



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Simulación estacionaria y transitoria de la temperatura en depósitos formados por materiales de distinta conductividad

PROYECTO FIN DE CARRERA

INGENIERO INDUSTRIAL

Autor: Joaquín Sánchez-Muñoz Espín

Directores: Juan Francisco Sánchez Pérez
Francisco Alhama López



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Cartagena, Septiembre 2017

Índice

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN. | 3 |
| 1.1 Antecedentes. | 3 |
| 1.2 Objetivos. | 5 |
| 1.3 Medios utilizados. | 6 |
| CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS. | 7 |
| 2.1 Transmisión del calor por conducción. | 7 |
| 2.1.1 Campo de temperaturas. | 7 |
| 2.1.2 Gradiente de temperatura. | 8 |
| 2.1.3 Flujo de calor. Ley de Fourier. | 9 |
| 2.1.4 Conductividad térmica. | 12 |
| 2.1.5 Ecuación diferencial de la conducción. | 13 |
| 2.1.6 Medios multicapa. | 18 |
| 2.1.7 Condiciones iniciales y de frontera. | 19 |
| 2.2 El método de simulación por redes. | 21 |
| 2.2.1 Idea del método. Tipos de monpuertas. | 21 |
| Monopuertas pasivas | 23 |
| 2.3 El software PSpice-OrCAD. | 24 |
| 2.3.1 Introducción y aplicaciones. | 24 |
| 2.3.2 Simulación. Presentación de resultados. | 27 |
| 2.4 El programa C# | 28 |
| 2.5 El Método de Simulación por Redes frente a la Analogía Termoeléctrica Clásica. | 30 |
| CAPÍTULO 3. EL PROGRAMA PROCCA-09. | 31 |
| 3.1 Estructura del programa PROCCA-09. | 31 |
| 3.2 Creación de archivos de modelos. | 33 |
| 3.2.1 Presentación del programa. | 33 |
| 3.2.2 Descripción del módulo CONCBA. | 34 |
| 3.3 Criterios para la numeración de celdas, nodos y elementos del modelo. | 40 |
| 3.4 Estructura de los archivos de texto de modelos. | 42 |
| 3.5 Pantallas de presentación de resultados. | 46 |
| CAPÍTULO 4. CASOS SIMULADOS Y RESULTADOS. | 48 |
| 4.1 Planteamiento. | 48 |
| 4.1.1 Aislante: lana de roca. | 48 |
| 4.1.2 Condición de contorno en el interior. | 49 |
| 4.1.3 Condición de contorno en el exterior. | 49 |
| 4.2 Depósito esférico. | 52 |
| 4.2.1 Condición exterior: Convección. | 54 |
| Caso 1.1 | 56 |
| Caso 1.2 | 56 |
| Caso 1.3 | 57 |
| Caso 1.4 | 57 |
| 4.2.2 Condición exterior: Radiación | 58 |
| Caso 2.1 | 60 |

| | |
|---|-----------|
| Caso 2.2 | 60 |
| Caso 2.3 | 61 |
| Caso 2.4 | 61 |
| 4.2.3 Condición exterior: Convección + Radiación | 62 |
| Caso 3.1 | 64 |
| Caso 3.2 | 64 |
| Caso 3.3 | 65 |
| Caso 3.4 | 65 |
| 4.3 Depósito cilíndrico..... | 66 |
| 4.3.1 Condición exterior: Convección. | 68 |
| Caso 4.1 | 70 |
| Caso 4.2 | 70 |
| Caso 4.3 | 71 |
| Caso 4.4 | 71 |
| 4.3.2 Condición exterior: Radiación. | 72 |
| Caso 5.1 | 74 |
| Caso 5.2 | 74 |
| Caso 5.3 | 75 |
| Caso 5.4 | 75 |
| 4.3.3 Condición exterior: Convección + Radiación | 76 |
| Caso 6.1 | 78 |
| Caso 6.2 | 78 |
| Caso 6.3 | 79 |
| Caso 6.4 | 79 |
| 4.4 Resultados..... | 80 |
| 4.4.1 Régimen transitorio de temperaturas. | 80 |
| 4.4.2 Régimen estacionario de temperaturas. | 80 |
| Depósito esférico. | 81 |
| Depósito cilíndrico..... | 82 |
| Análisis. | 83 |
| 4.4.3 Régimen transitorio de flujos de calor. | 85 |
| 4.4.4 Régimen estacionario de flujos de calor. | 85 |
| Depósito esférico. | 86 |
| Depósito cilíndrico..... | 87 |
| Análisis. | 88 |
| CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES..... | 90 |
| 5.1 Conclusiones relativas al campo de temperaturas. | 90 |
| 5.2 Conclusiones relativas a los flujos de calor. | 90 |
| CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA..... | 92 |
| ANEXO 1..... | 93 |



Capítulo 1. Introducción.

1.1 Antecedentes.

Hoy en día el aislamiento de depósitos multicapa es un problema de gran interés en la industria. En la mayoría de estos depósitos se encierran fluidos de sustancias peligrosas a altas temperaturas que pueden suponer un riesgo para el entorno exterior. Es por ello por lo que surge la necesidad de encontrar modelos que satisfagan las necesidades de las empresas y las industrias que hagan uso de este tipo de depósitos, con el fin de garantizar la completa seguridad de las personas.

Para ello necesitaremos conocer los conceptos básicos termodinámicos y de transmisión del calor, así como los modelos de simulación por redes para el estudio de este proyecto.

Siempre que existe una diferencia de temperatura, la energía se transfiere de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura. De acuerdo con los conceptos termodinámicos, la energía que se transfiere como resultado de una diferencia de temperatura es el calor.


Sin embargo, aunque las leyes de la termodinámica tratan de la transferencia de energía, sólo se aplican a sistemas que están en equilibrio; pueden utilizarse para predecir la cantidad de energía requerida para modificar un sistema de un estado de equilibrio a otro, pero no sirven para predecir la rapidez (tiempo) con que puedan producirse estos cambios. La fenomenología que estudia la transmisión del calor complementa los Principios Termodinámicos, proporcionando unos métodos de análisis que permiten predecir esta velocidad de transmisión térmica.

Para realizar un análisis completo de la transmisión de calor debemos considerar que la energía calórica o térmica puede ser transmitida por diferentes mecanismos. Estos son la radiación, la conducción y la convección, aunque en la mayoría de los procesos reales todos se encuentran presentes en mayor o menor grado. El diseño de los sistemas de intercambio de calor y conversión energética requieren de cierta familiaridad con cada uno de estos mecanismos, así como de sus interacciones. Estos mecanismos son:

Transmisión por conducción

En este caso el calor se transmite de molécula a molécula sin cambio aparente de materia, por lo que esta forma de intercambio de calor interesa esencialmente a los sólidos.

La elevación de temperatura aumenta la excitación de las partículas más elementales de la materia, transmitiéndose dicha excitación a las más próximas de su entorno y con ello su energía calorífica, continuándose el proceso en el cuerpo en cuestión de la zona más caliente a la más fría.

| | |
|---|---|
|  | SIMULACIÓN ESTACIONARIA Y TRANSITORIA DE LA TEMPERATURA EN DEPÓSITOS FORMADOS POR MATERIALES DE DISTINTA CONDUCTIVIDAD |
| | Capítulo 1. Introducción. |

Por lógica se comprende que cuanto más denso, compacto y pesado es un cuerpo, más próximas están las moléculas entre sí y, por tanto, el cambio se realiza con mayor facilidad.

Transmisión por convección

Esta forma de propagación es propia de los fluidos (líquidos y gases).

Las moléculas en contacto con un cuerpo a temperatura más alta se calientan, disminuyendo su densidad y desplazándose por gravedad. Si a su vez entran en contacto con un cuerpo más frío, ceden calor, aumentando su densidad y desplazándose en sentido contrario, formándose así un ciclo de convección.

Transmisión por radiación

La radiación está constituida por ondas electromagnéticas de diferentes longitudes.

Mientras las dos formas de transmisión anteriores (conducción y convección) necesitan de un soporte material; la transmisión por radiación puede realizarse en el vacío.


Todos los cuerpos, incluso a temperaturas bajas, emiten calor por radiación y la cantidad de calor irradiado aumenta cuando se eleva la temperatura del cuerpo. Por ello, cuando un cuerpo se encuentra en presencia de otro más caliente, absorbe más energía de la que emite y viceversa, siendo la cantidad transmitida la diferencia entre la emitida por ambos.

La prioridad es conocer la función de la conductividad térmica, cuyo coeficiente expresa la cantidad o flujo de calor que pasa, por unidad de tiempo, a través de la unidad de superficie de una muestra del material, de extensión infinita, caras paralelas y espesor unidad, cuando entre sus caras se establece una diferencia de temperaturas igual a la unidad, en condiciones estacionarias.

En este proyecto se pretende determinar la influencia en la transmisión de calor que se lleva a cabo en las distintas capas de 2 tipos de depósito (esférico y cilíndrico) de la caracterización de la capa aislante en función de su conductividad y la variación de las condiciones de contorno en el exterior del depósito (sólo convección, sólo radiación o una combinación simultánea de ambas). Todo ello teniendo en el interior una temperatura dependiente del tiempo.

El medio estará formado por varias capas, una de las cuales será la capa térmicamente no conductora (o aislante), mientras que la otra tendrá otras propiedades mecánicas o químicas requeridas por el diseño.

Para elaborar este estudio se van a utilizar los modelos diseñados mediante el método de simulación por redes, MESIR (González-Fernández y col. [2002]), y van a ser elaborados en el programa PROCCA-09 desarrollado y siendo simulados por el programa de simulación de circuitos Pspice (u Orcad) y Matlab. La elección de llevar a cabo el proyecto con este programa ha sido tomada debido a que este tipo de problema no podemos resolverlo

| | |
|---|---|
|  | SIMULACIÓN ESTACIONARIA Y TRANSITORIA DE LA TEMPERATURA EN DEPÓSITOS FORMADOS POR MATERIALES DE DISTINTA CONDUCTIVIDAD |
| | Capítulo 1. Introducción. |

mediante métodos numéricos de elementos finitos, ya que estos solo nos proporcionan una solución aproximada.

El MESIR es un método versátil y potente, muy extendido en la literatura científica, capaz de modelar, en principio, cualquier problema matemático definido mediante un conjunto de ecuaciones de gobierno y de condiciones de contorno.


Los modelos utilizados en este proyecto toman como referencia los desarrollados por el grupo de investigación “Simulación por Redes” de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) y publicados en la literatura científica. Estos modelos han demostrado ser suficientemente precisos ya que los errores quedan reducidos a valores del 0,5 o 1 % para problemas transitorios lineales, 1- D y 2-D, con mallados relativamente pequeños (Alhama [1999], Alarcón [2001] y Alarcón y col. [2000a y2000b]).

La aplicación del MESIR precisa de un programa de resolución de circuitos eléctricos, PSpice, e incluye la resolución numérica del modelo en red obtenido mediante la reticulación del espacio en elementos de volumen o celdas elementales. Un modelo en red se considera equivalente a un determinado proceso cuando, en su descripción, las ecuaciones discretas del modelo matemático y las ecuaciones del modelo en red para un elemento del volumen o celda elemental, correspondientes a variables análogas, coinciden. Al aplicar a las reticulaciones las ecuaciones diferenciales, se obtiene un conjunto de ecuaciones en diferencias finitas que se constituyen en el punto de partida para la obtención del modelo en red correspondiente a cada celda elemental. Una seleccionada correspondencia entre variables dependientes del problema y variables eléctricas, tensiones e intensidades, permite interpretar los resultados de la simulación en términos del proceso que se modela. La asociación de celdas, de acuerdo con la geometría del problema, configura el modelo en red correspondiente a todo el medio finito, que es tanto más preciso cuanto mayor sea el número de celdas. Las condiciones de contorno e iniciales se incorporan al modelo de manera simple mediante dispositivos eléctricos adecuados.

1.2 Objetivos.

El software PROCCA-09 puede ser un sustituto del trabajo en el laboratorio, pues se trata de una herramienta virtual del método de simulación por redes, aplicado a la resolución de problemas en ingeniería que requieran una analogía termo-eléctrica. Gracias al dominio de este programa será posible la obtención de la solución real al estudio sin limitaciones de ningún tipo. Esto no era posible mediante los métodos numéricos de elementos finitos, estudiados durante la carrera, donde solamente era posible conseguir aproximaciones de la solución real.

El objetivo global de este proyecto es el uso del software PROCCA-09 para la obtención de campos térmicos transitorios y estacionarios en las paredes de depósitos (esférico y cilíndrico) de conductividad variable ante condiciones de contorno de primera, segunda y tercera clase. También se obtendrán los flujos de calor en régimen transitorio y estacionario. Este objetivo global deberá ser el resultado de la consecución de los siguientes objetivos específicos:

| | |
|---|--|
|  | SIMULACIÓN ESTACIONARIA Y TRANSITORIA DE LA TEMPERATURA EN DEPÓSITOS FORMADOS POR MATERIALES DE DISTINTA CONDUCTIVIDAD |
| | Capítulo 1. Introducción. |

- Instalación y manejo del programa PROCCA-09.
- Diseño de modelos de tanques de aislamiento (esféricos y cilíndricos) con paredes de conductividad variable.
- Obtención de campos térmicos estacionarios en la pared.
- Obtención de campos térmicos transitorios en la pared.
- Obtención de flujos de calor estacionarios en la pared.
- Obtención de flujos de calor transitorios en la pared.
- Aplicación de condiciones especiales de contorno.
- Establecimiento de conclusiones.

1.3 Medios utilizados.

Para conseguir los objetivos que este proyecto persigue, se han utilizado los siguientes medios:

- Un ordenador portátil HP con las características que se detallan a continuación:
 - Procesador Intel Core i7
 - 16 GB de memoria RAM
 - Disco duro SSD de 250 GB
- El programa de simulación de circuitos PSpice, versión 10.5, perteneciente a la familia de análisis OrCAD
- Oracle VM Virtualbox (máquina virtual para simular el SO Windows XP)
- El programa base para “Simulación por Redes” conocido como PROCCA-09
- El programa de hojas de cálculo Microsoft Excel, versión 2016, perteneciente a la suite ofimática Microsoft Office



Capítulo 2. Fundamentos Teóricos.

2.1 Transmisión del calor por conducción.

El fenómeno de la conducción de calor es un proceso de propagación de la energía por contacto directo entre las partículas de un cuerpo, o entre cuerpos a distintas temperaturas, en virtud del movimiento de las micro partículas de la sustancia.

En los metales, caso de estudio de este proyecto, la transmisión de calor se debe principalmente a la difusión de los electrones libres y, en menor medida, a las oscilaciones elásticas.

La teoría analítica de la conducción no tiene en cuenta la estructura molecular de la sustancia y al considera como un medio continuo. Esta aproximación está justificada cuando los cuerpos estudiados son suficientemente grandes en relación con las dimensiones de sus moléculas y las distancias entre ellas.

2.1.1 Campo de temperaturas.

Cualquier fenómeno físico implica, en general, un cambio de las propiedades físicas del sistema afectado por el fenómeno en el espacio y el tiempo. El proceso de conducción del calor sólo puede aparecer cuando puntos distintos de un sólido están a diferentes temperaturas. Por tanto, la conducción va acompañada, generalmente, por cambios de temperatura en el espacio y en el tiempo.

El tratamiento analítico de la conducción no es más que el estudio de estas variaciones de temperatura en el espacio y el tiempo, es decir, consiste en establecer la ecuación (1).


$$T = f(x, y, z, t) \quad (1)$$

La ecuación (1) es la expresión matemática del campo de temperaturas, que es el conjunto de temperaturas en todos los puntos del espacio estudiado, en cualquier instante.

El campo de temperaturas puede ser de dos clases: estacionario o transitorio. La ecuación (1) describe el tipo más frecuente de campo, aquel en el que las temperaturas varían con el tiempo y de un punto a otro. Este tipo es característico de la conducción en régimen transitorio y se llama campo de temperaturas transitorio.

Si se establece un flujo de calor de forma que la temperatura de cada punto sea constante con el tiempo, se tiene un campo de temperaturas estacionario. La temperatura es, en este caso, sólo función de las coordenadas espaciales como muestra la ecuación (2).

$$T = f_1(x, y, z, t); \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

| | |
|---|---|
|  | SIMULACIÓN ESTACIONARIA Y TRANSITORIA DE LA TEMPERATURA EN DEPÓSITOS FORMADOS POR MATERIALES DE DISTINTA CONDUCTIVIDAD |
| | Capítulo 2. Fundamentos Teóricos. |

Las ecuaciones (1) y (2) definen un campo tridimensional, puesto que la temperatura es función de tres coordenadas. Si la temperatura es función de dos coordenadas, el campo se llama bidimensional y está definido por la ecuación (3).

$$T = f_2(x, y, z, t); \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Cuando la temperatura es función de una sola coordenada, el campo se llama unidimensional y se expresa como se refleja en la ecuación (4).

$$T = f_3(x, t); \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

2.1.2 Gradiente de temperatura.

Si se unen todos los puntos de un cuerpo que estén a la misma temperatura, se obtiene una superficie de igual temperatura llamada isoterma. Así, una superficie isoterma de un cuerpo es el lugar geométrico de los puntos que tienen la misma temperatura.

Como un mismo punto de un cuerpo no puede tener dos temperaturas distintas simultáneamente, las superficies isotermas no se cortan.

La intersección de las superficies isotermas por un plano da una familia de isotermas sobre él, que tienen las mismas propiedades que aquéllas, o sea que no se cortan, que son continuas dentro del cuerpo y terminan en la superficie o están completamente contenidas en él.

La Figura 2-1 representa isotermas cuya temperatura difiere en ΔT .

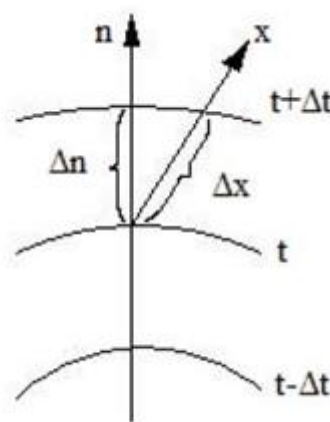


Figura 2-1 Isotermas



La temperatura de un cuerpo varía solamente en las direcciones que cortan a las superficies isotermas; la mayor variación de temperatura por unidad de longitud se obtiene en la dirección normal a la superficie isoterma.

Un incremento de temperatura en esa dirección está determinado por el gradiente de temperatura. Este gradiente es un vector normal a la superficie isoterma y positivo en la dirección de las temperaturas crecientes. Numéricamente es igual a la derivada de la temperatura en esa dirección como se muestra en la expresión (5):

$$\nabla T = n_0 \frac{\partial T}{\partial n} \quad (5)$$

En donde: n_0 es un vector unitario normal a la superficie isoterma y en sentido de las temperaturas crecientes, y $\frac{\partial T}{\partial n}$ es la derivada de la temperatura en la dirección normal (n).

El módulo del gradiente de la temperatura no es el mismo en puntos distintos de una superficie isoterma; es tanto mayor cuanto menor sea la distancia n entre las superficies. Cuando se habla de la magnitud gradiente de temperatura se hace referencia al valor de su módulo $\frac{\partial T}{\partial n}$.

El escalar $\frac{\partial T}{\partial n}$ es negativo en la dirección de las temperaturas decrecientes.

Las proyecciones del vector ∇T sobre los ejes coordenados OX, OY y OZ son las que se expresan en las expresiones (6):

$$\begin{aligned} (\nabla T)_x &= \frac{\partial T}{\partial n} \cos(n, x) = \frac{\partial T}{\partial x} \\ (\nabla T)_y &= \frac{\partial T}{\partial n} \cos(n, y) = \frac{\partial T}{\partial y} \\ (\nabla T)_z &= \frac{\partial T}{\partial n} \cos(n, z) = \frac{\partial T}{\partial z} \end{aligned} \quad (6)$$

2.1.3 Flujo de calor. Ley de Fourier.

La propagación del calor en el medio considerado depende de que la distribución de temperaturas sea o no uniforme. Por lo tanto, para que la transmisión de calor por conducción se realice es necesario que el gradiente de temperatura sea mayor que cero en varios puntos del cuerpo.



Según la ley de Fourier, la cantidad de calor dQ_t que pasa a través de un elemento de superficie isoterma dF en el intervalo de tiempo dt es proporcional al gradiente de temperatura $\frac{\partial T}{\partial n}$ según la ecuación (7):

$$dQ_t = -n_0 k \frac{\partial T}{\partial n} dF dt, \text{ en } J \quad (7)$$

Se ha demostrado experimentalmente que el factor de proporcionalidad de la ecuación (7) es una propiedad física de la sustancia que define la capacidad de la sustancia para conducir el calor y se llama conductividad térmica (k).

La cantidad de calor transmitido a través de la superficie isoterma por unidad de área y por unidad de tiempo (8) es:

$$q = \frac{dQ_t}{dF dt} \quad (8)$$

Se llama densidad de flujo de calor y es un vector definido por la relación (9):

$$q = -n_0 k \frac{\partial T}{\partial n}, \text{ en } W/m^2 \quad (9)$$

El vector densidad de flujo de calor es normal a la superficie isoterma y está dirigido en el sentido de las temperaturas decrecientes, puesto que el calor fluye siempre desde las superficies calientes a las frías según el segundo principio de la termodinámica. En consecuencia, los vectores q y ∇T tienen la misma dirección, pero sentidos opuestos, lo que explica el signo menos en el segundo miembro de las ecuaciones (7) y (9).

Las líneas cuyas tangentes tienen la dirección del vector q se llaman líneas de flujo de calor y son ortogonales a las superficies isotermas.

El módulo de la densidad de flujo de calor se muestra en la ecuación (10):

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial n}, \text{ en } W/m^2 \quad (10)$$

La cantidad de calor que pasa a través de una superficie isoterma de área F por unidad de tiempo se llama flujo de calor, Q . La cantidad de calor que fluye por unidad de tiempo a través de una superficie isoterma, cuyos puntos tienen diferentes gradientes de temperatura se muestra en la ecuación (11):

$$Q = \int q dF = - \int_F k \frac{\partial T}{\partial n} dF, \text{ en } W \quad (11)$$



Capítulo 2. Fundamentos Teóricos.

En la ecuación (11), dF es un elemento de área de la superficie isoterma. La cantidad total de calor que pasa a través de una superficie isoterma de área F en un tiempo t se da por la ecuación (12).

$$Q_t = - \int_0^t \int_F k \frac{\partial T}{\partial n} dF dt, \text{ en } J \quad (12)$$

La cantidad de calor que fluye a través de una superficie elemental de área dF_1 , que forma un ángulo φ con el plano tangente a la superficie isoterma puede calcularse por la misma fórmula, teniendo en cuenta la ecuación (13).

$$q_l = q \cos(\varphi) = \frac{dQ_t}{dt} \frac{1}{dF} \cos(\varphi) = \frac{dQ_t}{dt} \frac{1}{dF_1} \quad (13)$$

Puesto que $dF = dF_1 \cos \varphi$ es la proyección del área dF_1 sobre la superficie isoterma, el flujo de calor a través de dF_1 en el tiempo dt se expresa con la ecuación (14).

$$dQ_t = q_l dF_1 dt = q dF_1 \cos(\varphi) dt = q dF dt \quad (14)$$

La cantidad total de calor que fluye a través de la superficie F_1 en el tiempo t viene dada por la expresión (15).

$$Q = - \int_0^t \int_{F_1} k \frac{\partial T}{\partial n} dF dt, \text{ en } J \quad (15)$$

Se deduce de la ecuación (13) que la máxima densidad de flujo de calor se obtiene siguiendo las líneas normales a las superficies isotermas. Proyectando este flujo sobre los ejes coordenados OX , OY , OZ , se tiene, de acuerdo con las ecuaciones (6), las ecuaciones (16).

$$\begin{aligned} q_x &= -k \frac{\partial T}{\partial x} \\ q_y &= -k \frac{\partial T}{\partial y} \\ q_z &= -k \frac{\partial T}{\partial z} \end{aligned} \quad (16)$$

Las ecuaciones (16) nos dan las componentes del vector densidad de flujo de calor que se representa mediante la ecuación (17).

$$\hat{q} = \hat{i}q_x + \hat{j}q_y + \hat{k}q_z \quad (17)$$



Para determinar la cantidad de calor que pasa a través de cualquier superficie de un cuerpo, es necesario conocer el campo de temperaturas establecido en su interior. Por lo tanto, el problema principal de la teoría analítica de la conducción es determinar ese campo de temperaturas.

2.1.4 Conductividad térmica.

La conductividad térmica es una propiedad física de cada materia. En general depende de la temperatura, de la presión y de la naturaleza de la misma. La conductividad térmica de los distintos materiales se determina en general experimentalmente. Se calcula mediante la relación (18).

$$k = \left| \frac{q}{\nabla T} \right|, \text{ en } W/m K \quad (18)$$

Se deduce de la ecuación (18), que la conductividad térmica es numéricamente igual a la cantidad de calor que atraviesa la unidad de área de superficie isoterma en la unidad de tiempo cuando el gradiente de temperatura es la unidad.

Se han publicado tablas con los resultados de las medidas de conductividades térmicas para su uso en los cálculos de transmisión de calor por conducción. Como los cuerpos pueden estar a distintas temperaturas y la distribución de temperaturas dentro de un cuerpo durante la transmisión de calor no es uniforme, resulta necesario conocer la dependencia de la conductividad térmica respecto a la temperatura.

Se ha demostrado experimentalmente que en las aplicaciones prácticas es suficiente exacto suponer que la conductividad térmica varía linealmente con la temperatura en la mayoría de los materiales, según la ecuación (19).

$$k = k_0[1 + b(T - T_0)], \text{ en } W/m K \quad (19)$$

En la ecuación (19), k_0 es la conductividad térmica a la temperatura T_0 y b una constante determinada experimentalmente.

En los metales, los principales agentes de transporte de calor son los electrones libres, que pueden asimilarse a un gas perfecto monoatómico. También es posible la transmisión de calor por medio de oscilaciones de átomos o de ondas elásticas, pero esta forma de transmisión es insignificante en comparación con el transporte de energía efectuado por el gas de electrones. El movimiento de los electrones libres en un metal calentado o enfriado produce la igualación de las temperaturas de todos los puntos del mismo, como consecuencia de su movimiento desde las regiones de mayor a menor temperatura y viceversa. En el primer caso ceden energía a los átomos y en el segundo la extraen. Ya que los electrones son portadores al mismo tiempo de calor y electricidad, la conductividad térmica de un metal es proporcional a su conductividad eléctrica. La dispersión de los electrones aumenta con la temperatura, debido a la pérdida de uniformidad de la distribución electrónica como



consecuencia del aumento de energía media. En los metales puros, esto conduce a una disminución de las conductividades térmica y eléctrica.

La conductividad térmica de los metales disminuye fuertemente en presencia de impurezas ya que un aumento de la heterogeneidad estructural provoca la dispersión de los electrones. Sin embargo, en las aleaciones ocurre lo contrario. Los materiales de conductividad térmica baja (menos de 0.25 W/m K) se llaman aislantes térmicos.

2.1.5 Ecuación diferencial de la conducción.

Si se elige un volumen elemental del espacio dv y un intervalo de tiempo pequeño dt , para realizar un estudio del proceso, se puede ignorar la estructura discreta de la materia y se puede considerar a ésta como un medio continuo. De esta manera, se obtiene la ecuación diferencial general del proceso en cuestión. Integrando esta ecuación se obtiene la relación analítica entre las magnitudes características en el campo de integración y en cualquier intervalo de tiempo considerado.

Para encontrar el campo de temperaturas se necesita, por tanto, una ecuación diferencial de la conducción. Para facilitar su obtención, se van a realizar las siguientes aproximaciones:

- El sólido es homogéneo e isótropo.
- Sus parámetros físicos son constantes.
- Las variaciones de volumen debidas a los cambios de temperatura son muy pequeñas frente al propio volumen del cuerpo.
- No existe movimiento relativo entre las macropartículas del sólido.
- Las fuentes internas de calor [expresadas normalmente en la forma $q_v = f(x,y,z,t)$] están distribuidas uniformemente.

La deducción de la ecuación diferencial de la conducción se basa en la ley de la conservación de la energía, que se puede formular de la forma siguiente: la cantidad de calor dQ introducida en el elemento de volumen, desde el exterior, por conducción y por las fuentes de calor internas en el intervalo de tiempo dt es igual a la variación de energía interna de la sustancia contenida en tal volumen, según la ecuación (20) .

$$dQ_1 + dQ_2 = dQ, \text{ en } J \quad (20)$$

En donde:

- dQ_1 = cantidad de calor introducido en el elemento de volumen dv por conducción en el intervalo dt ;
- dQ_2 = cantidad de calor liberada por las fuentes de calor internas en el intervalo dt ;

- dQ = cambio de energía interna de la sustancia contenida en el elemento de volumen dv en el intervalo dt .



Figura 2-2 Balance energético

Con objeto de calcular los términos de la ecuación (20), se considera un paralelepípedo elemental de aristas dx , dy y dz , dispuesto con sus caras paralelas a los ejes coordenados, como en la Figura 2-3.

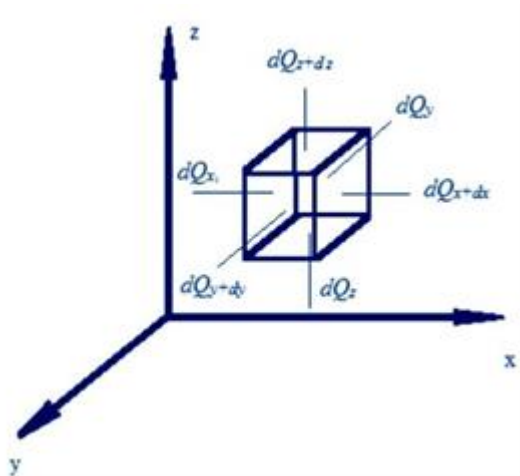


Figura 2-3 Paralelepípedo

Las cantidades de calor que se introducen en el elemento de volumen en ese intervalo de tiempo y en las direcciones OX, OY y OZ se representan por dQ_x , dQ_y y dQ_z respectivamente.

Las cantidades de calor extraídas a través de las caras opuestas a las anteriores y en las mismas direcciones se representan por dQ_{x+dx} , dQ_{y+dy} y dQ_{z+dz} respectivamente. La cantidad de calor introducida por la cara $dy \cdot dz$ en la dirección del eje OX vale lo que se muestra en la ecuación (21).

$$dQ_{x+dx} = q_{x+dx} dy dz dt \quad (21)$$



La diferencia entre las cantidades de calor introducidas y extraídas del paralelepípedo en la dirección del eje OX en dicho intervalo es la cantidad dQ_{x1} que refleja la ecuación (22).

$$dQ_{x1} = dQ_x - dQ_{x+dx} = q_x dydzdt + q_{x+dx} dydzdt \quad (22)$$

La función q_{x+dx} es continua y diferenciable en el intervalo dx y se puede desarrollar en serie de Taylor según (23):

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx + \frac{\partial^2 q_x}{\partial x^2} \frac{dx^2}{2!} + \dots \quad (23)$$

Tomando los dos primeros términos de la ecuación (23), la ecuación (22) se puede escribir como en (24):

$$dQ_{x1} = -\frac{\partial q_x}{\partial x} dx dydzdt \quad (24)$$

De forma similar, se calculan las cantidades de calor introducidas en el volumen elemental en la dirección de los otros dos ejes coordenados.

Así pues, la cantidad de calor dQ_1 , absorbido por el volumen considerado por conducción vale lo que muestra la ecuación (25).

$$dQ_1 = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) dx dydzdt \quad (25)$$

Para hallar el segundo término del primer miembro de la ecuación (20), dQ_2 , se utiliza la capacidad de las fuentes internas de calor identificada con el símbolo $[q_v]$ (W/m^3). A este valor se le llama también densidad volumétrica de liberación de calor y es igual a la cantidad de calor liberado en la unidad de tiempo y de volumen. Así, dQ_2 queda como indica la ecuación (26):

$$dQ_2 = q_v dvdt \quad (26)$$

El tercer término de la ecuación (20), que define el cambio de energía interna, se calcula a partir de la ecuación (27):

$$dQ = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} dt dv \quad (27)$$

Donde ρ es la densidad (kg m^{-3}) y c el calor específico por unidad de masa a presión constante ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$).



Si se sustituyen en la ecuación (25) las proyecciones del vector densidad de flujo según (16), se obtiene la ecuación (28).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{c\rho} \quad (28)$$

La ecuación (28) se conoce como ecuación diferencial de la conducción. Establece la relación entre las variaciones de temperatura en el tiempo y en cada punto del espacio en el que tiene lugar el proceso de conducción.

Se puede sustituir la relación $(k/c\rho)$ por un parámetro α que representa una propiedad física de la sustancia llamada difusividad térmica. Está relacionada con la variación de temperatura y da una medida de la inercia térmica. Se observa cómo la velocidad de variación de la temperatura $(\partial T/\partial t)$ en cada punto del sólido es tanto mayor cuanto mayor sea la difusividad térmica α .

Si se considera que no hay fuentes de calor internas ($q_v = 0$), la ecuación (28) queda simplificada según:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (29)$$

Si tenemos transmisión de calor por conducción en geometrías cilíndricas, podemos usar la ecuación (29) expresada en las correspondientes coordenadas.

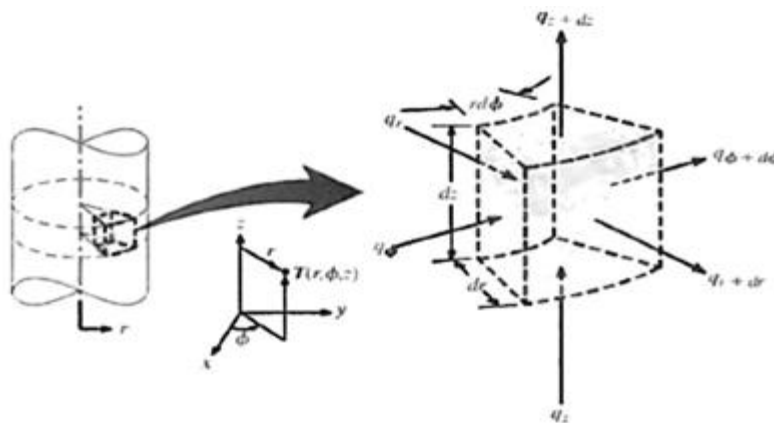


Figura 2-4 Geometría cilíndrica

Aplicando la ecuación de conservación de la energía al volumen de control cilíndrico infinitesimal, sin fuentes de energía en el interior, obtenemos:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c_e \frac{\partial T}{\partial t} \quad (30)$$



O bien, si se trata de un medio lineal (conductividad y calor específico constantes, es decir, independientes de la temperatura y la posición):

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (31)$$

Cuando tenemos transmisión del calor en una geometría esférica, se aplica el siguiente volumen de control esférico infinitesimal:

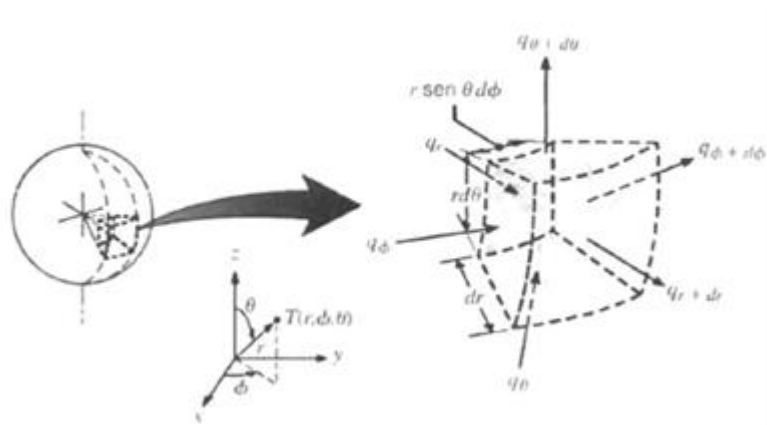


Figura 2-5 Geometría esférica

Cuando aplicamos la ecuación de la conservación de la energía a este volumen obtenemos la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) = \rho c_e \frac{\partial T}{\partial t} \quad (32)$$

O bien,

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (33)$$

Los problemas estudiados con el programa PROCCA-09 abordan geometrías 2-D rectangulares, 2-D cilíndricas, con r y z como variables independientes, y 1-D esféricas, con r como variable espacial. En esos casos todas estas ecuaciones se simplifican, respectivamente, a las siguientes:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \rho c_e \frac{\partial T}{\partial t} \quad (34)$$



Capítulo 2. Fundamentos Teóricos.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c_e \frac{\partial T}{\partial t} \quad (35)$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho c_e \frac{\partial T}{\partial t} \quad (36)$$

Además, en medios con características térmicas constantes se simplifican aún más:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (37)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (38)$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (39)$$

2.1.6 Medios multicapa.

Los medios de estudio habituales en la ingeniería suelen estar formados por varias capas, entre las cuales una puede ser la capa aislante (térmicamente no conductora), situada en la zona central o exterior, mientras las demás tienen otras propiedades mecánicas o químicas adecuadas al objetivo del diseño.

En cada capa se cumple la ecuación diferencial de conducción, (37), (38) o (39), según la geometría correspondiente, rectangular, cilíndrica o esférica, respectivamente, de forma que el conjunto global de ecuaciones es de la forma:

$$\left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y_i^2} \right) = \frac{1}{\alpha_i} \frac{\partial T_i}{\partial t}, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (40)$$

$$\frac{1}{r_i} \frac{\partial}{\partial r_i} \left(r_i \frac{\partial T_i}{\partial r_i} \right) + \frac{\partial^2 T_i}{\partial z_i^2} = \frac{1}{\alpha_i} \frac{\partial T_i}{\partial t}, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (41)$$

$$\frac{1}{r_i^2} \frac{\partial}{\partial r_i} \left(r_i^2 \frac{\partial T_i}{\partial r_i} \right) = \frac{1}{\alpha_i} \frac{\partial T_i}{\partial t}, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (42)$$

Donde n es el número de capas. Además de estas ecuaciones deben cumplirse las condiciones de frontera entre capas; en el caso de contacto térmico perfecto, estas ecuaciones son la de conservación del flujo calorífico entre medios y la de continuidad del valor de la temperatura al pasar de un medio a otro, es decir:



$$\left. \frac{-k_1 \partial T}{\partial n} \right|_{\text{pared}} = \left. \frac{-k_2 \partial T}{\partial n} \right|_{\text{pared}} \quad (43)$$

$$T(x_i = L_i) = T(x_{i+1} = 0) \quad (44)$$

Donde L_i es el tamaño de capa i (en esta ecuación el origen de coordenadas se ha tomado al principio de cada capa).

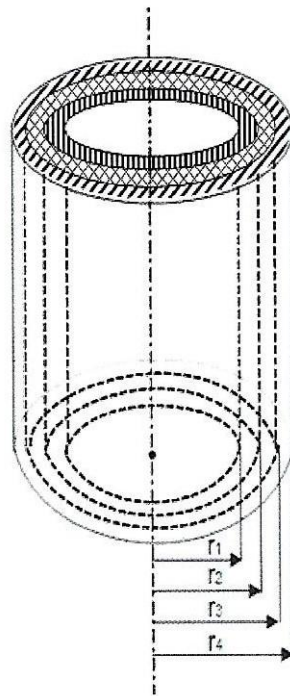


Figura 2-6 Medio multicapas. Geometría cilíndrica hueca 2-D

2.1.7 Condiciones iniciales y de frontera.

La ecuación de conducción requiere, para su solución, la especificación de unas condiciones de contorno asociadas a los límites del medio o fronteras y de unas condiciones iniciales que proporcionan la información sobre el campo inicial de temperaturas en el medio y el origen de la coordenada tiempo. Estas condiciones se expresan mediante ecuaciones matemáticas simples.

Si llamamos a la superficie de la frontera A , se define la densidad de flujo calorífico de conducción (W/m^2) que cruza la superficie A como

$$q_n(x_{\text{frontera}}) = \left. \frac{-k \partial T}{\partial n} \right|_{\text{pared}}$$



Esta densidad de flujo de calor, de acuerdo con el tipo de interacción entre el medio y el exterior, puede ser debida a diferentes causas. Entre éstas cabe distinguir:

- q_{fuente} , asociada a una fuente incidente externa,
- q_{conv} , que representa fuentes o sumideros de tipo convectivo debida al contacto de la superficie A con un fluido exterior, $q_{\text{conv}} = h(T_{\text{pared}} - T_{\infty})$, donde T_{pared} es la temperatura en la pared, T_{∞} la del fluido exterior lejos de la superficie y h el llamado coeficiente de transferencia de calor o coeficiente de película; h depende, en general, del tipo de flujo (laminar, turbulento, etc.), de la geometría y aspecto superficial de la pared, de la diferencia de temperaturas ($T_{\text{pared}} - T_{\infty}$), de las propiedades físicas del fluido, etc. El rango de valores de este coeficiente es muy amplio y en muchos textos de ingeniería pueden encontrarse tabulaciones de h para cada tipo de aplicación,
- q_{rad} , que representa las pérdidas (o ganancias si $q_{\text{rad}} > 0$) de calor por radiación hacia el medio exterior, $q_{\text{rad}} = \varepsilon\sigma \left[(T_{\text{pared}})^4 - (T_r)^4 \right]$, donde ε es la emisividad de la superficie, σ la constante de Stefan-Boltzmann y T_r la temperatura de referencia del medio exterior para la radiación.

El balance energético a través de la superficie A es de la forma

$$q_n(x_{\text{frontera}}) = q_{\text{fuente}} + q_{\text{conv}} + q_{\text{rad}}$$

que, usando las expresiones anteriores, puede escribirse en función de una única variable, la temperatura en la pared, mediante la ecuación no lineal:

$$\left. \frac{-k\partial T(r)}{\partial n} \right|_{T_{\text{pared}}} = -q_{\text{fuente}} + h(T_{\text{pared}} - T_{\infty}) + \varepsilon\sigma \left[(T_{\text{pared}})^4 - (T_r)^4 \right] \quad (45)$$

Así, las condiciones de contorno se clasifican en las siguientes clases:

- **Condición de contorno de primera clase:** Se especifica la temperatura en la frontera como una función generalmente dependiente de la posición y el tiempo, $T(r_{\text{frontera}}, t)$. el caso $T(r_{\text{frontera}}, t) = 0$ se llama condición de contorno homogénea de primera clase.
- **Condición de contorno de segunda clase:** Se conoce el flujo externo en la superficie de la pared, que debe coincidir con el flujo calorífico de conducción, $\left. \frac{-k\partial T(r)}{\partial n} \right|_{T_{\text{pared}}}$. El caso especial $\left. \frac{k\partial T(r)}{\partial n} \right|_{T_{\text{pared}}} = 0$, condición homogénea de contorno de segunda clase, corresponde a una pared adiabática.
- **Condición de contorno de tercera clase:** Se trata de una condición convectiva; el flujo de conducción en la superficie de la pared coincide con el de convección del fluido exterior, $\left. \frac{-k\partial T(r)}{\partial n} \right|_{T_{\text{pared}}} = h(T_{\text{pared}} - T_{\infty})$. El caso $T_{\infty} = 0$ se llama condición homogénea de contorno de tercera clase. Las condiciones de primera y segunda clase pueden derivarse de esta última haciendo $k = 0$ o $h = 0$, respectivamente.



- **Condición de radiación:** Algunos autores se refieren a ésta como condición de cuarta clase cuando la emisividad, ε , y la temperatura de referencia, T_r , son constantes. La condición de radiación $\frac{-k\partial T(x)}{\partial n}\Big|_{T_{\text{pared}}} = \varepsilon\sigma \left[(T_{\text{pared}})^4 - (T_r)^4 \right]$ puede aproximarse a la ecuación lineal $\frac{-k\partial T}{\partial n}\Big|_{T_{\text{pared}}} = h_r(T_{\text{pared}} - T_r)$, con $h_r = 4\varepsilon\sigma T_r^3$, cuando entre las temperaturas T_{pared} y T_r se cumple $\left| \frac{(T_{\text{pared}} - T_r)}{T_r} \right| \ll 1$.
- **Condición de contacto entre medios:** Se da cuando dos medios de igual o diferente conductividad se someten a un contacto térmico imperfecto. El balance energético en la frontera requiere que se cumpla una ecuación lineal del tipo $\frac{-k_1\partial T}{\partial n}\Big|_{\text{pared},1} = h_{1,2}(T_{\text{pared},1} - T_{\text{pared},2}) = \frac{-k_2\partial T}{\partial n}\Big|_{\text{pared},2}$, donde $h_{1,2}$ es la llamada conductancia térmica de contacto entre medios, que depende de la rugosidad de las superficies, tipo de material, presión de contacto, material de separación de los medios, etc. Cuando existe un contacto perfecto, es decir, conductancia infinita, la ecuación anterior se convierte en $\frac{-k_1\partial T}{\partial n}\Big|_{\text{pared}} = \frac{-k_2\partial T}{\partial n}\Big|_{\text{pared}}$.

2.2 El método de simulación por redes.

2.2.1 Idea del método. Tipos de monpuertas.

El Método de simulación por redes (González-Fernández y col. [2002]) es una técnica para el estudio de diferentes procesos físicos que puedan definirse mediante un conjunto de ecuaciones o modelo matemático. Como ya se ha explicado, hay una analogía entre el proceso de conducción de calor y la teoría de circuitos. Por ello, partiendo de las ecuaciones que modelan el sistema, se elabora un “modelo en red” o circuito eléctrico equivalente al proceso y, en segundo lugar, se simula dicho proceso, obteniendo la solución del modelo mediante un programa adecuado de resolución de circuitos eléctricos.

Para que el modelo en red sea equivalente al proceso, las ecuaciones del modelo matemático discretizadas y las ecuaciones del modelo en red para un elemento del volumen, correspondientes a variables análogas, coinciden.

Para elaborar el modelo se siguen los siguientes pasos:

- Se reticula el espacio en elementos de volumen o celdas elementales.
- Se aplican a estas reticulaciones las ecuaciones diferenciales, obteniéndose un conjunto de ecuaciones en diferencias finitas que se constituyen en el punto de partida para la obtención del modelo en red correspondiente a cada celda elemental.
- Se asocian las variables dependientes del problema a variables eléctricas.



Capítulo 2. Fundamentos Teóricos.

- La asociación de celdas, de acuerdo con la geometría del problema, configura el modelo en red correspondiente a todo el medio finito, que es tanto más preciso cuanto mayor sea el número de estas celdas.
- Las condiciones de contorno e iniciales se incorporan al modelo de manera simple mediante dispositivos eléctricos adecuados.

Con este método se puede reducir un complejo sistema de ecuaciones diferenciales por un circuito eléctrico equivalente de manera que ya no hay que manipular las complicadas ecuaciones. Además, el programa PSpice se encarga de resolver el circuito equivalente y permite visualizar y relacionar las diferentes variables y procesos físicos de una manera fácil y sencilla. Por otro lado, en tanto que la continuidad de la corriente eléctrica (1ª ley de Kirchhoff) y la propiedad asociada al potencial eléctrico, derivado de un campo conservativo, (2ª ley de Kirchhoff) son leyes exigidas a los circuitos, no es necesario hacer las aproximaciones o tanteos que muchos métodos numéricos exigen para cumplir estos requerimientos; PSpice advierte cuando alguna de estas reglas no ha sido respetada en el diseño del modelo en red.


El MESIR, que utiliza la teoría de redes para modelar el proceso físico objeto de estudio, es un método de simulación en tanto que incluye la resolución numérica del modelo en red obtenido mediante la reticulación. Así, las variables flujo y fuerza características del mismo deben satisfacer las leyes de Kirchhoff y sus relaciones determinarán los elementos de circuito correspondientes. Ahora bien, en cada proceso concreto y una vez elegidas las variables conjugadas, la información de qué elementos de circuito intervienen en el modelo en red y cómo se conectan entre sí, se obtiene del modelo matemático y no de consideraciones de tipo físico acerca del papel que juegan estas variables.

Para poder realizar un modelo en red debe darse:

- La existencia de una red independiente del tiempo,
- La existencia de una magnitud $j_{N-N'}$ llamada flujo, asociada a cada rama que conecta los nudos $N-N'$ y que va de N a N' . $j_{N-N'}$ obedece las leyes de Kirchhoff para corrientes (LCK),
- La existencia de una magnitud, ϕ , asociada a cada nudo, tal que la diferencia $X_{N-N'} = \phi_N - \phi_{N'}$, llamada fuerza, obedece a la ley de los voltajes de Kirchhoff (LVK).

En el caso de procesos de transporte es normal establecer una correspondencia entre variables flujo por un lado (densidad de corriente eléctrica con flujo de calor, flujo de masa, etc.) y variables tipo potencial por otro (potencial eléctrico con temperatura, concentración, etc.), pero también es posible establecer otras analogías aún en procesos físicos que describan el transporte de una determinada magnitud.

Si se considera un proceso de transporte caracterizado por las variables flujo y fuerza que obedecen las leyes de Kirchhoff (variables LCK y LVK respectivamente), tales leyes dan cuenta de la topología de la red relativa al proceso. A esa red se le asocia un conjunto de flujos que obedecen a una ley de balance local y un conjunto de fuerzas que satisfacen la condición de unicidad. Las propiedades topológicas dependen únicamente de la asignación de conexiones entre los diferentes puntos o de las posibles combinaciones de trayectorias

| | |
|---|--|
|  | SIMULACIÓN ESTACIONARIA Y TRANSITORIA DE LA TEMPERATURA EN DEPÓSITOS FORMADOS POR MATERIALES DE DISTINTA CONDUCTIVIDAD |
| | Capítulo 2. Fundamentos Teóricos. |

que unen un nudo dado con otros nudos. Son independientes de las medidas y, desde un punto de vista topológico, dos grafos son iguales o isomorfos si las asignaciones de vértices y ramas son las mismas.

Las leyes de Kirchhoff establecen relaciones entre flujos y fuerzas por separado, pero no expresan ningún tipo de relación entre flujos y fuerzas entre sí. Las relaciones entre el par conjugado o flujo-fuerza se conocen como ecuaciones constitutivas o fenomenológicas y definen los elementos de circuito que expresan características específicas de cada proceso. Se dice que dos grafos son geoméricamente iguales si los potenciales y flujos de cada par de puntos y su rama correspondiente, son iguales para cualquier conjunto de valores que puedan ser elegidos para los flujos o las fuerzas. Las propiedades geométricas de la red, es decir, sus características métricas, se siguen de las relaciones constitutivas.

Si las relaciones constitutivas se establecen entre las variables de un par flujo-fuerza, se habla de monopuerta. Las monopuertas pueden ser pasivas, que disipan o almacenan energía (resistencias, bobinas y condensadores), y activas o fuentes (fuentes de tensión y/o corriente), que generan potencia de acuerdo con una ley preestablecida.

Monopuertas pasivas


Una **monopuerta resistiva** es un elemento de circuito asociado a una relación entre las derivadas temporales de las variables flujo y fuerza, de una misma rama, mediante una función independiente del tiempo que llamaremos resistencia, R , que puede depender o no del flujo o de la fuerza según las ecuaciones (46) y (47):

$$\frac{dX(t)}{dt} = R \frac{dJ(t)}{dt} \quad (46)$$

$$R = \frac{dX(t)}{dJ(t)} \quad (47)$$

Una monopuerta resistiva es lineal cuando la relación entre las variables $X(t)$ y $J(t)$ lo es, es decir $X(t) = R J(t)$; donde R es una constante. Su acción es instantánea, no importa cuál sea su estado anterior, carecen de memoria. En su analogía física representan efectos disipativos, fricciones, efectos viscosos, energías de reacción, etc., y desde el punto de vista termodinámico son elementos generadores de entropía. Las monopuertas resistivas no lineales se definen a través de las funciones que las caracterizan y constituyen, en definitiva, fuentes controladas de corriente o tensión, respectivamente. La traducción al modelo en red es una resistencia eléctrica de valor R ohmios para el caso lineal o una fuente controlada de corriente o tensión para el caso no lineal.

Una **monopuerta capacitiva** es un elemento de circuito asociado a una relación entre la variable flujo y la derivada temporal de la variable fuerza, de una misma rama, mediante una función no dependiente del tiempo que designaremos como capacidad C , tal y como se muestra en la ecuación (48).

| | |
|---|--|
|  | SIMULACIÓN ESTACIONARIA Y TRANSITORIA DE LA TEMPERATURA EN DEPÓSITOS FORMADOS POR MATERIALES DE DISTINTA CONDUCTIVIDAD |
| | Capítulo 2. Fundamentos Teóricos. |

$$J(t) = C \frac{dX(t)}{dt} \quad (48)$$

En estas monopuertas se produce algún tipo de almacenamiento energético, sin pérdidas (no hay disipación energética), y su estado, que no cambia instantáneamente, tiene en cuenta todas las operaciones llevadas a cabo en el pasado (tiene memoria). En su analogía, representa procesos físicos en los que se produce algún tipo de almacenamiento como condensadores, tanques, etc.

La relación constitutiva anterior puede expresarse en términos de la capacidad, como se muestra en la ecuación (49),

$$C = \frac{dq}{dX} = \frac{dF_c(X)}{dX} \quad (49)$$

Que es constante cuando la dependencia $q = F_c(X)$ es lineal, $C = q/X$. La traducción al modelo en red es un condensador eléctrico de valor C faradios.


Los procesos de almacenamiento y disipación de energía, bajo la hipótesis de continuidad del medio, se originan en todos los puntos del sistema. Los elementos R y C se identifican sin embargo con regiones pequeñas pero finitas del medio y sus conexiones con las otras puertas se realizan con enlaces ideales de energía, es decir, con conductores de resistencia nula. El que cada elemento pueda ser caracterizado por un par de variables conjugadas con una única ecuación constitutiva entre ellas físicamente equivale a decir que es posible elegir un elemento de volumen lo suficientemente pequeño como para que su tiempo de relajación interna sea mucho menor que el del sistema global, pero suficientemente grande como para que las fluctuaciones de las variables que describe el sistema en él sean despreciables.

2.3 El software PSpice-OrCAD.

2.3.1 Introducción y aplicaciones.

Una vez obtenido el modelo en red se procede a su análisis mediante su simulación. Para ello se usa el software PSpice u OrCAD [1994], la versión actualizada del primero.

Con la simulación se pueden obtener los datos correspondientes a medidas de laboratorio con muy poco error y se pueden alterar las condiciones iniciales, de contorno y las características térmicas del medio con sencillos cambios en el programa, permitiendo más versatilidad que si se realizasen medidas reales.

| | |
|---|--|
|  | SIMULACIÓN ESTACIONARIA Y TRANSITORIA DE LA TEMPERATURA EN DEPÓSITOS FORMADOS POR MATERIALES DE DISTINTA CONDUCTIVIDAD |
| | Capítulo 2. Fundamentos Teóricos. |

La simulación está estructurada en cinco subprogramas principales, que interaccionan entre ellos a través de una estructura de datos que es almacenada en un área común del programa. Estos subprogramas son: entrada, organización, análisis, salida y utilidades.

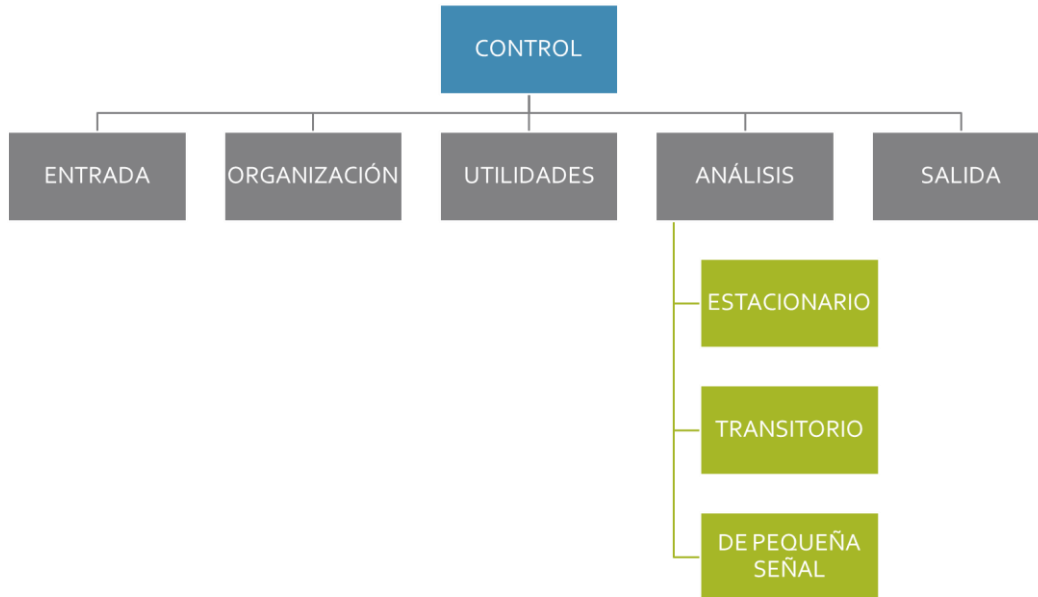


Figura 2-7 Diagrama de bloques del programa de simulación de circuitos PSpice

El subprograma de entrada lee el archivo de entrada, construye una estructura de datos y chequea el circuito. El de organización, una vez que el programa se ha ejecutado con éxito, construye las estructuras adicionales de datos que serán requeridas en el programa de análisis, parte esencial de la simulación. El subprograma de salida genera y organiza, en la memoria central o en discos, los resultados solicitados por el usuario en forma tabular o gráfica. Las utilidades son aspectos secundarios no relacionados directamente con la simulación; éstas permiten, por ejemplo, almacenar componentes o partes de modelos para ser compartidos por otros usuarios.

El subprograma análisis es la parte importante del programa de simulación. Ejecuta los análisis del circuito requeridos, de acuerdo con las indicaciones del archivo de entrada; la información resultante se almacena en la memoria central o en discos para su posterior procesamiento en los archivos de salida. Mientras que la facilidad de uso del programa reside en los subprogramas de entrada y salida, el programa de análisis, que contiene algoritmos más complejos y consume la fracción mayor del tiempo de computación, determina la eficiencia de la simulación.

En el proceso de simulación, se obtiene la solución numérica de la representación matemática del modelo en red. El conjunto de tareas que componen el proceso de simulación puede ser agrupado en los siguientes algoritmos de computación:



Capítulo 2. Fundamentos Teóricos.

- i. Formulación de las ecuaciones.
- ii. Solución de las ecuaciones lineales.
- iii. Solución de las ecuaciones no lineales.
- iv. Integración numérica.

PSpice es miembro de la familia de programas de simulación de circuitos SPICE2; mucho más potente y rápido que sus predecesores, fue desarrollado en la Universidad de California en los años setenta y utiliza algoritmos numéricos más refinados con formatos de entrada-salida idénticos.

La formulación de las ecuaciones del circuito se realiza mediante el método conocido como Análisis Nodal Modificado. La solución transitoria se determina computacionalmente extrayendo del intervalo temporal un conjunto discreto de instantes $(0, t_1, t_2, \dots, T)$. En cada uno de ellos, empezando por 0, el tiempo se incrementa una pequeña porción o paso, dt , y, mediante métodos de integración (algoritmo implícito de Backward-Euler) y procesos de iteración hasta conseguir la convergencia, se resuelven las ecuaciones algebraicas equivalentes de las monpuertas que contienen derivadas temporales; cada iteración requiere de la linealización de las ecuaciones del modelo y de su solución; el método de linealización es el de Newton- Raphson que utiliza una serie de Taylor truncada después del término de primer orden. Para la solución del sistema matricial de ecuaciones lineales se utiliza el método de factorización LU que elimina directamente las incógnitas (este método descompone la matriz de coeficientes en producto de matrices triangulares, “lower and upper, LU”, cuyas inversas no precisan ser calculadas, lo que redundaría en un menor esfuerzo computacional). Para minimizar el esfuerzo de cálculo, las ecuaciones se reordenan usando el método de Markowitz.

Los métodos de integración implantados en PSpice incorporan un proceso de variación dinámica del paso del tiempo de integración para mantener una razonable exactitud en la solución y un tiempo mínimo de computación. PSpice utiliza unos métodos de integración polinomiales basados en el análisis de error de truncamiento local y en la estabilidad (propiedades contrapuestas). Debido a que ciertos circuitos (que contienen constantes de tiempo de valores muy diferentes) pueden dar lugar a un sistema de ecuaciones “stiff”, es conveniente que el algoritmo de integración sea “stiffestable”. Para conseguir este objetivo se utilizan métodos de integración trapezoidal y Gear de orden variable de dos a seis. Tras conseguir la convergencia, la solución se almacena y se reinicia el proceso para el instante siguiente. El paso dt es, en consecuencia, variable de unos tramos del intervalo a otros; el programa los ajusta en función de la precisión exigida a los resultados de manera que el tiempo de computación sea el mínimo. Los datos de simulación correspondientes a tiempos fuera del conjunto discreto de instantes $0, t_1, t_2, \dots, T$ se obtienen por interpolación.

La siguiente figura representa un diagrama de flujo que ilustra los cuatro algoritmos de computación que tienen lugar en la simulación de un proceso transitorio (para simplificar se ha supuesto un dt constante).

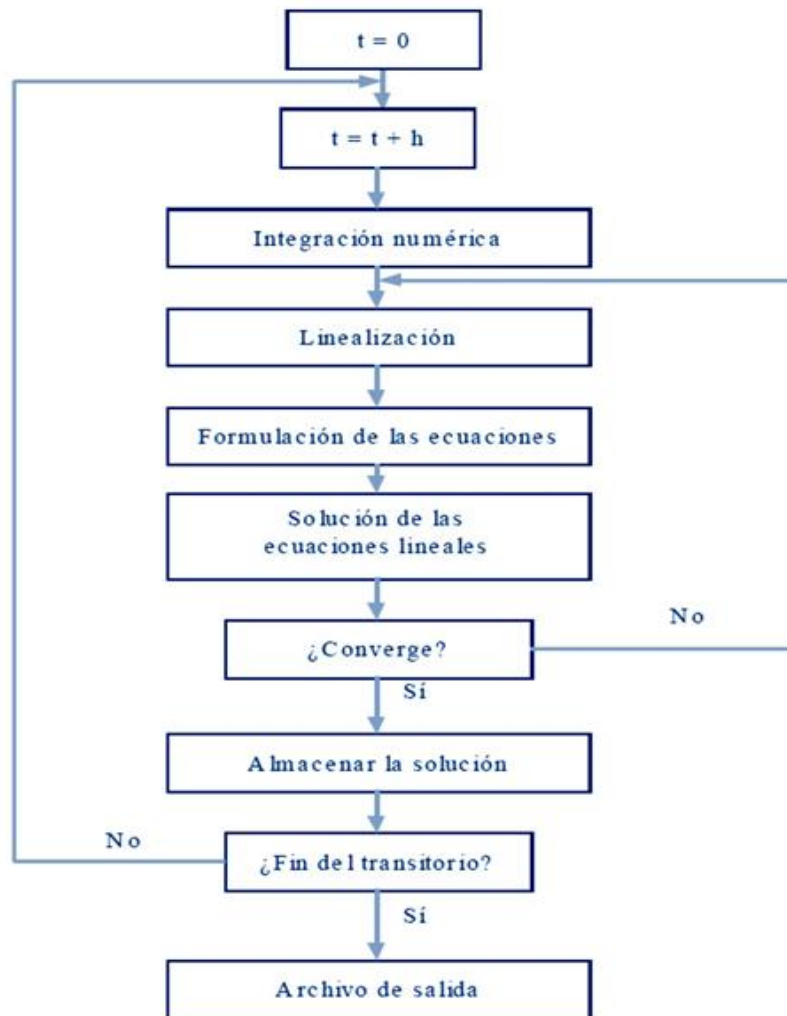


Figura 2-8 Operaciones en el análisis de circuitos

2.3.2 Simulación. Presentación de resultados.

El software PSpice se programa en su forma clásica por sentencias, elaborando archivos de texto, en un lenguaje relativamente simple o por medio de la opción gráfica ‘schematics’ seleccionando directamente los elementos de circuito y conectándolos eléctricamente entre sí en forma de esquema eléctrico. Se realiza un chequeo y se advierte al programador de posibles errores mediante mensajes previos a la ejecución.

El programa PSpice ofrece muchas posibilidades para el estudio de los sistemas térmicos:



- Permite conocer directamente el estacionario del sistema térmico (BIAS POINT), mediante el análisis en continua del circuito. La opción TRANS proporciona el transitorio del proceso.
- Con el análisis en alterna se obtiene de forma inmediata el análisis de respuesta en frecuencia del sistema térmico.
- La aplicación Probe muestra de forma gráfica los resultados de la simulación con la máxima precisión que da el programa. Esta aplicación permite también la representación de funciones resultado de operaciones entre variables de la simulación.
- El software admite la parametrización del modelo en red (sentencia PARAM), lo que constituye un modo ventajoso de utilizar la técnica de cambiar de valores los componentes del circuito para obtener soluciones de problemas similares.
- Las sentencias PARAM y STEP combinadas obtienen la variación secuencial de la respuesta del sistema ante la variación de un parámetro, lo que es una herramienta muy útil para problemas sencillos de optimización (una o dos variables).
- La aplicación Stimulus permite la confección de fuentes de tensión o corriente de prácticamente cualquier forma, que pueden representar cualquier estímulo térmico del sistema.
- Admite la ejecución sucesiva de programas, técnica que permite arrancar indefinidamente PSpice por otro programa y resolver el circuito para una amplia gama de valores de los componentes. En este caso el programa actúa como un ‘solver’, cuya misión es resolver las ecuaciones diferenciales del sistema, mientras que al otro programa se le confía la resolución de un problema más amplio.

En relación con la presentación de resultados, PSpice permite acceder a los resultados de la simulación (temperaturas y flujos de calor en todo el medio) de dos formas: directamente usando su propio entorno gráfico, muy intuitivo y potente, o accediendo a los archivos de salida de datos los cuales muestran los resultados en forma tabulada; en general estos resultados vienen dados usando como variable independiente en tiempo por lo que son muy útiles en problemas transitorios pero no tanto en problemas estacionarios.

2.4 El programa C#

C# (pronunciado en inglés “C sharp” y en español “C almohadilla”) es el nuevo lenguaje sencillo e intuitivo diseñado por Microsoft específicamente para su plataforma .NET. Se trata de un lenguaje orientado a objetos sencillo, moderno, intuitivo y fácilmente legible que ha sido diseñado por Microsoft recogiendo las mejores características de muchos otros lenguajes como Visual Basic, Java y C++, y combinándolas. De esta manera, se unen la alta productividad y facilidad de aprendizaje de Visual Basic con la potencia de C++.

C# incorpora muchos elementos de los que carecen otros lenguajes, tales como sistema de tipos homogéneo, propiedades, indexadores, tablas multidimensionales, operadores redefinibles, etc., y tiene una velocidad de ejecución muy competitiva. Las principales características de este lenguaje son:



Capítulo 2. Fundamentos Teóricos.

- Dispone de todas las características propias de cualquier lenguaje orientado a objetos: encapsulación, herencia y polimorfismo,
- Permite definir estructuras, que son clases un tanto especiales: sus objetos se almacenan en pila de acceso rápido,
- Es un lenguaje fuertemente tipado, lo que significa que se controla que todas las conversiones entre tipos se realicen de forma compatible, lo que asegura que nunca se acceda fuera del espacio de memoria ocupado por un objeto. Así se evitan frecuentes errores de programación y se consigue que los programas no puedan poner en peligro la integridad de otras aplicaciones,
- Tiene a su disposición un recolector de basura que libera al programador de la tarea de tener que eliminar las referencias a objetos que dejen de ser útiles, encargándose de ello éste y evitándose así que se agote la memoria porque al programador olvide liberar objetos inútiles o que se produzcan errores porque el programador libere áreas de memoria ya liberadas y reasignadas,
- Incluye soporte nativo para eventos y delegados. Los delegados son similares a los punteros de funciones de otros lenguajes como C++, aunque más cercanos a la orientación a objetos, y los eventos son mecanismos mediante los cuales los objetos pueden notificar de la ocurrencia de sucesos. Los eventos suelen usarse en combinación con los delegados para el diseño de interfaces gráficas de usuario, con lo que se proporciona al programador un mecanismo cómodo para escribir códigos de respuesta a los diferentes eventos que puedan surgir a lo largo de la ejecución de la aplicación (pulsación de un botón, modificación de un texto, etc.),
- Incorpora propiedades, que son un mecanismo que permite el acceso controlado a miembros de una clase tal y como si de campos públicos se tratasen, - Permite la definición del significado de los operadores básicos del lenguaje (+, -, *, &, =, etc.) para nuestros propios tipos de datos, lo que facilita enormemente tanto la legibilidad de las aplicaciones como el esfuerzo necesario para escribirlas. Es más, se puede incluso definir el significado del operador [] en cualquier clase, lo que permite acceder a sus objetos tal y como si fuesen tablas. A la definición de este último operador se le denomina indizador, y es especialmente útil a la hora de escribir o trabajar con colecciones de objetos.
- Admite unos elementos llamados atributos que no son miembros de las clases sino información sobre éstas que podemos incluir en su declaración. Por ejemplo, indican si un miembro de una clase ha de aparecer en la ventana de propiedades de Visual Studio.NET, cuáles son los valores admitidos para cada miembro en ésta, etc.

Visual Studio.Net permite diseñar la interfaz de la aplicación de manera visual, sin más que arrastrar con el ratón los elementos que necesitemos (botones, lista de selección, etc.) sobre las posiciones adecuadas en la ventana de nuestra aplicación. También incluye otras facilidades para el desarrollo, como una ventana de propiedades desde la que se puede modificar los valores de las propiedades de cada objeto sin tener que escribir código, un depurador de código gráfico, un editor de códigos inteligente que puede detectar nuestros errores de sintaxis instantáneamente, etc.



2.5 El Método de Simulación por Redes frente a la Analogía Termoeléctrica Clásica.

La analogía termoeléctrica clásica suele tratar problemas lineales y con condiciones de contorno simples, primera y segunda clase. Ningún texto ni artículo, con excepción de los publicados por miembros del grupo de investigación “Simulación por redes” de la UPCT, menciona la analogía termo-eléctrica como método de cálculo numérico. Un ejemplo importante es el uso de la analogía eléctrica empleado por Chapman [1984]. Dedicó un importante apartado a este tema, pero siempre dentro de los procesos de transmisión de calor lineales, cuya solución sólo requiere resistencias térmicas, condensadores para el almacenamiento y fuentes constantes para las condiciones de contorno.

El “método de simulación por redes” es algo sustancialmente diferente a la analogía termo- eléctrica clásica esencialmente por su capacidad de abordar cualquier tipo de problemas lineales o no, acoplados o no, y con condiciones de contorno arbitrarias.



Capítulo 3. El Programa PROCCA-09.

3.1 Estructura del programa PROCCA-09.

El programa PROCCA-09 es un programa comercial educativo aplicado a ciencias e ingeniería que tiene un objetivo científico y didáctico. Frente a otros programas que simplemente están orientados al cálculo y funcionan como “cajas negras” ya que su contenido es inaccesible al usuario, PROCCA-09 no solamente realiza el cálculo numérico necesario para la simulación de los problemas de conducción térmica para los que ha sido desarrollado sino que permite aprender, simultáneamente, los contenidos básicos de esta ciencia en lo referente tanto a problemas de conducción de calor en medios multicapa de diferentes geometrías (módulo CONCBA) como a problemas de análisis y diseño de aletas (módulo CONCAL).

El programa PROCCA-09 se presenta al usuario mediante un entorno de comunicación ameno, tipo ventanas, que dirige paso a paso las acciones y opciones posibles del usuario. Los archivos de modelos en red se ejecutan en PSpice [1994] y los resultados de simulación se ofrecen directamente en el entorno, gráfico o tabulado, de salida de PSpice o bien, mediante manipulaciones adecuadas en el entorno gráfico del propio programa y (en mayor detalle) en el entorno gráfico del software MATLAB [1997]. PROCCA-09 permite también presentar soluciones animadas de las isotermas en problemas transitorios.

La Figura III.1 presenta un esquema del funcionamiento básico del programa. Su puesta en marcha permite seleccionar el módulo de trabajo (CONCBA o CONCAL). En este trabajo, se va a utilizar sólo el módulo CONCBA o básico. Una vez elegido este módulo, se procede directamente a la entrada de datos: geometría de la reticulación, características térmicas, condiciones de contorno, etc. Ya completada la especificación se puede crear un archivo de texto básico del modelo que permite su manipulación directa y su modificación. La introducción de datos complementarios relativos al tipo de simulación, tales como la precisión en los cálculos, número de dígitos, tiempo de simulación, opciones de presentación y otros, se introduce paralelamente o al final de la creación del archivo del modelo. La ejecución o simulación y consiguiente solución del modelo da acceso al entorno de salida gráfico de PSpice el cual permite representar simultáneamente las variables de salida más comunes, a saber, los flujos de calor y las temperaturas (corrientes y tensiones) en los distintos elementos y nudos del medio elegidos por el usuario.

PROCCA-09 incorpora un gráfico directo en el que se muestra la disposición de las celdas o volúmenes de control mostrando la leyenda de los nudos centrales de cada celda, que sirve también para identificar todos los componentes de la celda (resistencias y condensadores). En este gráfico también se muestran las celdas en las que se incorporan las condiciones de contorno particulares.



Capítulo 3. El Programa PROCCA-09.

Por último, un archivo de ayuda accesible desde cualquier paso del programa da información al usuario de cómo resolver e interpretar las dificultades que surgen en la explotación del programa.

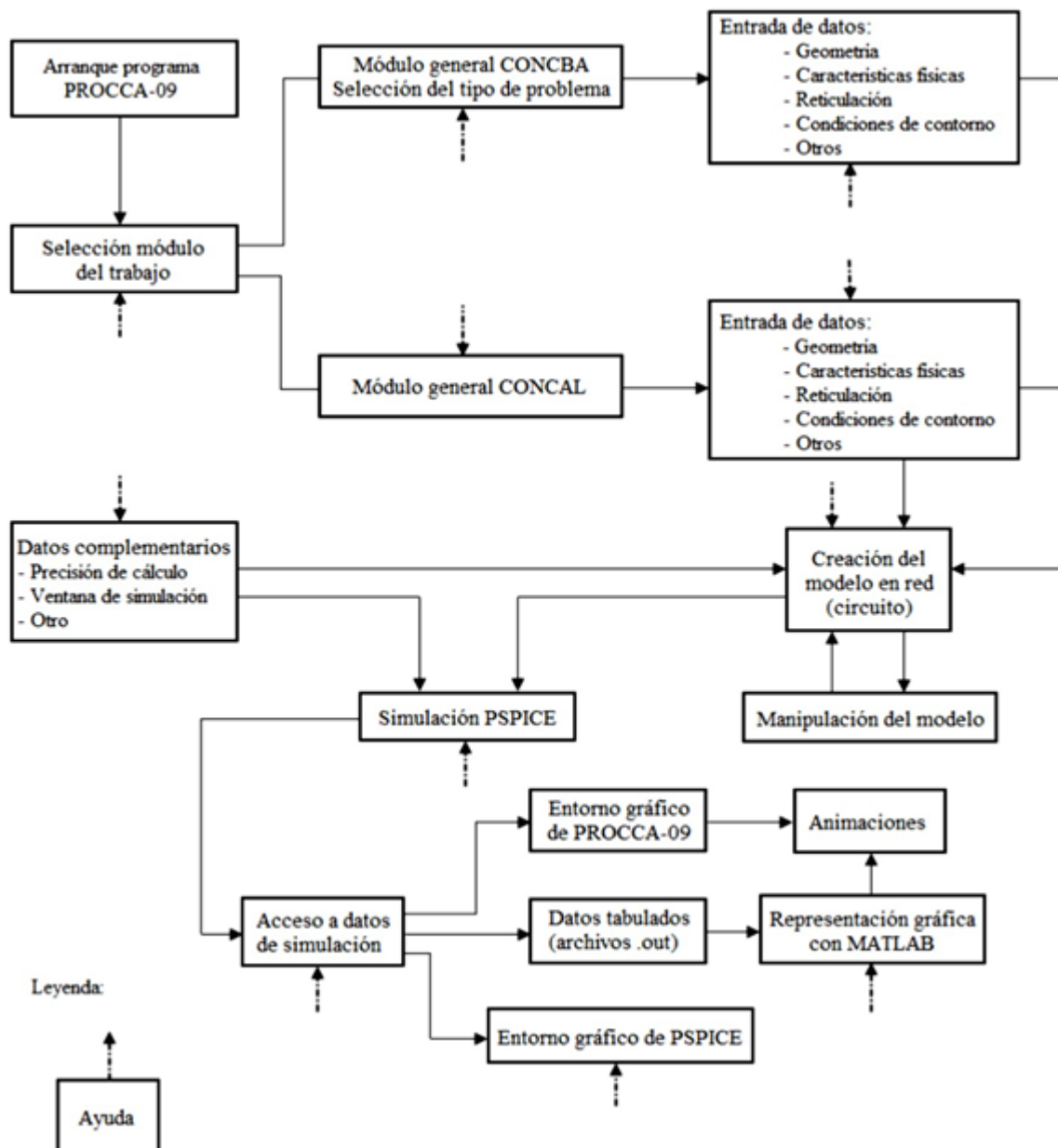



Figura 3-1 Diagrama de funcionamiento de PROCCA-09

| | |
|---|--|
|  | SIMULACIÓN ESTACIONARIA Y TRANSITORIA DE LA TEMPERATURA EN DEPÓSITOS FORMADOS POR MATERIALES DE DISTINTA CONDUCTIVIDAD |
| | Capítulo 3. El Programa PROCCA-09. |

3.2 Creación de archivos de modelos.

3.2.1 Presentación del programa.

La ejecución del PROCCA-09, cuyo icono aparece en la Figura 3-2, da entrada al programa por medio de la pantalla de la Figura III.3, “Diseñador de Modelos”, con la que se inicia el diseño del modelo buscado o se elige un modelo ya diseñado y archivado en el directorio. Los botones de acceso al usuario son tres: “Archivo”, “Vista” y “Ayuda”. Con el primero, Figura III.4, se opta bien por iniciar el diseño de un nuevo modelo a través de los módulos CONCBA y CONCAL (opciones “Nuevo modelo CONCBA, conducción de calor básica” y “Nuevo modelo CONCAL, conducción de calor en aletas”), bien por importar modelos ya existentes en otras carpetas (opción “Cargar”), para lo cual se hace clic directamente en el directorio de archivo de los mismos cuya ruta se acciona en la pantalla.



Figura 3-2 Icono del programa PROCCA-09

La ejecución del PROCCA-09, da entrada al programa por medio de la interfaz, “Diseñador de Modelos”, con la que se inicia el diseño del modelo buscado o se elige un modelo ya diseñado y archivado en el directorio. Los botones de acceso al usuario son tres: “Archivo”, “Vista” y “Ayuda”.



Figura 3-3 Pantalla de inicio del programa PROCCA-09

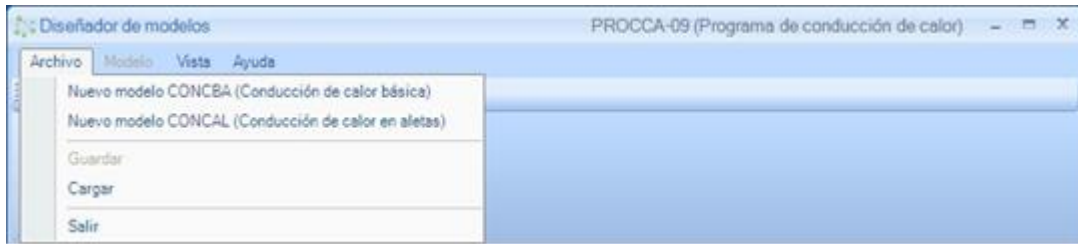


Figura 3-4 Opciones de inicio de la barra de herramientas de PROCCA-09

3.2.2 Descripción del módulo CONCBA.

En la pantalla correspondiente al módulo CONCBA se selecciona el “Tipo de modelo” con arreglo a la geometría del mismo, “Rectangular”, “Cilíndrica” y “Esférica”, Figura 3-5. En este proyecto se va a trabajar con geometría esférica y cilíndrica.

La selección de una de estas opciones (modelo esférico) da paso a la pantalla de la Figura 3-5. En esta pantalla se introduce el número de celdas horizontales y verticales adoptado para la simulación. En este proyecto, 50 celdas horizontales tanto para el modelo esférico como para el cilíndrico. Además, se introduce un radio interior de valor 1 metro.

La opción “Nuevo modelo CONCBA presenta la pantalla mostrada en la Figura 3-5:

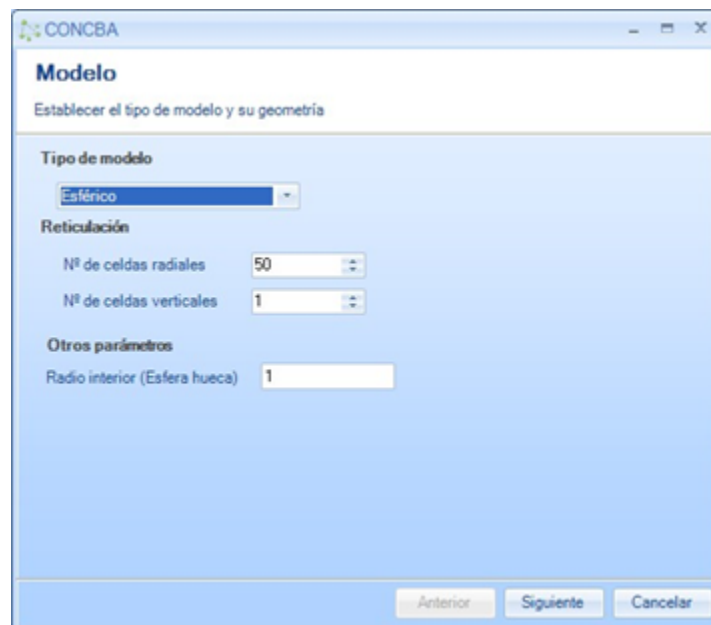


Figura 3-5 Opciones de selección del problema. Módulo CONCBA. Geometría esférica

Una vez seleccionado el tamaño de las celdas aparece la retícula deseada en el diseñador de modelos.

Y una vez introducidos los datos de esta pantalla se pulsa el botón “Siguiete” para dar paso a la pantalla de la Figura 3-7, que permite introducir los datos de información de cada capa. Simultáneamente en la pantalla principal “Diseñador de modelos” aparece una retícula con el número de celdas seleccionado, Figura 3-6.

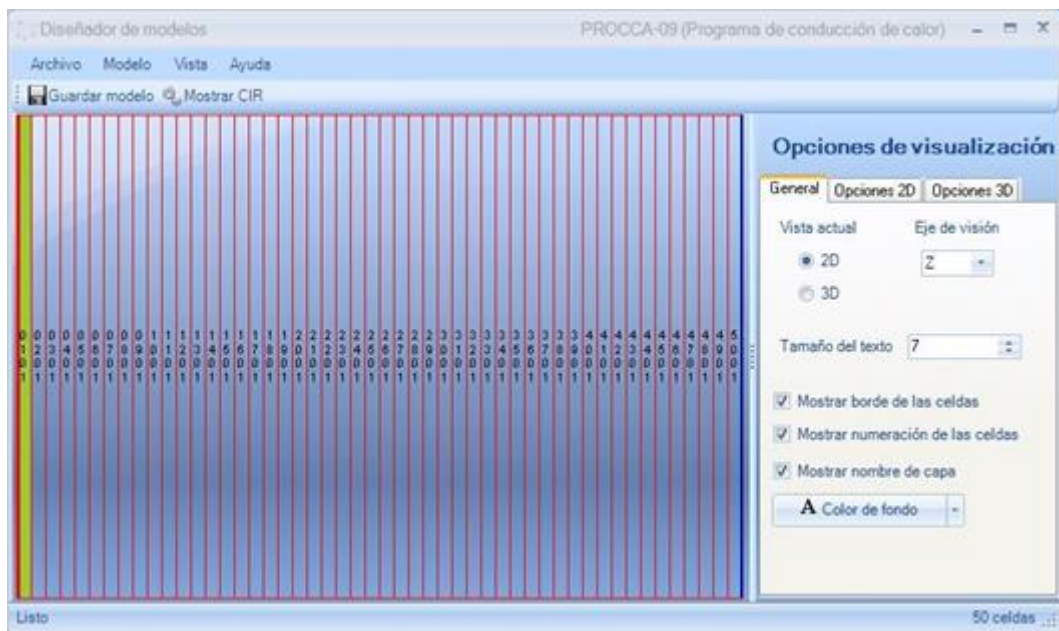


Figura 3-6 Retícula de celdas del medio



Figura 3-7 Pantalla de introducción de datos por capas en geometría esférica

La introducción de datos se realiza capa a capa definiendo: el nombre de la capa, las celdas que ocupa, el tamaño de la capa (anchura y altura de la misma), las propiedades térmicas del material (densidad, conductividad y calor específico de la capa) y la temperatura inicial. Todas las unidades se introducen en el SI. La información ancho y alto de la celda de la capa actual la calcula el programa a partir de los datos anteriores y la presenta en la pantalla para información al usuario. La elección de este método de introducción de datos tiene la ventaja de poder asociar a cada región o capa tanto un tamaño diferente para las celdas que la definen como una condición inicial, también diferente, lo que permite ampliar el campo de aplicación del programa al poder reticular más finamente aquellas regiones en las que los procesos locales transitorios son más cambiantes, además de otras ventajas de aspecto educativo (influencia del tamaño de la retícula en la solución, análisis de resultados detallados en regiones seleccionadas, etc.).

El programa puede contener los datos de una serie de materiales metálicos y no metálicos con propiedades conocidas (previamente introducidos por el usuario) por lo que es posible seleccionar el tipo directamente. En ese caso, el programa presenta las propiedades del material seleccionado ya almacenadas en su memoria. También es posible definir nuevos materiales con la opción “Definir nuevo material”; los materiales así definidos se almacenarán como nuevos materiales en la memoria del programa para sucesivas aplicaciones. Una vez introducidos los datos de una capa es preciso pulsar el botón “Añadir capa” para finalizar correctamente la introducción de los datos de la capa. En coordenadas

rectangulares, cada vez que se introduce una nueva capa la pantalla de la retícula se colorea con un color que define la capa introducida.

Finalizada la definición de capas, el botón “Siguiente” da acceso a las pantallas de “Condiciones de contorno”, Figura 3-8 y Figura 3-9. La introducción de las condiciones de contorno se hace definiendo la celda o conjunto de celdas a las que se aplica la misma condición, seleccionando tal condición e introduciendo los datos complementarios asociados a dicha condición y especificando la posición de la celda a la que se aplica (extremo inferior, superior, izquierdo o derecho). Las condiciones posibles son adiabática (no requiere datos complementarios), isoterma con temperatura fija (requiere el valor de la temperatura), flujo de calor constante (valor de dicho flujo), de convección (coeficiente de convección más temperatura de referencia), radiación (emisividad más temperatura de referencia), convección más radiación (requiere el coeficiente de convección y la temperatura de referencia para la convección, la emisividad y la temperatura de referencia para la radiación), temperatura dependiente del tiempo y flujo de calor dependiente del tiempo (que requieren información adicional sobre la dependencia temporal de la temperatura y del flujo de calor, respectivamente).

Para este proyecto se ha considerado una temperatura dependiente del tiempo en la región izquierda (Figura 3-8) y como condición en la región derecha una sucesión de varios casos, entre ellos convección +radiación (Figura 3-9).

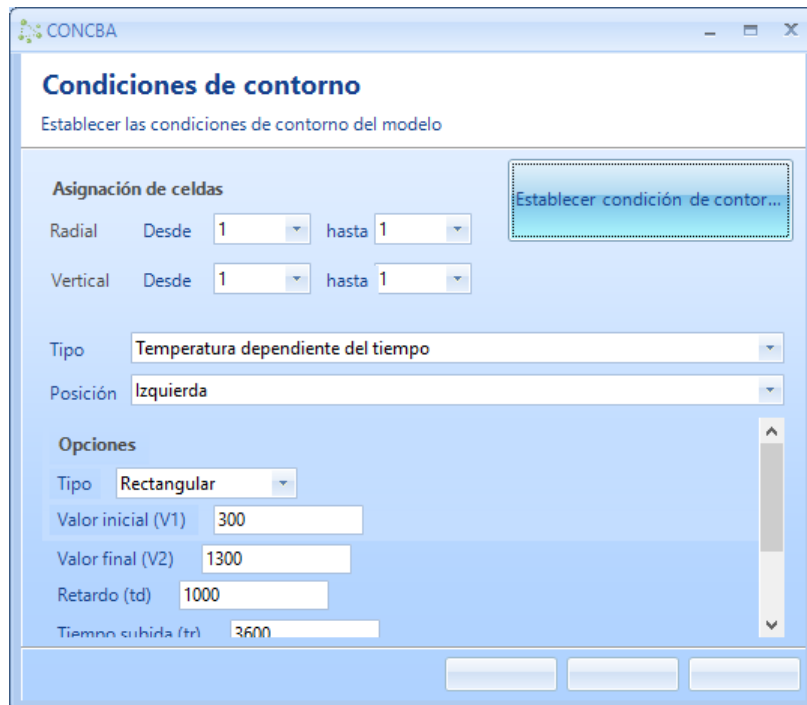
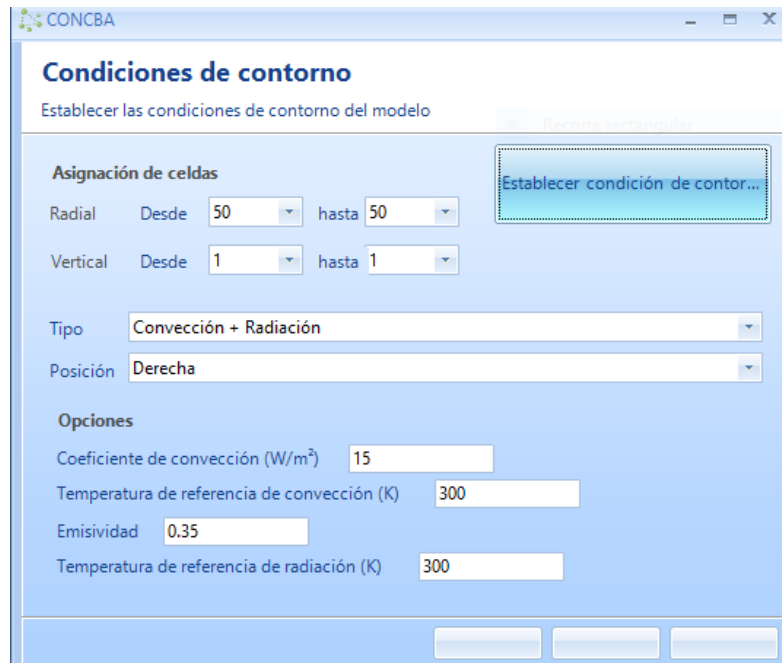


Figura 3-8 Pantalla de introducción de las condiciones de contorno: temperatura dependiente del tiempo



*Figura 3-9 Pantalla de introducción de las condiciones de contorno:
Convección + Radiación*

Al finalizar la introducción de las condiciones de contorno, la pantalla de reticulación de celdas colorea las condiciones separadamente e indica en qué posición se han impuesto (tales condiciones) para que el usuario pueda hacer comprobaciones inmediatas.

La siguiente pantalla, Figura 3-10 permite introducir la ventana de simulación junto con otros tiempos característicos asociados a la presentación de resultados tabulados y al paso de tiempo interno para los cálculos numéricos de PSpice. La simulación simultánea de un parámetro variable en un rango dado se especifica también en esta pantalla proporcionando el parámetro o variable elegida, su rango de variación y el incremento en su valor.

Con esto se completa la especificación del archivo de modelo y el programa presenta la pantalla de la Figura 3-11, que contiene las opciones de visualización gráfica de PROCCA-09. Estas opciones están básicamente preparadas para modelos 3-D (pendientes de integrar en el programa) y se refieren al modo de presentar la retícula. Contiene opciones para integrar o no en la retícula la numeración de celdas y el nombre de la capa. El modelo ahora puede guardarse en una carpeta de directorio, u opcionalmente presentar el texto del mismo para ser modificado, y posteriormente ejecutado, en una nueva pantalla, Figura 3-12.

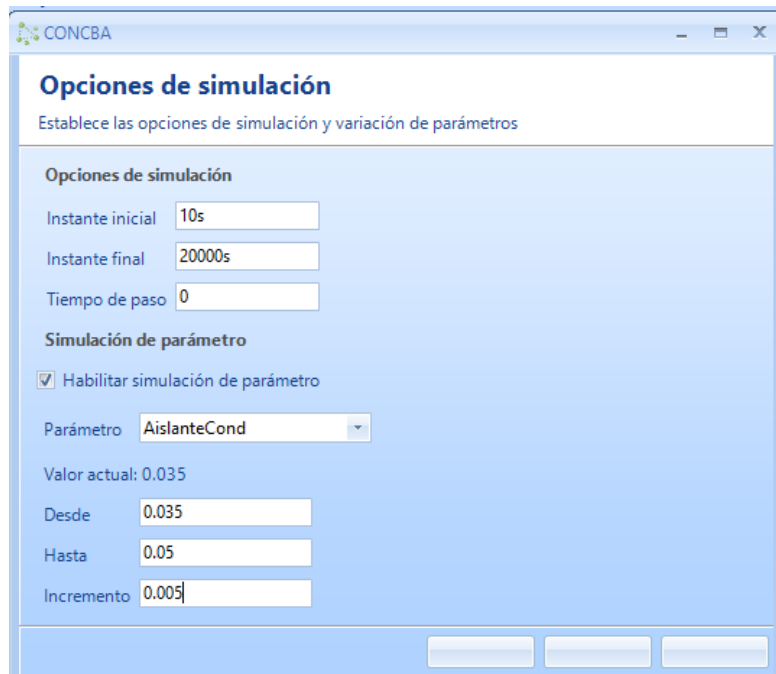


Figura 3-10 Pantalla de opciones de simulación

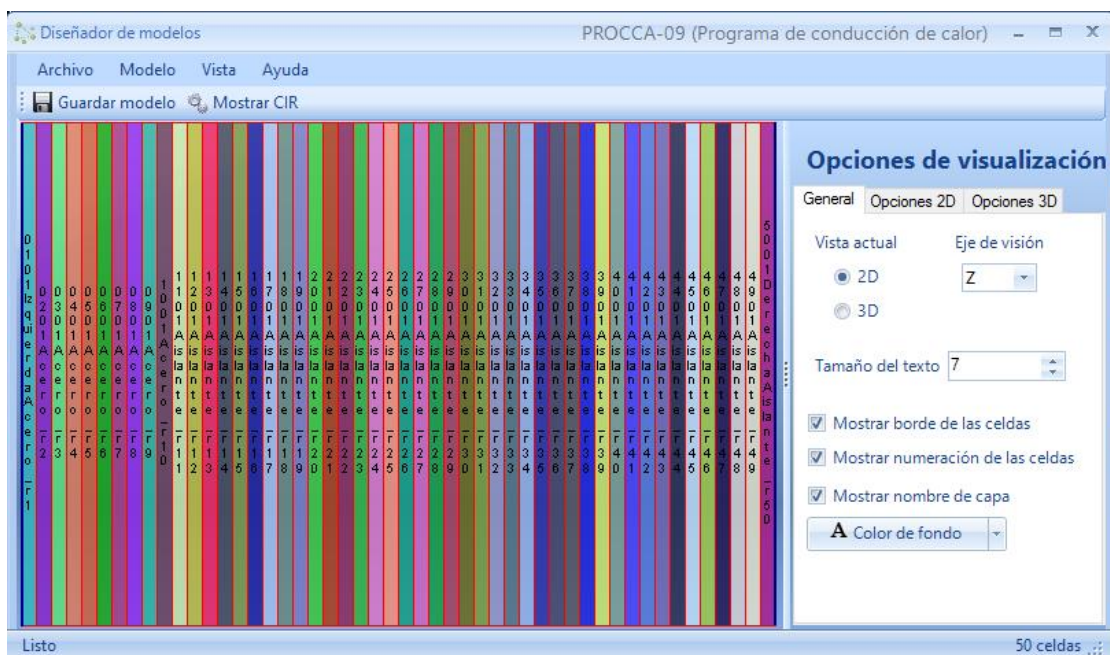


Figura 3-11 Pantalla de modelo finalizado

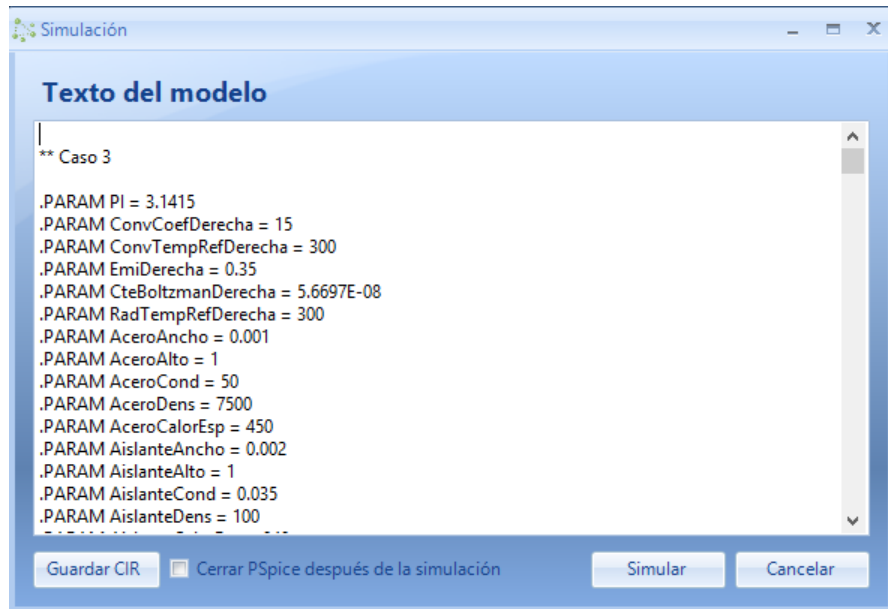


Figura 3-12 Pantalla de archivo “.cir” del modelo generado

3.3 Criterios para la numeración de celdas, nodos y elementos del modelo.

PROCCA-09 genera automáticamente la numeración de las celdas siguiendo un criterio lógico consistente en atribuir a cada una un conjunto de 4 dígitos, de los cuales los dos primeros indican la posición horizontal de la celda y los dos siguientes la posición vertical, Figura 4-30.

Esta misma numeración se asigna al subcircuito correspondiente a la celda. Se llama subcircuito al conjunto de componentes eléctricos del modelo que implementan las ecuaciones en diferencias finitas aplicadas a la celda o elemento de volumen. Así, basta definir en el modelo un subcircuito para cada capa o conjunto de celdas idénticas y luego conectar eléctricamente éste a las celdas contiguas y a las condiciones de contorno cuando se trata de celdas del contorno. Cada subcircuito tiene una denominación propia (asociada a la celda que implementa) para distinguirlo de los demás.

El origen para la numeración, (origen de coordenadas) se sitúa en la posición izquierda inferior de la geometría. El nudo correspondiente al centro de la celda se define igual que la propia celda, los nudos de los bordes izquierdo y derecho llevan una y al final de su denominación mientras que los nudos inferior y superior llevan una x. También, los nudos izquierdo e inferior de la celda tienen la misma numeración que el central mientras que el derecho y superior tienen una unidad más en la coordenada correspondiente (x e y,

respectivamente). De esta forma es inmediato establecer una correspondencia entre nudos y posiciones locales del medio en unidades de longitud. Un detalle de esta numeración se muestra en la misma.

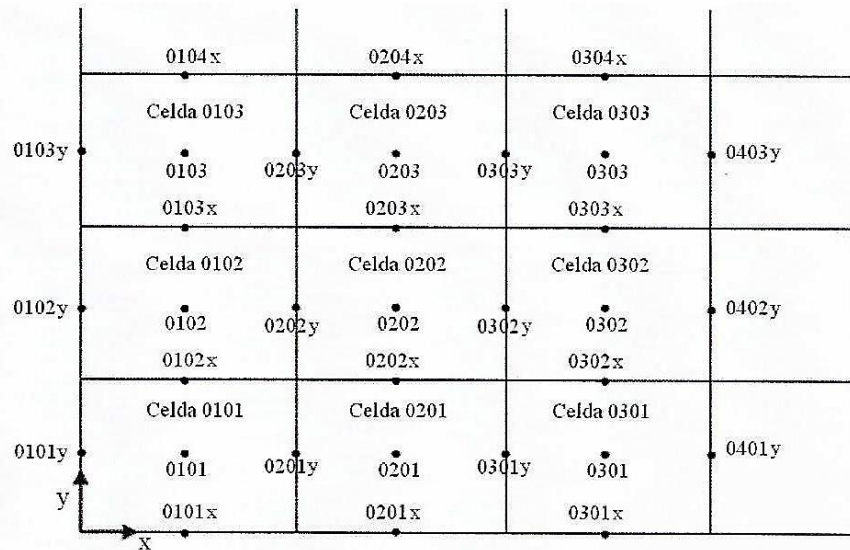



Figura 3-13 Numeración de celdas y nudos

Con la numeración de la figura anterior es fácil identificar la posición relativa de cada punto del mallado a partir del número de celdas que contiene y solicitar los datos de temperatura en los puntos requeridos una vez realizada la simulación. Esta definición de nudos es muy útil cuando se trata de buscar los errores o fallos de programación del archivo usando directamente los resultados de la simulación (temperaturas y flujos de calor en cualquier nodo) mostrados en el entorno de salida gráfico de PSpice.

En relación con la denominación de elementos del modelo, estos se definen con una letra inicial que los identifica (R para la resistencia; C para el condensador; V para un generador de tensión constante o pila; I para un generador de corriente constante; E, para un generador de tensión controlado por tensión, etc.) seguida de los números correspondientes a la celda a la que pertenecen. Debido al diseño simétrico de la celda, se añade “izq o “der” y “sup” o “inf” a las resistencias para identificar su posición relativa en la celda. Con esta identificación intuitiva de elementos el usuario puede encontrar fácilmente el correspondiente a la posición requerida para solicitar el flujo de calor a través.

Finalmente, en relación con los elementos de contorno se sigue igualmente una regla lógica para identificarlos. Cuando se trata de condiciones adiabáticas las resistencias que las implementan van conectadas entre el nudo correspondiente del contorno y masa, pero cuando se trata de condiciones isotermas, convectivas o radiativas los generadores que las implementan van conectados a un nudo común que a su vez se une con masa por medio de un generador (pila) de tensión nula que actúa como integrador de las corrientes de todo el contorno o de la parte del entorno sometida a igual condición. De esta forma disponemos de

| | |
|---|--|
|  | SIMULACIÓN ESTACIONARIA Y TRANSITORIA DE LA TEMPERATURA EN DEPÓSITOS FORMADOS POR MATERIALES DE DISTINTA CONDUCTIVIDAD |
| | Capítulo 3. El Programa PROCCA-09. |

este valor directamente leyendo la corriente de tal pila. Estos nudos de referencia comunes de los generadores tienen la denominación siguiente:

| | |
|------------------|--|
| NrefIzquierdaTdt | para la condición temperatura dependiente del tiempo |
| NrefDerechaConv | para la condición convectiva |
| NrefInferiorRad | para la condición radiativa |

En este proyecto, se van a emplear las tres condiciones. En relación con la denominación de los generadores se ha seguido la regla:

| | |
|--------------|---|
| VnulaIzqTdt | generador común a la pared temp depend tiempo izquierda |
| VnulaDerConv | generador común a la pared convectiva derecha |
| VnulaAbjRad | generador común a la pared inferior radiativa |

3.4 Estructura de los archivos de texto de modelos.

La estructura de estos archivos está dividida en los bloques siguientes, por este orden:

- Nombre del archivo (con la opción de incluir, a continuación del nombre, una descripción general del problema),
- Parámetros físicos, geométricos y de reticulación,
- Descripción de los subcircuitos de las celdas correspondientes a cada capa donde se especifican los componentes de los mismos y la denominación de sus nudos internos,
- Listado de interconexión de subcircuitos, especificando el nombre del subcircuito y la numeración de nudos externos,
- Listado de elementos que implementan las condiciones de contorno, indicando el tipo de elemento, su valor y los nudos de conexión,
- Listado de variables a imprimir, y
- Sentencias de opciones de simulación

El archivo, pues, está encabezado por el nombre que lo identifica y, opcionalmente, una descripción no limitada del problema a que se refiere (descripción introducida, como se ha mencionado, por el usuario en el diseño del modelo).

La sección siguiente del programa está formada por un listado de las variables que usa. Éstas se refieren a los parámetros físicos (conductividades, calores específicos, densidades de cada capa), parámetros geométricos del problema (longitudes del medio), parámetros asociados a las condiciones de contorno (coeficientes de convección, emisividades, temperaturas de referencia, etc.) y tamaño de las celdas de cada capa (ancho y alto). La denominación de estas variables, que toman el valor dado en la especificación del problema o lo deducen de los datos de entrada, es una abreviatura de su nombre completo con objeto de identificarlas fácilmente.

| |
|---------------------------------|
| .PARAM PI = 3.1415 |
| .PARAM ConvCoefDerecha = 15 |
| .PARAM ConvTempRefDerecha = 300 |



Capítulo 3. El Programa PROCCA-09.

```
.PARAM EmiDerecha = 0.35
.PARAM CteBoltzmanDerecha = 5.6697E-08
.PARAM RadTempRefDerecha = 300
.PARAM AceroAncho = 0.001
.PARAM AceroAlto = 1
.PARAM AceroCond = 50
.PARAM AceroDens = 7500
.PARAM AceroCalorEsp = 450
.PARAM AislanteAncho = 0.002
.PARAM AislanteAlto = 1
.PARAM AislanteCond = 0.035
.PARAM AislanteDens = 100
.PARAM AislanteCalorEsp = 840
```

El tercer bloque define los subcircuitos. Cada uno de ellos se corresponde a una capa, cuando todos los subcircuitos de la misma son iguales, o bien a una celda cuando los subcircuitos de la capa son diferentes como ocurre en coordenadas esféricas. La primera línea define el nombre del subcircuito seguido de la numeración de nodos internos del mismo. En problemas 1-D cada subcircuito o celda contiene 3 nudos (izquierdo, derecho y central, por este orden) más el nudo de potencial nulo (masa), mientras que en problemas 2-D los nudos son 6 (izquierdo, derecho, inferior, superior, central y masa, por este orden). Los componentes que contiene para el caso general son dos resistencias en problemas 1-D (cuatro en problemas 2-D) dispuestas simétricamente y un condensador conectado entre el centro de la celda y el nudo de referencia (masa). La denominación de estos componentes ya se indicó anteriormente. Para especificar su valor se escribe éste directamente, o la fórmula o función de las variables, de las que depende, entre llaves.

```
.SUBCKT Acero_r1 1 2 3 4 5 6
Rizq 1 5 {AceroAncho / (2 * AceroCond * 4 * PI * (1 + AceroAncho/4)^2)}
Rder 5 2 {AceroAncho / (2 * AceroCond * 4 * PI * (1 + 3*AceroAncho/4)^2)}
Rinf 3 5 1E15
Rsup 5 4 1E15
Ra 3 6 1E-15
Rb 4 6 1E-15
Ccell 5 6 {(4/3) * PI * ((1 + AceroAncho)^3 - (1)^3) * AceroDens * AceroCalorEsp}
IC=300
.ENDS Acero_r1
...
.SUBCKT Aislante_r11 1 2 3 4 5 6
Rizq 1 5 {AislanteAncho / (2 * AislanteCond * 4 * PI * (1.01 + AislanteAncho/4)^2)}
Rder 5 2 {AislanteAncho / (2 * AislanteCond * 4 * PI * (1.01 + 3*AislanteAncho/4)^2)}
Rinf 3 5 1E15
Rsup 5 4 1E15
Ra 3 6 1E-15
Rb 4 6 1E-15
```



Capítulo 3. El Programa PROCCA-09.

```
Ccell 5 6 {(4/3) * PI * ( (1.01 + AislanteAncho)^3 - (1.01)^3 ) * AislanteDens *  
AislanteCalorEsp} IC=300  
.ENDS Aislante_r11
```

Un cuarto bloque se refiere al listado de interconexión entre subcircuitos (o celdas) en el que aparece el número total de subcircuitos existentes (perteneciente a alguno de los ya definidos en el bloque anterior) y la interconexión entre ellos con arreglo a la numeración de nodos ya explicada. Cada subcircuito contiene seis nodos que se escriben en el orden nudo izquierda, nudo derecha (que terminan en la letra y), nudo inferior, nudo superior (que terminan en la letra x), nudo central y masa. A continuación, se escribe el nombre del subcircuito. El listado se organiza por bloques de subcircuitos correspondientes a la misma columna vertical, siguiendo un orden desde la primera columna hasta la última.

```
* Listado de interconexión entre celdas 1  
X0101 0101y 0201y 0101x 0102x 0101 0 Acero_r1  
X0201 0201y 0301y 0201x 0202x 0201 0 Acero_r2  
X0301 0301y 0401y 0301x 0302x 0301 0 Acero_r3  
X0401 0401y 0501y 0401x 0402x 0401 0 Acero_r4  
X0501 0501y 0601y 0501x 0502x 0501 0 Acero_r5  
X0601 0601y 0701y 0601x 0602x 0601 0 Acero_r6  
X0701 0701y 0801y 0701x 0702x 0701 0 Acero_r7  
...
```

El siguiente bloque de la estructura del archivo de modelo es el correspondiente a las condiciones de contorno de las celdas sometidas a esta condición. En modelos 2-D los contornos son los bordes izquierdo, derecho, superior e inferior del modelo más los bordes correspondientes a los huecos dentro del medio, en caso de que existan.

```
* Listado de condiciones de contorno  
  
*Izquierda  
VizquierdaTdt01 0101y NrefIzquierdaTdt PULSE(300 1300 1000 3600 0 15400 20000)  
  
*Derecha  
GDerechaconv01 5101y NrefDerechaConv  
VALUE={ConvCoefDerecha*4*PI*(1.09)^2*(V(5101y,0)-{ConvTempRefDerecha})}  
GDerecharad01 5101y NrefDerechaRad  
VALUE={EmiDerecha*CteBoltzmanDerecha*4*PI*(1.09)^2*(V(5101y,0)^4-  
RadTempRefDerecha^4)}  
...
```

Con objeto de poder determinar, en todos los casos, no sólo el calor (la corriente) de cada uno de los elementos que definan las condiciones de contorno (es decir las corrientes que entran o salen por los contornos de las celdas sometidas a estas condiciones), sino el calor total que entra o sale por cada uno de los bordes del medio, se implementan como se mencionó anteriormente, circuitos auxiliares que permiten determinar estos valores directamente. Así todos los componentes de contorno de cada borde se conectan a un



Capítulo 3. El Programa PROCCA-09.

generador de tensión nula, en serie con la conexión de masa, que integra las corrientes individuales. Este generador actúa como amperímetro en el circuito. La nomenclatura de estos componentes está asociada a las condiciones de contorno a las que se conectan. El listado que implementa estos integradores siempre aparece en el modelo con independencia de que se den o no las condiciones isoterma, de convección, de radiación o mixtas, o de otro tipo. Para las condiciones dadas en el bloque anterior los circuitos integradores son los siguientes:

*Nudos de referencia para temperatura dependiente del tiempo

VnulaIzqTdt NrefIzquierdaTdt 0 0

VnulaDerTdt NrefDerechaTdt 0 0

VnulaArrTdt NrefSuperiorTdt 0 0

VnulaAbjTdt NrefInferiorTdt 0 0

* Elementos de integración para superficies convectivas

VnulaIzqConv NrefIzquierdaConv 0 0

VnulaDerConv NrefDerechaConv 0 0

VnulaArrConv NrefSuperiorConv 0 0

VnulaAbjConv NrefInferiorConv 0 0

* Elementos de integración para superficies radiativas

VnulaIzqRad NrefIzquierdaRad 0 0

VnulaDerRad NrefDerechaRad 0 0

VnulaArrRad NrefSuperiorRad 0 0

VnulaAbjRad NrefInferiorRad 0 0

El bloque en el que se listan las variables, cuyos resultados de simulación se desean obtener en forma tabulada en el archivo “.out”, constituye la siguiente sección del archivo de texto del modelo. Por defecto, siempre se solicita la impresión de la tensión en todos los centros de las celdas durante el transitorio, de acuerdo con el intervalo de tiempo solicitado para la impresión. Cualquier otro valor que desee ser tabulado debe solicitarse añadiendo al archivo las sentencias adecuadas.

* Listado de variables a imprimir en el archivo OUT

.PRINT TRAN V(0101,0)

.PRINT TRAN V(0201,0)

...

.PRINT TRAN V(4901,0)

.PRINT TRAN V(5001,0)

El último bloque contiene un grupo de sentencias fijas. La que define la ventana del transitorio de tiempos de la simulación, ya introducidos al diseñar el modelo, sentencia “.TRAN”; la asociada a la precisión requerida en los cálculos, sentencia “.OPTIONS RELTOL”; la que define el número de dígitos con que se presentan los resultados tabulados, sentencia “.OPTIONS NUMDIG”; la que activa el entorno gráfico de PSpice, sentencia “.PROBE” y, finalmente, la sentencia de cierre del archivo modelo, “.END”.



```
.TRAN 10s 20000s 0 UIC  
.OPTIONS RELTOL 0.1  
.OPTIONS NUMDGT 4  
.PROBE  
.END
```

El primero de los valores de la sentencia .TRAN define el intervalo de tiempo de impresión de los datos tabulados de salida, el segundo valor se refiere al tiempo total solicitado en la simulación y el tercero al valor a partir del cual se imprimen los resultados.

3.5 Pantallas de presentación de resultados.

Una vez creado el archivo de modelo su ejecución es inmediata pulsando el botón “Simular” de la pantalla “Archivo de texto del modelo” que aparece al pulsar el botón “Mostrar CIR” de la pantalla que contiene la retícula final del modelo. Esta acción arranca PSpice y ejecuta el modelo. Durante el tiempo que dura la simulación, PSpice muestra la pantalla de la Figura 4-31, donde, en la parte inferior derecha, aparece el intervalo de tiempo de simulación solicitado y el paso de tiempo que PSpice adopta en cada instante para la evaluación de los cálculos numéricos.

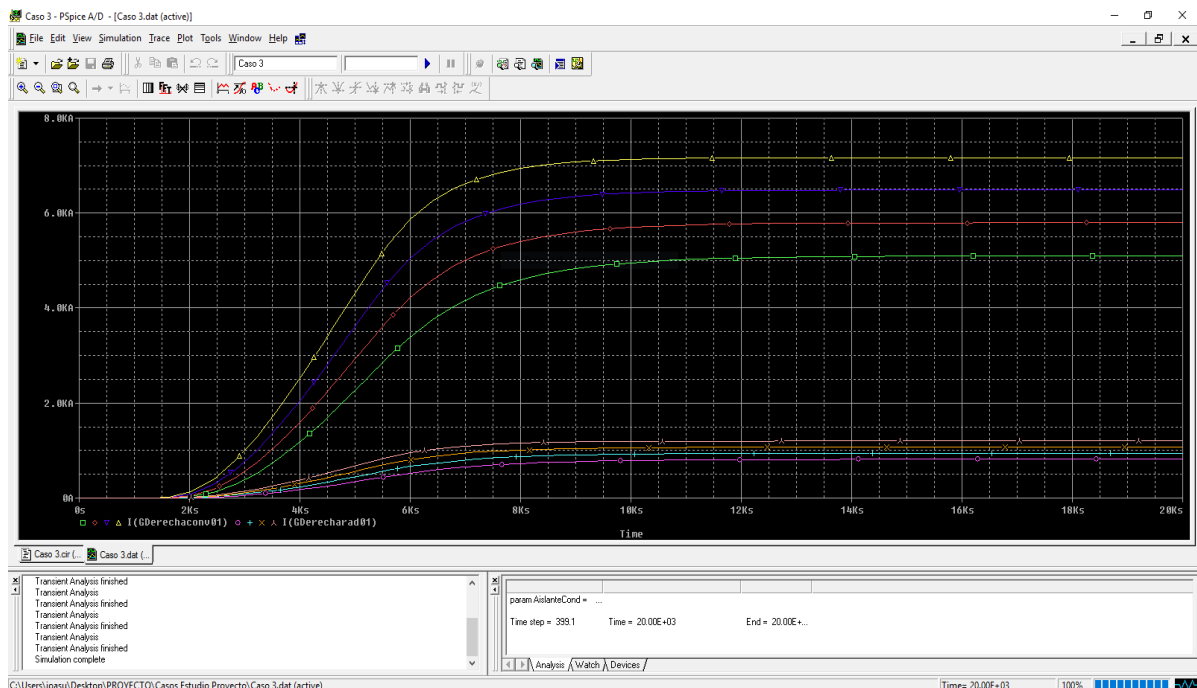


Figura 3-14 Pantalla de simulación en PSpice

El programa PSpice varía continuamente este paso de tiempo de cálculo, de acuerdo con la tendencia uniforme o cambiante de los resultados actuales, para reducir al máximo (sin merma de la precisión especificada por el programador a los resultados numéricos) los tiempos de computación totales.




Capítulo 3. El Programa PROCCA-09.

Si se ha incluido la opción de presentación de resultados en el entorno gráfico de Pspice (sentencia “.PROBE”), una vez finalizada la simulación PROCCA-09 muestra directamente este entorno, que consiste en una cuadrícula vacía cuyo eje horizontal muestra una escala de tiempos cuya extensión es la del transitorio y cuyo eje vertical, de momento sin escala, contendrá los valores numéricos de la variable solicitada (temperatura o flujo de calor) una vez se introduzca ésta por medio del comando “ADD TRACE” que aparece en la parte superior de la pantalla. La escala vertical tiene siempre unidades de voltios (V) o amperios (A), que hemos de traducir directamente por grados de temperatura (grados Kelvin) o flujos de calor (W/m²) en el elemento de circuito. No existe incompatibilidad en la asociación de amperios con flujos de calor ya que los amperios se refieren a la corriente que pasa por un elemento de circuito que siempre está asociado a una geometría y por tanto a una sección transversal.

El desplegable al pulsar el comando “ADD TRACE”, contiene un listado completo de todas las variables posibles del problema (temperaturas en todos los nudos y corrientes en todos los componentes del circuito). Así, si elegimos temperatura, el comando “ADD TRACE” permite ir añadiendo cuantos valores queramos en diferentes puntos del medio y comparar los resultados en una misma gráfica, y lo mismo si elegimos flujos de calor.

Los resultados tabulados pueden obtenerse, desde PSpice o bien desde Word, en el archivo de extensión “.out”. Este archivo, en el que también aparece al final del mismo todos los fallos de diseño del archivo de texto del modelo cuando no se puede simular éste, contiene ordenadamente un listado de todas las variables de las que se ha solicitado información tabulada con la sentencia “.PRINT TRAN”. En columnas aparece el valor de la variable en cada instante, en los intervalos de tiempo especificados por la sentencia “.TRAN”. Estos resultados pueden ser transportados fácilmente (copiar y pegar) a una hoja de cálculo para su manipulación y con ellos elaborar nuevas representaciones gráficas de perfiles, curvas de temperatura constante, etc.

| | |
|---|--|
|  | SIMULACIÓN ESTACIONARIA Y TRANSITORIA DE LA TEMPERATURA EN DEPÓSITOS FORMADOS POR MATERIALES DE DISTINTA CONDUCTIVIDAD |
| | Capítulo 4. Casos simulados y Resultados. |

Capítulo 4. Casos simulados y Resultados.

4.1 Planteamiento.

En este punto se procede al estudio del objetivo de este proyecto, la conducción de calor en depósitos esféricos y cilíndricos formados por dos capas, una lámina de acero que hace de estructura del depósito y un relleno de aislamiento. Los materiales elegidos para este estudio son el acero al carbono y, como aislante, la lana de roca. Sus propiedades físicas relacionadas con la conducción de calor son las siguientes:

| Material | Densidad (kg/m ³) | Conductividad térmica (W/m K) | Calor específico (J/kg K) |
|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| Acero al carbono | 7500 | 50 | 450 |
| Lana de roca | 100 | 0,035 – 0,05 | 840 |

Figura 4-1 Propiedades de los materiales

4.1.1 Aislante: lana de roca.

La lana de roca, perteneciente a la familia de las lanas minerales, es un material fabricado a partir de la roca volcánica. Se utiliza principalmente como aislamiento térmico y como protección pasiva contra el fuego en la edificación, debido a su estructura fibrosa multidireccional, que le permite albergar aire relativamente inmóvil en su interior.

El proceso de fabricación de la lana de roca pretende emular la acción natural de un volcán. La roca basáltica (diabasa) es fundida a más de 1600 °C en un horno (cubilote) para así retornarla a su estado inicial de lava. La lava es vertida en unas ruedas que giran a gran velocidad, y se transforma en fibras debido al efecto de la fuerza centrífuga. Tras la pulverización de un ligante orgánico, se reúnen las fibras para formar un colchón de lana primaria. Después de haber sido más o menos comprimido, dependiendo de las prestaciones buscadas, ese colchón pasa a la última fase de curado donde el producto adopta su forma final. La composición de la lana de roca fruto de este proceso es aproximadamente de 98% roca volcánica y 2% ligante orgánico.

La estructura de la lana de roca contiene aire seco y estable en su interior, por lo que actúa como obstáculo a las transferencias de calor caracterizándose por su baja conductividad térmica, la cual está entre los 0.050 y 0.031 W/m K, aislando tanto de temperaturas bajas como altas.

La lana de roca es el aislante más adecuado para este estudio debido a su rango de temperaturas máximas de empleo (hasta los 1000 °C). Se variará la conductividad del aislante dentro de su rango característico para cada caso de simulación (0.035, 0.04, 0.045, 0.05).



4.1.2 Condición de contorno en el interior.

En el interior del depósito se considera que hay un fluido que se encuentra a la temperatura ambiente de 27 °C y que posteriormente sufre un proceso de elevación de su temperatura de trabajo hasta por encima de los 1000 °C.

Concretamente, lo que se simula es una temperatura dependiente del tiempo que comienza a 300 K y se mantiene durante 5 minutos (300 segundos) para después aumentar linealmente hasta los 1300 K durante 1 hora (3600 s). Posteriormente se mantiene a esa temperatura durante el resto del ciclo de estudio, unos 20000 segundos.

A continuación, se muestra la curva de la temperatura en el interior del depósito:

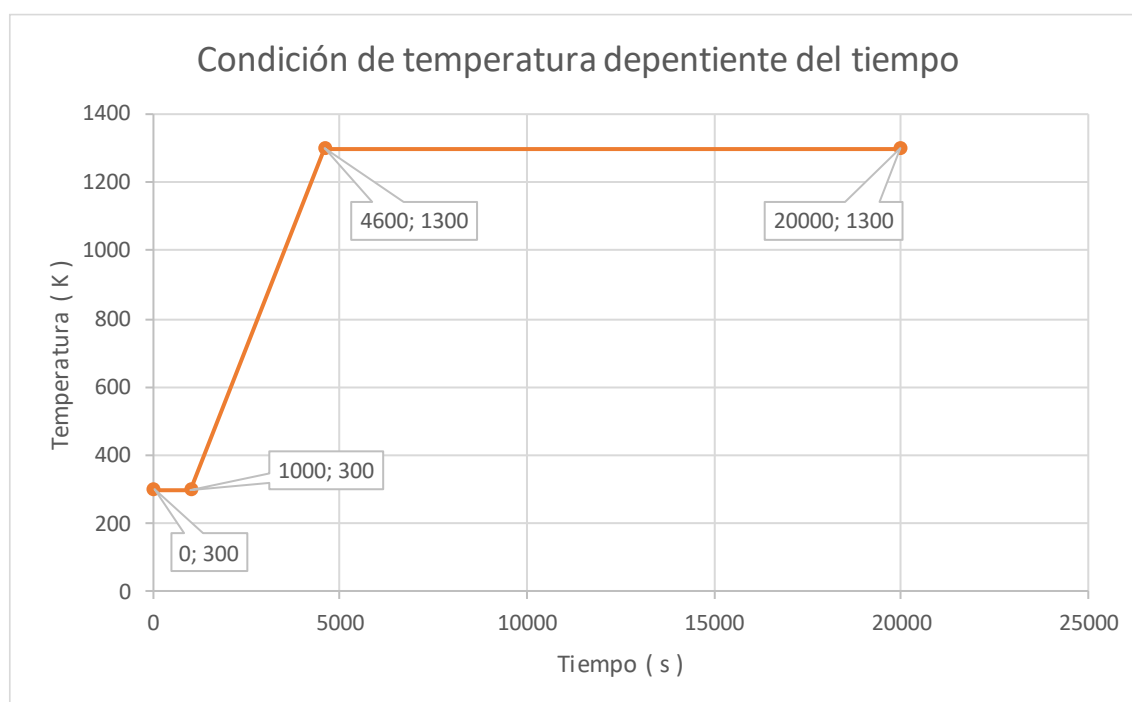


Figura 4-2 Curva de temperatura en el interior del depósito

4.1.3 Condición de contorno en el exterior.

Se va a someter el tipo de depósito estudiado (esférico o cilíndrico) a tres posibles condiciones de contorno en el exterior:

- Convección
- Radiación
- Convección + Radiación

Para este tipo de condiciones de contorno los parámetros más importantes son el coeficiente de convección (h) y la emisividad (ϵ).



Capítulo 4. Casos simulados y Resultados.

El valor del coeficiente de convección (h), también llamado coeficiente de transferencia de calor o coeficiente de película, depende de múltiples parámetros:

- Tipo de convección: natural o forzada
- Régimen del fluido: laminar o turbulento
- Velocidad del flujo
- Viscosidad del fluido
- Densidad del fluido
- Conductividad térmica del fluido
- Coeficiente de dilatación del fluido
- Forma de la superficie de intercambio
- Rugosidad de la superficie de intercambio
- Temperatura de la superficie de intercambio

Puesto que se considera que en el exterior del depósito el fluido existente es aire y en una situación de convección libre, el abanico de valores entre los que oscila el coeficiente de convección es entre 5 y 25 $W/m^2 K$. En este caso se ha tomado un valor de 15 $W/m^2 K$.

En cuanto al valor de la emisividad (ϵ), éste depende del acabado superficial del material y de su color. Por ello, se elige un valor recomendado de emisividad para esta situación de 0.35.

Los valores de referencia que se toman para estas condiciones de contorno son los siguientes:

- Temperatura exterior: 300 K. Se toma una temperatura ambiente de 27 °C.
- Temperatura inicial de las paredes del depósito igual a la temperatura exterior: 300 K.
- Coeficiente de convección: $h = 15 W/m^2 K$.
- Emisividad: 0.35

Así pues, el planteamiento del estudio a llevar a cabo en este proyecto se detalla en el organigrama de la Figura 4-3 :

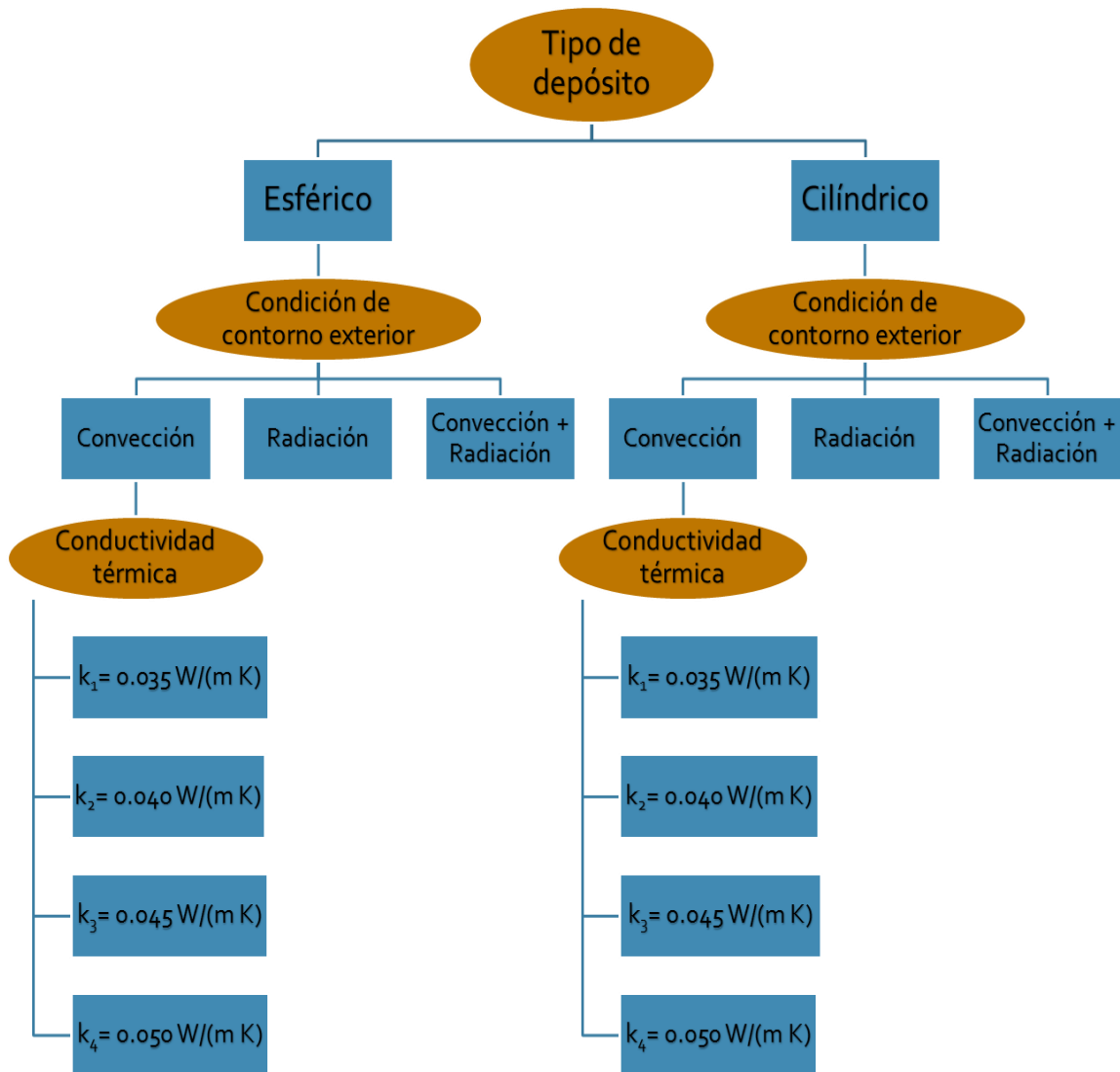


Figura 4-3 Secuencia de estudio

El proceso de estudio se realizará para los dos tipos de depósitos y en cada uno de ellos para las tres condiciones de contorno. Se simularán las cuatro conductividades térmicas con cada condición de contorno.

En todos estos casos de estudio se reflejarán las temperaturas y flujos de calor de la celda exterior del modelo (50-1) una vez alcanzado el régimen estacionario. También se plasmarán las gráficas de evolución respecto al tiempo de la temperatura de ésta y otras celdas típicas del modelo y de los flujos de calor en el interior y en el exterior del depósito.

Hay que recordar que los resultados mostrados por PSpice muestran las temperaturas en voltios y el flujo de calor en amperios. Su equivalencia es $1\text{ V} = 1\text{ K}$ y $1\text{ A} = 1\text{ W/m}^2$.



4.2 Depósito esférico.

En esta simulación se plantea un depósito esférico con radio interior de 1 metro formado por una chapa de acero al carbono de 1 cm de espesor y por una capa de aislante exterior de lana de roca de un espesor estándar de 8 cm.

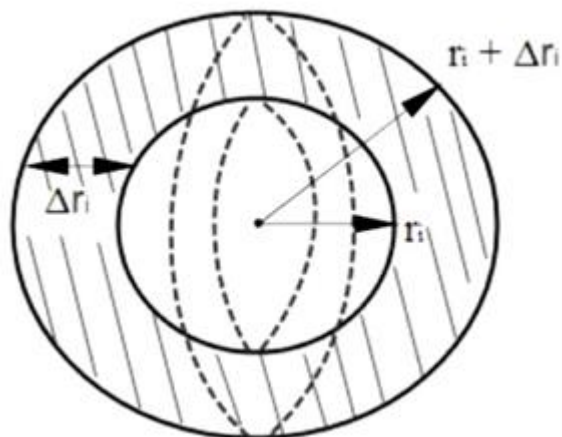


Figura 4-4 Nomenclatura de la celda en geometría esférica

Para una geometría esférica 1-D, con variable espacial r , las ecuaciones de las resistencias y el condensador de las celdas del modelo son:

$$R_{izq} = \frac{\Delta r_i}{2k 4\pi \left(r_i + \frac{\Delta r_i}{4}\right)^2} \quad (50)$$

$$R_{der} = \frac{\Delta r_i}{2k 4\pi \left(r_i + 3\frac{\Delta r_i}{4}\right)^2} \quad (51)$$

$$C_i = \rho c_e 4\pi r_i^2 \Delta r_i \quad (52)$$

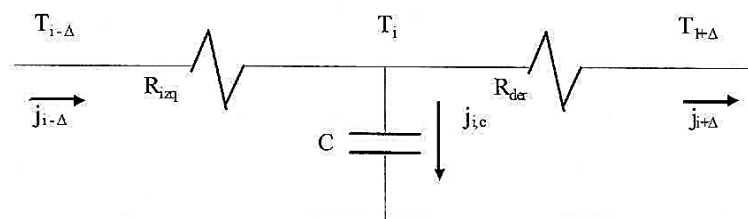


Figura 4-5 Modelo en red de la celda esférica 1-D

En el programa PROCCA-09 se define un modelo de 50 celdas horizontales y 1 vertical. Las 10 primeras se corresponden con el acero al carbono y las restantes 40 con la capa aislante. En la celda 1 y en la 50 se simulan las condiciones de contorno interior y exterior respectivamente.

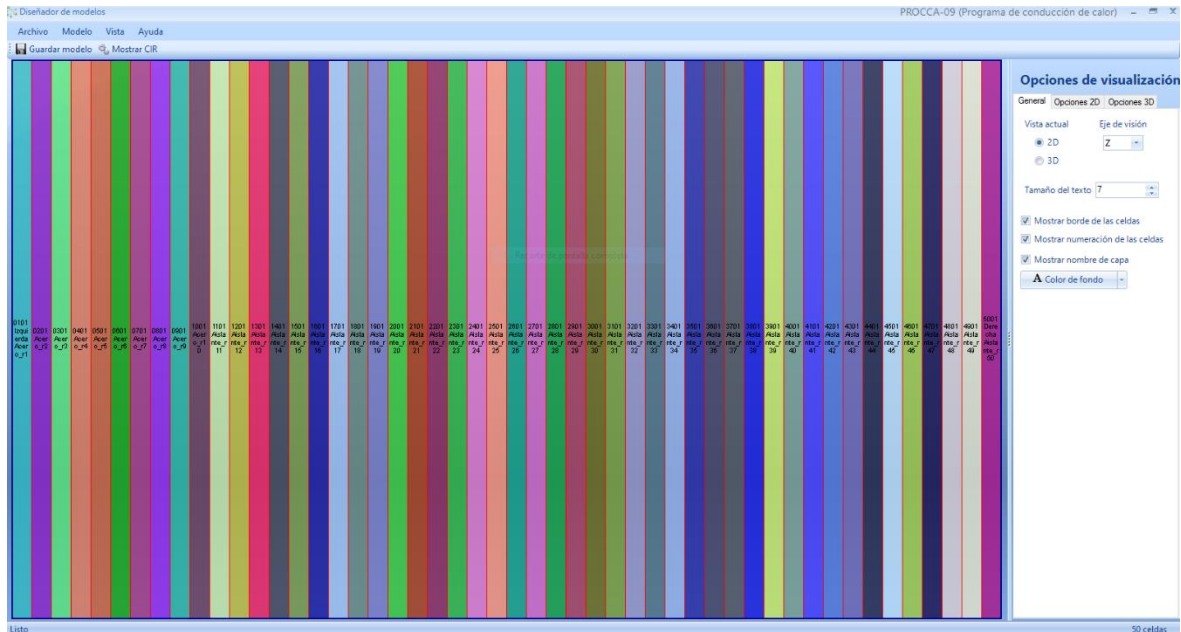


Figura 4-6 Modelo esférico

Como la duración del transitorio se estima con los tiempos relativos asociados a L_{capa1}^2/α_1 y L_{capa2}^2/α_2 , se procede a su cálculo:

- $L_{acero}^2/\alpha_{acero} = 6.75 \text{ s}$
- $L_{aislante}^2/\alpha_{aislante} = 15360 \text{ s}$

Donde L_{capa} es el espesor de la capa correspondiente y $\alpha_{capa} = k/(\rho c_e)$ la difusividad térmica (m^2/s), como ya se vio anteriormente, asociada a la rapidez global de propagación del calor en el medio.

Una vez realizado esto, se comprueba que el transitorio de los casos a estudiar no superará los 16000 segundos en ningún caso. Por todo ello se elige un tiempo de simulación de 20000 segundos con un tiempo de paso en PSpice de 10 segundos para no saturar el programa.



4.2.1 Condición exterior: Convección.

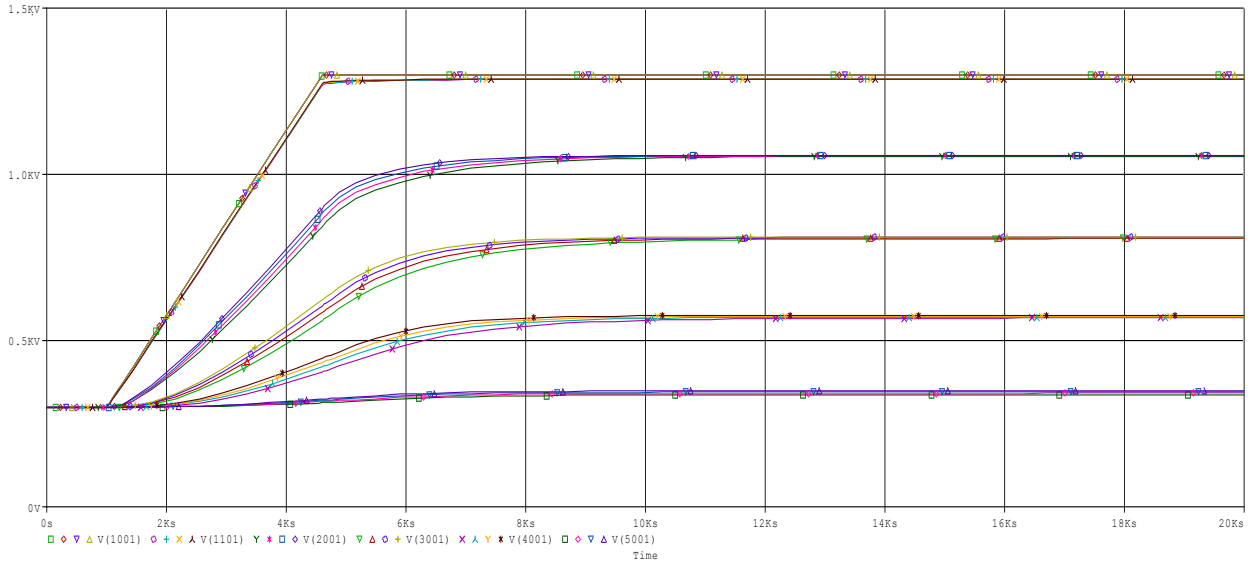


Figura 4-7 Curva de temperaturas según conductividad

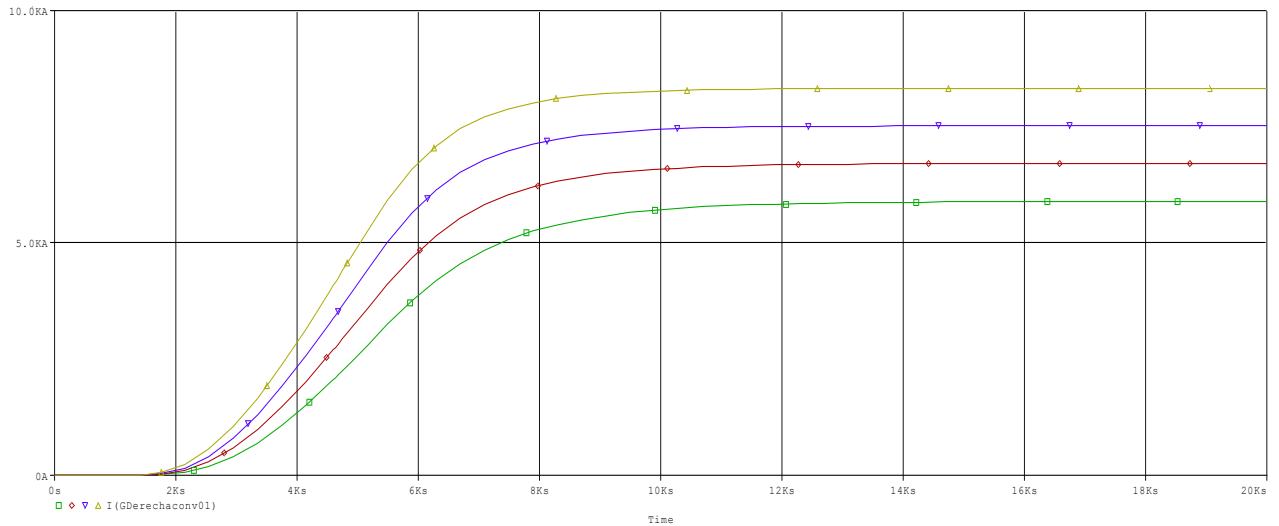


Figura 4-8 Curva de flujo de calor de convección según conductividad

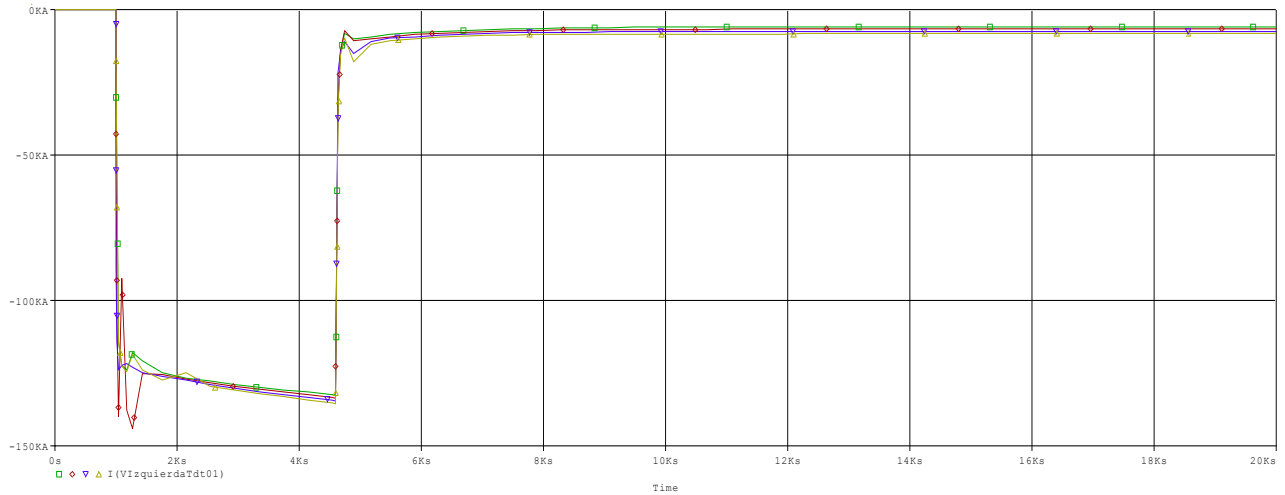


Figura 4-9 Curva de flujo de calor interno dependiente del tiempo según conductividad

Todas estas curvas de temperaturas y de flujos de calor en el transitorio de este caso concreto como las de los casos de estudio sucesivos se analizarán más adelante en el apartado de resultados.



Caso 1.1

Conductividad = 0.035 W/ (m K)

| CELDA | Temperatura en el estacionario (K) |
|--------------|---|
| 10 | 1299,9 |
| 11 | 1286,8 |
| 20 | 1055 |
| 30 | 806,71 |
| 40 | 567,76 |
| 50 | 337,6 |

| Flujos de calor en el estacionario (A) | |
|---|---------|
| Interno dep. del tiempo | -5893,1 |
| Convección | 5892,3 |

Caso 1.2

Conductividad = 0.04 W/ (m K)

| CELDA | Temperatura en el estacionario (K) |
|--------------|---|
| 10 | 1299,9 |
| 11 | 1286,8 |
| 20 | 1055,9 |
| 30 | 808,56 |
| 40 | 570,51 |
| 50 | 341,2 |

| Flujos de calor en el estacionario (A) | |
|---|---------|
| Interno dep. del tiempo | -6709,3 |
| Convección | 6709,1 |



Caso 1.3

Conductividad = 0.045 W/ (m K)

| CELDA | Temperatura en el estacionario (K) |
|-------|------------------------------------|
| 10 | 1299,9 |
| 11 | 1286,9 |
| 20 | 1056,8 |
| 30 | 810,4 |
| 40 | 573,23 |
| 50 | 344,78 |

| Flujos de calor en el estacionario (A) | |
|--|---------|
| Interno dep. del tiempo | -7519,6 |
| Convección | 7519,6 |

Caso 1.4

Conductividad = 0.05 W/ (m K)

| CELDA | Temperatura en el estacionario (K) |
|-------|------------------------------------|
| 10 | 1299,9 |
| 11 | 1286,9 |
| 20 | 1057,7 |
| 30 | 812,21 |
| 40 | 575,93 |
| 50 | 348,33 |

| Flujos de calor en el estacionario (A) | |
|--|--------|
| Interno dep. del tiempo | -8324 |
| Convección | 8323,9 |



4.2.2 Condición exterior: Radiación

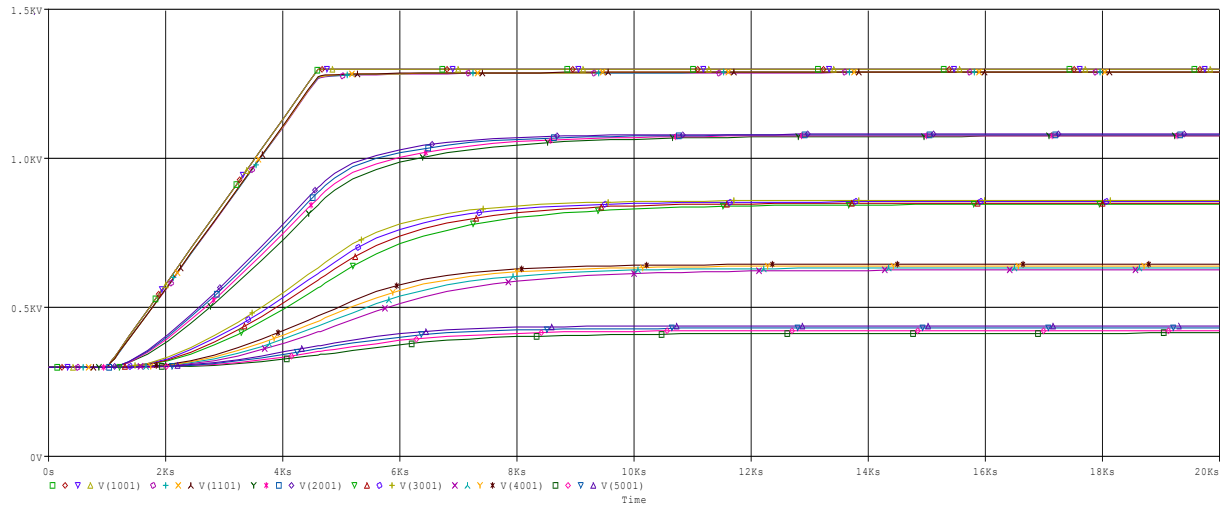


Figura 4-10 Curva de temperaturas según conductividad

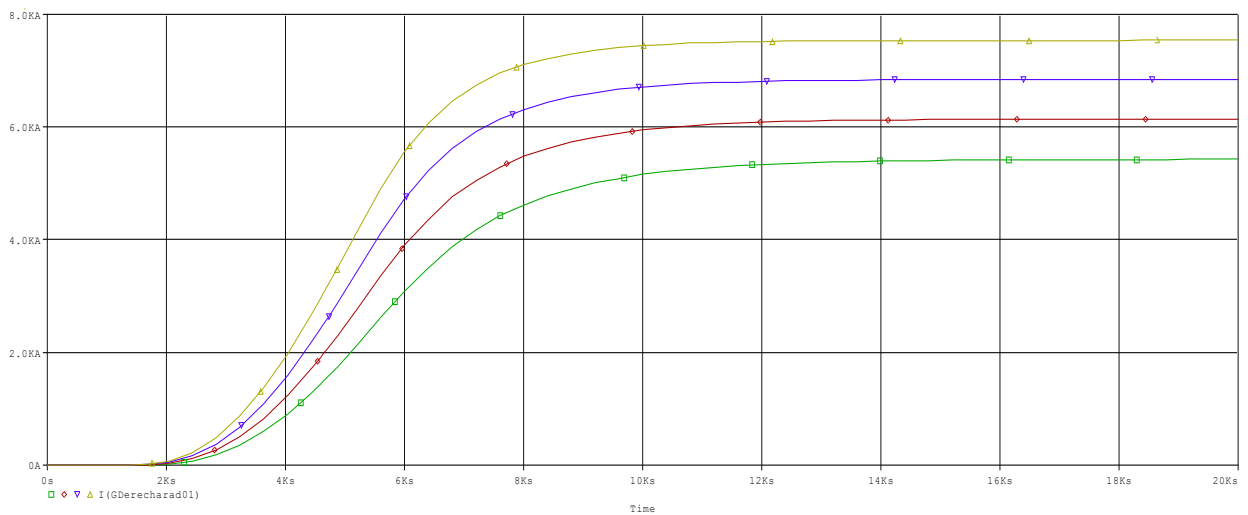


Figura 4-11 Curva de flujo de calor de radiación según conductividad



Capítulo 4. Casos simulados y Resultados.

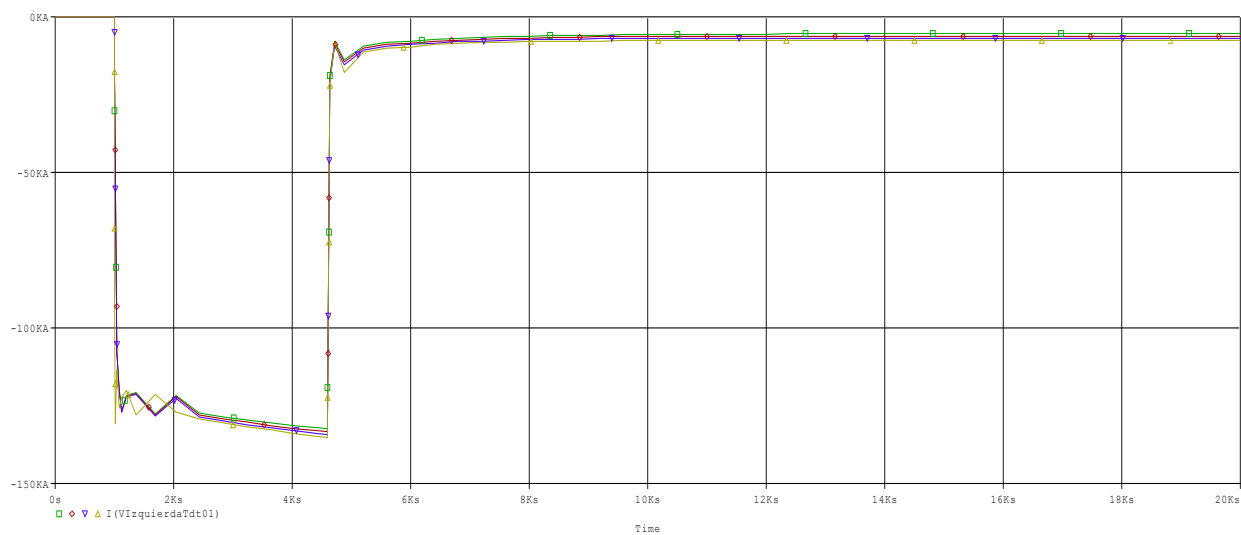


Figura 4-12 Curva de flujo de calor interno dependiente del tiempo según conductividad



Caso 2.1

Conductividad = 0.035 W/ (m K)

| CELDA | Temperatura en el estacionario (K) |
|-------|------------------------------------|
| 10 | 1299,9 |
| 11 | 1287,8 |
| 20 | 1074,3 |
| 30 | 845,6 |
| 40 | 625,52 |
| 50 | 413,54 |

| Flujos de calor en el estacionario (A) | |
|--|---------|
| Interno dep. del tiempo | -5428,7 |
| Radiación | 5426,5 |

Caso 2.2

Conductividad = 0.04 W/ (m K)

| CELDA | Temperatura en el estacionario (K) |
|-------|------------------------------------|
| 10 | 1299,9 |
| 11 | 1287,9 |
| 20 | 1076,5 |
| 30 | 850,14 |
| 40 | 632,24 |
| 50 | 422,34 |

| Flujos de calor en el estacionario (A) | |
|--|---------|
| Interno dep. del tiempo | -6141,7 |
| Radiación | 6141 |



Caso 2.3

Conductividad = 0.045 W/ (m K)

| CELDA | Temperatura en el estacionario (K) |
|--------------|---|
| 10 | 1299,9 |
| 11 | 1288 |
| 20 | 1078,6 |
| 30 | 854,32 |
| 40 | 638,44 |
| 50 | 430,49 |

| Flujos de calor en el estacionario (A) | |
|---|--------|
| Interno dep. del tiempo | -6845 |
| Radiación | 6844,8 |

Caso 2.4

Conductividad = 0.05 W/ (m K)

| CELDA | Temperatura en el estacionario (K) |
|--------------|---|
| 10 | 1299,9 |
| 11 | 1288,1 |
| 20 | 1080,5 |
| 30 | 858,21 |
| 40 | 644,21 |
| 50 | 438,08 |

| Flujos de calor en el estacionario (A) | |
|---|--------|
| Interno dep. del tiempo | -7539 |
| Radiación | 7538,9 |



4.2.3 Condición exterior: Convección + Radiación

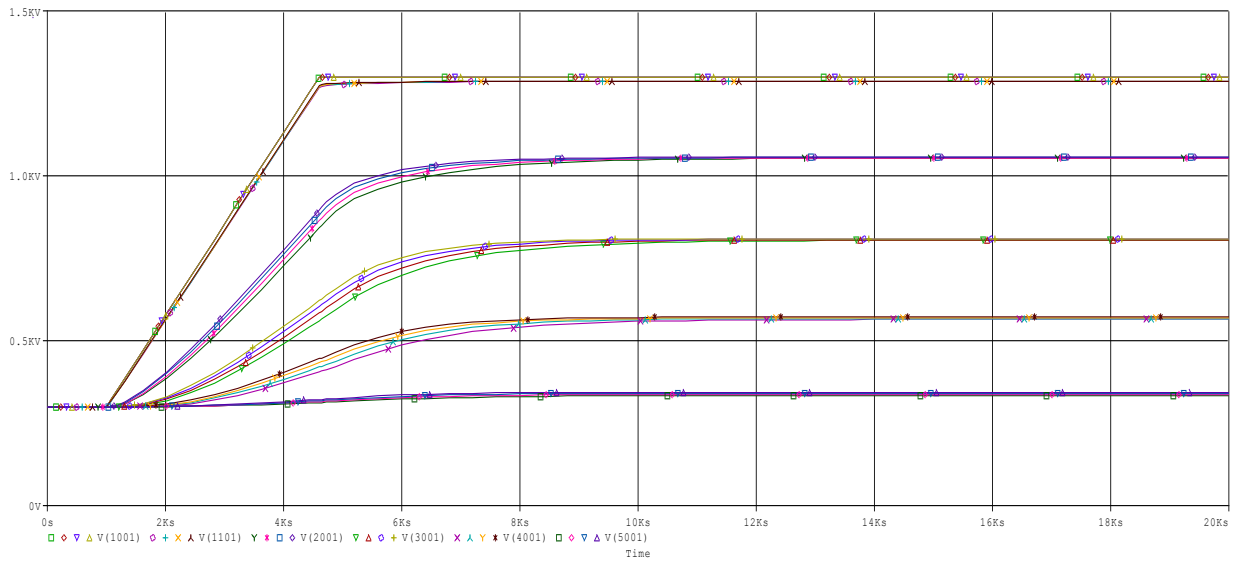


Figura 4-13 Curva de temperaturas según conductividad

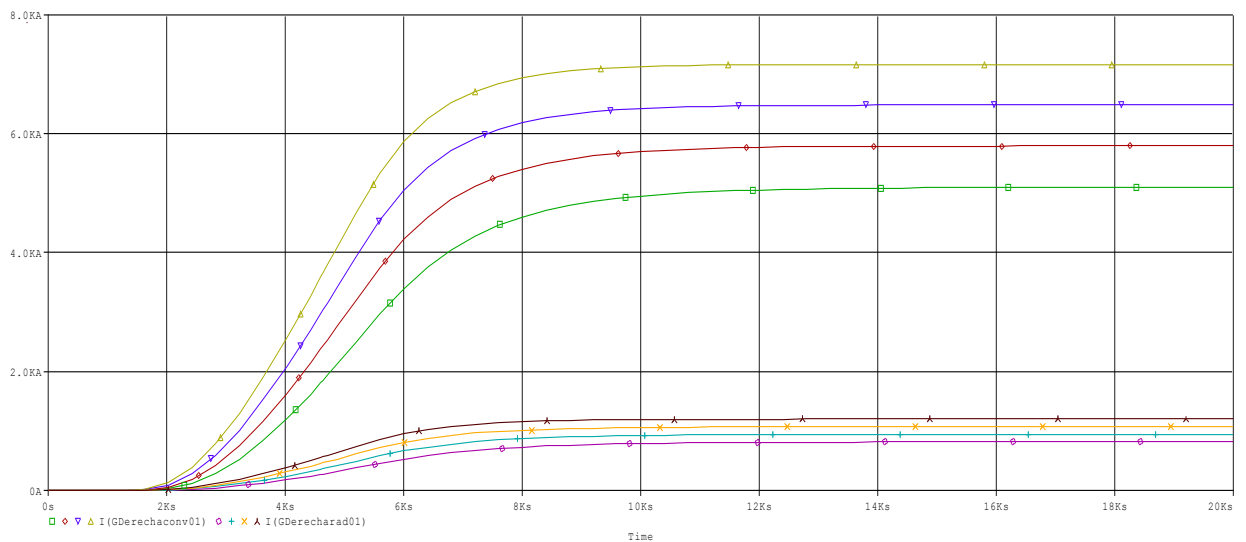


Figura 4-14 Curva de flujo de calor de convección y de radiación según conductividad



Capítulo 4. Casos simulados y Resultados.

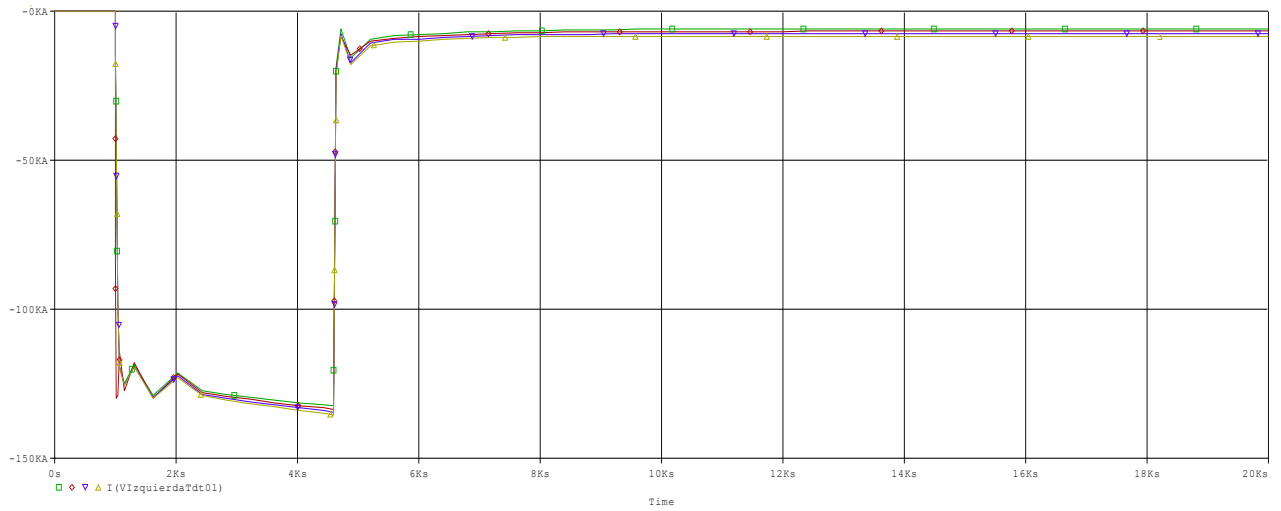


Figura 4-15 Curva de flujo de calor interno dependiente del tiempo según conductividad



Caso 3.1

Conductividad = 0.035 W/ (m K)

| CELDA | Temperatura en el estacionario (K) |
|-------|------------------------------------|
| 10 | 1299,9 |
| 11 | 1286,7 |
| 20 | 1054,1 |
| 30 | 804,91 |
| 40 | 565,1 |
| 50 | 334,1 |

| Flujos de calor en el estacionario (A) | |
|--|---------|
| Interno dep. del tiempo | -5914,5 |
| Convección | 5098,2 |
| Radiación | 815,6 |

Caso 3.2

Conductividad = 0.04 W/ (m K)

| CELDA | Temperatura en el estacionario (K) |
|-------|------------------------------------|
| 10 | 1299,9 |
| 11 | 1286,8 |
| 20 | 1054,9 |
| 30 | 806,5 |
| 40 | 567,44 |
| 50 | 337,17 |

| Flujos de calor en el estacionario (A) | |
|--|---------|
| Interno dep. del tiempo | -6737,5 |
| Convección | 5795,8 |
| Radiación | 941,53 |



Caso 3.3

Conductividad = 0.045 W/ (m K)

| CELDA | Temperatura en el estacionario (K) |
|-------|------------------------------------|
| 10 | 1299,9 |
| 11 | 1286,8 |
| 20 | 1055,6 |
| 30 | 808,06 |
| 40 | 569,76 |
| 50 | 340,22 |

| Flujos de calor en el estacionario (A) | |
|--|---------|
| Interno dep. del tiempo | -7555,5 |
| Convección | 6485,8 |
| Radiación | 1069,7 |

Caso 3.4

Conductividad = 0.05 W/ (m K)

| CELDA | Temperatura en el estacionario (K) |
|-------|------------------------------------|
| 10 | 1299,9 |
| 11 | 1286,8 |
| 20 | 1056,4 |
| 30 | 809,6 |
| 40 | 572,05 |
| 50 | 343,23 |

| Flujos de calor en el estacionario (A) | |
|--|---------|
| Interno dep. del tiempo | -8368,6 |
| Convección | 7168,5 |
| Radiación | 1200,1 |



4.3 Depósito cilíndrico.

En esta otra simulación se plantea un depósito cilíndrico con radio interior de 1 metro y altura 1 metro formado también por una chapa de acero al carbono de 1 cm de espesor y por una capa de aislante exterior de lana de roca de un espesor estándar de 8 cm.

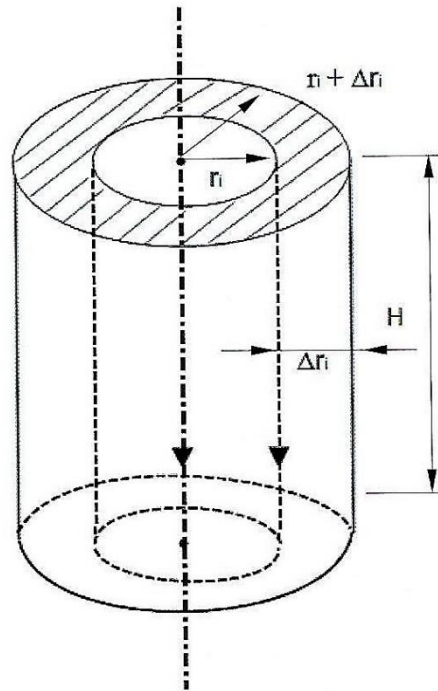


Figura 4-16 Nomenclatura de la celda en geometría cilíndrica

Como se quiere realizar un estudio de una geometría cilíndrica 1-D, se considera que las bases están sujetas a condiciones de contorno adiabáticas.

Para una geometría cilíndrica 1-D como la que se quiere simular, con variable espacial r , las ecuaciones de las resistencias y el condensador de las celdas del modelo son:

$$R_{izq} = \frac{\Delta r_i}{2k \left[2\pi \left(r_i + \frac{\Delta r_i}{4} \right) \right]} \quad (53)$$

$$R_{der} = \frac{\Delta r_i}{2k \left[2\pi \left(r_i + 3 \frac{\Delta r_i}{4} \right) \right]} \quad (54)$$

$$C_i = \rho c_e 2\pi r_i \Delta r_i \quad (55)$$

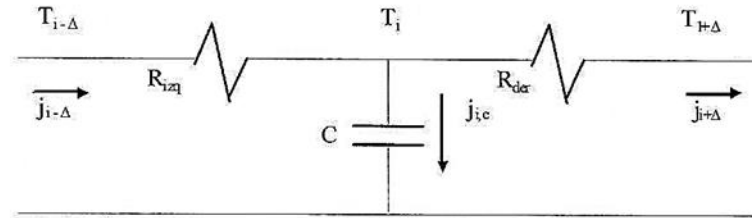


Figura 4-17 Modelo en red de la celda cilíndrica 1-D

En esta simulación, de nuevo se define un modelo de 50 celdas horizontales y 1 vertical. Las 10 primeras otra vez se corresponden con el acero al carbono y las restantes 40 con la capa aislante. En la celda 1 y en la 50 se vuelven a simular las condiciones de contorno interior y exterior respectivamente.

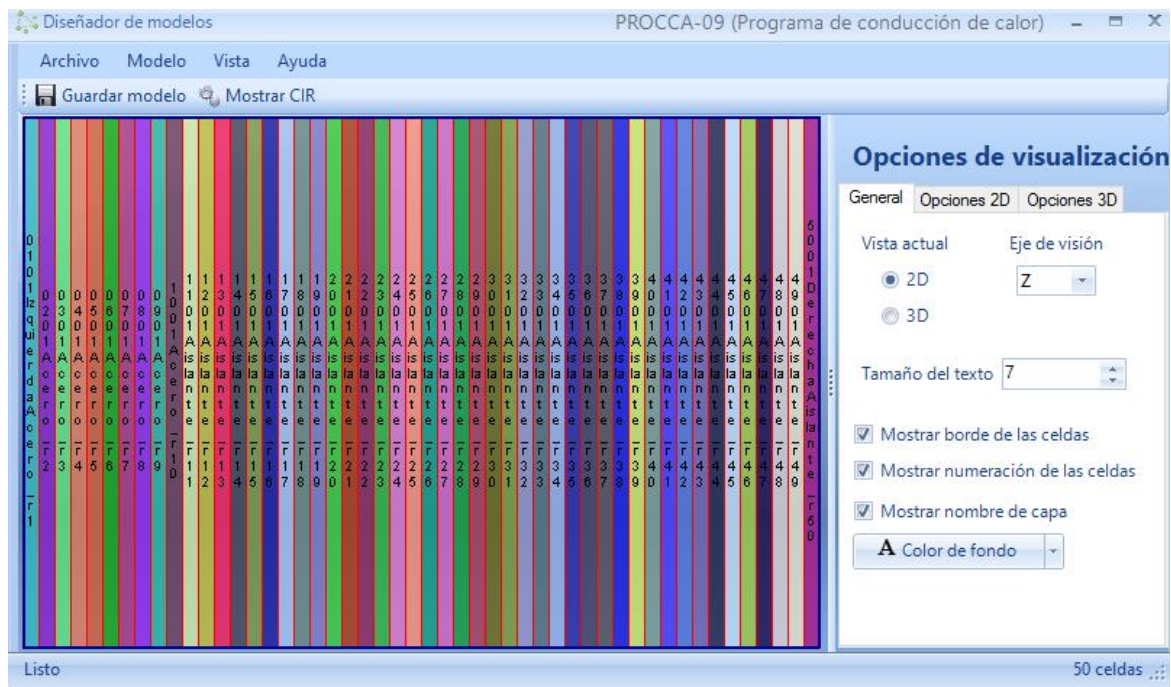


Figura 4-18 Modelo cilíndrico

Como en este nuevo tipo de depósito los espesores de las capas de acero y aislante además de los materiales son los mismos que en el caso esférico, el cálculo de los tiempos relativos asociados a L_{capa1}^2/α_1 y L_{capa2}^2/α_2 proporciona los mismos resultados también.

Por lo tanto, la duración del transitorio va a ser del mismo orden. De nuevo se elige un tiempo de simulación de 20000 segundos con un tiempo de paso en PSpice de 10 segundos.



4.3.1 Condición exterior: Convección.

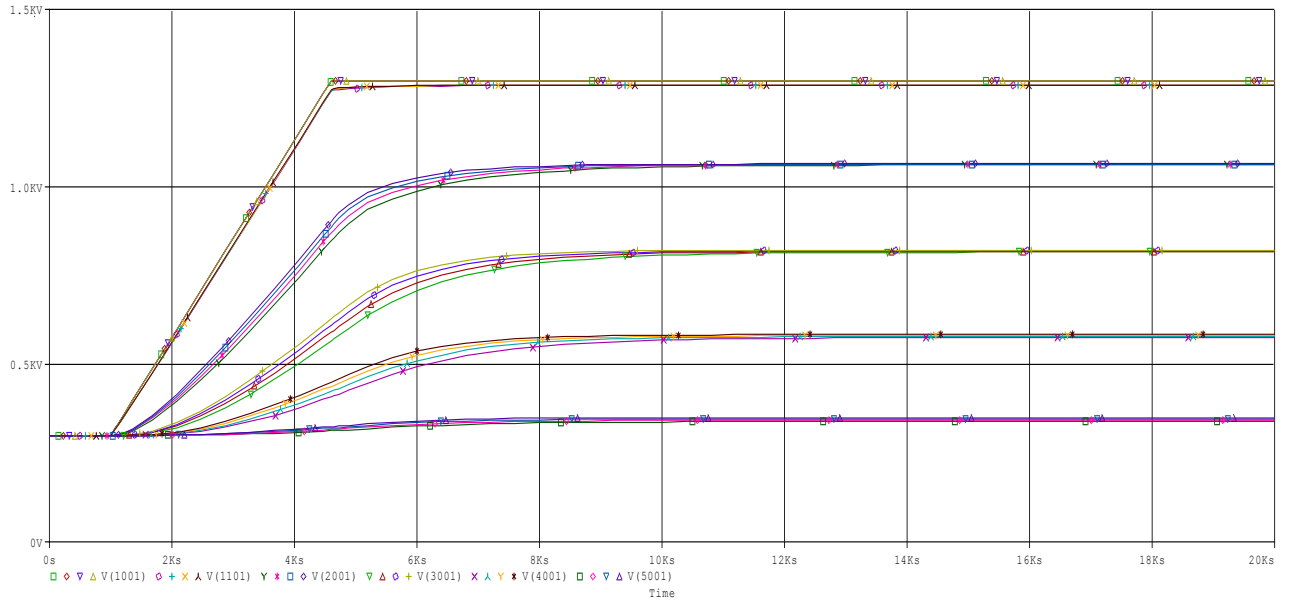


Figura 4-19 Curva de temperaturas según conductividad

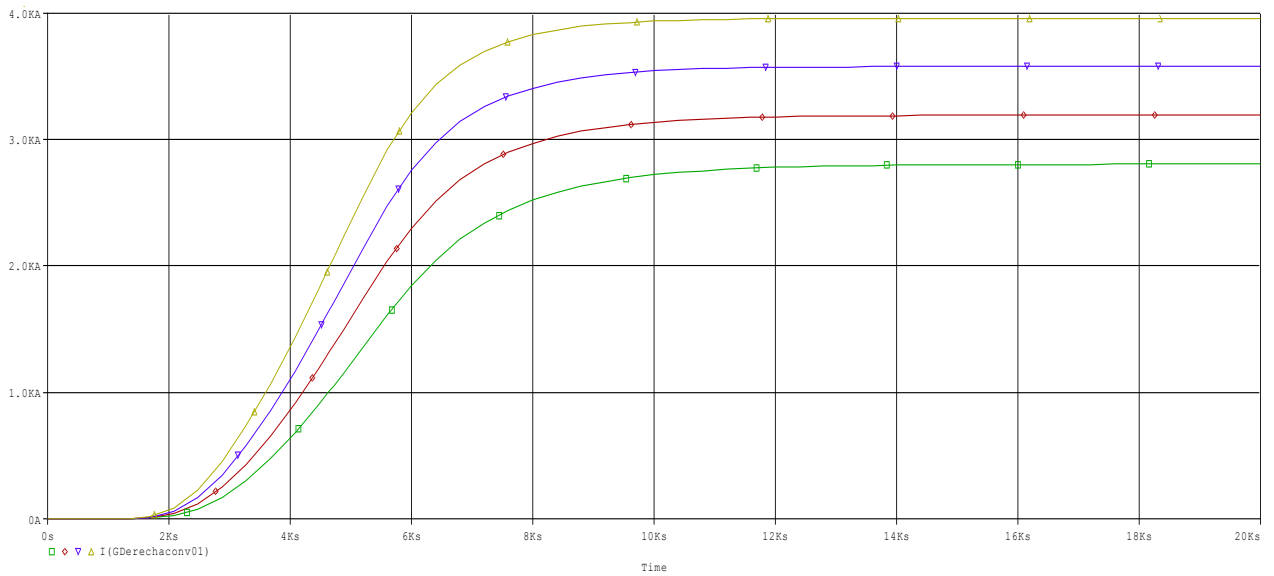


Figura 4-20 Curva de flujo de calor de convección según conductividad



Capítulo 4. Casos simulados y Resultados.

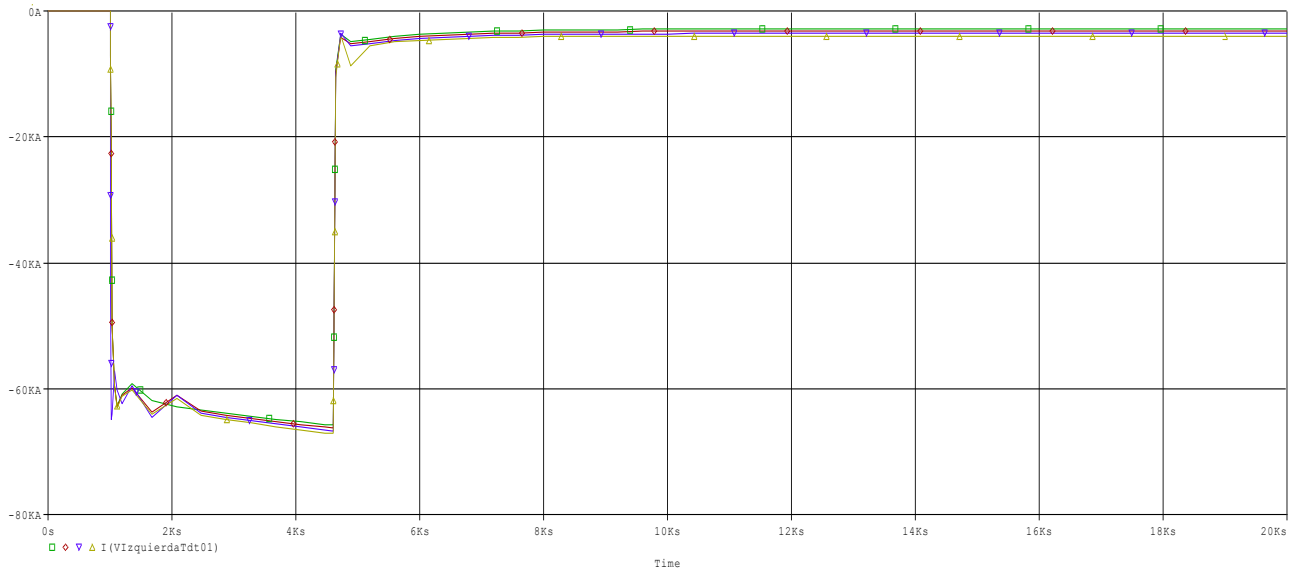


Figura 4-21 Curva de flujo de calor interno dependiente del tiempo según conductividad



Capítulo 4. Casos simulados y Resultados.

Caso 4.1

Conductividad = 0.035 W/ (m K)

| CELDA | Temperatura en el estacionario (K) |
|-------|------------------------------------|
| 10 | 1299,9 |
| 11 | 1287,3 |
| 20 | 1062,1 |
| 30 | 816,48 |
| 40 | 575,52 |
| 50 | 339,02 |

| Flujos de calor en el estacionario (A) | |
|--|---------|
| Interno dep. del tiempo | -2806,1 |
| Convección | 2805,7 |

Caso 4.2

Conductividad = 0.04 W/ (m K)

| CELDA | Temperatura en el estacionario (K) |
|-------|------------------------------------|
| 10 | 1299,9 |
| 11 | 1287,3 |
| 20 | 1063 |
| 30 | 818,37 |
| 40 | 578,34 |
| 50 | 342,76 |

| Flujos de calor en el estacionario (A) | |
|--|---------|
| Interno dep. del tiempo | -3194,3 |
| Convección | 3194,2 |



Caso 4.3

Conductividad = 0.045 W/ (m K)

| CELDA | Temperatura en el estacionario (K) |
|--------------|---|
| 10 | 1299,9 |
| 11 | 1287,4 |
| 20 | 1063,9 |
| 30 | 820,23 |
| 40 | 581,13 |
| 50 | 346,46 |

| Flujos de calor en el estacionario (A) | |
|---|---------|
| Interno dep. del tiempo | -3579,6 |
| Convección | 3579,5 |

Caso 4.4

Conductividad = 0.05 W/ (m K)

| CELDA | Temperatura en el estacionario (K) |
|--------------|---|
| 10 | 1299,9 |
| 11 | 1287,4 |
| 20 | 1064,8 |
| 30 | 822,08 |
| 40 | 583,9 |
| 50 | 350,14 |

| Flujos de calor en el estacionario (A) | |
|---|---------|
| Interno dep. del tiempo | -3961,9 |
| Convección | 3961,9 |



4.3.2 Condición exterior: Radiación.

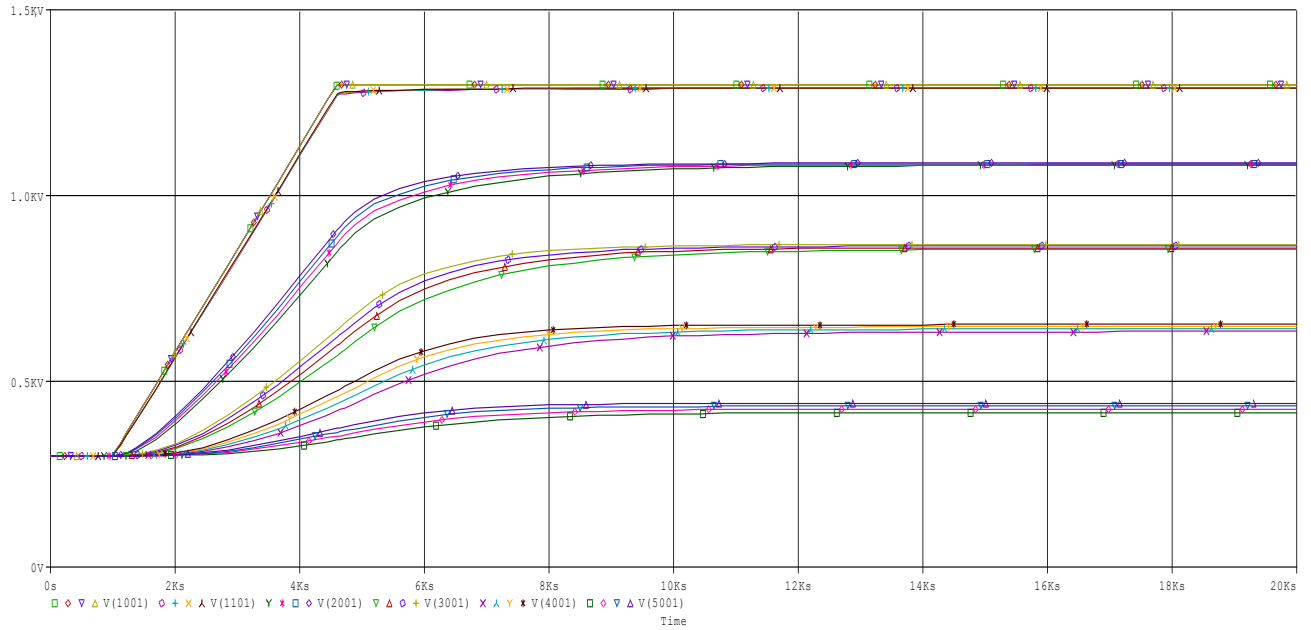


Figura 4-22 Curva de temperaturas según conductividad

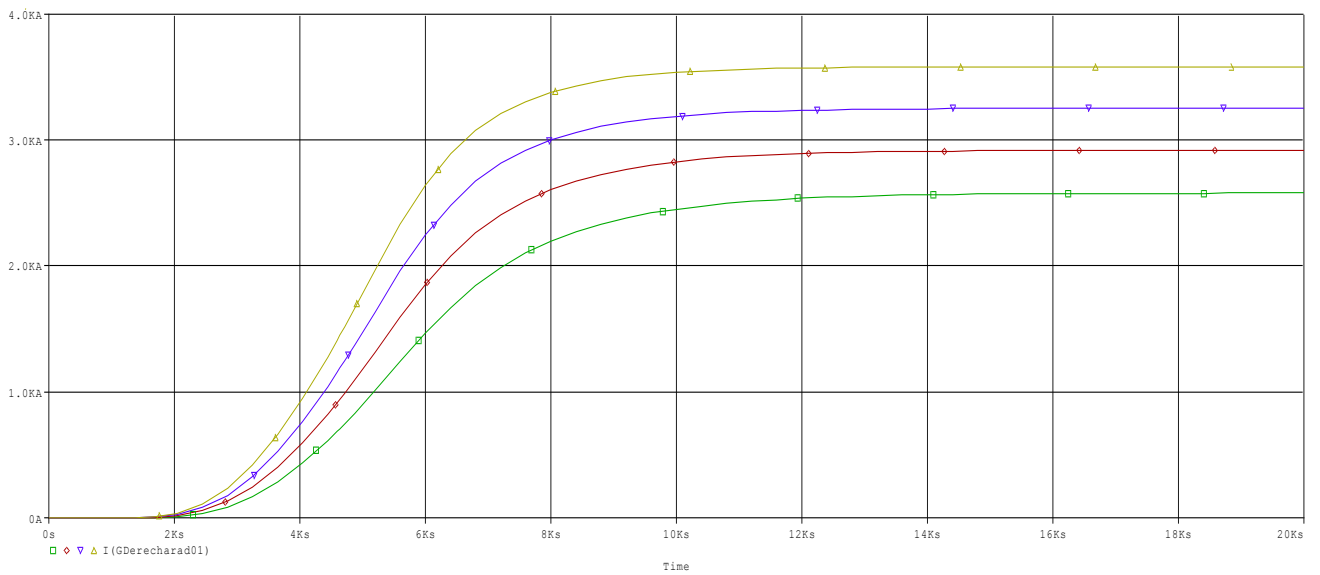


Figura 4-23 Curva de flujo de calor de radiación según conductividad

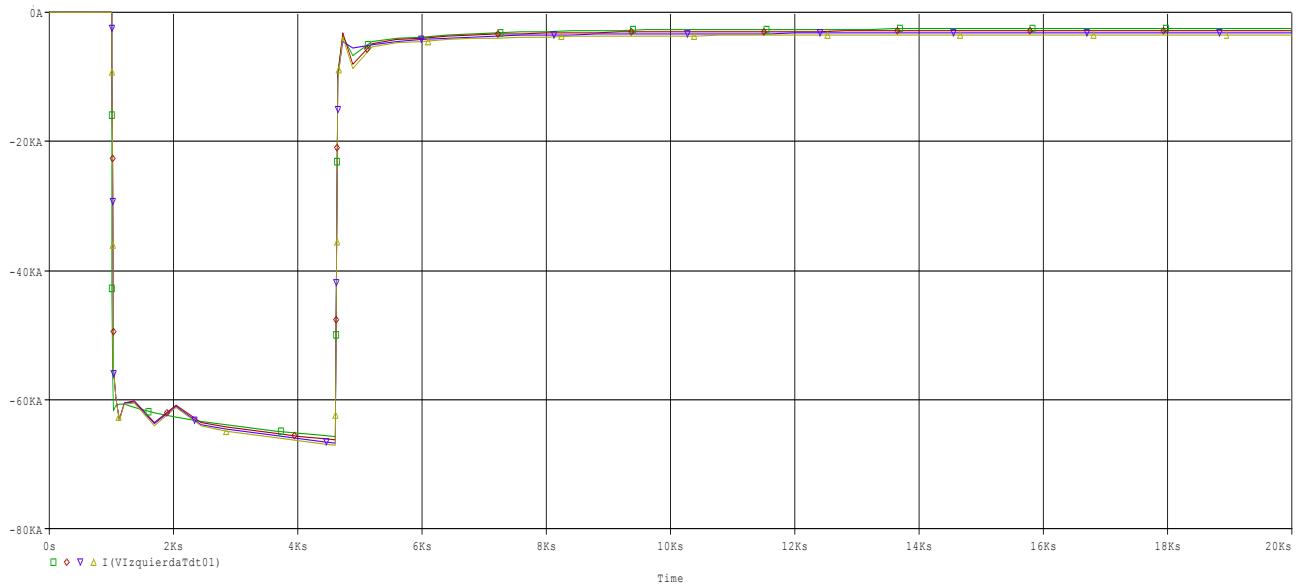


Figura 4-24 Curva de flujo de calor interno dependiente del tiempo según conductividad



Caso 5.1

Conductividad = 0.035 W/ (m K)

| CELDA | Temperatura en el estacionario (K) |
|-------|------------------------------------|
| 10 | 1299,9 |
| 11 | 1288,3 |
| 20 | 1081,2 |
| 30 | 855,39 |
| 40 | 633,84 |
| 50 | 416,42 |

| Flujos de calor en el estacionario (A) | |
|--|---------|
| Interno dep. del tiempo | -2580,4 |
| Radiación | 2579,3 |

Caso 5.2

Conductividad = 0.04 W/ (m K)

| CELDA | Temperatura en el estacionario (K) |
|-------|------------------------------------|
| 10 | 1299,9 |
| 11 | 1288,4 |
| 20 | 1083,5 |
| 30 | 859,92 |
| 40 | 640,6 |
| 50 | 425,35 |

| Flujos de calor en el estacionario (A) | |
|--|---------|
| Interno dep. del tiempo | -2918,8 |
| Radiación | 2918,4 |



Caso 5.3

Conductividad = 0.045 W/ (m K)

| CELDA | Temperatura en el estacionario (K) |
|-------|------------------------------------|
| 10 | 1299,9 |
| 11 | 1288,5 |
| 20 | 1085,5 |
| 30 | 864,08 |
| 40 | 646,83 |
| 50 | 433,61 |

| Flujos de calor en el estacionario (A) | |
|--|---------|
| Interno dep. del tiempo | -3252,5 |
| Radiación | 3252,3 |

Caso 5.4

Conductividad = 0.05 W/ (m K)

| CELDA | Temperatura en el estacionario (K) |
|-------|------------------------------------|
| 10 | 1299,9 |
| 11 | 1288,6 |
| 20 | 1087,4 |
| 30 | 867,94 |
| 40 | 652,63 |
| 50 | 441,3 |

| Flujos de calor en el estacionario (A) | |
|--|---------|
| Interno dep. del tiempo | -3581,7 |
| Radiación | 3581,6 |



4.3.3 Condición exterior: Convección + Radiación

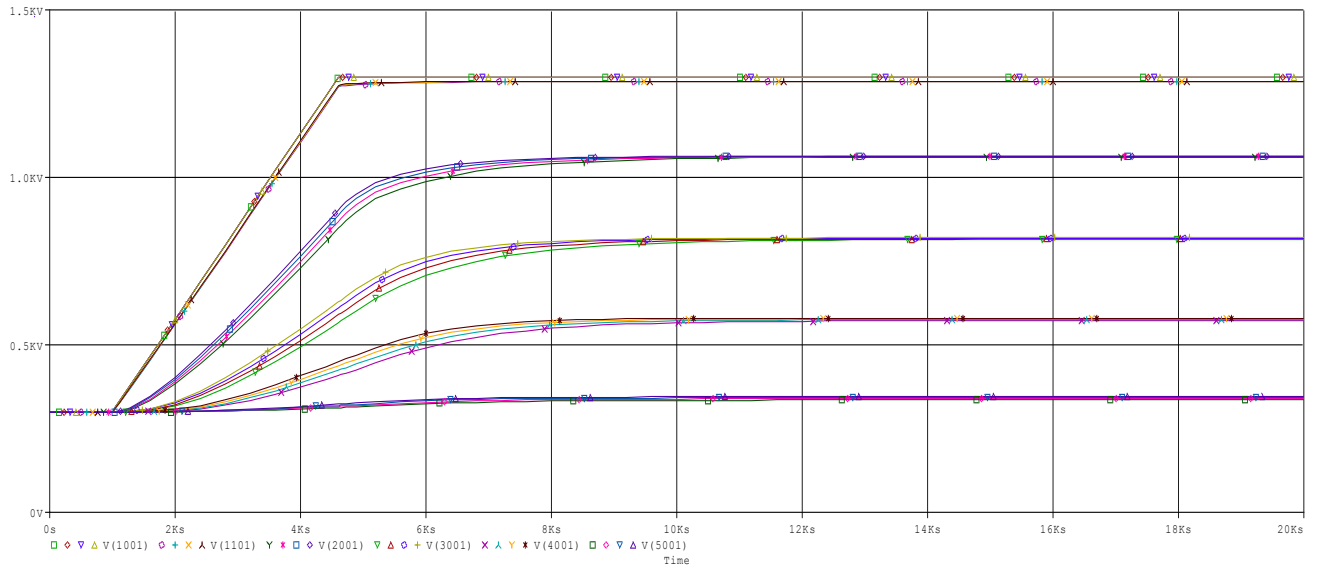


Figura 4-25 Curva de temperaturas según conductividad

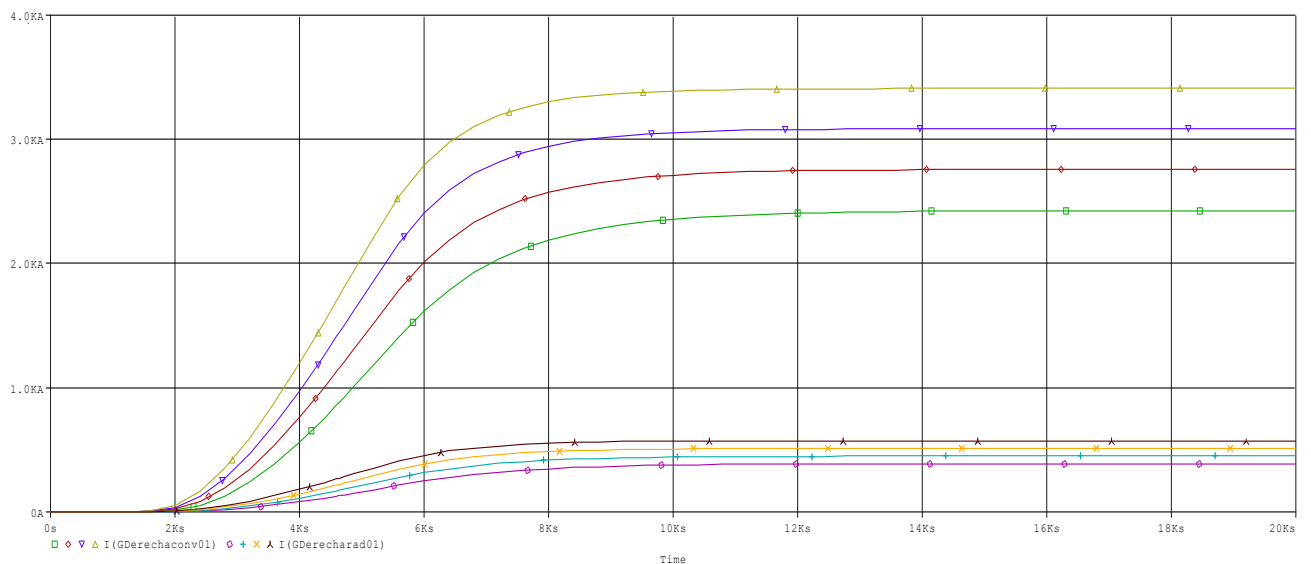


Figura 4-26 Curva de flujo de calor de convección y de radiación según conductividad



Capítulo 4. Casos simulados y Resultados.

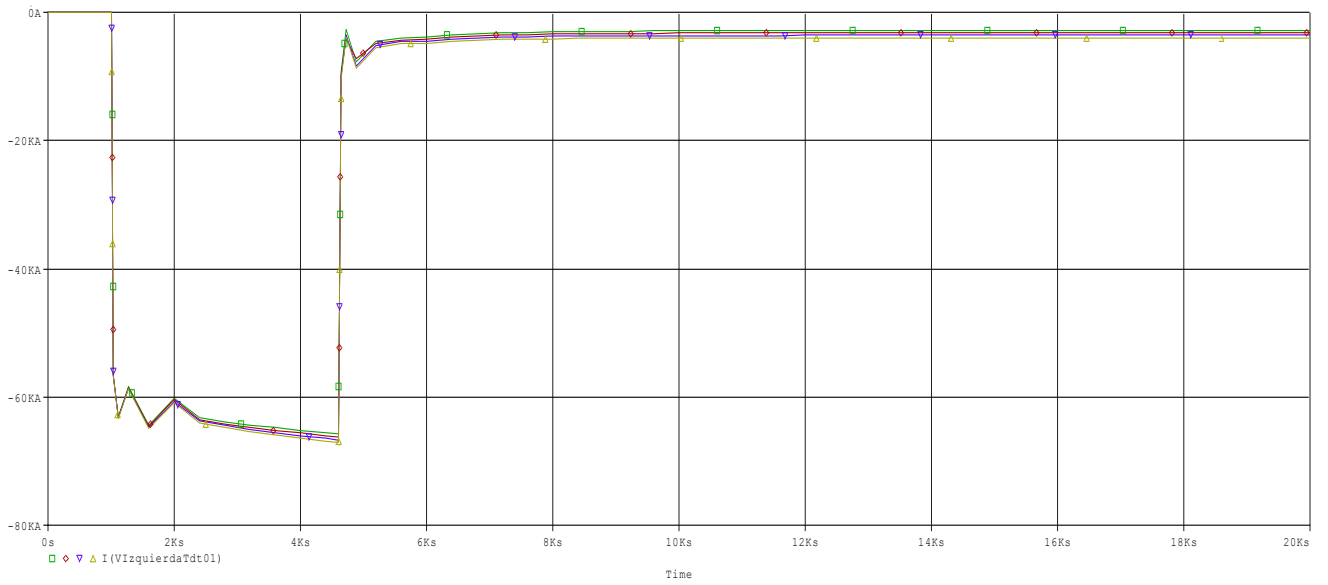


Figura 4-27 Curva de flujo de calor interno dependiente del tiempo según conductividad



Caso 6.1

Conductividad = 0.035 W/ (m K)

| CELDA | Temperatura en el estacionario (K) |
|-------|------------------------------------|
| 10 | 1299,9 |
| 11 | 1287,2 |
| 20 | 1061,2 |
| 30 | 814,65 |
| 40 | 572,77 |
| 50 | 335,38 |

| Flujos de calor en el estacionario (A) | |
|--|---------|
| Interno dep. del tiempo | -2816,7 |
| Convección | 2426,5 |
| Radiación | 389,83 |

Caso 6.2

Conductividad = 0.04 W/ (m K)

| CELDA | Temperatura en el estacionario (K) |
|-------|------------------------------------|
| 10 | 1299,9 |
| 11 | 1287,3 |
| 20 | 1062 |
| 30 | 816,26 |
| 40 | 575,18 |
| 50 | 338,56 |

| Flujos de calor en el estacionario (A) | |
|--|---------|
| Interno dep. del tiempo | -3208,3 |
| Convección | 2758 |
| Radiación | 450,18 |



Caso 6.3

Conductividad = 0.045 W/ (m K)

| CELDA | Temperatura en el estacionario (K) |
|-------|------------------------------------|
| 10 | 1299,9 |
| 11 | 1287,3 |
| 20 | 1062,8 |
| 30 | 817,85 |
| 40 | 577,55 |
| 50 | 341,72 |

| Flujos de calor en el estacionario (A) | |
|--|---------|
| Interno dep. del tiempo | -3597,4 |
| Convección | 3085,7 |
| Radiación | 511,62 |

Caso 6.4

Conductividad = 0.05 W/ (m K)

| CELDA | Temperatura en el estacionario (K) |
|-------|------------------------------------|
| 10 | 1299,9 |
| 11 | 1287,3 |
| 20 | 1063,5 |
| 30 | 819,41 |
| 40 | 579,9 |
| 50 | 344,83 |

| Flujos de calor en el estacionario (A) | |
|--|--------|
| Interno dep. del tiempo | -3984 |
| Convección | 3409,9 |
| Radiación | 574,17 |



4.4 Resultados.

A la hora de analizar resultados existen dos posibilidades, los basados en el campo de temperaturas y los que se deducen de los flujos de calor obtenidos.

4.4.1 Régimen transitorio de temperaturas.

Analizando la respuesta transitoria de la temperatura en el medio (tanto depósito esférico como cilíndrico), se observa en todos los casos las siguientes apreciaciones:

- Comparando las temperaturas en la frontera entre el acero y el aislante (celdas 10 y 11 respectivamente), se observa un cambio de pendiente en la curva de temperaturas de la celda 11 con respecto al acero (celda 10). Además, se produce también una pequeña disminución de la amplitud y un pequeño retardo, independientemente de la conductividad elegida.
- Observando todos los casos se puede apreciar como a medida que aumenta el espesor del depósito (la celda 50 es la más exterior) se produce una disminución considerable de la amplitud de la curva de temperatura además de un retardo con respecto a la de la celda anterior. Todo ello es debido a una continua disminución de la pendiente de las curvas de temperatura conforme se avanza en el espesor del depósito (sobre todo en la capa aislante).
- Además, analizando las curvas de temperatura para una misma celda de material aislante y las distintas conductividades, también se observa que conforme disminuye la conductividad la curva se retrasa en el tiempo y su amplitud disminuye (sobre todo en la región transitoria).
- Por último, se aprecia que la curva de la celda 50 (exterior del depósito) tiene muy poca pendiente, casi plana, debido al efecto que causa el material aislante en el depósito (y que es el deseado).

4.4.2 Régimen estacionario de temperaturas.

A continuación, se procede a analizar la variación de temperatura de la capa superficial del depósito (celda 50) una vez que se ha alcanzado el régimen estacionario (en este caso, transcurridos 20000 segundos). Se han indicado las temperaturas para los tres casos de condición de contorno en el exterior y para cada una de las conductividades del aislante elegidas.



Depósito esférico.

| Condición de contorno exterior | Conductividad (W/m K) | Temperatura celda 50 (K) |
|--------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Convección | 0,035 | 337,6 |
| | 0,04 | 341,2 |
| | 0,045 | 344,78 |
| | 0,05 | 348,33 |
| Radiación | 0,035 | 413,54 |
| | 0,04 | 422,34 |
| | 0,045 | 430,49 |
| | 0,05 | 438,08 |
| Convección + Radiación | 0,035 | 334,1 |
| | 0,04 | 337,17 |
| | 0,045 | 340,22 |
| | 0,05 | 343,23 |

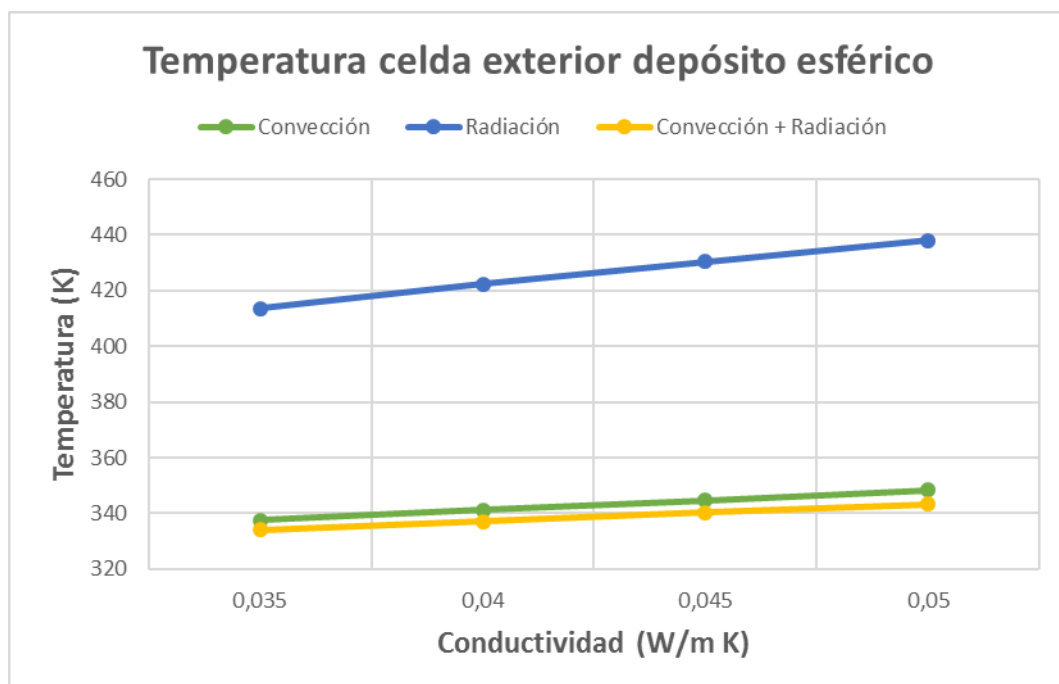


Figura 4-28 Temperatura estacionaria celda exterior depósito esférico



Depósito cilíndrico.

| Condición de contorno exterior | Conductividad (W/m K) | Temperatura celda 50 (K) |
|--------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| <i>Convección</i> | 0,035 | 339,02 |
| | 0,04 | 342,76 |
| | 0,045 | 346,46 |
| | 0,05 | 350,14 |
| <i>Radiación</i> | 0,035 | 416,42 |
| | 0,04 | 425,35 |
| | 0,045 | 433,61 |
| | 0,05 | 441,3 |
| <i>Convección + Radiación</i> | 0,035 | 335,38 |
| | 0,04 | 338,56 |
| | 0,045 | 341,72 |
| | 0,05 | 344,83 |

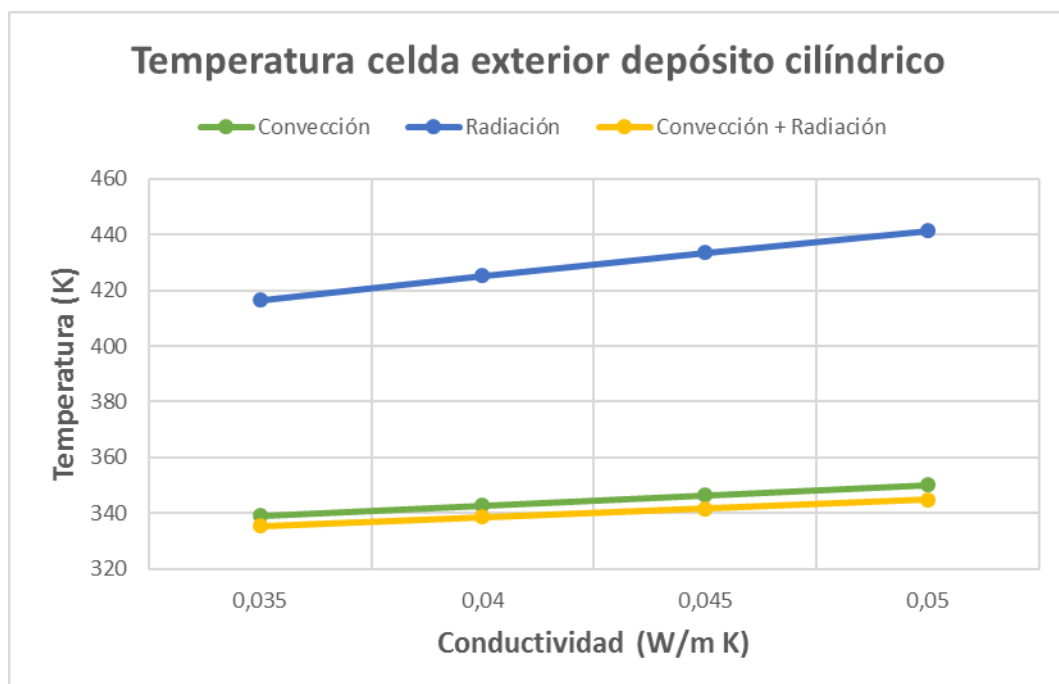


Figura 4-29 Temperatura estacionaria celda exterior depósito cilíndrico



Análisis.

Contemplando los resultados y gráficas que se obtienen se deduce en todos los casos estudiados que para la conductividad más baja del aislante se obtiene la temperatura más cercana a la temperatura ambiente fijada (300 K).

Así mismo, también se observa que las temperaturas que se obtienen en la celda exterior cuando la condición de contorno es la radiación son bastante superiores a las que resultan de sólo convección o una combinación de convección y radiación en el exterior. Esto es debido a que el flujo radiante que se produce en el exterior depende de la cuarta potencia de T, mientras que el de convección sólo depende de T:

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon\sigma \left[(T_{\text{pared}})^4 - (T_r)^4 \right]$$

$$q_{\text{conv}} = h(T_{\text{pared}} - T_{\infty})$$

Todas estas apreciaciones anteriores se cumplen en los dos tipos de depósitos estudiados (esférico y cilíndrico).

También hay una pequeña variación de temperaturas para una misma conductividad según sea el tipo de depósito. Esto es así porque en ambas geometrías no hay linealidad en el valor de las resistencias térmicas. En el caso cilíndrico la resistencia térmica del medio depende de la posición r y en el esférico de r^2 . Esto se debe a que ambas geometrías tienen distintas secciones de paso.

Comparando los resultados de temperatura para ambos tipos de depósitos y para una misma conductividad (0.035 W/m K) según el tipo de condición exterior, se obtiene la Figura 4-30. En ella no se observan grandes diferencias de temperatura entre ambos depósitos para una misma conductividad y condición de contorno exterior. Por el contrario, sí se aprecia una gran variación de temperaturas cuando la condición de contorno es la radiación, tal y como se ha visto anteriormente.



Capítulo 4. Casos simulados y Resultados.

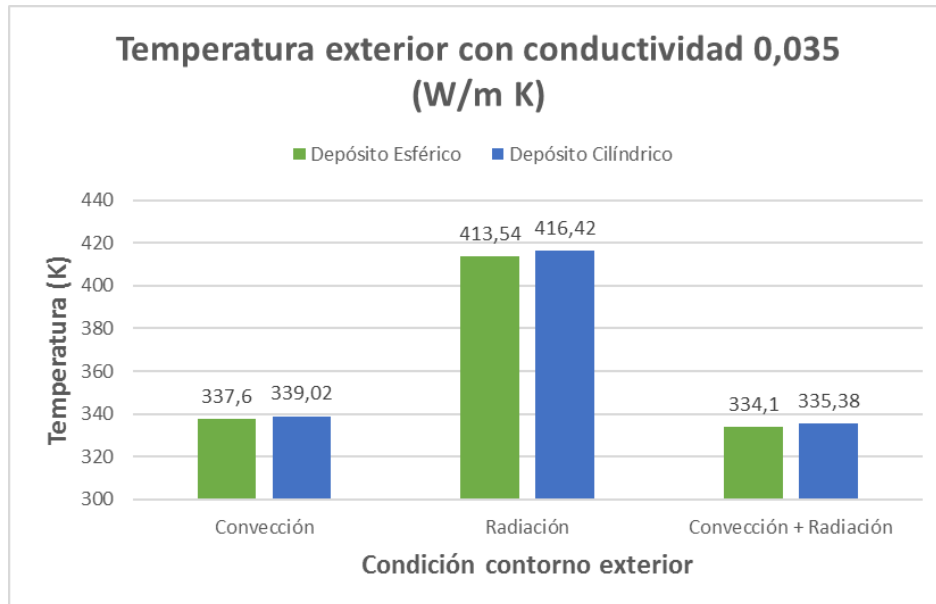


Figura 4-30 Comparación de temperaturas de los dos tipos de depósito para una conductividad fija

Si por el contrario lo que se compara es la temperatura de ambos tipos de depósitos para una misma condición exterior de contorno (convección + radiación) frente a los distintos valores de conductividad, lo que se obtiene es la Figura 4-31. En ella tampoco se observa ninguna diferencia apreciable entre ambos depósitos. Sí se aprecia que conforme aumenta la conductividad del aislante aumenta la temperatura exterior del depósito, como se vio antes.

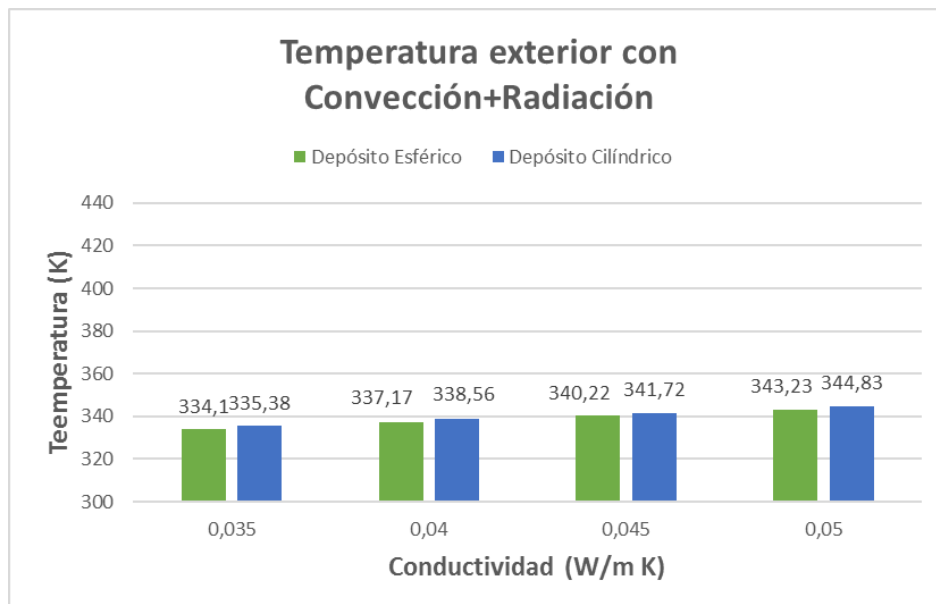


Figura 4-31 Comparación de temperaturas de los dos tipos de depósito para una misma condición de contorno exterior



4.4.3 Régimen transitorio de flujos de calor.

Si ahora se analiza la respuesta transitoria de los flujos de calor (tanto el que produce la variación temporal de la temperatura interior como los externos de convección o radiación o ambos combinados) para ambos tipos de depósitos, se deduce lo siguiente:

- Se observa un pulso de gran amplitud en el flujo de calor interno de la temperatura dependiente del tiempo durante el periodo en que la temperatura se eleva desde los 300 a los 1300 K (aproximadamente durante 3600 segundos). Después se estabiliza hasta que alcanza su valor estacionario.
- Se puede comprobar como en estado estacionario el flujo interno que produce la temperatura dependiente del tiempo es igual en módulo al flujo exterior del depósito (ya sea de sólo convección, sólo radiación o una combinación de ambos).
- También se aprecia cómo al aumentar la conductividad aumenta el módulo tanto del flujo interno como del externo en ambos tipos de depósito.
- Cuando en el exterior hay una combinación de convección y radiación, el aporte del flujo de radiación es considerablemente menor que el de convección (en ambos tipos de depósitos).

4.4.4 Régimen estacionario de flujos de calor.

A continuación, se procede a analizar la variación de los flujos de calor una vez que se ha alcanzado el régimen estacionario (transcurridos 20000 segundos). Se han indicado los flujos de calor para los tres casos de condición de contorno en el exterior y para cada una de las conductividades del aislante elegidas.



Depósito esférico.

| Condición de contorno exterior | Conductividad (W/m K) | Flujo de calor (W/m ²) | | | | |
|--------------------------------|-----------------------|------------------------------------|------------|-----------|----------------------|---------------------|
| | | Interno dep. tiempo | Convección | Radiación | Convección combinada | Radiación combinada |
| Convección | 0,035 | -5893,1 | 5892,3 | | | |
| | 0,04 | -6709,3 | 6709,1 | | | |
| | 0,045 | -7519,6 | 7519,6 | | | |
| | 0,05 | -8324 | 8323,9 | | | |
| Radiación | 0,035 | -5428,7 | | 5426,5 | | |
| | 0,04 | -6141,7 | | 6141 | | |
| | 0,045 | -6845 | | 6844,8 | | |
| | 0,05 | -7539 | | 7538,9 | | |
| Convección + Radiación | 0,035 | -5914,5 | | | 5098,2 | 815,6 |
| | 0,04 | -6737,5 | | | 5795,8 | 941,53 |
| | 0,045 | -7555,5 | | | 6485,8 | 1069,7 |
| | 0,05 | -8368,6 | | | 7168,5 | 1200,1 |

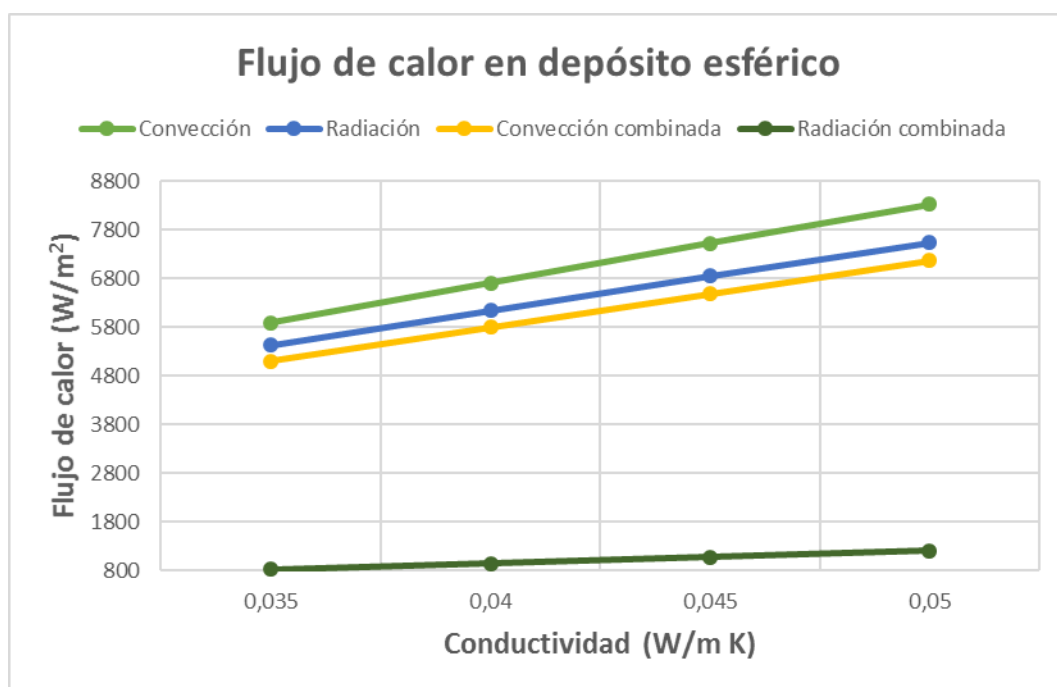


Figura 4-32 Flujo de calor externo en depósito esférico



Depósito cilíndrico.

| Condición de contorno exterior | Conductividad (W/m K) | Flujo de calor (W/m ²) | | | | |
|--------------------------------|-----------------------|------------------------------------|------------|-----------|----------------------|---------------------|
| | | Interno dep. tiempo | Convección | Radiación | Convección combinada | Radiación combinada |
| Convección | 0,035 | -2806,1 | 2805,7 | | | |
| | 0,04 | -3194,3 | 3194,2 | | | |
| | 0,045 | -3579,6 | 3579,5 | | | |
| | 0,05 | -3961,9 | 3961,9 | | | |
| Radiación | 0,035 | -2580,4 | | 2579,3 | | |
| | 0,04 | -2918,8 | | 2918,4 | | |
| | 0,045 | -3252,5 | | 3252,3 | | |
| | 0,05 | -3581,7 | | 3581,6 | | |
| Convección + Radiación | 0,035 | -2816,7 | | | 2426,5 | 389,83 |
| | 0,04 | -3208,3 | | | 2758 | 450,18 |
| | 0,045 | -3597,4 | | | 3085,7 | 511,62 |
| | 0,05 | -3984 | | | 3409,9 | 574,17 |

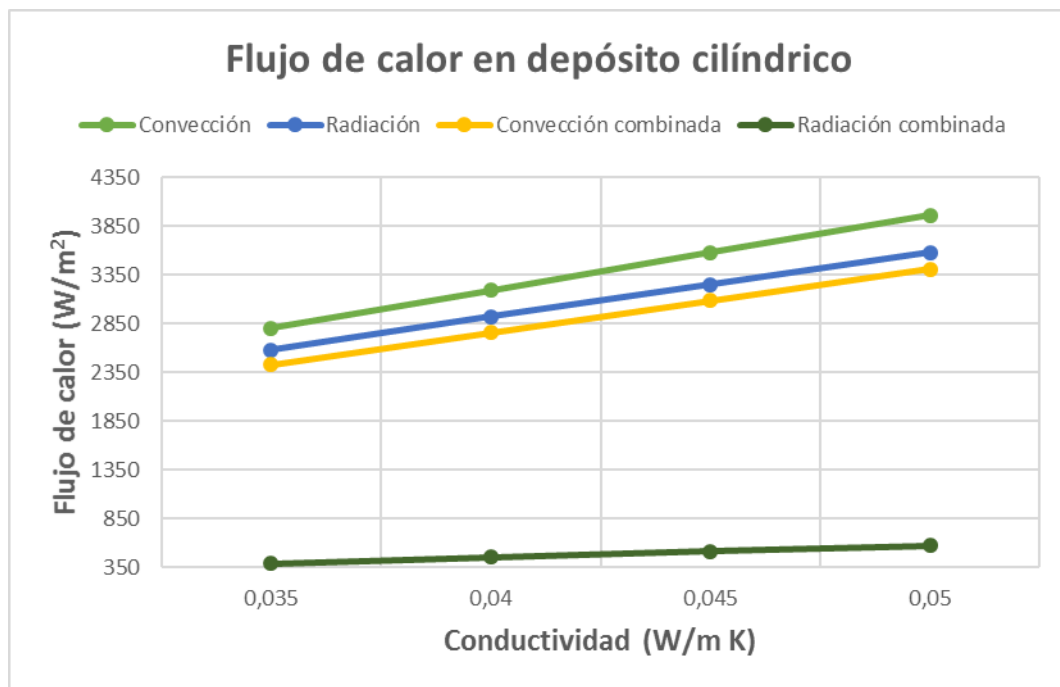


Figura 4-33 Flujo de calor externo en depósito cilíndrico



Análisis.

Al igual que ha ocurrido en el estudio realizado de la temperatura, según se aumenta el coeficiente de conductividad también aumentan los valores de flujo de calor; es decir, el aislante permite mayor intercambio de calor por metro cuadrado para una mayor conductividad.

A la vista de estos resultados se aprecia claramente cómo en el caso de la combinación simultánea de convección y radiación en el exterior, el flujo de radiación es casi despreciable frente al de convección.

Sin embargo, considerando los tres casos de condición exterior, se observa como el flujo de sólo radiación exterior es bastante inferior a las otras dos magnitudes de flujo (el de sólo convección exterior y el de convección y radiación combinada).

Todas estas conclusiones se cumplen en el estudio de los dos tipos de depósitos (esférico y cilíndrico).

Si se comparan los resultados obtenidos para cada tipo de depósito y en las mismas condiciones de contorno (ver Figura 4-32 y Figura 4-33), se intuye que hay una gran diferencia en el módulo de los flujos de calor hacia el exterior.

Por lo tanto, se procede a comparar en una gráfica los flujos de calor de ambos depósitos para una misma condición de contorno exterior (sólo convección) y frente a los distintos valores de conductividad del aislante que se han estudiado.

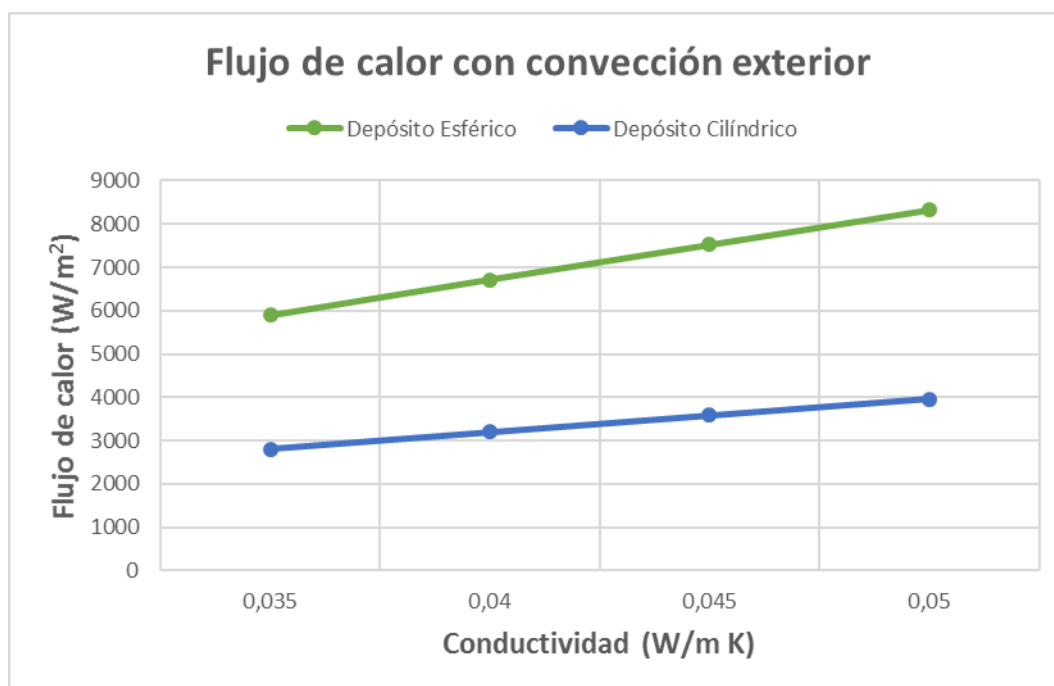


Figura 4-34 Comparación de flujos de calor de los dos tipos de depósito para una misma condición de contorno exterior



Capítulo 4. Casos simulados y Resultados.

En la Figura 4-34 se visualiza claramente la diferencia de magnitud entre el flujo de convección exterior que se produce en el depósito esférico y en el cilíndrico. En el caso del depósito esférico es mucho mayor que en el cilíndrico. Esta gran diferencia de valores es debida a que en el caso esférico la superficie de contacto con el medio exterior es mucho mayor que en el caso cilíndrico, a pesar de que los dos depósitos tengan el mismo radio interior y exterior y el mismo espesor de aislante.

Concretamente y teniendo en cuenta que las bases del depósito cilíndrico son adiabáticas (sólo transmite calor hacia el exterior a través de su superficie lateral), las dos superficies de contacto con el exterior son las siguientes:

$$S_{cilindro} = 2\pi R_{ext} H = 2\pi * 1.09 * 1 = 6.85 m^2 \quad (56)$$

$$S_{esfera} = 4\pi R_{ext}^2 = 4\pi * (1.09)^2 = 14.93m^2 \quad (57)$$

Esta diferencia de tamaño entre ambas superficies es la que influye en el flujo de calor evacuado al exterior del depósito que se observa en la Figura 4-34.



Capítulo 5. Conclusiones.

Después de haber realizado todas las simulaciones de los distintos casos a estudiar y haber realizado los análisis de esos datos obtenidos, se pueden sacar las siguientes conclusiones como un resumen de los resultados citados en el capítulo anterior.

5.1 Conclusiones relativas al campo de temperaturas.

1. Se ha comprobado que la duración del transitorio en las curvas de temperatura de ambos depósitos coincide con lo esperado según los cálculos teóricos basados en las propiedades físicas de las capas de material de los mismos.
2. Se observa en todas las curvas de temperatura de los distintos casos de estudio que conforme se avanza en el espesor de la capa de aislante se produce un retardo de la curva, así como una disminución de su amplitud amortiguando por tanto el efecto en la capa externa del depósito de los aumentos de temperatura en su interior. Sin embargo, no hay apenas variación en la capa del acero.
3. Queda demostrado que a menor conductividad del material aislante mayor será el aislamiento, es decir, la temperatura en la capa exterior del depósito será más próxima a la temperatura ambiente exterior. Esto es así porque para una misma celda del modelo y para unas mismas condiciones de contorno, conforme disminuye la conductividad la curva de temperatura sufre un retardo en el tiempo y una disminución de su amplitud.
4. Comparando los 3 tipos de condición de contorno exterior (sólo convección, sólo radiación o una combinación de ambas) para ambos depósitos, se observa que las temperaturas que se obtienen cuando la condición de contorno es la radiación son bastante superiores a las que resultan de los otros dos tipos de condición. Esto es debido a que el flujo radiante que se produce en el exterior depende de la cuarta potencia de T , mientras que el de convección sólo depende de T .
5. En cuanto al campo de temperaturas se observa una leve diferencia entre los dos tipos de depósito debido a que en el caso cilíndrico la resistencia térmica del medio depende de la posición r y en el esférico de r^2 .

5.2 Conclusiones relativas a los flujos de calor.

1. En el análisis de los flujos de calor también se observa (como en el caso del campo de temperaturas) que al aumentar la conductividad del aislante aumenta el flujo de calor en el interior y en el exterior del depósito (sea radial o cilíndrico). Lo cual ratifica que a menor conductividad del aislante mayor es el aislamiento térmico que proporciona.
2. En el caso de la condición de contorno exterior combinada de convección + radiación, la aportación del flujo radiante es prácticamente despreciable frente al de convección. Esto es así porque los dos tipos de depósito estudiados no tienen un acabado con una capa de material de mayor emisividad que la que tiene el aislante escogido.




Capítulo 5. Conclusiones.

3. Comparando los 3 tipos de condición de contorno exterior, también en el análisis de flujos se observa cómo el de sólo radiación es bastante menor que los otros dos. Como ya se ha dicho esto es debido a su dependencia de la cuarta potencia de T frente a la dependencia simple de T en la convección.
4. Por último, comparando los flujos entre ambos tipos de depósito se constata que en el caso cilíndrico los flujos son mucho menores que en el caso esférico. Esto es consecuencia del diferente tamaño de las superficies de contacto que ofrecen ambos.



Capítulo 6. Bibliografía.

- ISACHENKO, V. OSIPOVA, V. SUKOMEL, A. *Heat transfer. (traducción) Transmisión del calor.* Marcombo. 1973. ISBN 84-267-0239-2.
- MILLS, A.F. *Heat Transfer.* Second edition. Prentice Hall. 1999. ISBN 0-13-947624-5.
- CHAPMAN, Alan J. *Transmisión del calor.* 3ª Edición. Bellisco. 1984. ISBN 84-85-198-42-5.
- ALHAMA LÓPEZ, Francisco. DEL CERRO VELAZQUEZ, Francisco. *Simulación y diseño de problemas de conducción térmica con PROCCA-09.* 1ª Edición. 2010. UM. ISBN 978-8371-060-2010.
- ALHAMA, Iván. DEL CERRO, Francisco. *Prácticas de transmisión del calor con el programa PROCCA_09.* 1ª Edición. 2013. UPCT. ISBN 978-84-940692-2-2.
- GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, Carlos. HORNO MONTIJANO, José. *Modelos en Red de Sistemas Dinámicos.* ISBN 84-404-4752-3.
- GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ y col. *Network Simulation Method.* Research Signpost Ed. India. 2002. ISBN 81-7736-092-2.
- WEIGAND, Bernhard. *Analytical Methods for Heat Transfer and Fluid Flow Problems.* Springer. 2004. ISBN 3-540-22247-2.
- HOLMAN, J. P. *Heat transfer.* 5º Ed. McGraw-Hill. 1981.
- *PSPICE, versión 6.0.* Microsim Corporation. California. 1994.
- *PSPICE User's Guide.* Cadence Design Systems. 2ª Edición. Mayo 2000.
- <http://www.rockwool.es/rockwool+peninsular/proceso+de+fabricaci%C3%B3n>
Proceso de fabricación de la lana de roca.
- <http://www.erca.es/web/aislamiento-termico/>
- <http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp>
Propiedades térmicas de materiales.
- <https://www.isover.es/1-tanques-y-cisternas> Productos para aislamiento de tanques.

| | |
|---|--|
|  | SIMULACIÓN ESTACIONARIA Y TRANSITORIA DE LA TEMPERATURA EN DEPÓSITOS FORMADOS POR MATERIALES DE DISTINTA CONDUCTIVIDAD |
| | Anexo1. |

Anexo 1.

Junto a la memoria escrita de este proyecto se adjuntan los archivos informáticos empleados en este proyecto para todos los casos estudiados y que han aportado los datos que han sido sometidos a evaluación:

- Los archivos “.nsm”, que son los modelos de reticulación del sistema real sometido a estudio que genera el programa PROCCA-09.
- Los archivos “.cir” de los modelos generados por el programa PROCCA-09 para cada uno esos casos y que contienen todo el circuito eléctrico que simula el problema de transmisión de calor estudiado y las instrucciones para la representación gráfica de resultados en el software PSpice 10.5.
- Los archivos “.dat” que contienen todas las simulaciones gráficas realizadas por el software PSpice 10.5 de cada uno de ellos.