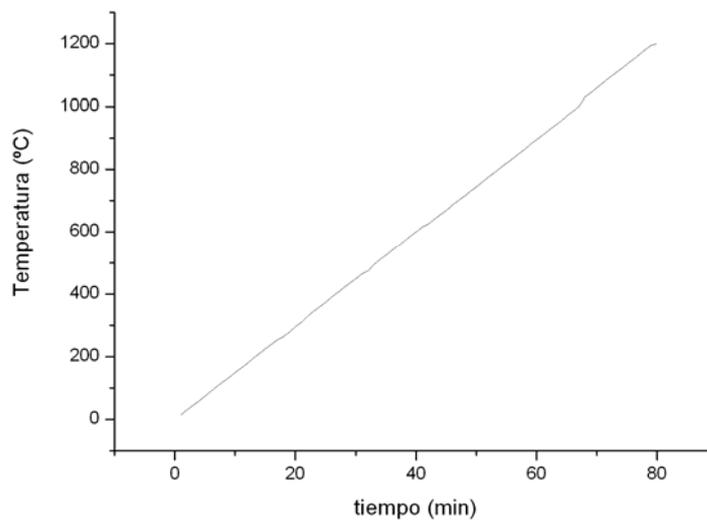
En la figura 31, 32 y 33 se muestra la distribución de temperatura a 60, 90 y 120 min de calentamiento de la muffla, respectivamente, calculados con la programación Visual Basic.

Donde observamos un comportamiento lineal en los tres casos, teniendo una notable diferencia con la figura 27, esto se atribuye a las consideraciones de transferencia de calor en ambos software, en estos resultados se considero insignificante el efecto de la radiación.

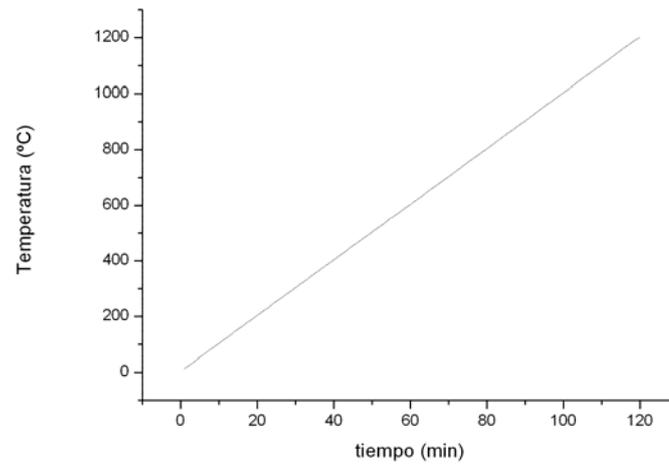
Se aprecia la similitud con los perfiles B de las figuras 24, 25 y 26, correspondiente a la temperatura calculada por el horno muffla.



**Figura 31.** Predicción de distribución de Temperatura 60 min de calentamiento en horno muffle, Programa en Visual Basic.



**Figura 32.** Predicción de distribución de Temperatura 90 min de calentamiento en horno muffle, Programa en Visual Basic.



**Figura 33.** Predicción de distribución de Temperatura 120 min de calentamiento en horno muffle, Programa en Visual Basic.



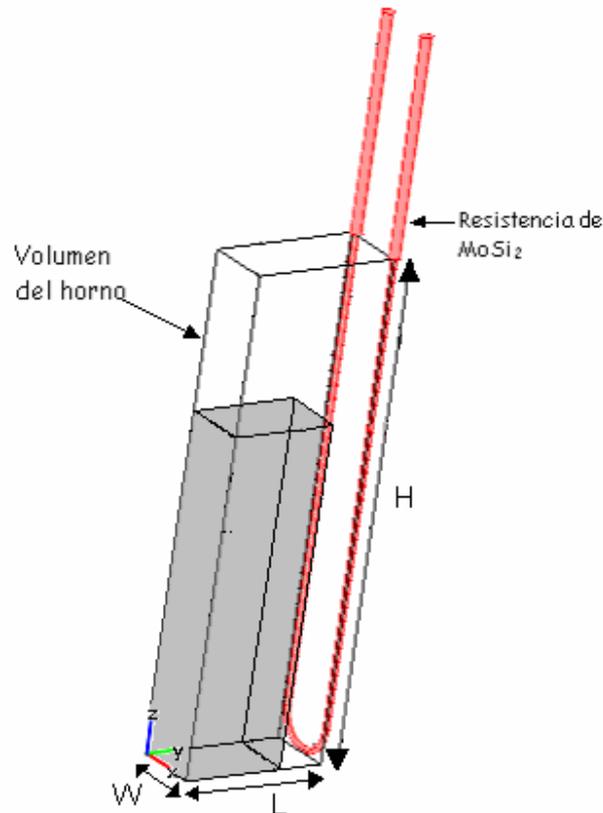
## CONCLUSIONES

### ➤ Conclusiones de COMSOL 3.2

En el modelo simulado en COMSOL 3.2 se observa

- ❖ A lo largo del volumen de aire del horno, en 3D, se determinó la temperatura para un mallado triangular que consiste de 5159 nodos.
- ❖ En la sección inferior de la resistencia la temperatura aumenta gradualmente con respecto al tiempo llegando a un valor de 1200 °C en los tiempos de 60, 90 y 120 minutos.
- ❖ En la parte superior de la resistencia, la temperatura es menor de 720 K, de donde la altura óptima para la resistencia y a lo largo del horno es del 60%, en esta zona se asegura una temperatura constante 1200° en los tiempos de 60, 90 y 120 min.
- ❖ En el piso del horno la temperatura es constante a todos los tiempos de calentamiento.
- ❖ En la parte superior del horno la temperatura varía, siendo la óptima el 60% del centro del horno a la resistencia, esto es porque la temperatura disminuye en 250° del centro del horno a la resistencia, la temperatura en la resistencia es de 900 K y en el centro del horno de 1150 K.
- ❖ Si existe variación de temperatura en el volumen del horno siendo la posición con temperatura constante,  $Y \leq \frac{2}{3}L$  ,  $Z \leq \frac{2}{3}H$  y para toda W en la dirección x, figura

34, aplicando estas distancias para cada resistencia de las 8 que contiene la muffla.



**Figura 34.** Volumen donde la temperatura es constante

➤ **Conclusiones de VB**

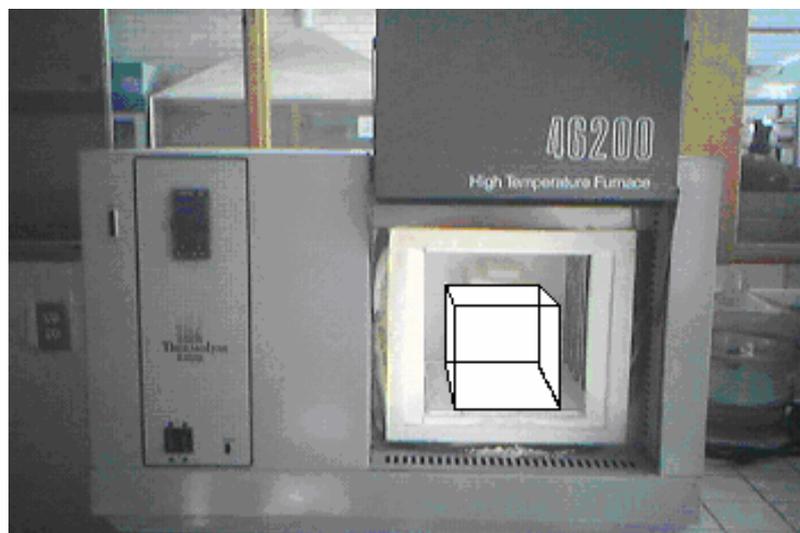
- ❖ A lo largo del volumen de aire del horno, en 1D, se determinó la temperatura para 10 nodos, se observó que ésta permanecía constante.
- ❖ La variación de la temperatura con respecto al tiempo de calentamiento se observa que la temperatura va aumentando en forma lineal hasta alcanzar 1200°C, en los tiempos de 60 min, 90 min y 120 min.

- ❖ Con esta programación no pudimos concluir sobre la posición debido a las limitadas consideraciones.

➤ **Conclusiones del Horno**

- ❖ La temperatura leída por el sensor presenta un comportamiento similar al presentado en COMSOL, bajo la consideración de la presencia de radiación.
- ❖ La temperatura calculada por el programa del horno, presenta un comportamiento lineal igual que las presentadas por el programa de VB, considerando insignificante la transferencia por radiación.

Con este trabajo se encontró la sección donde la temperatura es constante para realizar con éxito la sinterización de material cerámico, figura 35.



**Figura 35.** Volumen con temperatura constante para la sinterización de material cerámico muffle thermolyne 46000.

## GLOSARIO

**Bizcocho, Bizcochado o biscuit:** con este nombre se describe la primera cocción a la que es sometido un objeto de cerámica cruda. Una vez cocida la pieza recibe el nombre de bizcocho, del francés "biscuit".

**CAD:** Diseño asistido por computador, abreviado DAC pero más conocido por las siglas inglesas CAD (Computer Aided Design), se trata básicamente de una base de datos de entidades geométricas (puntos, líneas, arcos, etc) con la que se puede operar a través de una interfaz gráfica.

**Chamota:** Materiales cerámicos que han sido cocidos, molidos y reducidos a granos de varios grosores y se utiliza como desengrasante.

**IGES:** Inicial Graphics Exchange Specification es un formato CAD estándar desarrollado inicialmente para solucionar el creciente problema de incompatibilidad entre varios sistemas CAD/CAM, habilitando de esta forma un estándar para la importación / exportación de datos entre múltiples sistemas.

**Mayólica:** Es un término español que se refiere a un método específico de vidriar la loza de barro.

**LABSAG:** Laboratorio de Simuladores en Administración y Gerencia

**PDEs:** Sistema de Ecuaciones Diferenciales Parciales

**Gres:** se agrupan bajo esta denominación diversas especies capaces de adquirir la impermeabilidad por simple cocción. El gres procede de las arcillas y fundentes que cumplan esta condición, empleándose generalmente la mezcla de una arcilla refractaria con otra muy fusible o un feldespató, con lo cual se consigue la vitrificación a temperaturas de alrededor los 1200 °C.



## REFERENCIAS

1. Joseph Wolfe "Effective performance behaviors in a simulated policy and decision-making environment" *Management Science*, Vol.21 No. 8 1975
2. John Dekkers, Stephen Donatti "The Integration of Research Studies on the Use of Simulation as an Instructional Strategy", *Journal of Education Research*, July August 1981
3. Jude Lee "Effectiveness of Computer-based Instructional Simulation: A Meta Analysis" *International Journal of Instructional Media*, Vol. 26, March 1999
4. R. Thomas, E, Hooper "Simulation: An opportunity we are missing", *Journal of Research on Computing in Education* Vol 23 No. 4 1991 497-513
5. Jude Lee Op.Cit
6. Brian H. Cameron "Effectiveness of Simulation in a hybrid and online networking course" *The Quarterly Review of Distance Education*, Vol (4 (1) 2003 51-55
7. Cameron Op. Cit. P.54
8. P.B. De Mesquita "Diagnostic problema solving of school psychologists: scientific method or guesswork" *Journal of School Psychology*, 30, 1993, 269-291
9. R.B. Kozma "Learning with media" *Review of Educational Research*, 61(2) 179-221
10. L.P.Riber "Animation as feedback in a computer-based simulation: representation matters", *Educational Technology Research & Development*, 1996 44(1) 5-22
11. M.P. Brawer "Integrating motivational activities into instruction: a developmental model" ERIC, Document Reproduction Service No. ED 22 106
12. R.C. Meier, W.T. Newell, H.L. Paser "Simulation in Business and Economics", Prentice Hall, 1969
13. Joseph Wolfe, Gary Ruth "The Case Approach versus Gaming in the Teaching of Business Policy: an experimental evaluation", *Journal of Business*, Vol.48, No. 3 1975



14. Jude Lee "Effectiveness of Computer-based Instructional Simulation: A Meta Analysis" *International Journal of Instructional Media*, Vol. 26, March 1999
15. R. Thomas, E. Hooper "Simulation: An opportunity we are missing", *Journal of Research on Computing in Education* Vol 23 No. 4 1991 497-513
16. Jude Lee Op.Cit
17. Brian H. Cameron "Effectiveness of Simulation in a hybrid and online networking course" *The Quarterly Review of Distance Education*, Vol (4 (1) 2003 51-55
18. P.B. De Mesquita "Diagnostic problema solving of school psychologists: scientific method or guesswork" *Journal of School Psychology*, 30, 1993, 269-291
19. R.B. Kozma "Learning with media" *Review of Educational Research*, 61(2) 179-221
20. L.P. Riber "Animation as feedback in a computer-based simulation: representation matters", *Educational Technology Research & Development*, 1996 44(1) 5-22
21. M.P. Brawer "Integrating motivational activities into instruction: a developmental model" ERIC, Document Reproduction Service No. ED 22 106
22. Manual de Femlab, 2004, 23
23. Lien, David A. (1986). *The Basic Handbook: Encyclopedia of the BASIC Computer Language* (3a ed.). CompuSoft Publishing. Documenta la variación en el dialecto de más de 250 versiones de BASIC. Kemeny, John G.; & Kurtz, Thomas E. (1985). *Back To BASIC - The History, Corruption, and Future of the Language*. Addison Wesley Publishing.
- 24.-Autor: Luis Suárez Bernaldo Ingeniero de Telecomunicación. Libro, Visual Basic - Guía del Estudiante. Texto de libre difusión para fines educativos. Madrid, Julio de 1998.
25. Artículo escrito originalmente para Nupedia por Peter Fedorow (fedorowp@yahoo.com).
26. <http://www.xtec.es/~aromero8/hornos.htm>
27. <http://www.xtec.es/~aromero8/ceramica/hornoelctrico.htm>



28. <http://www.monografias.com/trabajos18/transferencia-calor/transferencia-calor.shtml>
29. <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes%5Cmanizales/4070035/lecciones/cap4/cap4.htm>
30. <http://www.monografias.com/trabajos14/trmnpot/trmnpot2.shtml32>
31. [http://66.94.231.168/language/translatedPage?tt=url&text=http%3a//www.matweb.com/search/SpecificMaterialText.asp%3fbassnum=MISIM0&lp=en\\_es&.intl=mx&fr=FP-tab-web-t](http://66.94.231.168/language/translatedPage?tt=url&text=http%3a//www.matweb.com/search/SpecificMaterialText.asp%3fbassnum=MISIM0&lp=en_es&.intl=mx&fr=FP-tab-web-t)



## ANEXOS

### COMSOL Model Report

**Mesh**

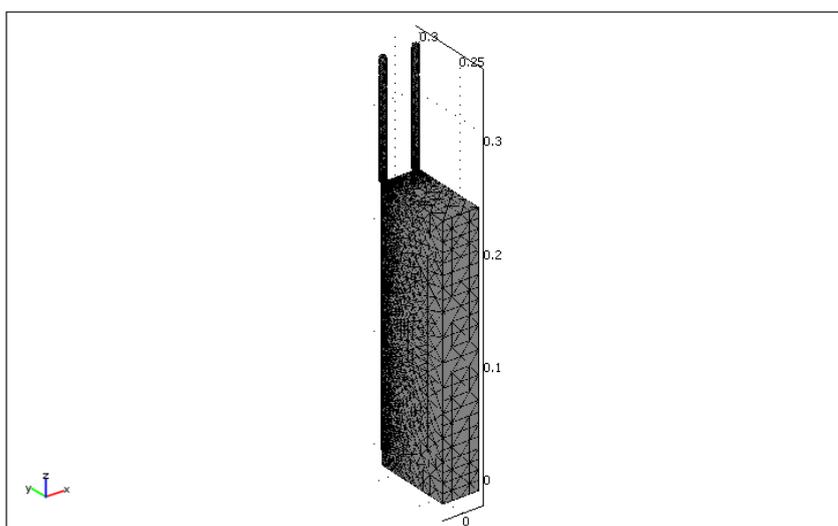
**Mesh Parameters**

Parameter		Value
Maximum element size		
Maximum element size scaling factor		1.5
Mesh curvature factor		0.7
Element growth rate		1.6
Mesh curvature cut off		0.04
Resolution of narrow regions		0.4
Resolution of geometry		20
x-direction scale factor		1.0
y-direction scale factor		1.0
z-direction scale factor		1.0
Optimize quality		On
Mesh geometry to level		Subdomain
<b>Subdomain</b>		1-2
Maximum element size		
Element growth rate		
<b>Boundary</b>		1-35
Maximum element size		
Element growth rate		
Mesh curvature factor		
Mesh curvature cut off		
<b>Edge</b>		1-76
Maximum element size		
Element growth rate		
Mesh curvature factor		
Mesh curvature cut off		
<b>Point</b>		1-46
Maximum element size		
Element growth rate		



### **Mesh Statistics**

Number of degrees of freedom	491046
Number of edge elements	2316
Number of boundary elements	24610
Number of elements	245918
Minimum element quality	0.0191



### **Application Mode: Conductive Media DC (dc)**

Application mode type: Conductive Media DC

Application mode name: dc

### **Application Mode Properties**

<b>Property</b>	<b>Value</b>
Default element type	Lagrange - Quadratic
Frame	Reference frame
Weak constraints	Off



**Variables**

Dependent variables: V

Shape functions: shlag(2,'V')

Interior boundaries active

**Point Settings**

Point	1-46
style	V {0,{0,0,255}}

**Edge Settings**

Edge	1-76
style	A/m {0,{0,0,255},'solid'}

**Boundary Settings**

Boundary		1-3, 10-15, 17-27, 29-34	4
Type		Electric insulation	Inward current flow
Normal current density (Jn)	A/m <sup>2</sup>	0	<b>inn/thick/side</b>
Boundary		5-9, 16, 28, 35	
Type		Ground	
Normal current density (Jn)		0	

**Subdomain Settings**

Subdomain		1
Shape functions (shape)		<b>shlag(2,'V')</b>
Integration order (gporder)		<b>4</b>
Constraint order (cporder)		<b>2</b>
name		<b>default</b>
Electrical conductivity (sigma)	S/m	<b>1/res</b>
Temperature (T)	K	<b>T</b>



**Application Mode: Heat Transfer by Conduction (ht)**

Application mode type: Heat Transfer by Conduction

Application mode name: ht

**Application Mode Properties**

Property	Value
Default element type	Lagrange - Quadratic
Analysis type	Transient
Frame	Reference frame
Weak constraints	Off

**Variables**

Dependent variables: T

Shape functions: shlag(2,'T')

Interior boundaries not active

**Boundary Settings**

Boundary		1-3	4, 28
Type		Heat flux	Temperature
name			<b>temp2</b>
Heat transfer coefficient (h)	W/(m <sup>2</sup> ·K)	<b>h1</b>	0
External temperature (Tinf)	K	<b>Tinf</b>	0
Problem-dependent constant (Const)	W/(m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup> )	<b>em*delta</b>	0
Ambient temperature (Tamb)	K	<b>Tinf</b>	0
Temperature (T0)	K	0	<b>Tinf</b>
Boundary	5-9, 16, 35	10-15, 17-27, 29-34	
Type	Thermal insulation	Heat flux	
name		<b>flujo2</b>	
Heat transfer coefficient (h)	0	<b>h1</b>	
External temperature (Tinf)	0	<b>Tinf</b>	



Problem-dependent constant (Const)	0	<b>em*delta</b>
Ambient temperature (Tamb)	0	<b>Tinf</b>
Temperature (T0)	0	0

**Subdomain Settings**

Subdomain		1	2
Shape functions (shape)		<b>shlag(2,'T')</b>	<b>shlag(2,'T')</b>
Integration order (gporder)		<b>4</b>	<b>4</b>
Constraint order (cporder)		<b>2</b>	<b>2</b>
name		<b>default</b>	
Thermal conductivity (k)	W/(m□K)	<b>k1</b>	<b>k2</b>
Density (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>ro1</b>	<b>ro2</b>
Heat capacity (C)	J/(kg□K)	<b>cp1</b>	<b>cp2</b>
Heat source (Q)	W/m <sup>3</sup>	<b>Q_dc</b>	0
Subdomain initial value		1	2
Temperature (T)	K	Tinf	Tinf

**Variables**

**Boundary**

<b>Name</b>	<b>Description</b>	<b>Expression</b>
nJ_dc	Current density outflow	$nx\_dc * Jx\_dc + ny\_dc * Jy\_dc + nz\_dc * Jz\_dc$
nJs_dc	Source current density	$unx * (Jx\_dc\_down - Jx\_dc\_up) + uny * (Jy\_dc\_down - Jy\_dc\_up) + unz * (Jz\_dc\_down - Jz\_dc\_up)$
nflux_ht	Normal heat flux	$nx\_ht * fluxx\_ht + ny\_ht * fluxy\_ht + nz\_ht * fluxz\_ht$



**Subdomain**

<b>Name</b>	<b>Description</b>	<b>Expression</b>
Jix_dc	Potential current density, x component	$\text{sigmaxx\_dc} * \text{Ex\_dc} + \text{sigmaxy\_dc} * \text{Ey\_dc} + \text{sigmaxz\_dc} * \text{Ez\_dc}$
Ex_dc	Electric field, x component	$-\text{Vx}$
Jx_dc	Total current density, x component	$\text{Jex\_dc} + \text{Jix\_dc}$
Jiy_dc	Potential current density, y component	$\text{sigmayx\_dc} * \text{Ex\_dc} + \text{sigmayy\_dc} * \text{Ey\_dc} + \text{sigmayz\_dc} * \text{Ez\_dc}$
Ey_dc	Electric field, y component	$-\text{Vy}$
Jy_dc	Total current density, y component	$\text{Jey\_dc} + \text{Jiy\_dc}$
Jiz_dc	Potential current density, z component	$\text{sigmazx\_dc} * \text{Ex\_dc} + \text{sigmazy\_dc} * \text{Ey\_dc} + \text{sigmazz\_dc} * \text{Ez\_dc}$
Ez_dc	Electric field, z component	$-\text{Vz}$
Jz_dc	Total current density, z component	$\text{Jez\_dc} + \text{Jiz\_dc}$
normE_dc	Electric field, norm	$\text{sqrt}(\text{abs}(\text{Ex\_dc})^2 + \text{abs}(\text{Ey\_dc})^2 + \text{abs}(\text{Ez\_dc})^2)$
normJe_dc	External current density, norm	$\text{sqrt}(\text{abs}(\text{Jex\_dc})^2 + \text{abs}(\text{Jey\_dc})^2 + \text{abs}(\text{Jez\_dc})^2)$
normJi_dc	Potential current density, norm	$\text{sqrt}(\text{abs}(\text{Jix\_dc})^2 + \text{abs}(\text{Jiy\_dc})^2 + \text{abs}(\text{Jiz\_dc})^2)$
normJ_dc	Total current density, norm	$\text{sqrt}(\text{abs}(\text{Jx\_dc})^2 + \text{abs}(\text{Jy\_dc})^2 + \text{abs}(\text{Jz\_dc})^2)$
Q_dc	Resistive heating	$\text{Jx\_dc} * \text{Ex\_dc} + \text{Jy\_dc} * \text{Ey\_dc} + \text{Jz\_dc} * \text{Ez\_dc}$
fluxx_ht	Heat flux, x component	$-(\text{kxx\_ht} * \text{Tx} + \text{kxy\_ht} * \text{Ty} + \text{kxz\_ht} * \text{Tz})$
fluxy_ht	Heat flux, y component	$-(\text{kyy\_ht} * \text{Tx} + \text{kyy\_ht} * \text{Ty} + \text{kzy\_ht} * \text{Tz})$
fluxz_ht	Heat flux, z component	$-(\text{kzz\_ht} * \text{Tx} + \text{kzy\_ht} * \text{Ty} + \text{kzz\_ht} * \text{Tz})$
gradT_ht	Temperature gradient	$\text{sqrt}(\text{Tx}^2 + \text{Ty}^2 + \text{Tz}^2)$
flux_ht	Heat flux	$\text{sqrt}(\text{fluxx\_ht}^2 + \text{fluxy\_ht}^2 + \text{fluxz\_ht}^2)$