



industriales  
etsii

Escuela Técnica  
Superior  
de Ingeniería  
Industrial

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

## Estudio, usando la analogía eléctrica, del aislamiento en tanques esféricos multicapa ante variaciones de espesor y conductividad de la capa aislante

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena

**Autor:** Belén López Alemán  
**Director:** Francisco Alhama López  
**Codirector:** Juan Francisco Sánchez Pérez

Cartagena, Septiembre 2015

# Índice



---

Capítulo I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	5
<b>I.1. Introducción</b> .....	5
<b>I.2. Objetivos</b> .....	8
Capítulo II. FUNDAMENTOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR. APLICACIONES INFORMÁTICAS. ....	10
<b>II.1. Transmisión del calor por conducción</b> .....	10
<b>II.1.1. Campo de temperaturas</b> .....	10
<b>II.1.2. Gradiente de temperatura</b> .....	11
<b>II.1.3. Flujo de calor. Ley de Fourier.</b> ....	12
<b>II.1.4. Conductividad térmica</b> .....	14
<b>II.1.5. Ecuación diferencial de la conducción</b> .....	15
<b>II.1.6. Condiciones de unicidad en la conducción del calor</b> .....	18
<b>II.2. CONDUCCIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO</b> .....	20
<b>II.2.1. Transmisión del calor a través de una placa</b> .....	20
<b>II.2.2. Transmisión del calor a través de geometrías cilíndricas y esféricas</b> .....	23
<b>II.2.3. Analogía eléctrica de la conducción</b> .....	24
<b>II.3. MÉTODO DE SIMULACIÓN POR REDES</b> .....	25
<b>II.3.1. Idea del método. Tipos de monopuertas.</b> .....	25
<b>II.4. EL SOFTWARE PSPICE- ORCAD</b> .....	28
<b>II.4.1. Introducción y aplicaciones</b> .....	28
<b>II.4.2. Simulación. Presentación de resultados</b> .....	30
<b>II.5. EL PROGRAMA C#</b> .....	31
<b>II.6. EL MÉTODO DE SIMULACIÓN POR REDES FRENTE A LA ANALOGÍA TERMOELÉCTRICA CLÁSICA</b> .....	33
Capítulo III. FUNCIONAMIENTO DE PROCCA-09 .....	34
<b>III.1. ESTRUCTURA DEL PROGRAMA PROCCA-09</b> .....	34
<b>III.2. CREACIÓN DE ARCHIVOS DE MODELOS</b> .....	35
<b>III.2.1. Presentación del programa</b> .....	35
<b>III.2.1.1. Descripción del módulo CONCBA</b> .....	36
<b>III.3. CRITERIOS PARA LA NUMERACIÓN DE CELDAS, NODOS Y ELEMENTOS DEL MODELO</b> 42	
<b>III.4. ESTRUCTURA DE LOS ARCHIVOS DE TEXTO DE MODELOS</b> .....	44
<b>III.5. PANTALLAS DE PRESENTACIÓN DE RESULTADOS</b> .....	48
Capítulo IV. ESCENARIOS Y RESULTADOS.....	51
<b>IV.1 DEPÓSITO ESFÉRICO</b> .....	53
<b>IV.1.1. Esfera de Material Aislante Lana de Vidrio</b> .....	55
<b>Escenario e1</b> .....	56

Escenario e2.....	57
Escenario e3.....	58
Escenario e4.....	59
Escenario e5.....	60
Escenario e6.....	61
Escenario e7.....	62
Escenario e8.....	63
Escenario e9.....	64
Escenario e10.....	65
Escenario e11.....	66
Escenario e12.....	67
IV.1.2. Esfera de Material Aislante Lana de Roca .....	68
Escenario e13.....	69
Escenario e14.....	70
Escenario e15.....	71
Escenario e16.....	72
Escenario e17.....	73
Escenario e18.....	74
Escenario e19.....	75
Escenario e20.....	76
Escenario e21.....	77
Escenario e22.....	78
Escenario e23.....	79
Escenario e24.....	80
IV.1.3. Esfera de Material Aislante Espuma de Poliuretano .....	81
Escenario e25.....	82
Escenario e26.....	83
Escenario e27.....	84
Escenario e28.....	85
Escenario e29.....	86
Escenario e30.....	87
Escenario e31.....	88
Escenario e32.....	89
Escenario e33.....	90
Escenario e34.....	91
Escenario e35.....	92
Escenario e36.....	93
<b>IV.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>94</b>

<b>IV. 2.1. Temperatura</b> .....	94
IV.2.1.1 Esfera de aislante de Lana de Vidrio.....	94
IV.2.1.2 Esfera de aislante de Lana de Roca .....	95
IV.2.1.3 Esfera de aislante de Espuma de Poliuretano .....	96
IV.2.1.4 Análisis de resultados de Temperatura .....	97
<b>IV. 2.2. Flujo de Calor</b> .....	99
IV.2.2.1 Esfera de aislante de Lana de Vidrio.....	99
IV.2.2.2 Esfera de aislante de Lana de Roca .....	100
IV.2.2.3 Esfera de aislante de Espuma de Poliuretano .....	101
IV.2.2.4 Análisis de resultados de Flujo de Calor .....	102
Capítulo V. CONCLUSIONES.....	104
<b>V.1.SOBRE EL SOFTWARE</b> .....	104
<b>V.2. SOBRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS</b> .....	104
Capítulo VI. BIBLIOGRAFÍA .....	106
<b>VI.1. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	106
<b>VI.2. BIBLIOGRAFÍA DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN</b> .....	106
<b>VI.3. LISTA BIBLIOGRÁFICA</b> .....	107



	<p style="text-align: center;"><b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b></p>	
<p style="text-align: center;"><b>Capítulo I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS</b></p>		<p style="text-align: right;"><b>FECHA: 09/2015</b></p>	

# Capítulo I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

---

## I.1. Introducción

---

Hoy en día el aislamiento de tanques esféricos multicapa es un problema de gran interés en la industria química y energética en general. En la mayoría de estos tanques se encierran fluidos de sustancias peligrosas y/o a altas temperaturas que pueden suponer un riesgo para el entorno exterior. Es por esto, 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 tanques, 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 caso.



Siempre que existe una diferencia de temperatura, la energía se transfiere de la región de mayor temperatura a la de temperatura más baja; 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 transferencia térmica.

Para realizar un análisis completo de la transferencia de calor debemos considerar que la energía calórica o térmica puede ser transferida por diferentes mecanismos de transferencia, 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 y proyecto 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.

- Por conducción

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

	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS</b>		<b>FECHA: 09/2015</b>	

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.

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.

- 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.

- 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.

Nuestra 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 transferencia de calor que se lleva a cabo en las distintas capas de un tanque esférico a partir de la caracterización de la capa aislante en función del binomio conductividad-espesor con el fin de optimizar la mayor disipación de calor de la superficie del tanque.

	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS</b>		<b>FECHA: 09/2015</b>	

El medio estará formado por varias capas, una de las cuales será la capa térmicamente no conductora (o aislante), mientras que las otras tendrán 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 simulados en el programa PROCCA-09 desarrollado tomando como base el programa de simulación de circuitos Pspice (u Orcad), Matlab, Excel y el programa C#. La elección de llevar a cabo el proyecto con este programa ha sido tomada debido a que este tipo de problema no podemos resolverlo 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 ó 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.

Tras esta introducción, se expondrán los objetivos del proyecto (Capítulo I), una breve reseña al problema de transmisión de calor y los modelos a utilizar (Capítulo II), una descripción del programa PROCCA-09 (Capítulo III), la simulación numérica de los diferentes Escenarios propuestos



	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS</b>		<b>FECHA: 09/2015</b>	

y el tratamiento de los resultados (Capítulo IV) y, por último, las conclusiones sustraídas del estudio (Capítulo V). Para finalizar, se enumerará la bibliografía utilizada en la redacción del mismo.

## I.2. Objetivos

Estudiar la distribución del flujo de calor en recipientes esféricos en función del binomio conductividad-espesor de la capa material aislante a partir de modelos en red

Este estudio tiene como objetivo, ampliar los conocimientos de transmisión del calor adquiridos en la asignatura de tercero de grado, con el fin de distinguir la capacidad para solucionar problemas de distribución de flujo de calor que tienen los métodos numéricos de elementos finitos que desarrollamos en clase, frente a los modelos en red que pueden ser desarrollados mediante programas informáticos.



Considerando una esfera hueca en la que se introducirá una sustancia a determinada temperatura, caracterizaremos las condiciones de contorno mediante dispositivos eléctricos adecuados. En nuestro caso al estudiar el parámetro espesor-conductividad en coordenadas esféricas evaluaremos el flujo de calor en dirección radial y su variación en función de dichos parámetros. Las distintas variables van a ser simuladas con el fin de conocer como se distribuye el flujo de calor a través de la pared multicapa.

Aprender a manejar y controlar el programa PROCCA-09 que resuelve modelos en red en 2-D

Como ya hemos mencionado anteriormente llevaremos a cabo el estudio utilizando los modelos diseñados mediante el método de simulación por redes, MESIR, simulando los distintos casos en el programa PROCCA-09, que ha resultado muy eficiente para el análisis de problemas de transmisión de calor, con el fin de controlar dicho programa para futuros usos relacionados con éste u otros modelos que tengan la posibilidad de ser resueltos mediante modelos en red.



Optimización del modelo para conseguir la mejor distribución de las capas y sus características más favorables

El principal objetivo de este proyecto trata de conseguir caracterizar la transferencia de calor que se lleva a cabo en las distintas capas de un tanque esférico. Se va a estudiar este flujo en función de las conductividades y el espesor de la capa de aislante del recipiente con el fin de investigar cual de los mecanismos optimizar para obtener una mayor disipación de calor de la superficie del tanque. Compondremos cada uno de los medios con diferentes capas, una de las cuales suele ser la capa térmicamente no conductora (o aislante), mientras que las otras tendrán otras propiedades mecánicas o químicas dependiendo de cada diseño.

	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS</b>		<b>FECHA: 09/2015</b>	

Se simularán los modelos globales estudiando la influencia de:

- La temperatura exterior e interior del recipiente esférico.
- El coeficiente de conductividad de cada una de las capas que formarán el tanque.
- El espesor de la capa de aislante térmico.
- Las condiciones de contorno

	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo II. FUNDAMENTOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR. APLICACIONES INFORMÁTICAS</b>		<b>FECHA: 09/2015</b>	

# Capítulo II. FUNDAMENTOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR. APLICACIONES INFORMÁTICAS.

---

## II.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 la 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.

### II.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 (II.1).

$$t = f(x, y, z, \tau) \quad (II.1)$$

La ecuación (II.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 (II.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 (II.2). Este caso es el que se va a analizar en el presente proyecto y es por ello el que se va a explicar más detenidamente.

	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo II. FUNDAMENTOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR. APLICACIONES INFORMÁTICAS</b>		<b>FECHA: 09/2015</b>	

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

Las ecuaciones (II.1) y (II.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 (II.3).

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

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

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

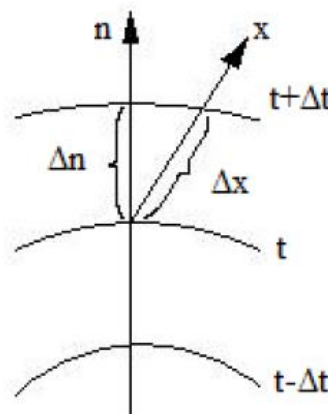
### II.1.2. Gradiente de temperatura

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 II.1 representa isotermas cuya temperatura difiere en  $\Delta t$ .



**Figura II.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

	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo II. FUNDAMENTOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR. APLICACIONES INFORMÁTICAS</b>		<b>FECHA: 09/2015</b>	

de las temperaturas crecientes. Numéricamente es igual a la derivada de la temperatura en esa dirección como se muestra en la expresión (II.5):

$$\text{grad } t = n_0 \frac{\partial t}{\partial n} \quad (\text{II.5})$$

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  $\text{grad } t$  sobre los ejes coordenados  $ox$ ,  $oy$  y  $oz$  son las que se expresan en las expresiones (II.6).

$$\begin{aligned} (\text{grad } t)_x &= \frac{\partial t}{\partial n} \cos(n, x) = \frac{\partial t}{\partial x} \\ (\text{grad } t)_y &= \frac{\partial t}{\partial n} \cos(n, y) = \frac{\partial t}{\partial y} \\ (\text{grad } t)_z &= \frac{\partial t}{\partial n} \cos(n, z) = \frac{\partial t}{\partial z} \end{aligned} \quad (\text{II.6})$$

### II.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  $dQ_\tau$  que pasa a través de un elemento de superficie isoterma  $dF$  en el intervalo de tiempo  $d\tau$  es proporcional al gradiente de temperatura  $\frac{\partial t}{\partial n}$  según (II.7).



$$dQ_\tau = -n_0 \lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF d\tau, J \quad (\text{II.7})$$

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

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

$$q = \frac{dQ_\tau}{dF d\tau} \quad (\text{II.8})$$

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

	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo II. FUNDAMENTOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR. APLICACIONES INFORMÁTICAS</b>		<b>FECHA: 09/2015</b>	

$$q = -n_0 \lambda \frac{\partial t}{\partial n'} \text{ W/m}^2 \quad (\text{II.9})$$

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  $\text{grad } t$  tienen la misma dirección pero sentidos opuestos, lo que explica el signo menos en el segundo miembro de las ecuaciones (II.7) y (II.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 (II.10).

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n'} \text{ W/m}^2 \quad (\text{II.10})$$

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 (II.11).

$$Q = \int q dF = - \int_F \lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF, \text{ W} \quad (\text{II.11})$$

En la ecuación (II.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  $\tau$  se da por la ecuación (II.12).

$$Q_\tau = \int_0^\tau \int_F \lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF d\tau, \text{ J} \quad (\text{II.12})$$

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



$$q_t = q \cos(\varphi) = \frac{dQ_\tau}{d\tau} \frac{1}{dF} \cos(\varphi) = \frac{dQ_\tau}{d\tau} \frac{1}{dF_l} \quad (\text{II.13})$$

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

$$dQ_\tau = q_l dF_l d\tau = q dF_l \cos(\varphi) d\tau = q dF d\tau \quad (\text{II.14})$$

La cantidad total de calor que fluye a través de la superficie  $F_l$  en el tiempo  $\tau$  viene dada por la expresión (II.15).

$$Q = - \int_0^\tau \int_{F_l} \lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF d\tau, \text{ J} \quad (\text{II.15})$$

	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo II. FUNDAMENTOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR. APLICACIONES INFORMÁTICAS</b>		<b>FECHA: 09/2015</b>	

Se deduce de la ecuación (II.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 (II.6), las ecuaciones (II.16).

$$\begin{aligned} q_x &= -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \\ q_y &= -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \\ q_z &= -\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \end{aligned} \quad (II.16)$$

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

$$q = iq_x + jq_y + kq_z \quad (II.17)$$

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.

#### II.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 (II.18).

$$\lambda = \left| \frac{q}{grad\ t} \right| W/m^{\circ}C \quad (II.18)$$

Se deduce de la ecuación (II.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 (II.19).

$$\lambda = \lambda_0 [1 + b(t - t_0)] W/m^{\circ}C \quad (II.19)$$

En la ecuación (II.19),  $\lambda_0$  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

	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo II. FUNDAMENTOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR. APLICACIONES INFORMÁTICAS</b>		<b>FECHA: 09/2015</b>	

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°C) se llaman aislantes térmicos.

### II.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 generalmente en la forma  $q_v=f(x,y,z,\tau)$ ] 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 (II.20).

$$dQ_1 + dQ_2 = dQ, J \quad (II.20)$$



En donde:

$dQ_1$  = cantidad de calor introducido en el elemento de volumen  $dv$  por conducción en el intervalo  $dt$ ;

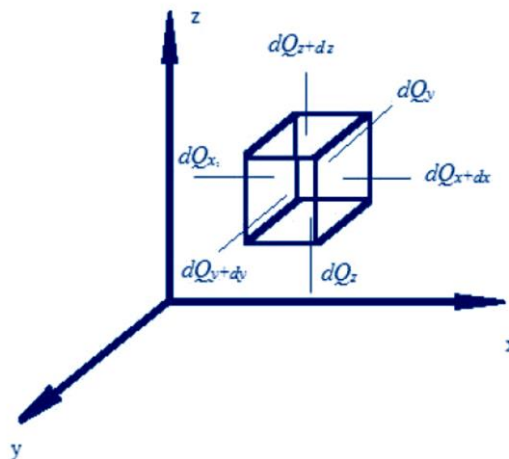
$dQ_2$  = cantidad de calor liberada por las fuentes de calor internas en el intervalo  $dt$ ;

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



**Figura II.2. Balance de energía**

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



**Figura II.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 (II.21).

$$dQ_{x+dx} = q_{x+dx} dydzd\tau \quad (II.21)$$

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 (II.22).

$$dQ_{x1} = dQ_x - dQ_{x+dx} = q_x dydzd\tau - q_{x+dx} dydzd\tau \quad (II.22)$$

	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo II. FUNDAMENTOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR. APLICACIONES INFORMÁTICAS</b>			<b>FECHA: 09/2015</b>

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

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

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

$$dQ_{x1} + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx + \frac{\partial^2 q_x}{\partial x^2} \frac{dx^2}{2!} + \dots \quad (\text{II.23})$$

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

$$dQ_{x1} = \frac{\partial q_x}{\partial x} dx dy dz d\tau \quad (\text{II.24})$$

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 calcula la ecuación (II.25).

$$dQ_{x1} = - \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) dx dy dz d\tau \quad (\text{II.25})$$

Para hallar el segundo término del primer miembro de la ecuación (II.20),  $dQ_2$ , se representa la capacidad de las fuentes internas de calor 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 (II.26).

$$dQ_2 = q_v dv d\tau \quad (\text{II.26})$$

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



$$dQ = c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau dv \quad (\text{II.27})$$

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

Si se sustituyen en la ecuación (II.27) las proyecciones del vector densidad de flujo, se obtiene la ecuación (II.28).

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

La ecuación (II.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.

	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo II. FUNDAMENTOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR. APLICACIONES INFORMÁTICAS</b>		<b>FECHA: 09/2015</b>	

Se puede sustituir la relación  $\lambda/c\rho$  por un parámetro  $\alpha$  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 como la velocidad de variación de la temperatura  $\partial t / \partial \tau$  en cada punto del sólido es tanto mayor cuanto mayor sea la difusividad térmica  $\alpha$ .

Si se considera que no hay fuentes de calor internas ( $q_v = 0$ ) y se desarrolla la ecuación, queda la expresión (II.29).

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

Los problemas estudiados con 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. Así, las ecuaciones anteriores (3D) se simplifican para estas coordenadas.

### II.1.6. Condiciones de unicidad en la conducción del calor



La ecuación diferencial de la conducción describe el fenómeno general pero hay que completarla con las expresiones matemáticas de las propiedades particulares de cada proceso específico, es decir, con sus condiciones de unicidad.

Estas condiciones incluyen:

- Condiciones geométricas características de la forma y tamaño del cuerpo donde se da la conducción.
- Propiedades físicas del sólido.
- Condiciones iniciales.
- Condiciones de contorno que describen las interacciones del cuerpo con su medio.

Las condiciones de contorno pueden darse de distintas formas:

- a) *Condiciones de contorno de primera especie.* Se da la distribución de temperaturas en la superficie del cuerpo en cada instante.
- b) *Condiciones de contorno de segunda especie.* En este caso se da el valor de la densidad de flujo de calor en cada punto de la superficie del cuerpo y en cada instante.
- c) *Condiciones de contorno de tercera especie.* Se da la temperatura del medio y la ley que gobierna el intercambio de calor entre la superficie del cuerpo y el medio. Este tipo de condición de contorno describe la ley de transmisión del calor entre la superficie y el medio que le rodea durante el calentamiento y el enfriamiento de un cuerpo, procesos descritos por la ley de Newton. Según esta ley, la cantidad de calor extraída de la superficie de un cuerpo por unidad de área en la unidad de tiempo es proporcional a la diferencia entre su temperatura  $t_w$  y la del medio exterior  $t_f$ , según la expresión II.30.

	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo II. FUNDAMENTOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR. APLICACIONES INFORMÁTICAS</b>		<b>FECHA: 09/2015</b>	

$$q = \alpha(t_w - t_f) \quad (II.30)$$

Donde  $\alpha$  es un factor de proporcionalidad llamado coeficiente de transmisión superficial de calor.

El coeficiente de transmisión superficial de calor es la medida de la intensidad del transporte entre la superficie del cuerpo y el medio, numéricamente es igual a la cantidad de calor emitida o absorbida por la unidad de área en la unidad de tiempo, cuando la diferencia entre las temperaturas de la superficie y la del medio es de un grado.

De acuerdo con la ley de la conservación de la energía, la cantidad de calor emitida o absorbida por una unidad de área en la unidad de tiempo es igual a la cantidad de calor llegada a la unidad de área de dicha superficie por conducción procedente de las fuentes internas de calor como se muestra en (II.31).

$$\alpha(t_w - t_f) = -\lambda \left( \frac{\partial t}{\partial n} \right)_w \quad (II.31)$$

En donde  $n$  es la normal a la superficie del cuerpo y el subíndice  $w$  indica que la temperatura y el gradiente se toman sobre la superficie (para  $n=0$ ).

Finalmente, las condiciones de contorno de tercera especie se escriben con la expresión (II.32).

$$\left( \frac{\partial t}{\partial n} \right)_w = -\frac{\alpha}{\lambda}(t_w - t_f) \quad (II.32)$$



El coeficiente de transmisión superficial de calor  $\alpha$  depende de un gran número de variables pero puede considerarse constante en muchos casos.

- d) *Condiciones de contorno de cuarta especie.* Definen el proceso de conducción del calor entre un cuerpo o sistema y el medio exterior. Los cuerpos se suponen en contacto perfecto (las superficies en contacto están a la misma temperatura). En las condiciones consideradas, los flujos de calor a través de las superficies en contacto son iguales (expresión II.33).

$$\lambda_1 \left( \frac{\partial t_1}{\partial n} \right)_w = \lambda_2 \left( \frac{\partial t_2}{\partial n} \right)_w \quad (II.33)$$

En los casos en que rigen las condiciones de contorno de cuarta especie, la relación entre las pendientes de las tangentes a las curvas de temperatura en los puntos de contacto de dos cuerpos o de un cuerpo y el medio es una constante:

$$\frac{\tan \varphi_1}{\tan \varphi_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = cte \quad (II.34)$$

	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo II. FUNDAMENTOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR. APLICACIONES INFORMÁTICAS</b>		<b>FECHA: 09/2015</b>	

## II.2. CONDUCCIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO

### II.2.1. Transmisión del calor a través de una placa

En estado estacionario la temperatura de un cuerpo no depende del tiempo. La ecuación diferencial de la conducción en estado estacionario es la (II.35).

$$\nabla^2 t + \frac{q_v}{\lambda} = 0 \quad (II.35)$$

En ausencia de fuentes internas de calor,  $q_v=0$ , la ecuación (II.37), se transforma en la (II.36).

$$\nabla^2 t = 0 \rightarrow \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0 \quad (II.36)$$

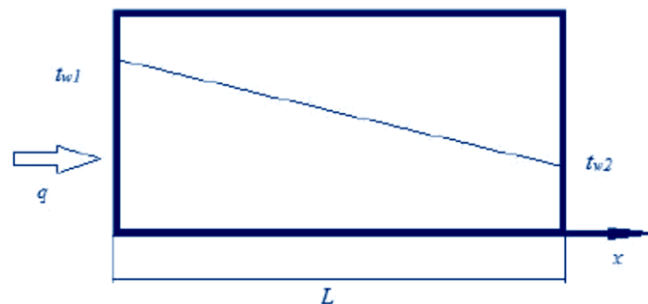
Además, si se trata de una transmisión 2D, la ecuación final será la (II.37).

$$\nabla^2 t = 0 \rightarrow \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = 0 \quad (II.37)$$

Por otro lado, si tenemos el caso unidimensional, la cosa se simplifica todavía más (II.38).

$$\nabla^2 t = 0 \rightarrow \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0 \quad (II.38)$$

Se va a considerar una placa homogénea e isotrópica, de longitud  $L$  y de conductividad térmica,  $\lambda$ , constante. Las superficies externas de la pared se van a mantener a temperatura constante  $t_{w1}$  y  $t_{w2}$ . Con estas condiciones, la temperatura sólo cambia en la dirección normal a la pared. Si se dirige el eje  $ox$  como se muestra en la figura II.4, la temperatura permanecerá constante en la dirección de los ejes  $oy$  y  $oz$ , por lo que  $\partial t / \partial y = \partial t / \partial z = 0$ .





**Figura II.4. Placa homogénea**

Entonces, la ecuación general de la conducción queda como la (II.39).

$$\nabla^2 t = 0 \rightarrow \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0 \quad (II.39)$$

Para este problema, las condiciones de contorno se formulan como en (II.40).

$$\begin{aligned} \text{para } x = 0, t &= t_{w1} \\ \text{para } x = L, t &= t_{w2} \end{aligned} \quad (II.40)$$

	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo II. FUNDAMENTOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR. APLICACIONES INFORMÁTICAS</b>		<b>FECHA: 09/2015</b>	

La ecuación (II.39) y las condiciones (II.40) dan una descripción matemática completa del problema. Su solución consiste en encontrar la distribución de temperaturas en la pared, o sea la función  $t=f(x)$ , y deducir una fórmula para determinar el flujo de calor que atraviesa la placa en la unidad de tiempo.

Mediante una doble integración de la ecuación (II.39) se halla la ley de distribución de temperaturas.

De la primera integración resulta la expresión (II.41).

$$\frac{dt}{dx} = C_1 \quad (II.41)$$

Y de la segunda, la expresión (II.42).

$$t = C_1x + C_2 \quad (II.42)$$

Si la conductividad térmica es constante, la variación de temperatura en la placa es lineal. Las constantes  $C_1$  y  $C_2$  de la ecuación (II.42) se determinan a partir de las condiciones de contorno según (II.43.)

$$\begin{aligned} \text{para } x = 0, t = t_{w1} \text{ resulta } C_2 &= t_{w1} \\ \text{para } x = L, t = t_{w2} \text{ resulta } C_1 &= -\frac{t_{w1} - t_{w2}}{L} \end{aligned} \quad (II.43)$$

Por tanto, la ecuación (II.42) se transforma en la (II.44).

$$t = t_{w1} - \frac{t_{w1} - t_{w2}}{L}x \quad (II.44)$$

Si se toma como temperatura de referencia la más pequeña de las temperaturas de la pared  $t_{w2}$ , se puede escribir la ecuación (II.44) en forma adimensional.

Se va a emplear la siguiente notación:

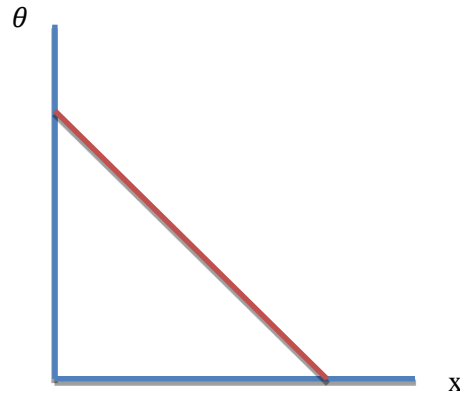
$$\begin{aligned} \Delta t &= t - t_{w2} \quad \text{caída de temperatura o exceso de temperatura;} \\ \Delta t_0 &= t_{w1} - t_{w2} \quad \text{caída total o exceso máximo de temperatura;} \end{aligned}$$

Introduciendo estas variables en la ecuación (II.44), queda la ecuación (II.45).

$$\Delta t = \Delta t_0 - \frac{\Delta t_0}{L}x \rightarrow \frac{\Delta t}{\Delta t_0} = 1 - \frac{x}{L} \rightarrow \theta = 1 - X \quad (II.45)$$

En la ecuación (II.45), se ha considerado  $\Delta t/\Delta t_0$  como el gradiente de temperatura adimensional,  $\theta$ , y  $X=x/L$  una coordenada adimensional.

La ecuación (II.45) es completamente general, es posible representar con ella la distribución de temperaturas como una línea recta única e independiente de los valores  $t_{w1}$ ,  $t_{w2}$  y  $L$  como se muestra en la figura II.5.



**Figura II.5. Campo de temperaturas adimensional en una placa**

La cantidad de calor que atraviesa la unidad de área en la unidad de tiempo en la dirección del eje ox se determina con la Ley de Fourier (II.46).

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \quad (II.46)$$

Como  $\frac{\partial t}{\partial x} = C_1 = -(t_{w1} - t_{w2})/L$ , queda la ecuación (II.47).

$$q = \frac{\lambda}{L} (t_{w1} - t_{w2}), W/m^2 \quad (II.47)$$

La relación  $\lambda/L$  ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ) se llama conductancia térmica y su inversa resistencia térmica de la pared. Ésta última representa la caída de temperaturas a través de la pared cuando el flujo de calor es la unidad. Si se conoce esta densidad de flujo de calor, se puede calcular fácilmente la cantidad total de calor transmitido a través de un área F en un intervalo de tiempo  $\tau$ , según (II.48).

$$Q = qF\tau = \frac{\lambda}{L} (t_{w1} - t_{w2})F\tau, J \quad (II.48)$$



Entonces, queda la ecuación (II.49).

$$t = t_{w1} - \frac{q}{\lambda} x \quad (II.49)$$

Los medios suelen estar formados por varias capas, una de las cuales suele ser la capa térmicamente no conductora (o aislante), situada en la zona central, mientras que las otras suelen tener otras propiedades mecánicas o químicas requeridas por el diseño.

Si se considera la conducción de calor en una placa plana compuesta por n capas homogéneas, suponiendo sus contactos perfectos y que, por tanto, las temperaturas de contacto son iguales, en cada capa se satisface la ecuación de calor, de forma que el conjunto global de ecuaciones es de la forma de la expresión (II.50).

$$\begin{aligned} q &= \frac{\lambda_1}{L_1} (t_{w1} - t_{w2}) \\ q &= \frac{\lambda_2}{L_2} (t_{w2} - t_{w3}) \end{aligned} \quad (II.50)$$

	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo II. FUNDAMENTOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR. APLICACIONES INFORMÁTICAS</b>		<b>FECHA: 09/2015</b>	

$$q = \frac{\lambda_n}{L_n} (t_{wn} - t_{w(n+1)})$$

Si se agrupan las ecuaciones y se ordenan adecuadamente, se obtiene la ecuación (II.51).

$$t_{w1} - t_{w(n+1)} = q \left( \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{L_n}{\lambda_n} \right) \quad (II.51)$$

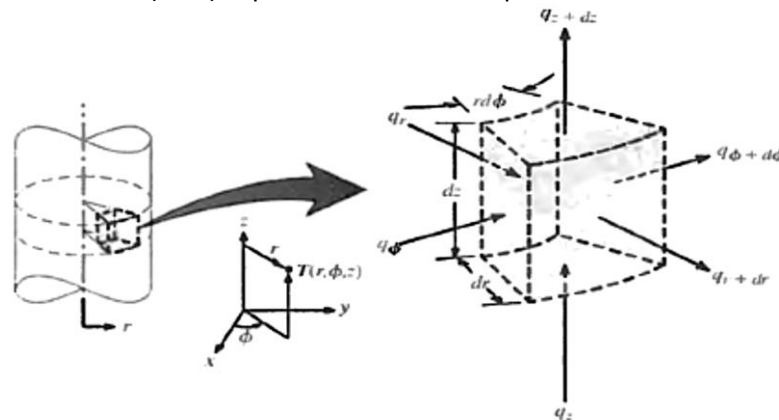
Por lo tanto, la densidad de flujo de calor es la que se obtiene con la ecuación (II.52).

$$q = \frac{t_{w1} - t_{w(n+1)}}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{L_i}{\lambda_i}}, W/m^2 \quad (II.52)$$

La magnitud  $\sum_{i=1}^{i=n} \frac{L_i}{\lambda_i}$  que es la suma de las resistencias térmicas de cada una de las capas, se llama resistencia térmica total de la placa compuesta.

### II.2.2. Transmisión del calor a través de geometrías cilíndricas y esféricas

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



**Figura II.6. Campo en geometría cilíndrica**

Expresaremos la ecuación de Fourier del siguiente modo:

$$q = -k\nabla T = -k \left( i \frac{\partial T}{\partial r} + j \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \phi} + k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (II.53)$$

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

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (II.54)$$

Si tenemos un problema de transmisión del calor con geometría esférica, aplicamos el siguiente volumen de control:



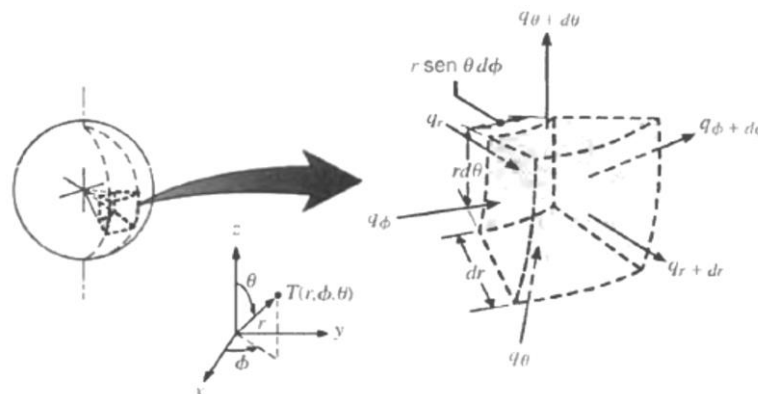


Figura II.7. Campo en geometría esférica

La expresión del balance de energía en esta geometría es la siguiente:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( k \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( k \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (II.55)$$

### II.2.3. Analogía eléctrica de la conducción

Es frecuente el uso de analogías eléctricas de procesos simples de transmisión de calor por un interés meramente académico; sencillamente porque las ecuaciones algebraicas del proceso de transporte, aplicadas a medios finitos, son exactamente iguales a las que relacionan la intensidad y la tensión (ley de Ohm) en los componentes pasivos de los circuitos eléctricos. Una amplia y detallada discusión sobre el uso de la analogía termoeléctrica, con numerosas referencias bibliográficas, puede encontrarse en Alhama [1999].

Este enfoque utiliza los conceptos desarrollados en la teoría de circuitos eléctricos y con frecuencia se llama analogía entre el flujo de calor y la electricidad. Si la transmisión de calor se considera análoga al flujo de electricidad, la combinación  $L/\lambda$  equivale a una resistencia  $R_k$  y la diferencia de temperatura es análoga a una diferencia de potencial. La ecuación (II.47) puede escribirse en forma semejante a la ley de Ohm de la teoría de circuitos eléctricos como se observa en la ecuación (II.56).



$$q = \frac{\Delta T}{R_k} \quad (II.56)$$

El recíproco de la resistencia térmica se denomina conductancia térmica  $\lambda/L$ , como ya se dijo.

Si existen varias capas, la variación de temperatura se considera entre las dos extremas y las resistencias de cada capa se considera que están en serie, expresándose entonces como muestra (II.57).

$$q = \frac{t_i - t_n}{\sum_{i=1}^{i=n} R_i} \quad (II.57)$$

Además, la analogía eléctrica puede usarse también en materiales dispuestos en paralelo.

	<p style="text-align: center;"><b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b></p>	
<p style="text-align: center;"><b>Capítulo II. FUNDAMENTOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR. APLICACIONES INFORMÁTICAS</b></p>		<p style="text-align: right;"><b>FECHA: 09/2015</b></p>	

## II.3. MÉTODO DE SIMULACIÓN POR REDES

### II.3.1. Idea del método. Tipos de monopuertas.

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.
- 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

	<p style="text-align: center;"><b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b></p>	
<p style="text-align: center;"><b>Capítulo II. FUNDAMENTOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR. APLICACIONES INFORMÁTICAS</b></p>		<p style="text-align: right;"><b>FECHA: 09/2015</b></p>	

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  $\phi$ , asociada a cada nudo, tal que la diferencia  $X_{N-N'} = \phi_N - \phi_{N'}$ , llamada fuerza, obedece 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 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 flujofuerza, 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.

### II.3.1.1. 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 (II.58) y (II.59):

	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo II. FUNDAMENTOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR. APLICACIONES INFORMÁTICAS</b>			<b>FECHA: 09/2015</b>

$$\frac{dX(t)}{dt} = R \frac{dJ(t)}{d(t)} \quad (II.58)$$

$$R = \frac{dX(t)}{dJ(t)} \quad (II.59)$$

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,  $C$  (ver expresión II.60).

$$J(t) = C \frac{dX(t)}{dt} \quad (II.60)$$



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 (II. 61),

$$C = \frac{dq}{dX} = \frac{dF_c(X)}{dX} \quad (II.61)$$

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 todo 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.

	<p style="text-align: center;"><b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b></p>	
<p style="text-align: center;"><b>Capítulo II. FUNDAMENTOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR. APLICACIONES INFORMÁTICAS</b></p>		<p style="text-align: right;"><b>FECHA: 09/2015</b></p>	

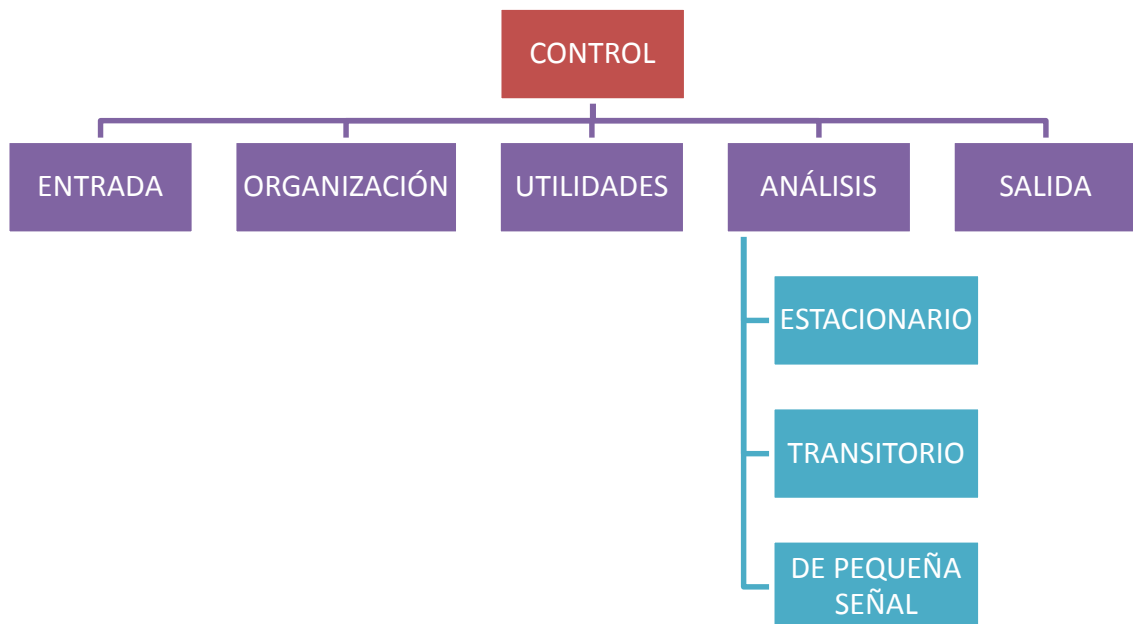
## II.4. EL SOFTWARE PSPICE- ORCAD

### II.4.1. 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.



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 II.8. 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

	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo II. FUNDAMENTOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR. APLICACIONES INFORMÁTICAS</b>		<b>FECHA: 09/2015</b>	

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:

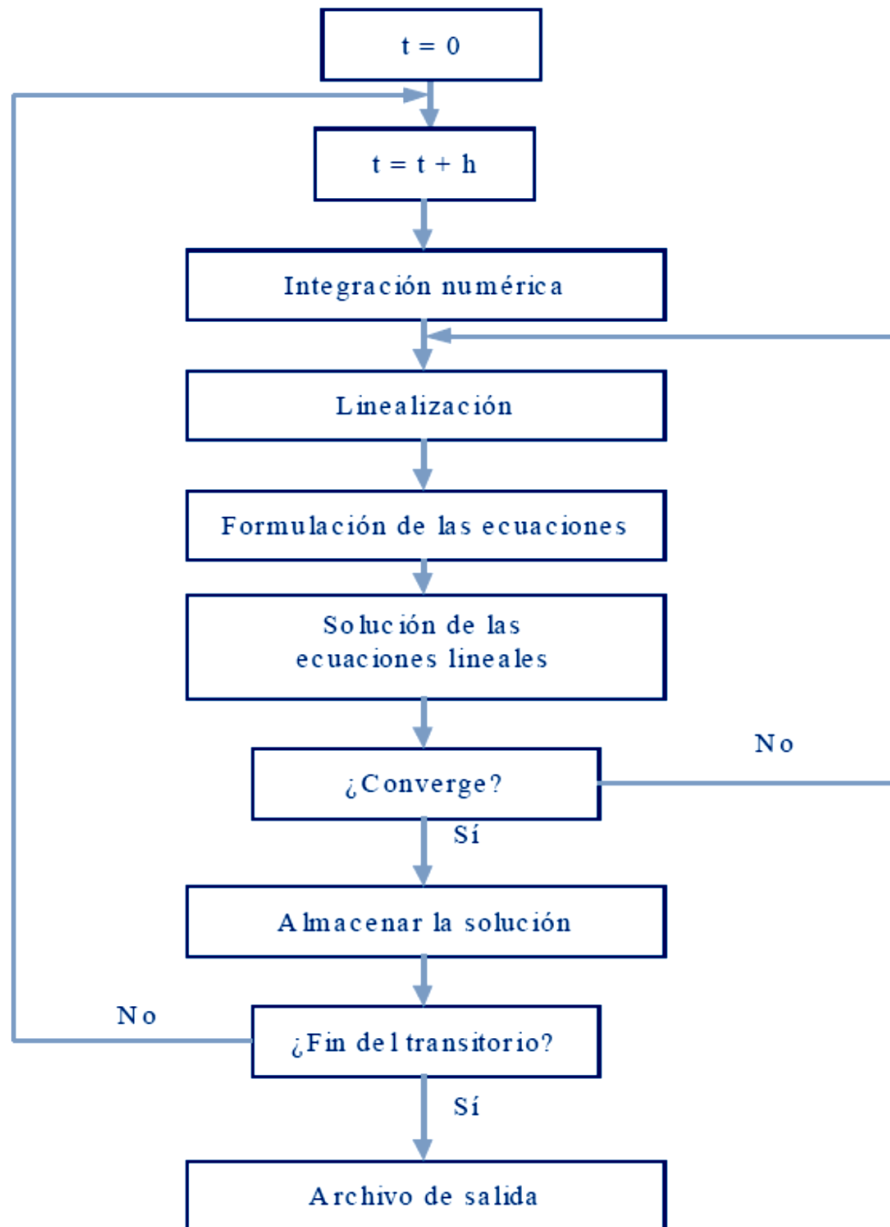
1. Formulación de las ecuaciones.
2. Solución de las ecuaciones lineales.
3. Solución de ecuaciones no lineales.
4. Integración numérica.

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,  $t_1$ ,  $t_2$ , ..., 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 monopuertas 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 "stiffstable". 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,  $t_1$ ,  $t_2$ , ..., 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 II.9. Operaciones en el análisis de circuitos**

#### **II.4.2. 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.

	<p style="text-align: center;"><b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b></p>	
<p style="text-align: center;"><b>Capítulo II. FUNDAMENTOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR. APLICACIONES INFORMÁTICAS</b></p>		<p style="text-align: right;"><b>FECHA: 09/2015</b></p>	

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.

## **II.5. 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,





	<p align="center"><b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b></p>	<p align="center"><b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b></p>	
<p align="center"><b>Capítulo II. FUNDAMENTOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR. APLICACIONES INFORMÁTICAS</b></p>		<p align="right"><b>FECHA: 09/2015</b></p>	

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:

- 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.

	<p style="text-align: center;"><b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b></p>	
<p style="text-align: center;"><b>Capítulo II. FUNDAMENTOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR. APLICACIONES INFORMÁTICAS</b></p>		<p style="text-align: right;"><b>FECHA: 09/2015</b></p>	

- 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.

## **II.6. 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 segundana 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]. Dedicar 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.

	<p style="text-align: center;"><b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b></p>	
<p style="text-align: center;"><b>Capítulo III. FUNCIONAMIENTO DE PROCCA-09</b></p>		<p style="text-align: right;"><b>FECHA: 09/2015</b></p>	

## Capítulo III. FUNCIONAMIENTO DE PROCCA-09

### III.1. ESTRUCTURA DEL PROGRAMA PROCCA-09

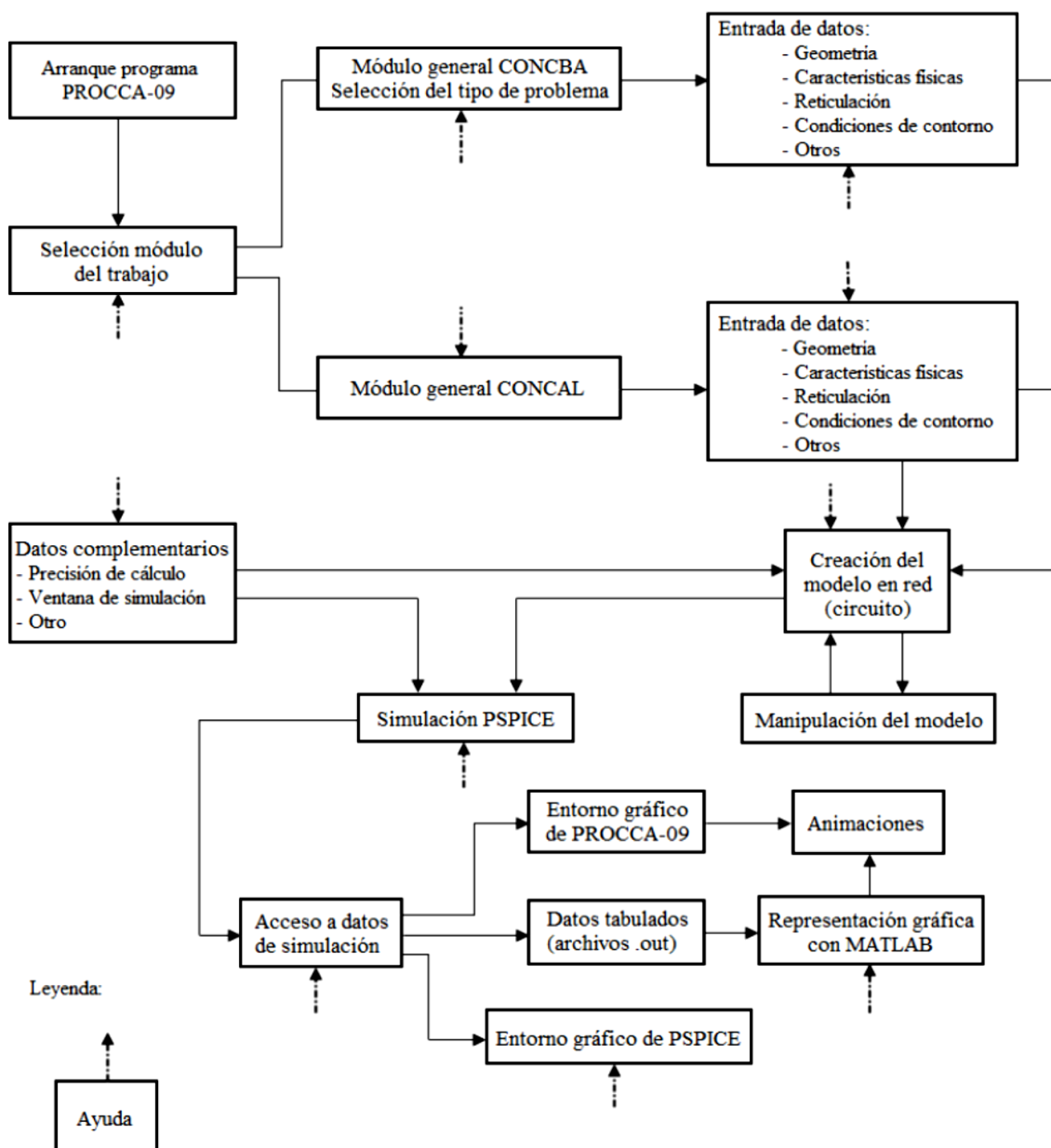
El programa PROCCA-09 es un programa comercial educativo aplicado a ciencias e ingeniería que tiene un objetivo científico y didáctico. Frente a otros programas que simplemente están orientados al cálculo y funcionan como “cajas negras” ya que su contenido es inaccesible al usuario, PROCCA-09 no solamente 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.

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 0.1 Diagrama de funcionamiento de PROCCA-09**

## III.2. CREACIÓN DE ARCHIVOS DE MODELOS

### III.2.1. Presentación del programa

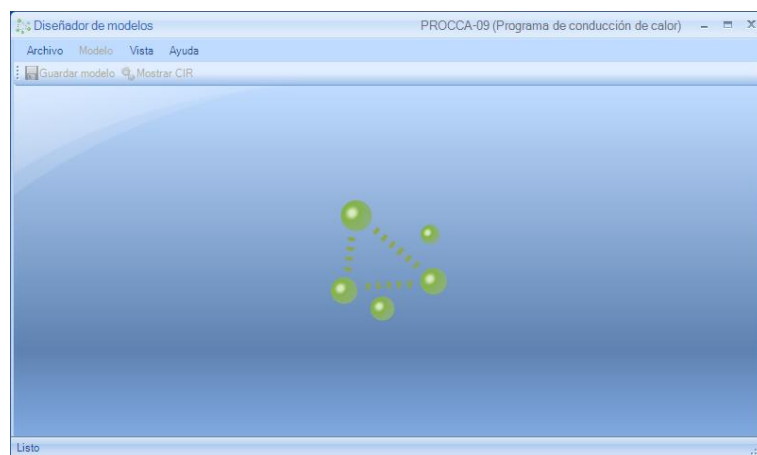
La ejecución del PROCCA-09, cuyo icono aparece en la Figura III.2, da entrada al programa por medio de la pantalla de la Figura III.3, “Diseñador de Modelos”, con la que se inicia el diseño del modelo buscado o se elije un modelo ya diseñado y archivado en el directorio. Los botones de acceso al usuario 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.

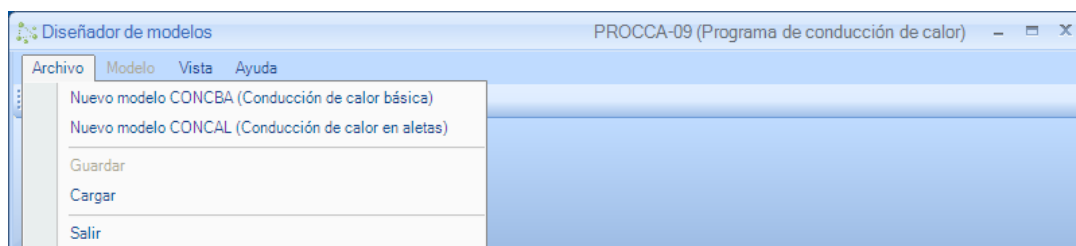


**Figura 0.2 Icono del programa PROCCA-09**

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 0.3 Pantalla de inicio del programa PROCCA-09**



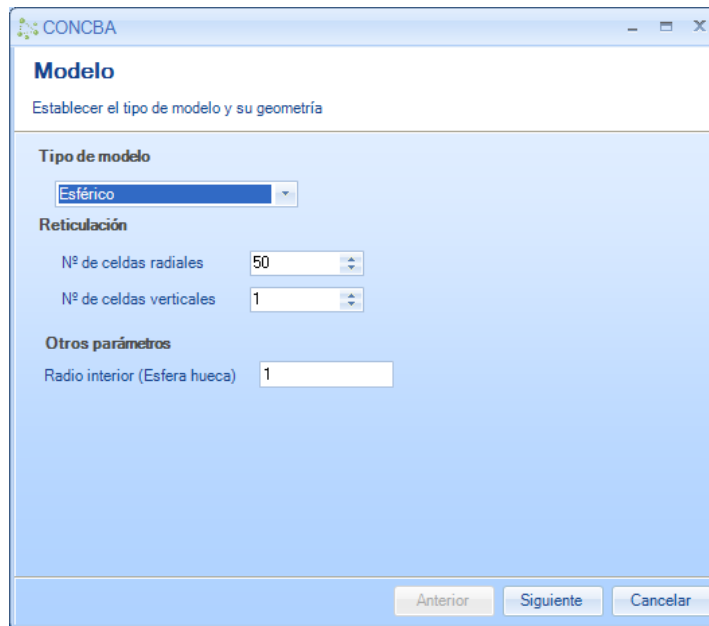
**Figura 0.4 Opciones de inicio de la barra de herramientas de PROCCA-09**

### III.2.1.1. 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 III.5. En este proyecto se va a trabajar con una geometría esférica.

La selección de esta opción da paso a la pantalla de la Figura III.5. En esta pantalla se introduce el número de celdas horizontales y verticales adoptado para la simulación. En nuestro caso, 50 celdas horizontales para el modelo esférico. Además incluiremos un radio interior de valor 1.

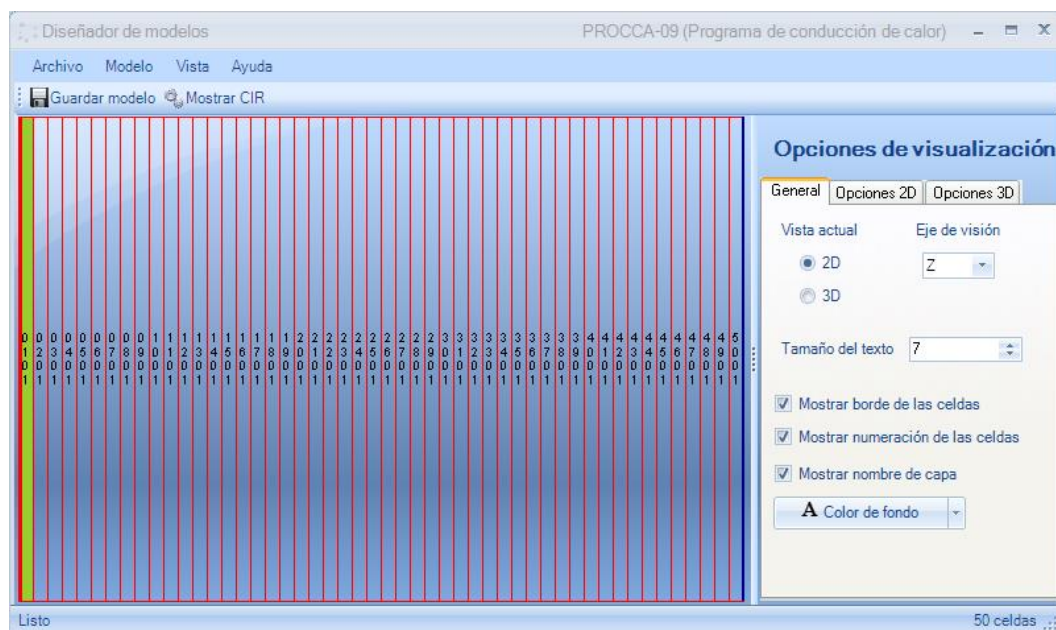
La opción “Nuevo modelo CONCBA presenta la pantalla mostrada en la Figura III.5



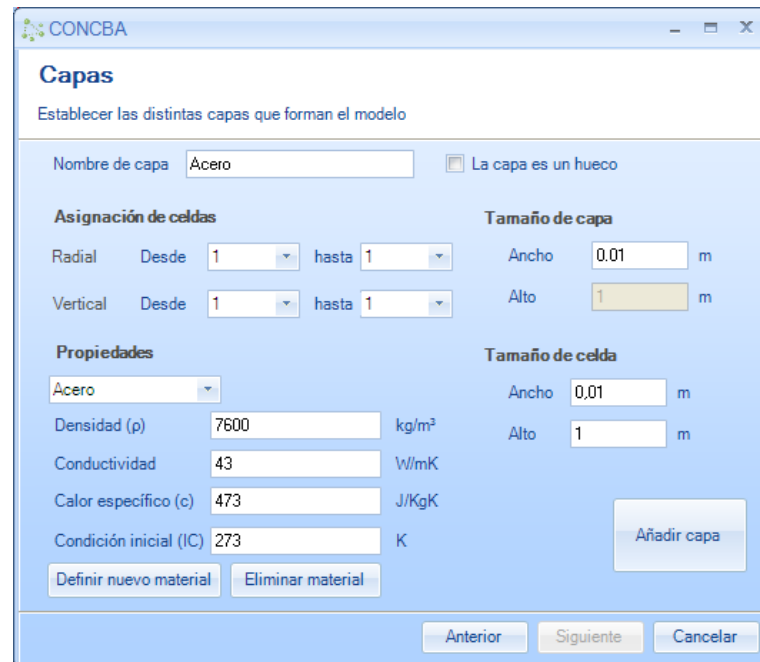
**Figura 0.5 Opciones de selección del problema. Módulo CONCBA**

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

Una vez introducidos los datos de esta pantalla se pulsa el botón “Siguiente” para dar paso a la pantalla de la Figura III.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 III.6.



**Figura 0.6 Reticula de celdas del medio**



**Figura 0.7 Pantalla de introducción de datos por capas.**

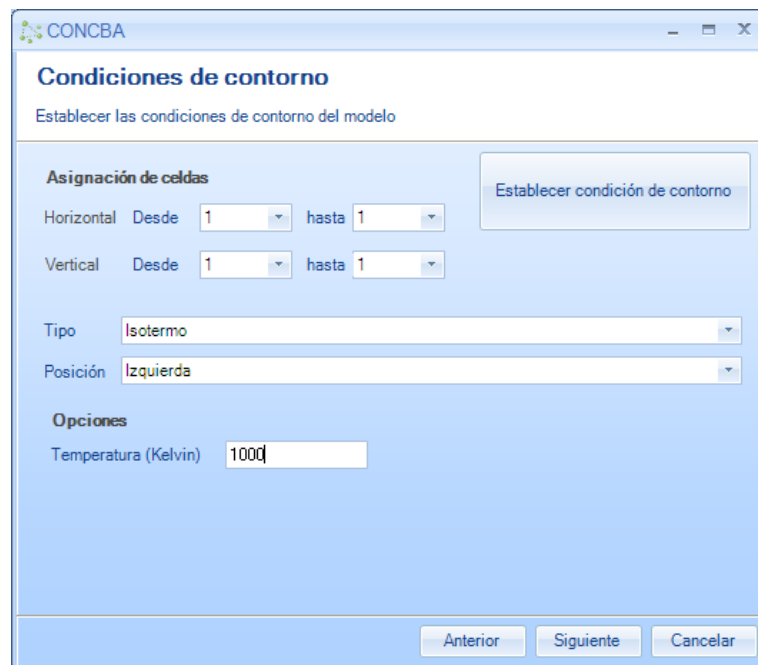
La introducción de datos se realiza capa a capa definiendo: el nombre de la capa, las celdas que ocupa, el tamaño de la capa (anchura y altura de la misma), las propiedades térmicas del material (densidad, conductividad y calor específico de la capa) y la temperatura inicial. Todas las unidades se introducen 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”, Figuras III.8 III.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

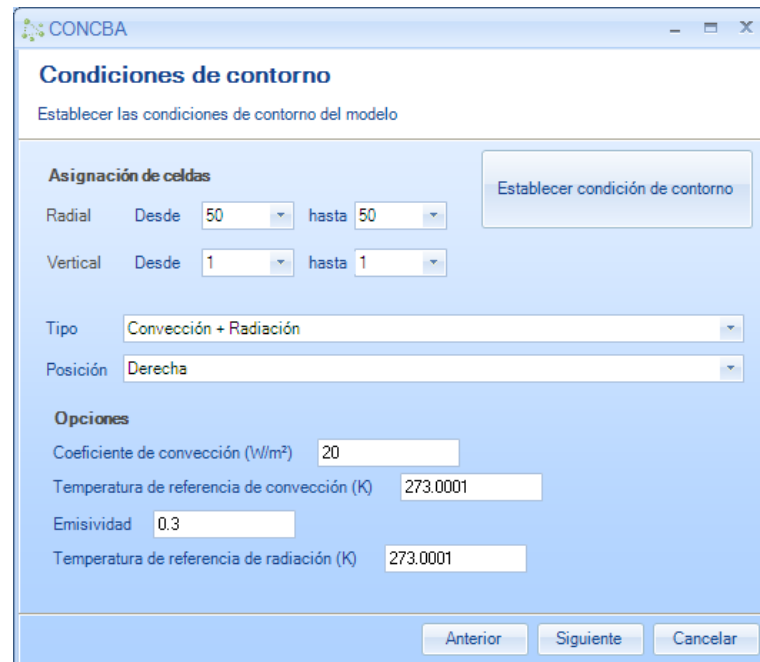
derecho). Las condiciones posibles son adiabática (no requiere datos complementarios), isoterma con temperatura fija (requiere el valor de la temperatura), flujo de calor constante (valor de dicho flujo), de convección (coeficiente de convección más temperatura de referencia), radiación (emisividad más 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), isoterma función del tiempo y flujo de calor función del tiempo (que requieren información adicional sobre la dependencia temporal de la temperatura y del flujo de calor, respectivamente).

Para el caso de estudio se ha considerado isotérmica la región izquierda y como condición en la región derecha convección+radiación.



**Figura 0.8 Pantalla de introducción de las condiciones de contorno: isoterma**





**Figura 0.9 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 III.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 III.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 III.12.

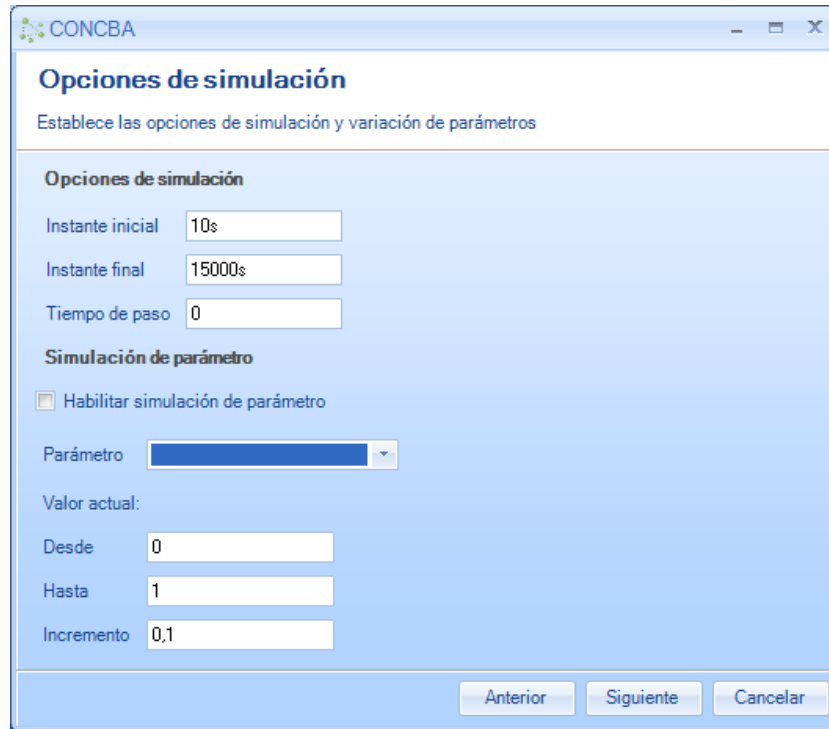


Figura 0.10 Pantalla de opciones de simulación

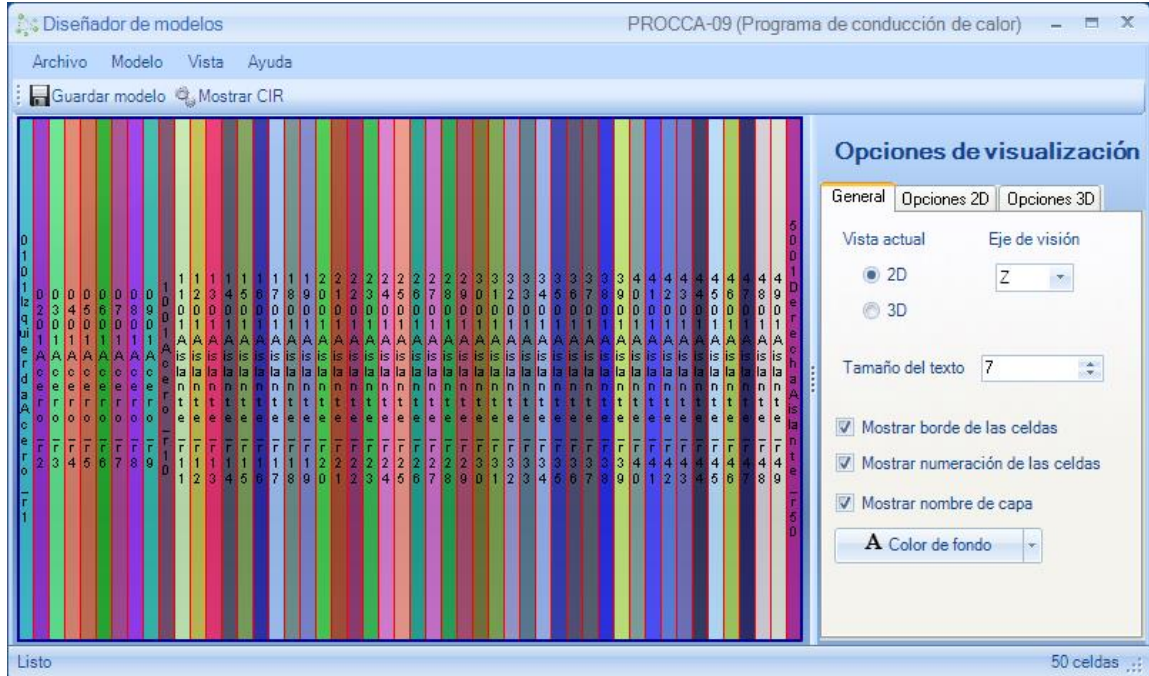
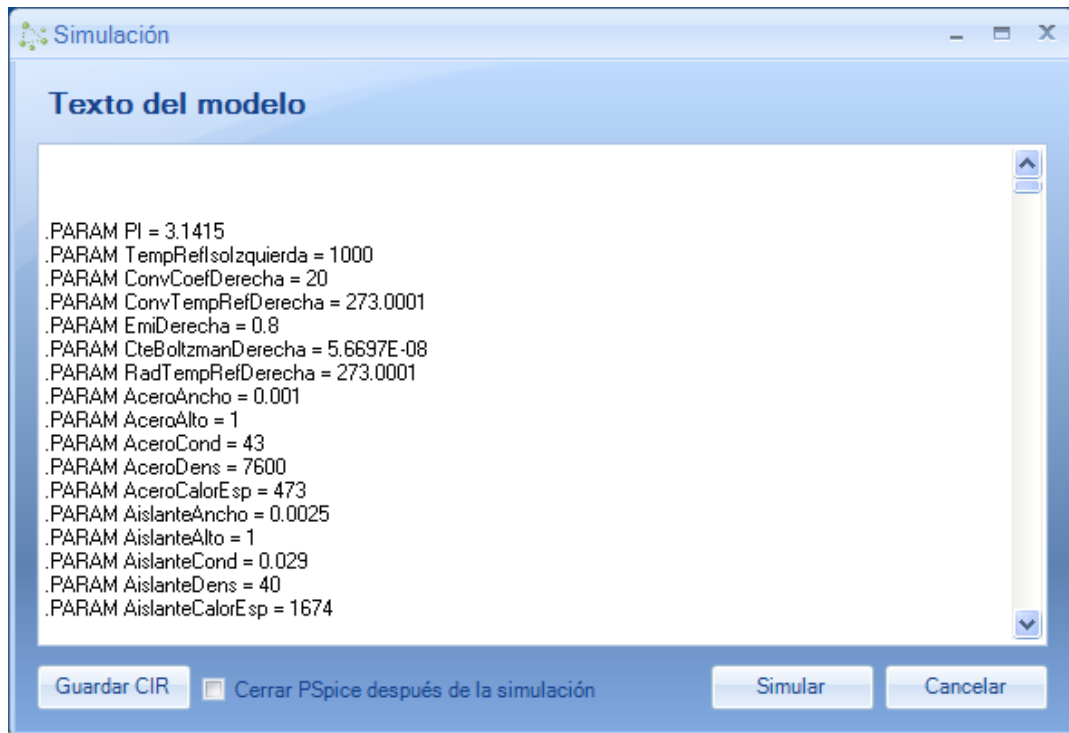


Figura 0.11 Pantalla de modelo finalizado



**Figura 0.12 Ventana de archivo “.cir” generado**

Para terminar diremos que el programa integra una ayuda completa que contiene para cada tipo de problema una descripción de sus fundamentos teóricos.

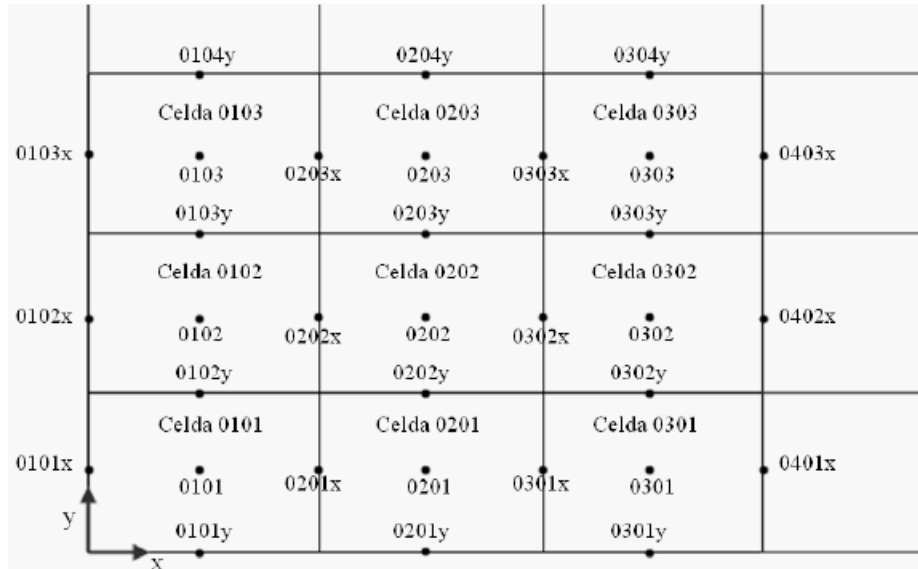
### **III.3. CRITERIOS PARA LA NUMERACIÓN DE CELDAS, NODOS Y ELEMENTOS DEL MODELO**

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 III.20.

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 x al final de su denominación mientras que los nudos inferior y superior llevan una y. 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 0.13 Numeración de celdas y nodos**

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

	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo III. FUNCIONAMIENTO DE PROCCA-09</b>			<b>FECHA: 09/2015</b>

NrefSuperiorIso	para la condición isoterma
NrefIzquierdaConv	para la condición convectiva
NrefIzquierdaRad	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:

VnulaIzquierdaIso	generador común a la pared isoterma superior
VnulaDerechaconv	generador común a la pared convectiva derecha
VnulaInferiorrad	generador común a la pared inferior radiativa

### **III.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.

	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo III. FUNCIONAMIENTO DE PROCCA-09</b>		<b>FECHA: 09/2015</b>	

```
.PARAM TempRefIsoDerecha = 0
.PARAM AceroAncho = 0.002
.PARAM AceroAlto = 0.002
.PARAM AceroCond = 232
.PARAM AceroDens = 2700
.PARAM AceroCalorEsp = 920
.PARAM AislanteAncho = 0.002
.PARAM AislanteAlto = 0.002
.PARAM AislanteCond = 0.15
.PARAM AislanteDens = 1120
.PARAM AislanteCalorEsp = 2000
```

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 1 2 3 4 5 6

Rizq 1 5 {AceroAncho / (2 * AceroCond * AceroAlto)}
Rder 5 2 {AceroAncho / (2 * AceroCond * AceroAlto)}
Rinf 3 5 {AceroAlto / (2 * AceroCond * AceroAncho)}
Rsup 5 4 {AceroAlto / (2 * AceroCond * AceroAncho)}
Ccell 5 6 {AceroAncho * AceroAlto * AceroDens * AceroCalorEsp} IC=0



.ENDS Acero

.SUBCKT Aislante 1 2 3 4 5 6

Rizq 1 5 {AislanteAncho / (2 * AislanteCond * AislanteAlto)}
Rder 5 2 {AislanteAncho / (2 * AislanteCond * AislanteAlto)}
Rinf 3 5 {AislanteAlto / (2 * AislanteCond * AislanteAncho)}
Rsup 5 4 {AislanteAlto / (2 * AislanteCond * AislanteAncho)}
Ccell 5 6 {AislanteAncho * AislanteAlto * AislanteDens * AislanteCalorEsp} IC=0

.ENDS Aislante
```

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

	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo III. FUNCIONAMIENTO DE PROCCA-09</b>		<b>FECHA: 09/2015</b>	

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

X0102 0102y 0202y 0102x 0103x 0102 0 Acero

X0103 0103y 0203y 0103x 0104x 0103 0 Acero

X0104 0104y 0204y 0104x 0105x 0104 0 Acero

X0105 0105y 0205y 0105x 0106x 0105 0 Acero

X0106 0106y 0206y 0106x 0107x 0106 0 Acero

X0107 0107y 0207y 0107x 0108x 0107 0 Acero

...

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

Vlquierdaiso01 0101y NrefIzquierdalso {TempRefIzolquierda} Vlquierdaiso02 0102y  
NrefIzquierdalso {TempRefIzolquierda}

...

\*Derecha

VDerechaiso01 5101y NrefDerechalso {TempRefIsoDerecha} VDerechaiso02 5102y  
NrefDerechalso {TempRefIsoDerecha}

...

\*Superior

RSuperioradi01 0126x 0 1E15

RSuperioradi02 0226x 0 1E15

...



\*Inferior

RInferioradi01 0101x 0 1E15

RInferioradi02 0201x 0 1E15

...

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,

	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo III. FUNCIONAMIENTO DE PROCCA-09</b>		<b>FECHA: 09/2015</b>	

circuitos auxiliares que permiten determinar estos valores directamente. Así todos los componentes de contorno de cada borde se conectan a un 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 isotermas, de convección, de radiación o mixtas, o de otro tipo. Para las condiciones dadas en el bloque anterior los circuitos integradores son los siguientes:

\* Elementos de integración para las superficies isotermas

VnulaIzqIso NrefIzquierdalso 0 0

VnulaDerIso NrefDerechalso 0 0

VnulaArrIso NrefSuperiorIso 0 0

VnulaAbjIso NrefInferiorIso 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(0102,0)

...

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 1s 150s 0 UIC

.OPTIONS RELTOL 0.0001

.OPTIONS NUMDGT 4

.PROBE

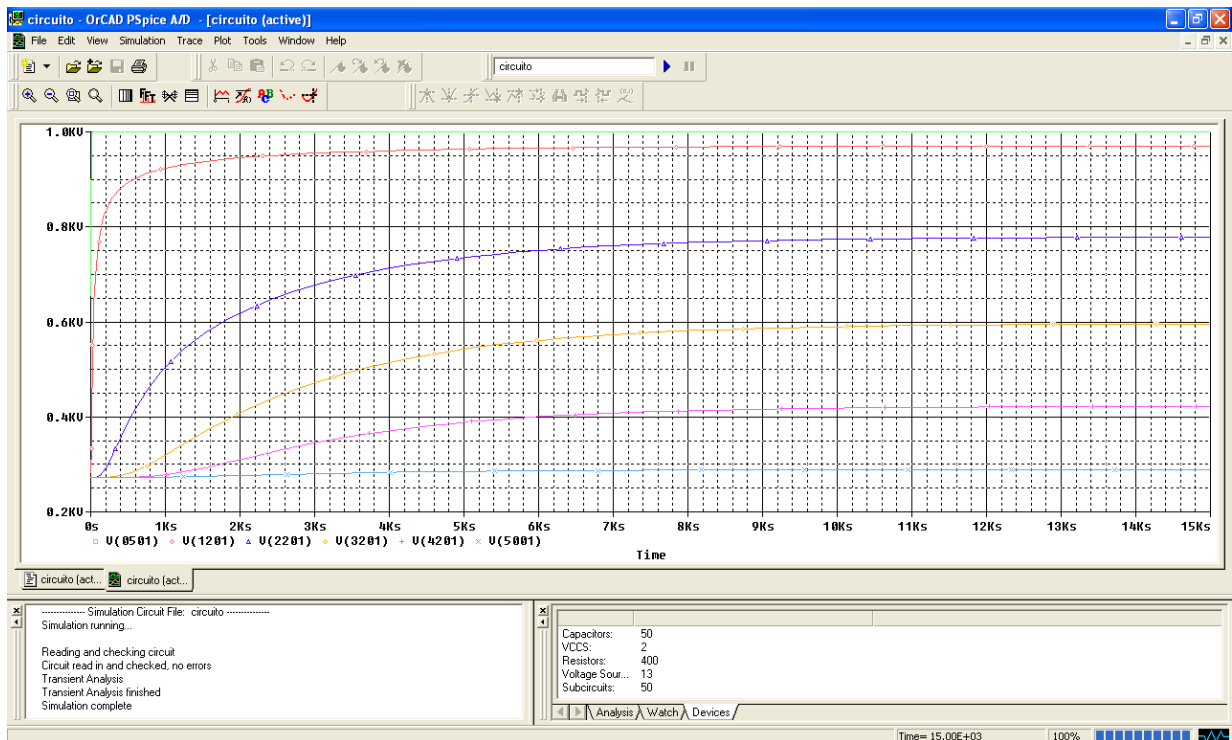
.END

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.



### III.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 de abajo, donde, en la parte inferior derecha, aparece el intervalo de tiempo simulación solicitado y el paso de tiempo que PSpice adopta en cada instante para la evaluación de los cálculos numéricos.



**Figura 0.14 Pantalla de resultado simulación en PSpice**

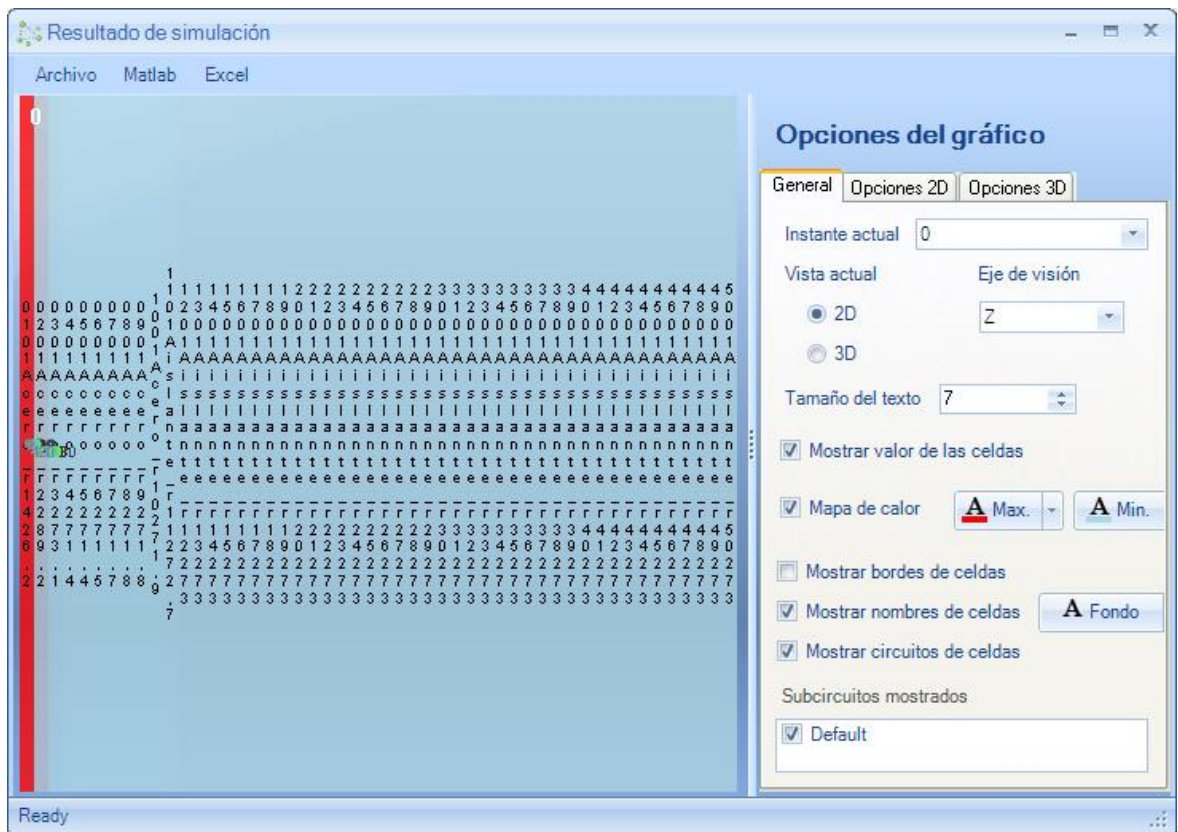
El programa PSpice varía continuamente este paso de tiempo de cálculo, de acuerdo con la tendencia uniforme o cambiante de los resultados actuales, para reducir al máximo (sin merma de la precisión especificada por el programador a los resultados numéricos) los tiempos de computación totales.

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 grados centígrados según la escala usada) o flujos de calor (W/m<sup>2</sup>) 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.

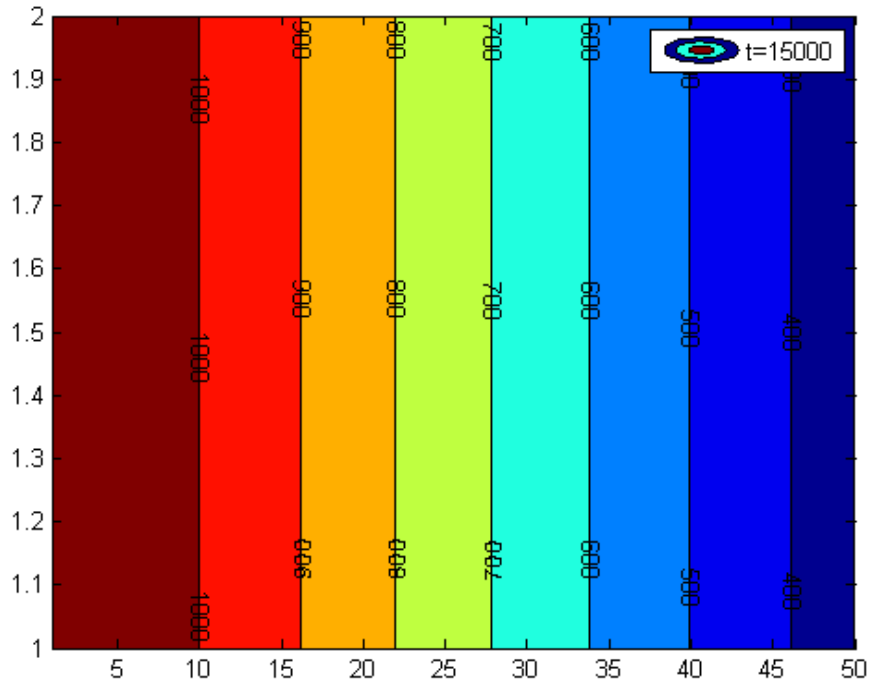
Los resultados tabulados pueden obtenerse, desde PSpice o bien desde Word, en el archivo de extensión “.out”. Este archivo, en el que también aparece al final del mismo todos los fallos de diseño del archivo de texto del modelo cuando no se puede simular éste, contiene ordenadamente un listado de todas 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.

El entorno gráfico de PROCCA-09, aunque limitado, permite acceder a isolíneas de temperatura obtenidas por interpolación de los resultados tabulados anteriores. Estas líneas están representadas por puntos y muestran la lectura directa de la temperatura, junto a cada punto, en el instante solicitado del transitorio. El acceso a estas representaciones es directo una vez simulado el modelo (pantalla gráfica de PROCCA-09), o bien cargando un archivo ya simulado a través de la ruta “Modelo” “Procesar archivo .out de este modelo” en la pantalla “Diseñador de modelos”.





**Figura 0.15 Pantalla de resultado de simulación en PROCCA-09**

Finalmente PROCCA-09 incorpora una rutina de programación que permite representar animaciones de evolución de isothermas, tanto en su propio entorno como en el entorno gráfico de MATLAB, obteniendo resultados como el mostrado en la figura III.16.



**Figura 0.16 Mapa de temperaturas generado con MATLAB**

	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo IV. ESCENARIOS Y RESULTADOS</b>			<b>FECHA: 09/2015</b>

## Capítulo IV. ESCENARIOS Y RESULTADOS

En este capítulo se va a analizar mediante la utilización de PROCCA-09 la conducción de calor en depósitos esféricos constituidos por dos capas, una lámina de acero y un relleno de aislamiento que iremos variando. Las propiedades de los materiales escogidos son las siguientes:

Material	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad térmica (W/m K)	Calor específico (J/kg K)
<b>Acero bajo en carbono</b>	7600	43	473
<b>Lana de vidrio</b>	140	0,03 – 0,05	670
<b>Lana de roca</b>	85	0,03 – 0,05	800
<b>Espuma de poliuretano</b>	40	0,019 – 0,040	1674

*Figura 0.1 Propiedades térmicas de los materiales*

En todos los ensayos se combinará una capa de acero con otra de aislante y se variará la conductividad de los materiales aislantes y su espesor para cada escenario de simulación. Además se tomarán unas condiciones fijas a la hora de simular, que son las siguientes:

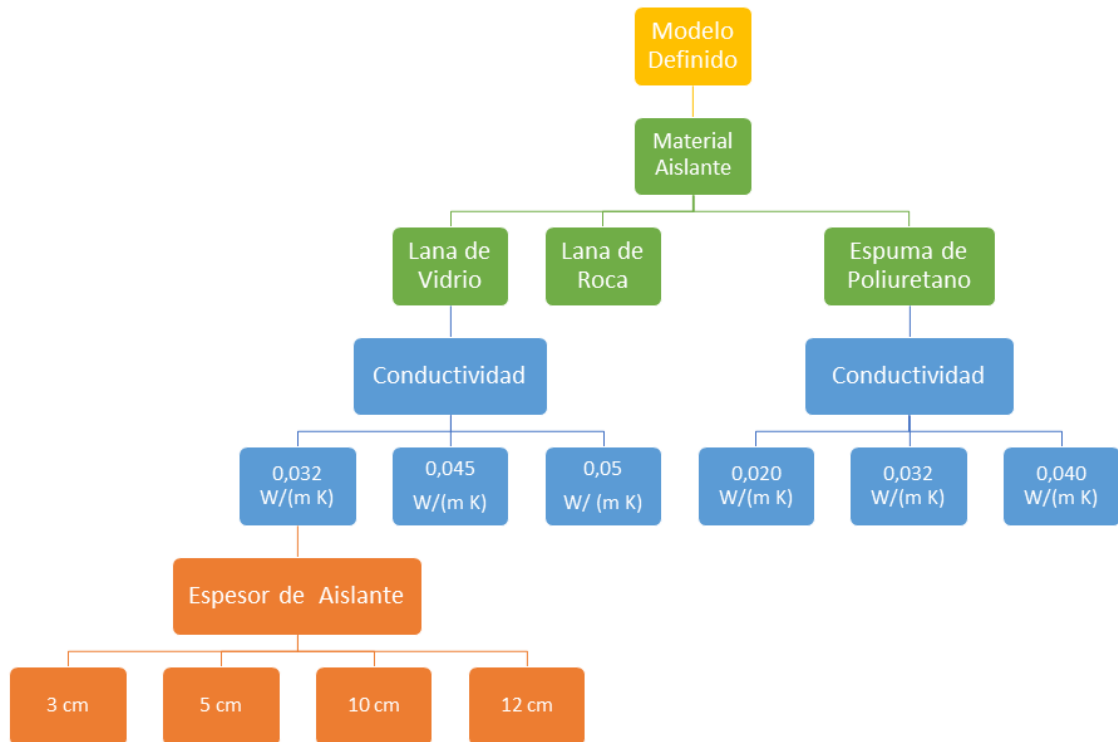
- Temperatura interior: 1000 K
- Temperatura exterior: 300 K
- Convección + Radiación:  $h = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$  y  $\epsilon = 0.3$

El valor de la temperatura interior se ha elegido de forma arbitraria ya que no sabemos el fluido que contendrá nuestro depósito, tomamos 1000 K que es una temperatura lo suficientemente elevada; La temperatura exterior será aproximadamente una temperatura ambiente de 27 °C, que equivale a 300 K. Por último se ha elegido como mecanismo de transferencia del calor la interacción entre la convección y la radiación, debido a que en la mayoría de los casos se produce una combinación de ambos como ya se ha comentado anteriormente; el valor del parámetro de convección depende de múltiples parámetros:

- del tipo de convección (forzada o natural)
- del régimen del fluido (laminar o turbulento)
- de la velocidad del flujo
- de la viscosidad del fluido,
- de la densidad del fluido,
- de la conductividad térmica del fluido,
- del calor específico del fluido.
- del coeficiente de dilatación del fluido,
- de la forma de la superficie de intercambio
- de la rugosidad de la superficie de intercambio
- de su temperatura

Se ha establecido en  $20 \text{ W/m}^2\text{K}$  ya que es el característico de la convección natural del aire. Lo mismo ocurre con el valor de la emisividad, que dependerá del acabado superficial del material y de su color, tomando finalmente un valor de 0,3.

Debido a la gran cantidad de escenarios que se van a simular, se va a seguir el esquema definido en la figura IV.2.



<sup>1</sup> **Figura 0.2 Organigrama simulaciones**

Se mostrarán las temperaturas y flujos de calor de la celda 50-1 a los 15.000s (valor estacionario), así como las gráficas de evolución respecto al tiempo de estas temperaturas y flujos de calor. Los resultados mostrados por PSpice muestran las temperaturas en voltios y el calor en amperios, su equivalencia es  $1\text{v}=1\text{K}$ ,  $1\text{A}=1\text{W/m}^2$ .

<sup>1</sup> Se utilizará el mismo proceso en la lana de vidrio y la lana de roca, ya que ambas tienen el mismo rango de conductividad térmica, mientras que el de espuma de poliuretano es diferente. Se simularán los 4 espesores para cada uno de las conductividades de cada material aislante.



## IV.1 DEPÓSITO ESFÉRICO

Consideramos un depósito esférico con un radio interior de 1 metro formado por una chapa de acero de 1cm y una capa de aislamiento exterior que iremos variando, tanto su material como su espesor, para los que hemos tomado espesores comerciales en este tipo de industria (3 cm , 5 cm, 10 cm y 12 cm).

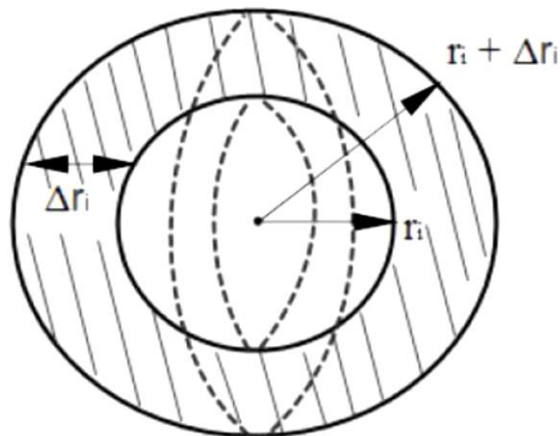


Figura 0.3 Modelo esférico

Se ha definido un modelo de 50 celdas horizontales y 1 vertical, 10 reticulan el espesor de la chapa, y 40 el espesor del aislante.

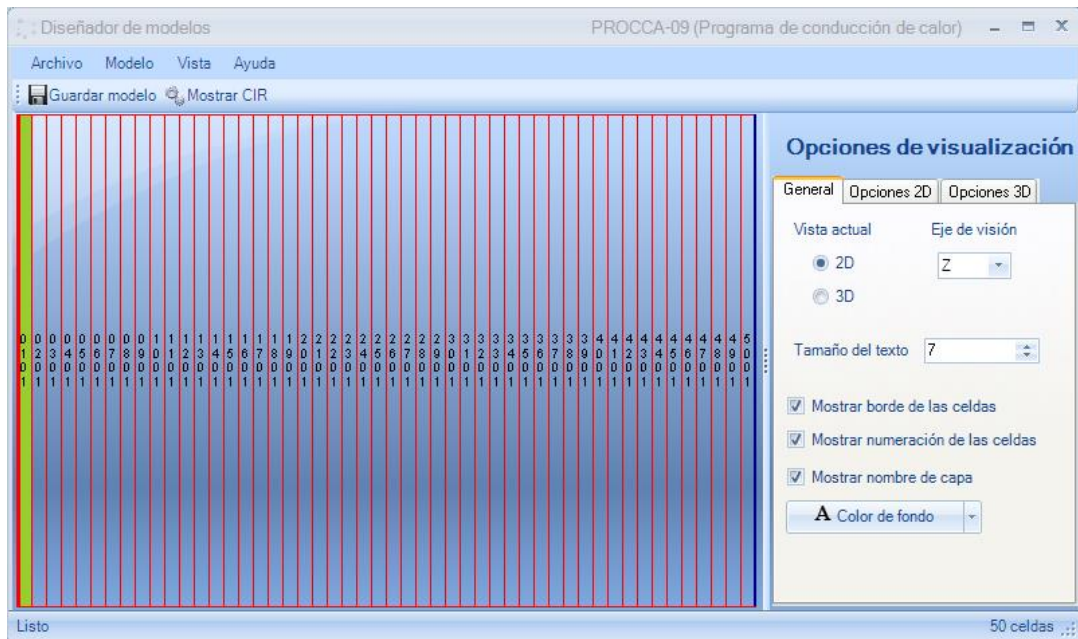






Figura 0.4 Modelo esférico PROCCA-09

Como condiciones de contorno tendremos la región de la izquierda isotérmica a 1000 K y la de la derecha convección + radiación. Para las demás condiciones seguiremos el organigrama de la figura IV.2.

	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo IV. ESCENARIOS Y RESULTADOS</b>		<b>FECHA: 09/2015</b>	

El tiempo final de las simulaciones es de 15000s, valor suficiente para que se establezcan las temperaturas en el interior del material, con un tiempo de paso de 10s ya que un número mayor provocaría un desbordamiento de memoria en PSpice.

	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo IV. ESCENARIOS Y RESULTADOS</b>		<b>FECHA: 09/2015</b>	

## IV.1.1. Esfera de Material Aislante Lana de Vidrio

Un material aislante se caracteriza por el valor de su conductividad térmica; su poder aislante es tanto más elevado cuanto más pequeña es su conductividad.

La lana de vidrio es un material compuesto. El fieltro, que se forma en la cadena, está constituido por fibras entrecruzadas desordenadamente, que impiden las corrientes de convección del aire. Es evidente que la conductividad térmica del fieltro será no una conductividad sólida real, sino una conductividad aparente y que será el balance de los efectos conjugados de varios procesos de cambios de calor, que vamos a tratar de analizar a continuación:

- a) El aire inmovilizado por la red de fibras, es un volumen proporcionalmente importante; por tanto, una parte de la transmisión de calor se hará por convección.
- b) Las fibras, en contacto unas con otras, permiten la transmisión de calor por conducción.
- c) Finalmente, las fibras intercambian energía entre sí, por radiación.

La relativa importancia de estas formas distintas de cambio de calor dependen, a igualdad de temperatura en el ambiente, de el diámetro de las fibras y la densidad aparente del producto.

Su conductividad varía de 0,032 a 0,05 W/(m · K) (a 10 °C). Los productos fabricados son ligeros (de 10 a 110 kg/m<sup>3</sup>) y fáciles de cortar y de manejar.

La lana de vidrio es incombustible, inatacable por los agentes exteriores: aire, vapor de agua, ácido (excepto de fluorhídrico) y bases no concentradas. El pH de la composición, 7 aproximadamente, asegura a la fibra una estabilidad total, incluso en medio húmedo y garantiza al usuario la no existencia de corrosión de los metales en contacto con ella. Su débil calor específico permite puestas en régimen rápidas, en instalaciones intermitentes.



## Escenario e1

### DATOS

Lana de Vidrio	
Conductividad	0,032 W/(m K)
Espesor	3 cm

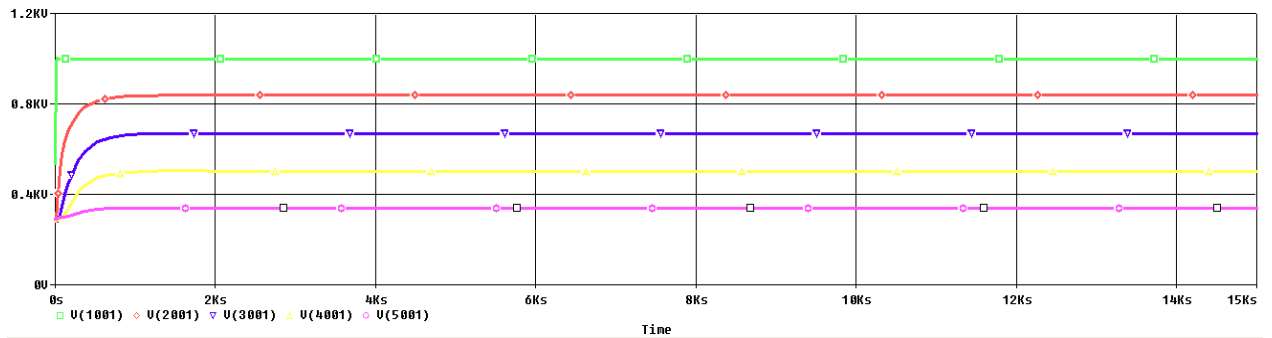
**Figura 0.5 Datos**

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
<b>10</b>	999,8
<b>20</b>	837,47
<b>30</b>	669,01
<b>40</b>	503
<b>50</b>	339,39

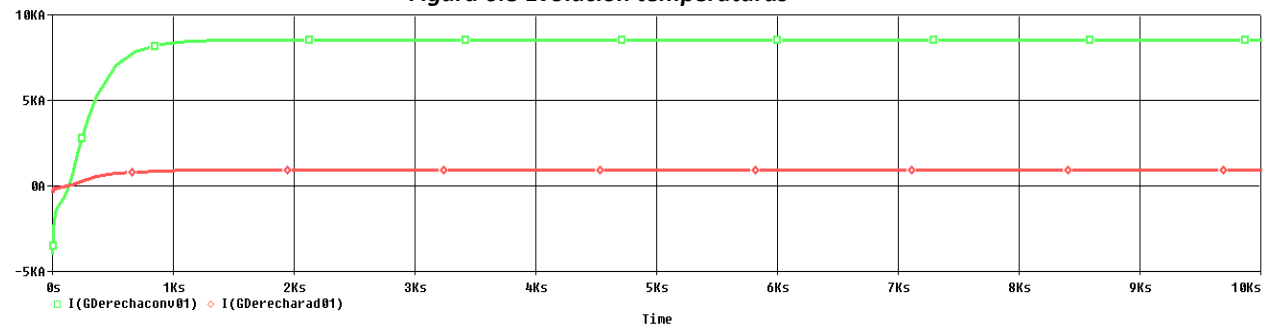
**Figura 0.6 Temperaturas**

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-9412,8
Convección	8501,1
Radiación	911,62

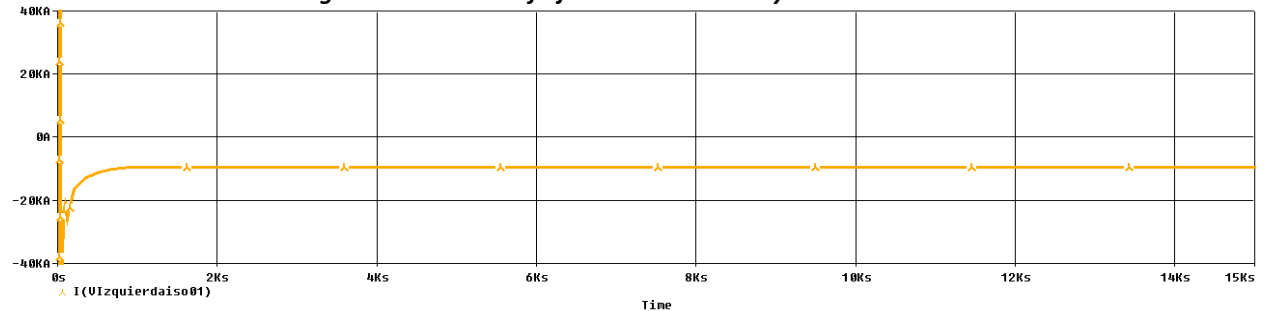
**Figura 0.7 Flujos de calor**



**Figura 0.8 Evolución temperaturas**



**Figura 0.9 Evolución flujo calor convección y radiación**



**Figura 0.10 Evolución flujo calor isotermo**

## Escenario e2

### DATOS

Lana de Vidrio	
Conductividad	0,032 W/(m K)
Espesor	5 cm

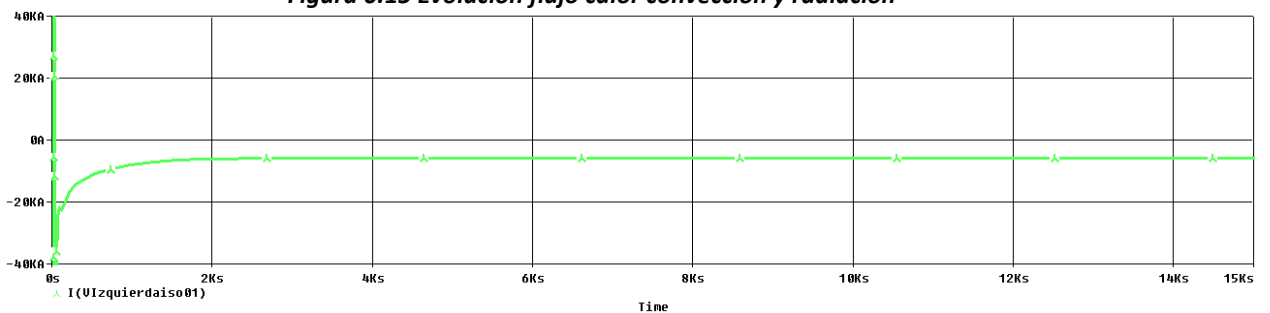
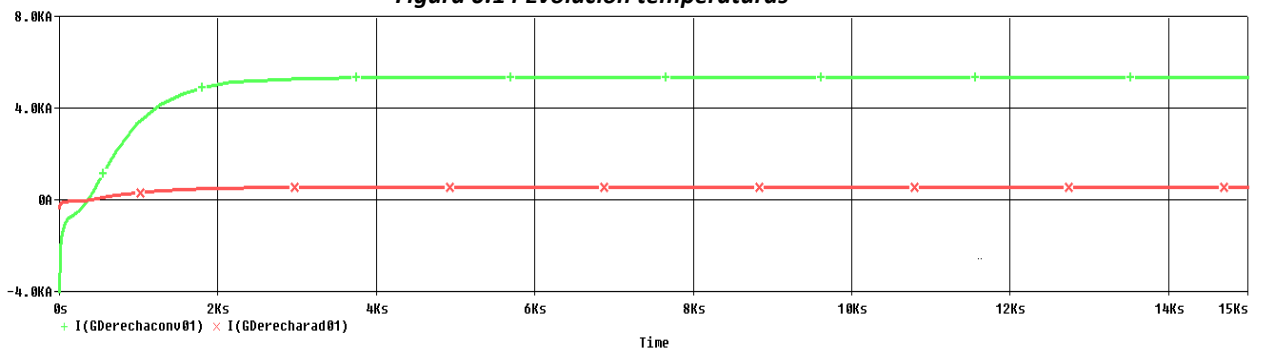
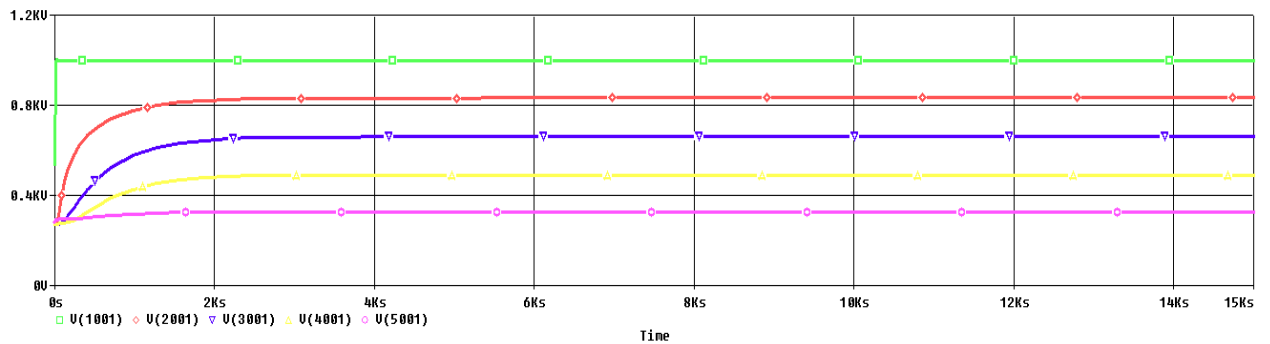
**Figura 0.11 Datos**

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
<b>10</b>	1000
<b>20</b>	832,11
<b>30</b>	659,66
<b>40</b>	491,33
<b>50</b>	326,97

**Figura 0.12 Temperaturas**

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-5863,7
Convección	5326,4
Radiación	537,32

**Figura 0.13 Flujos de calor**



### Escenario e3

#### DATOS

Lana de Vidrio	
Conductividad	0,032 W/(m K)
Espesor	10 cm

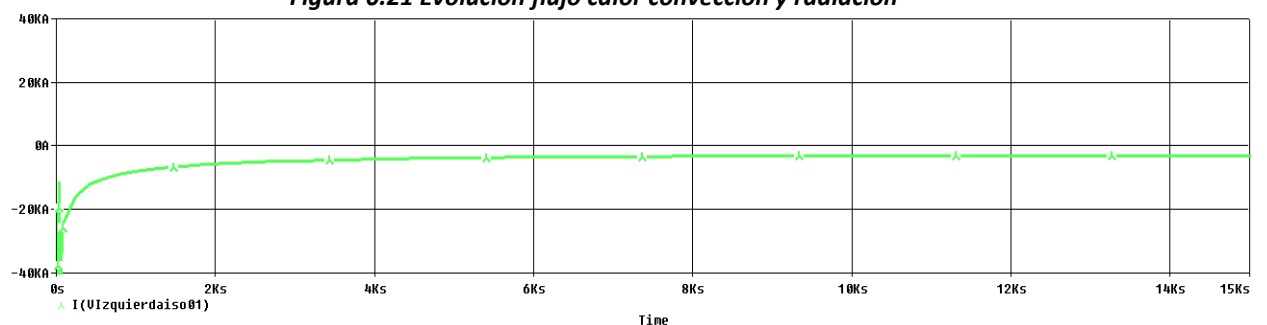
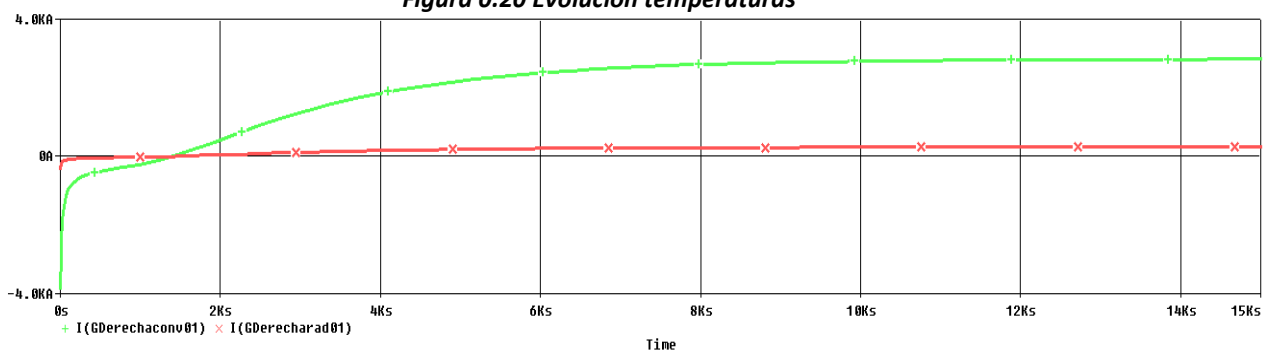
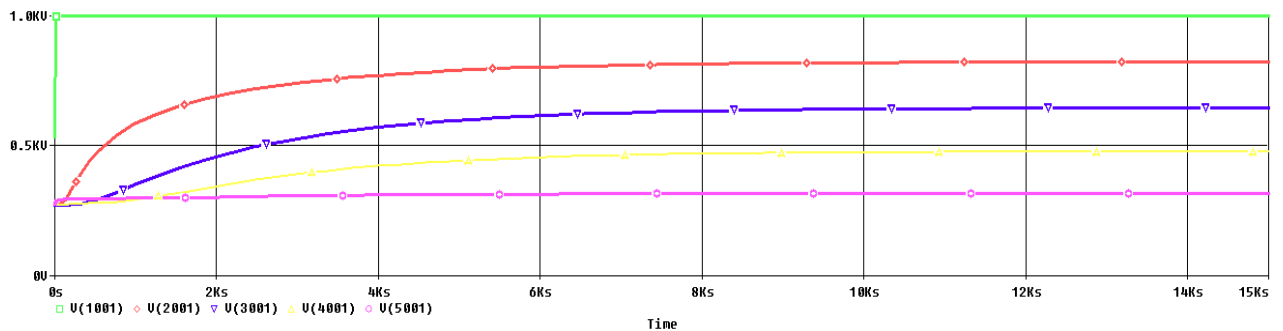
Figura 0.17 Datos

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
10	1000
20	822,96
30	645,69
40	477,27
50	316,94

Figura 0.18 Temperaturas

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-3122,3
Convección	2833,9
Radiación	272,44

Figura 0.19 Flujos de calor





Escenario e4

**DATOS**

Lana de Vidrio	
Conductividad	0,032 W/(m K)
Espesor	12 cm

Figura 0.23 Datos

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
10	1000
20	817,94
30	638,54
40	471,41
50	314,97

Figura 0.24 Temperaturas

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-2693,6
Convección	2371,1
Radiación	225,97

Figura 0.25 Flujos de calor

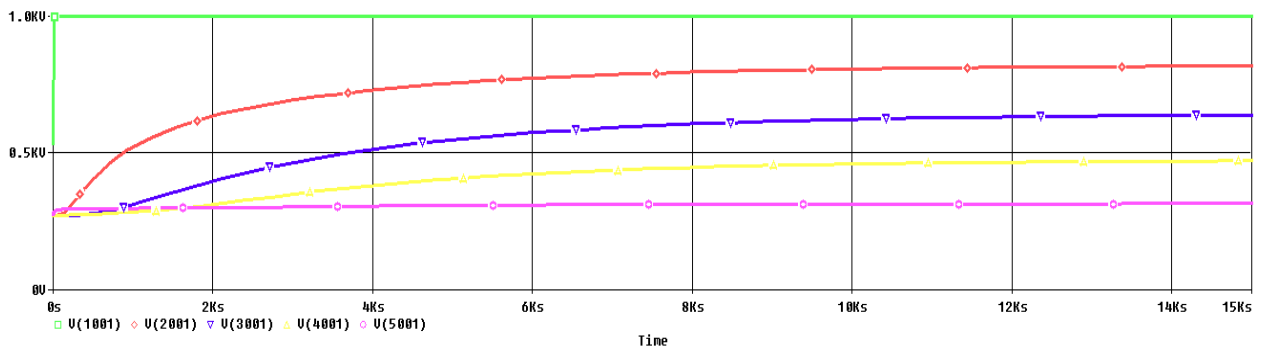


Figura 0.26 Evolución temperaturas

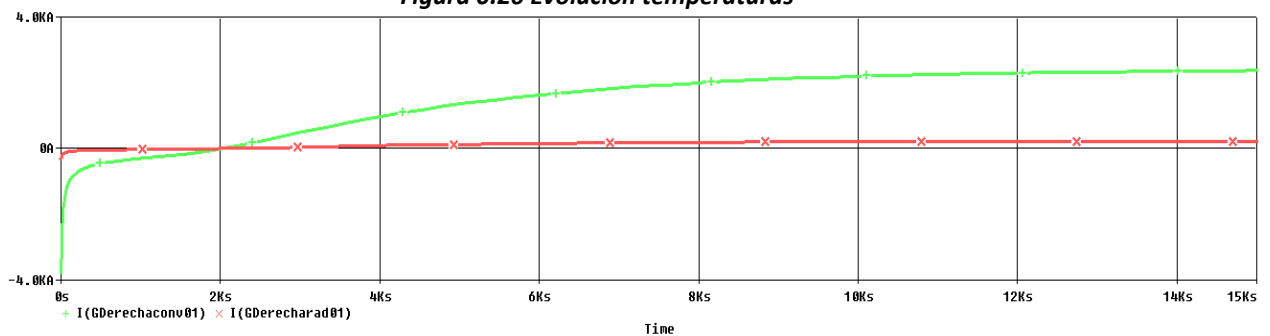


Figura 0.27 Evolución flujo calor convección y radiación

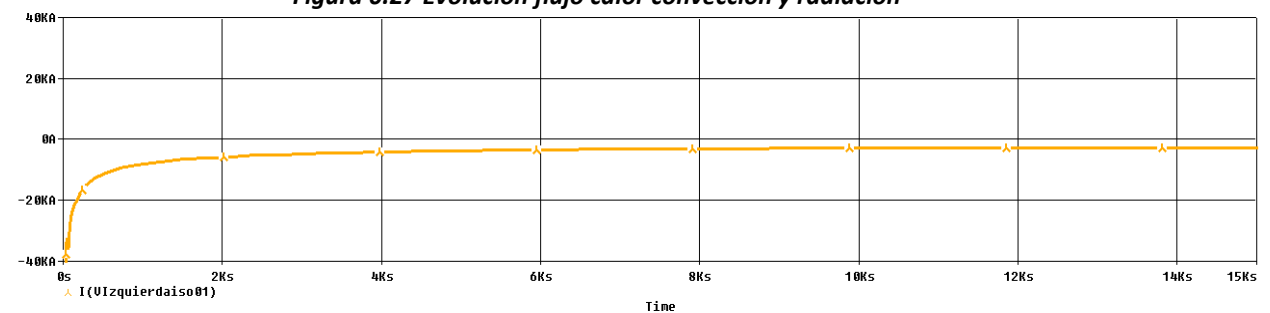


Figura 0.28 Evolución flujo calor isotermo

## Escenario e5

### DATOS

Lana de Vidrio	
Conductividad	0,045 W/(m K)
Espesor	3 cm

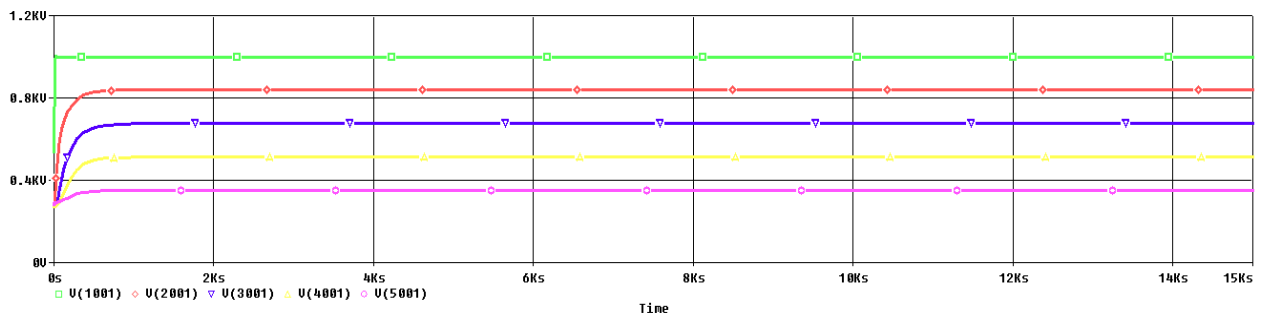
**Figura 0.29 Datos**

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
<b>10</b>	999,8
<b>20</b>	840,26
<b>30</b>	674,76
<b>40</b>	511,67
<b>50</b>	350,93

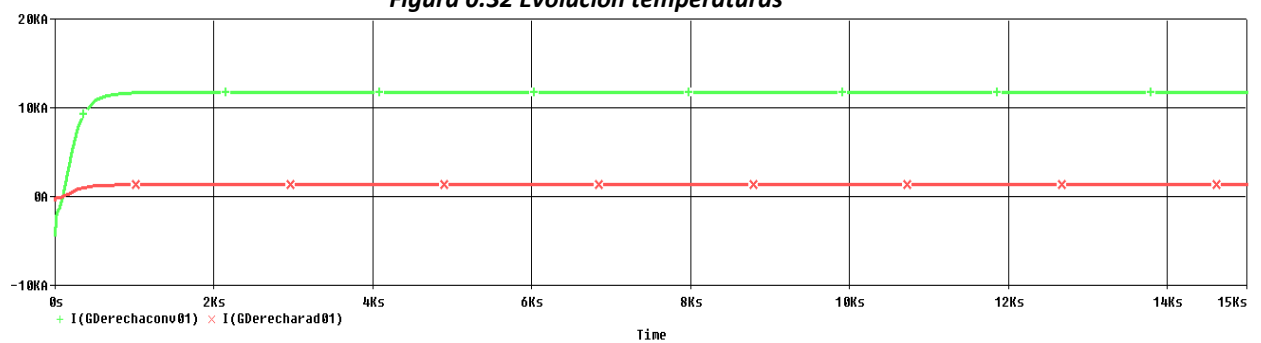
**Figura 0.30 Temperaturas**

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-13004
Convección	11678
Radiación	1325,8

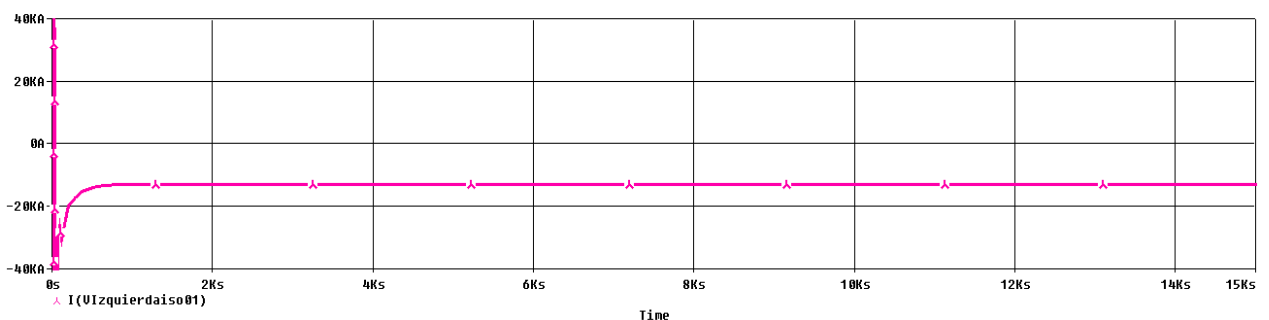
**Figura 0.31 Flujos de calor**



**Figura 0.32 Evolución temperaturas**



**Figura 0.33 Evolución flujo calor convección y radiación**



**Figura 0.34 Evolución flujo calor isotermo**

### Escenario e6

#### DATOS

Lana de Vidrio	
Conductividad	0,045 W/(m K)
Espesor	5 cm

Figura 0.35 Datos

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
10	999,9
20	833,87
30	663,28
40	496,76
50	334,18

Figura 0.36 Temperaturas

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-8157
Convección	7384,8
Radiación	772,24

Figura 0.37 Flujos de calor

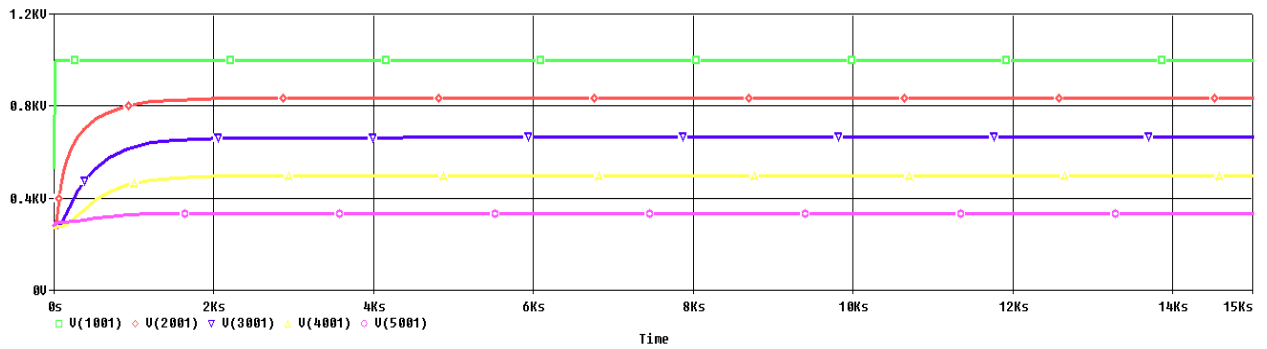


Figura 0.38 Evolución temperaturas

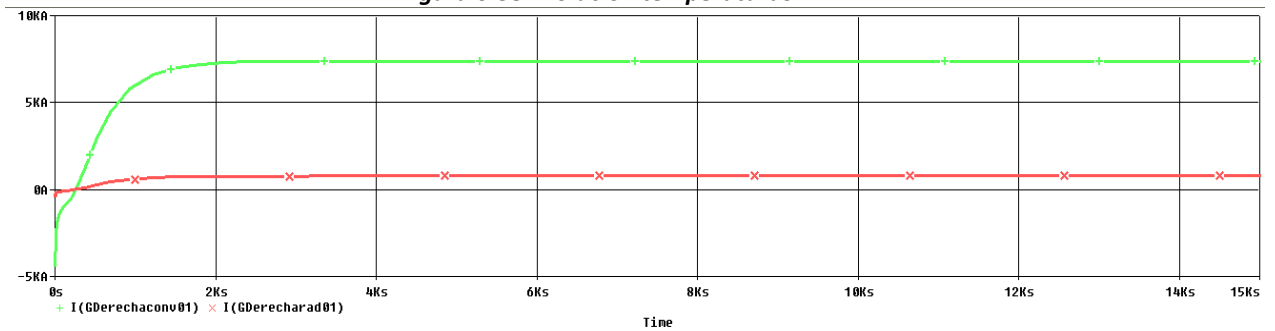


Figura 0.39 Evolución flujo calor convección y radiación

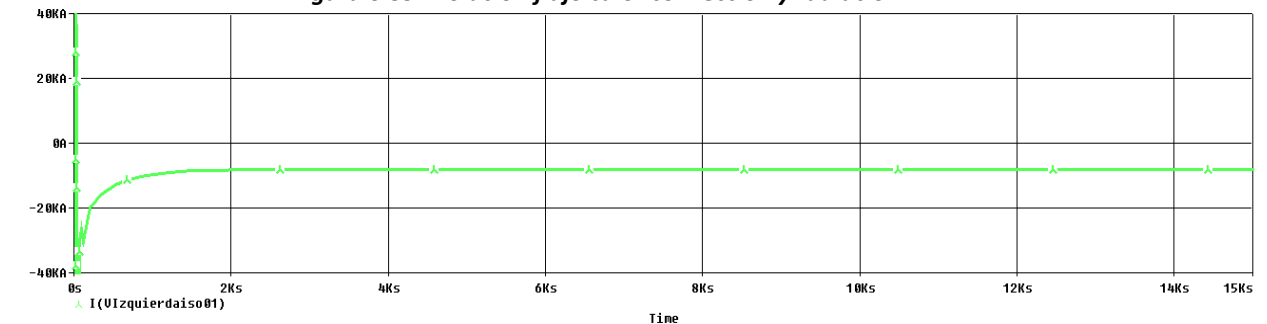


Figura 0.40 Evolución flujo calor isotermo

## Escenario e7

### DATOS

Lana de Vidrio	
Conductividad	0,045 W/(m K)
Espesor	10 cm

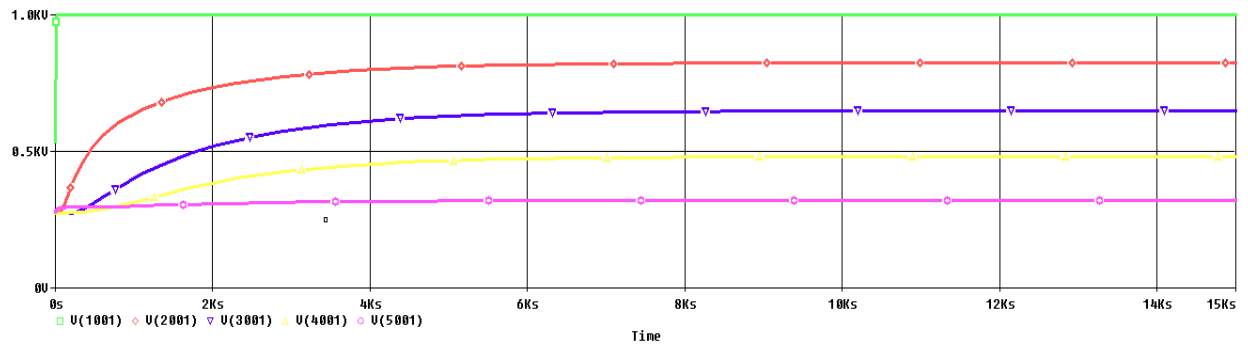
**Figura 0.41 Datos**

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
<b>10</b>	999,9
<b>20</b>	824,66
<b>30</b>	648,69
<b>40</b>	480,87
<b>50</b>	320,63

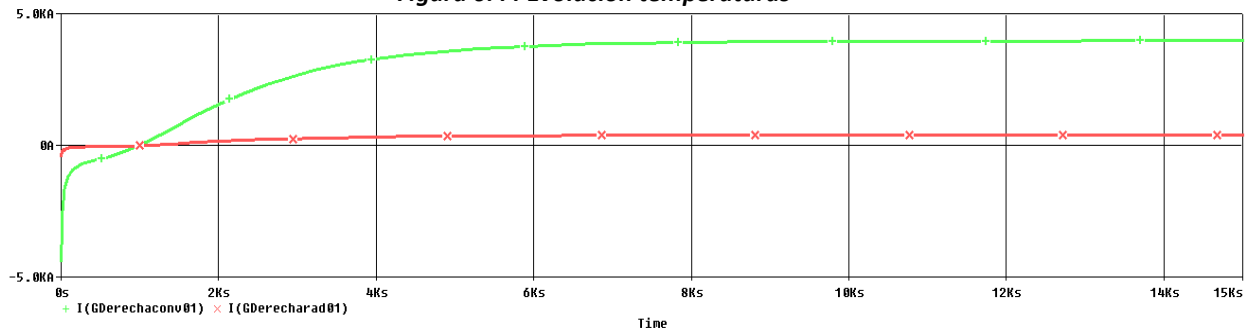
**Figura 0.42 Temperaturas**

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-4356,7
Convección	3966,7
Radiación	388,35

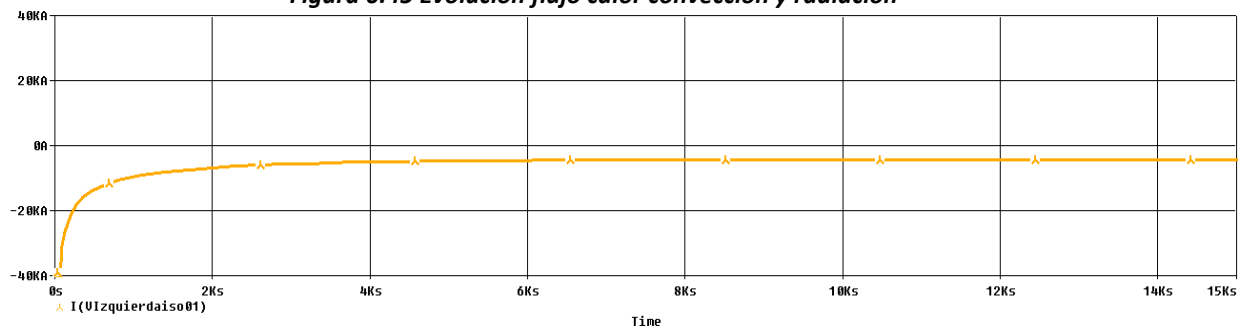
**Figura 0.43 Flujos de calor**



**Figura 0.44 Evolución temperaturas**



**Figura 0.45 Evolución flujo calor convección y radiación**



**Figura 0.46 Evolución flujo calor isotermo**

## Escenario e8

### DATOS

Lana de Vidrio	
Conductividad	0,045 W/(m K)
Espesor	12 cm

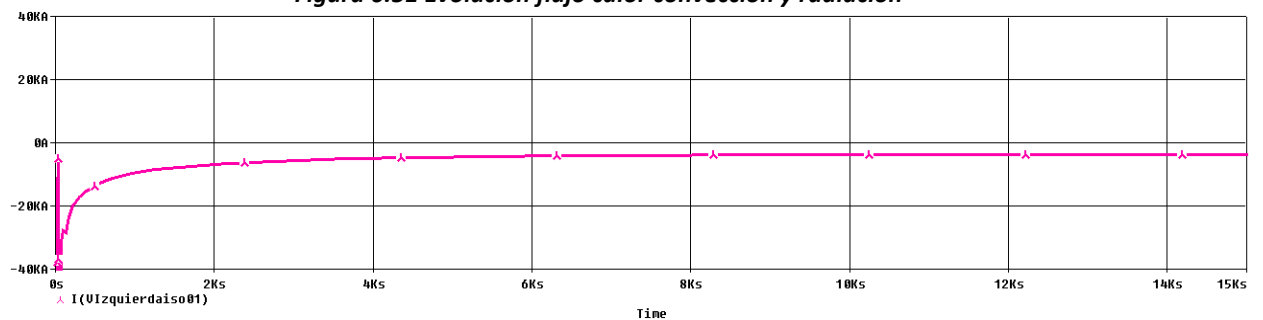
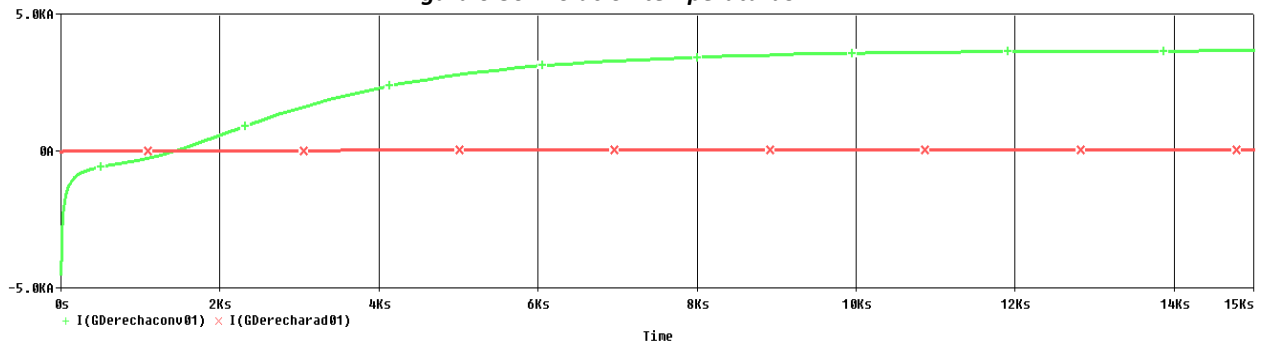
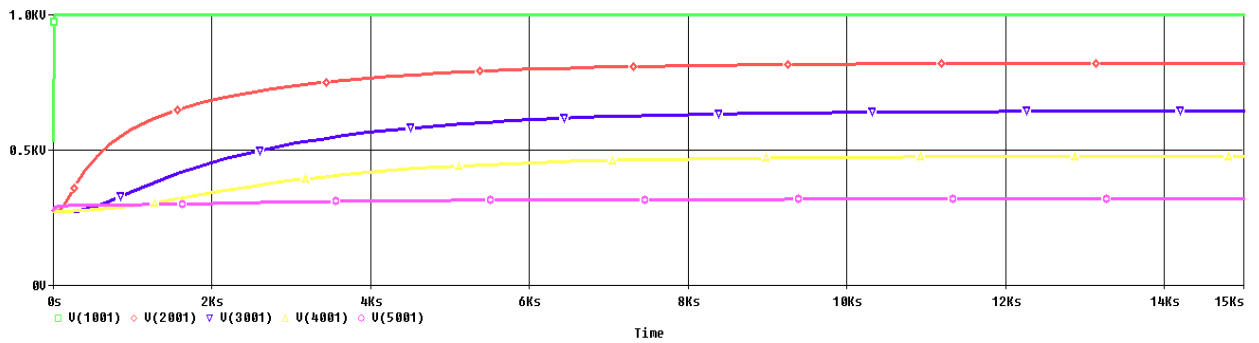
**Figura 0.47 Datos**

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
<b>10</b>	999,9
<b>20</b>	821,47
<b>30</b>	644,19
<b>40</b>	477,02
<b>50</b>	319,06

**Figura 0.48 Temperaturas**

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-3713,7
Convección	3656
Radiación	35,47

**Figura 0.49 Flujos de calor**





## Escenario e9

### DATOS

Lana de Vidrio  
 Conductividad 0,05 W/(m K)  
 Espesor 3 cm

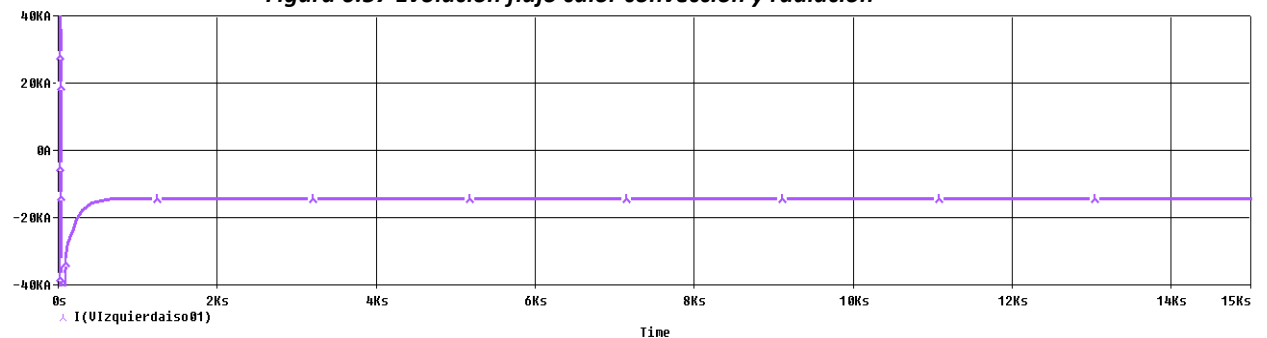
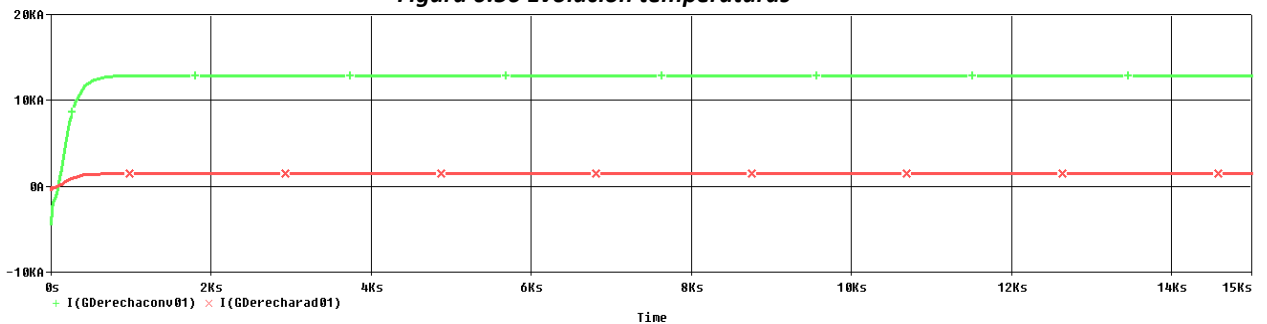
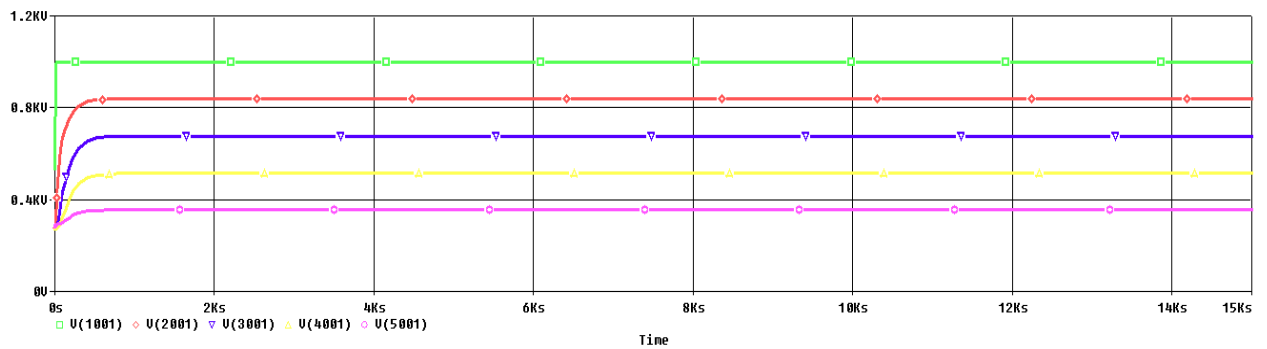
**Figura 0.53 Datos**

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
10	999,8
20	841,3
30	676,9
40	514,9
50	355,23

**Figura 0.54 Temperaturas**

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-14353
Convección	12861
Radiación	1491,3

**Figura 0.55 Flujos de calor**



## Escenario e10

### DATOS

Lana de Vidrio	
Conductividad	0,05 W/(m K)
Espesor	5 cm

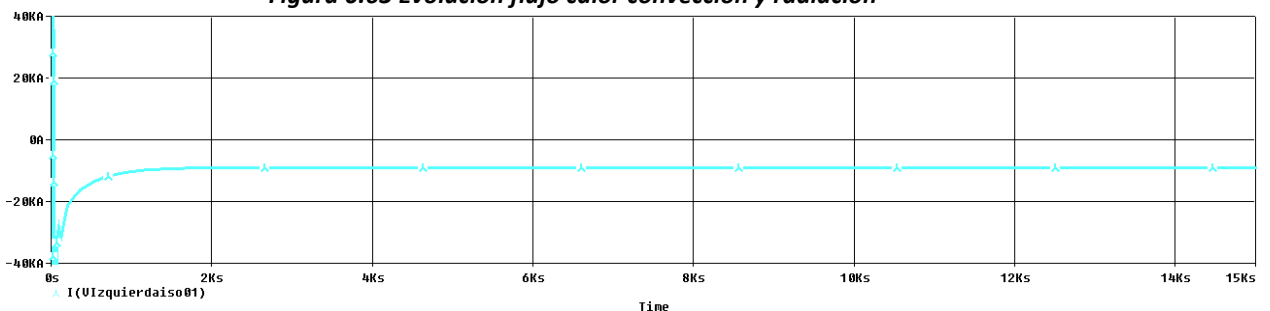
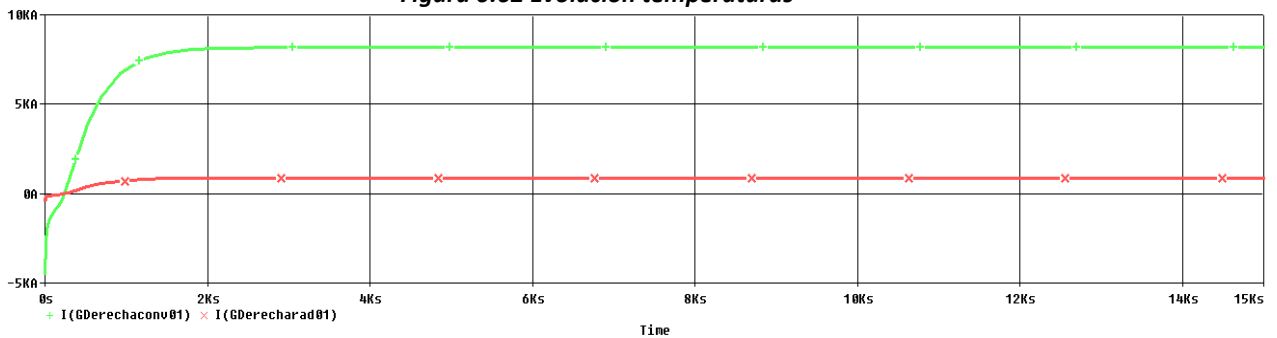
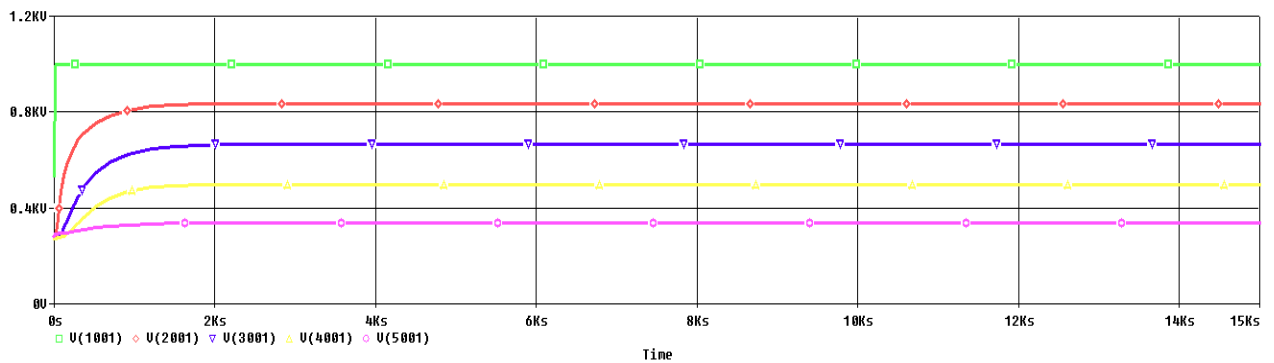
**Figura 0.59 Datos**

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
<b>10</b>	999,8
<b>20</b>	834,54
<b>30</b>	664,65
<b>40</b>	498,82
<b>50</b>	336,89

**Figura 0.60 Temperaturas**

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-9026,2
Convección	8161,1
Radiación	865,03

**Figura 0.61 Flujos de calor**



## Escenario e11

### DATOS

Lana de Vidrio	
Conductividad	0,05 W/(m K)
Espesor	10 cm

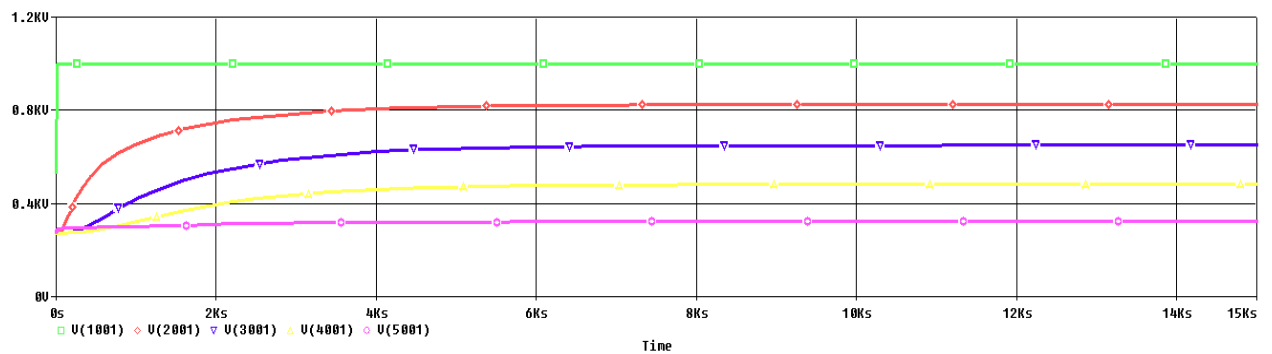
**Figura 0.65 Datos**

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
<b>10</b>	999,9
<b>20</b>	825,03
<b>30</b>	649,43
<b>40</b>	481,93
<b>50</b>	322

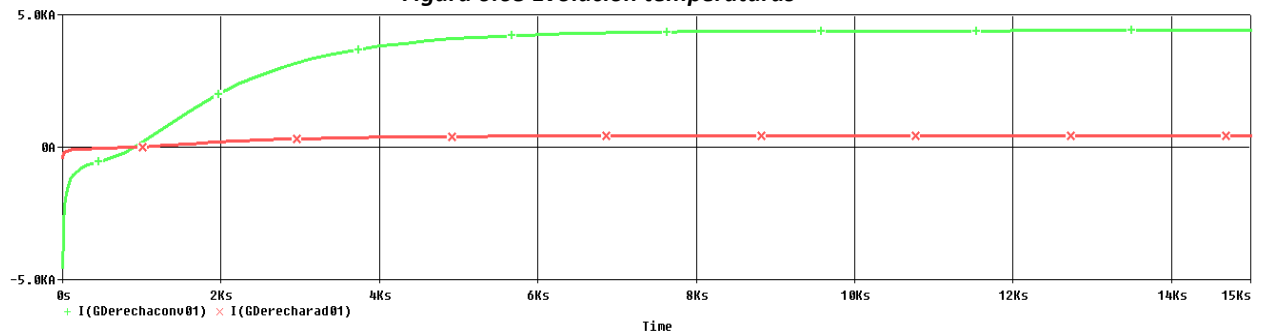
**Figura 0.66 Temperaturas**

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-4830,4
Convección	4396,4
Radiación	433,38

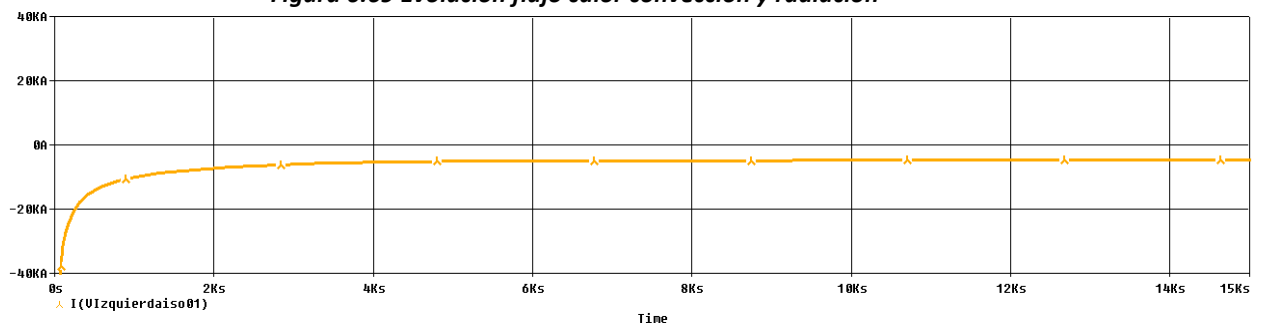
**Figura 0.67 Flujos de calor**



**Figura 0.68 Evolución temperaturas**



**Figura 0.69 Evolución flujo calor convección y radiación**



**Figura 0.70 Evolución flujo calor isotermo**

## Escenario e12

### DATOS

Lana de Vidrio	
Conductividad	0,05 W/(m K)
Espesor	12 cm

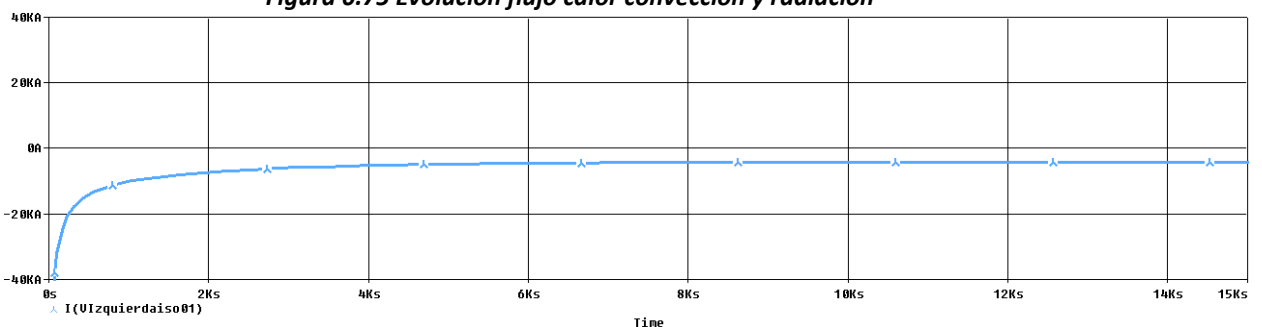
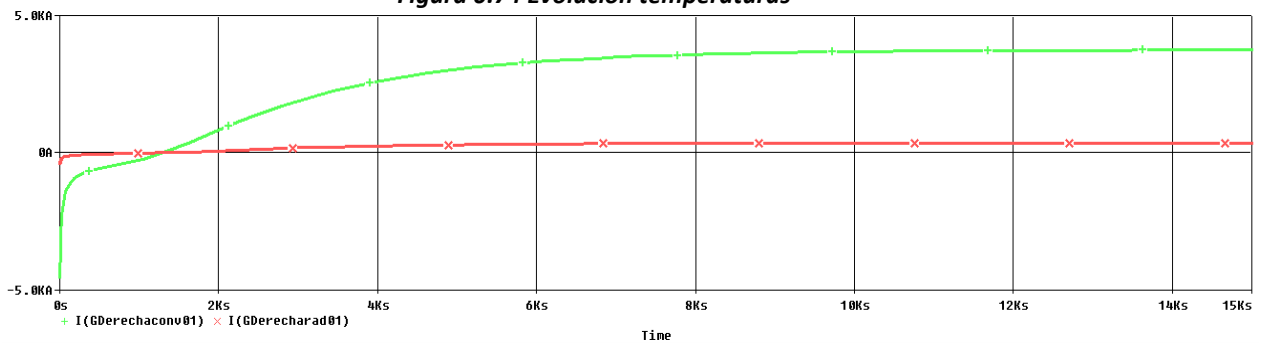
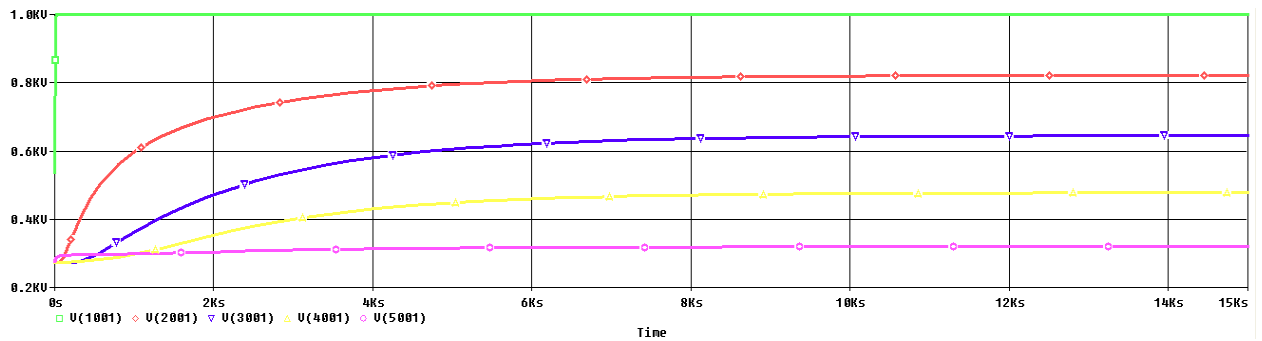
**Figura 0.71 Datos**

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
<b>10</b>	999,9
<b>20</b>	821,85
<b>30</b>	644,79
<b>40</b>	477,57
<b>50</b>	319,37

**Figura 0.72 Temperaturas**

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-4118,2
Convección	3742,2
Radiación	364,32

**Figura 0.73 Flujos de calor**



## IV.1.2.

# Esfera de Material Aislante Lana de Roca

Otro tipo de lana mineral es la denominada «lana de roca», elaborada a partir de rocas diabásicas (rocas basálticas), obteniéndose un producto de propiedades complementarias a la lana de vidrio.

Es un producto especialmente indicado para los aislamientos térmicos en la industria debido a su gran capacidad para soportar altas temperaturas.

El «caldo» utilizado en la fabricación de la lana de roca tiene unas características físico-químicas parecidas a los vidrios, estando compuestos por silicatos y óxidos metálicos. La lana de roca se obtiene fibrando por centrifugación el material, controlando en el proceso los contenidos de sílice y de óxidos metálicos.

La composición química final que debe asegurar una gran estabilidad mecánica hasta 750 °C es:

#### **Materias primas**

- Roca basáltica
- Grava
- Fosfato
- Mineral de hierro

#### **Materias primas encolado**

- Aceite de linaza
- Resina escórez
- Naftenato de manganeso
- Baquelita
- Aceite mineral

Las fibras, una vez impregnadas con un encolado compuesto de aceite mineral y una resina, caen sobre un tapiz metálico en movimiento para pasar a una estufa en la que un circuito de aire caliente asegura la polimerización del encolado.

La variación de la velocidad del tapiz de recepción permite obtener diferentes densidades y espesores del material aislante

Su conductividad varía de 0,03 a 0,05 W/(m · K).

### Escenario e13

#### DATOS

Lana de Roca	
Conductividad	0,032 W/(m K)
Espesor	3 cm

Figura 0.77 Datos

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
10	999,8
20	837,47
30	669,02
40	503
50	339,39

Figura 0.78 Temperaturas

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-9412,8
Convección	8501,1
Radiación	911,62

Figura 0.79 Flujos de calor

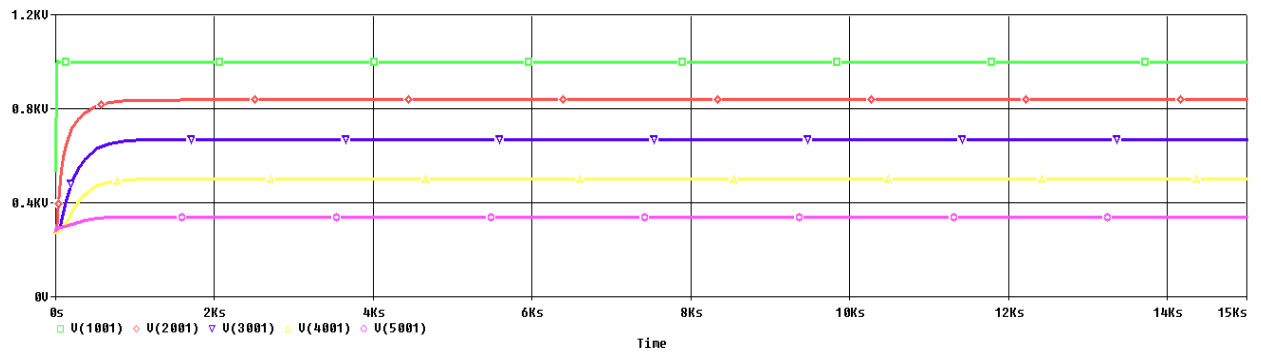


Figura 0.80 Evolución temperaturas

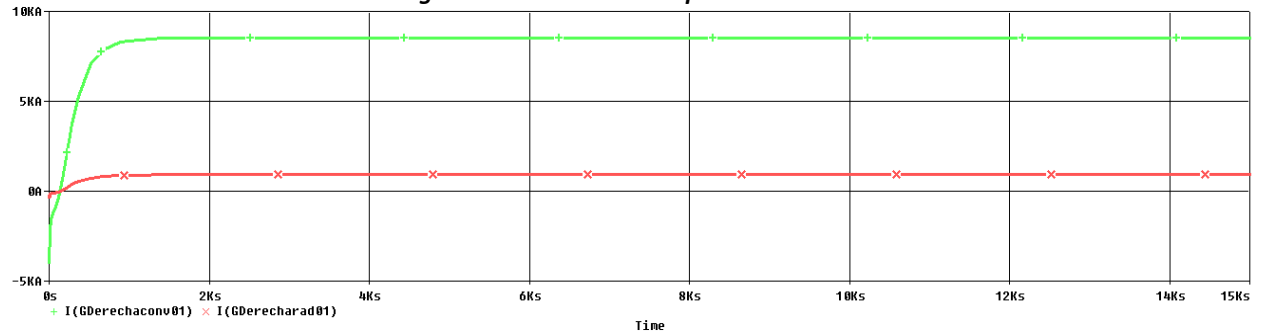


Figura 0.81 Evolución flujo calor convección y radiación

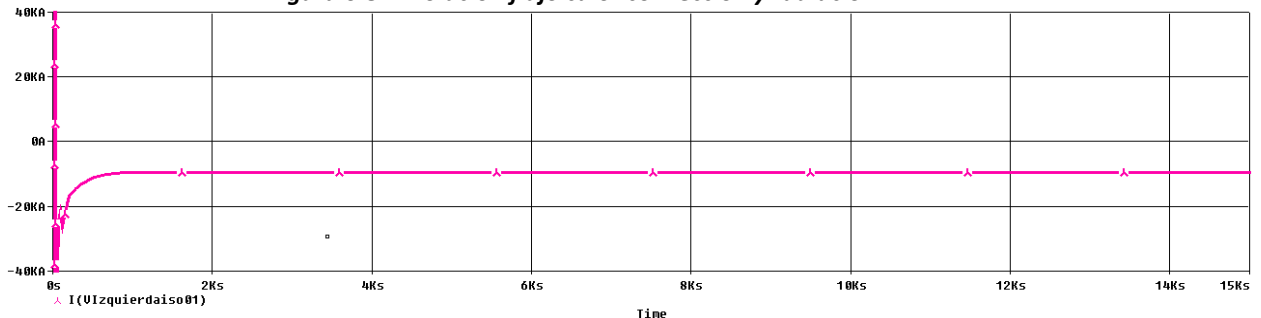


Figura 0.82 Evolución flujo calor isotermo

### Escenario e14

#### DATOS

Lana de Roca	
Conductividad	0,032 W/(m K)
Espesor	5 cm

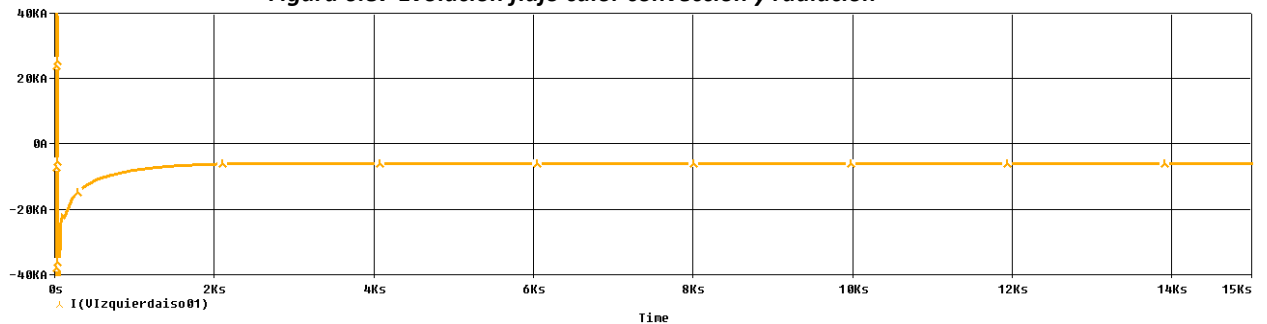
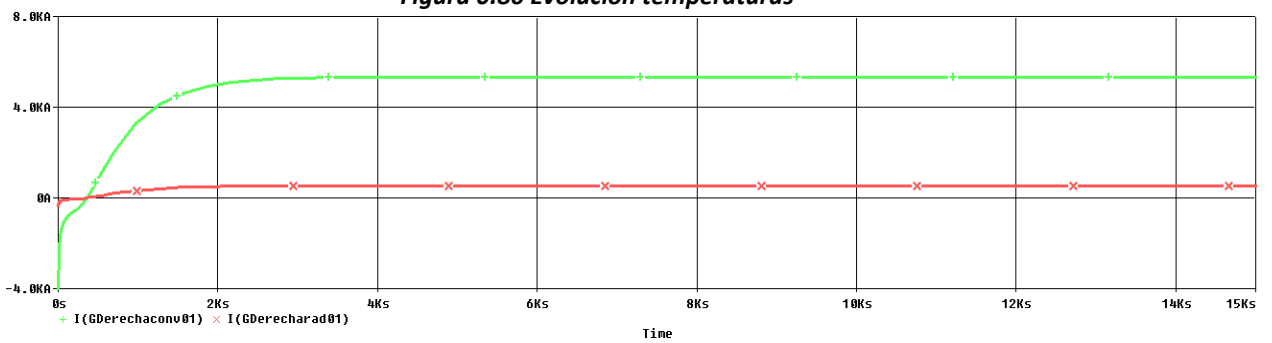
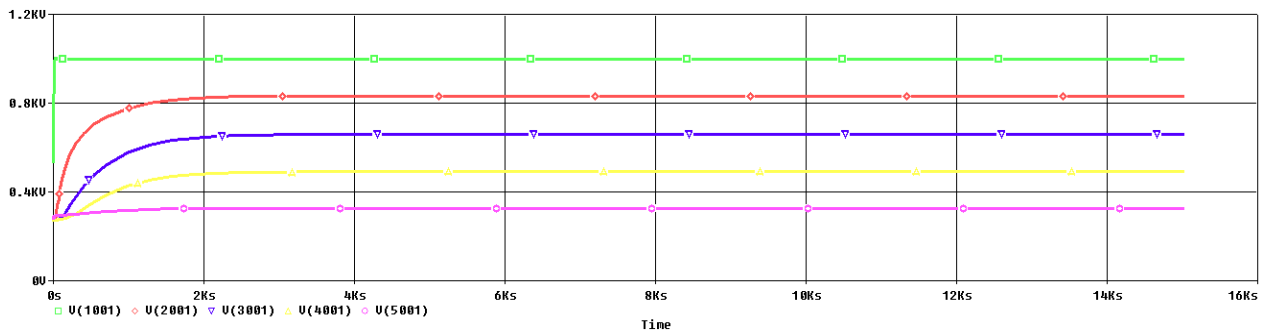
Figura 0.83 Datos

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
10	999,9
20	832,11
30	659,66
40	491,33
50	326,97

Figura 0.84 Temperaturas

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-5863,7
Convección	5326,4
Radiación	537,32

Figura 0.85 Flujos de calor





Escenario e15

DATOS

Lana de Roca	
Conductividad	0,032 W/(m K)
Espesor	10 cm

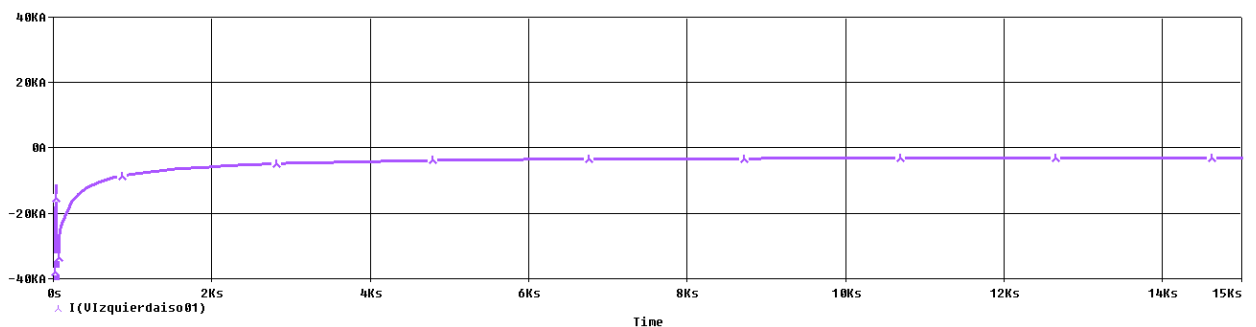
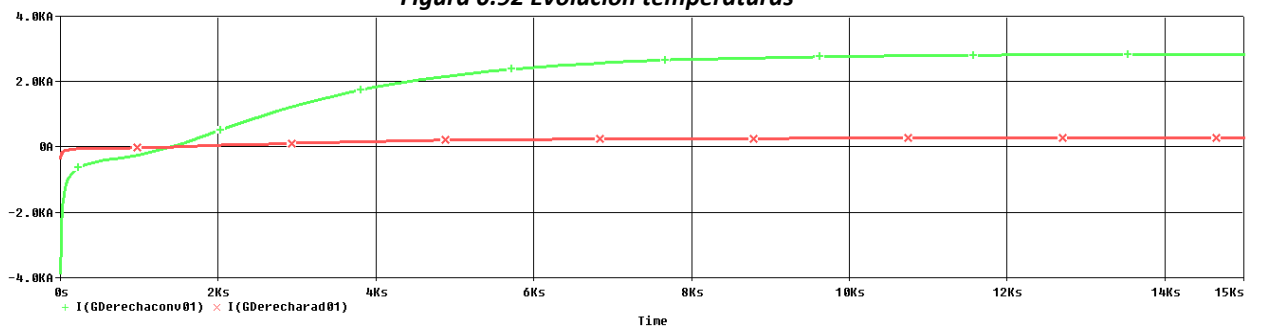
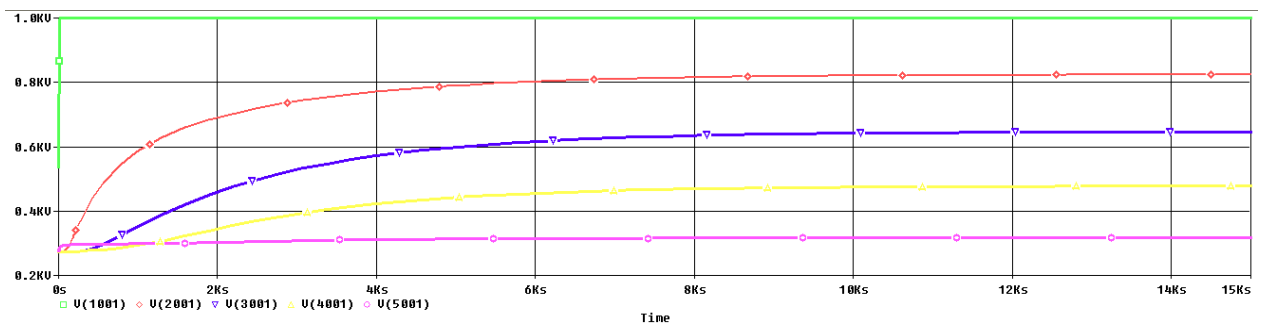
Figura 0.89 Datos

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
10	1000
20	823,41
30	646,36
40	477,76
50	316,99

Figura 0.90 Temperaturas

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-3121,3
Convección	2833,9
Radiación	272,44

Figura 0.91 Flujos de calor





## Escenario e16

### DATOS

Lana de Roca	
Conductividad	0,032 W/(m K)
Espesor	12 cm

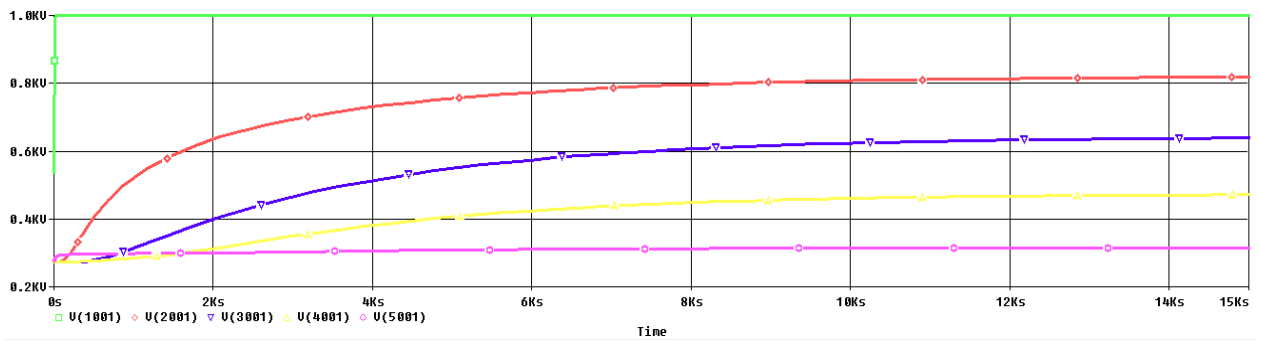
**Figura 0.95 Datos**

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
<b>10</b>	1000
<b>20</b>	818,20
<b>30</b>	638,92
<b>40</b>	471,68
<b>50</b>	314,98

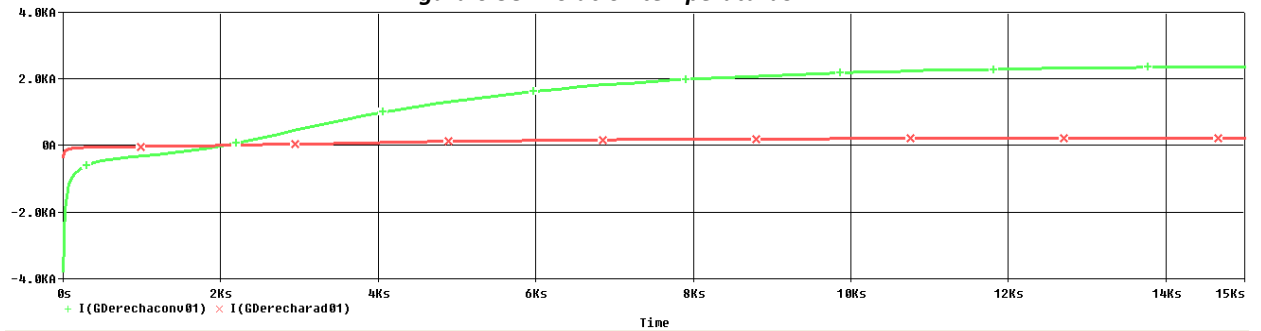
**Figura 0.96 Temperaturas**

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-2693,7
Convección	2371,1
Radiación	225,60

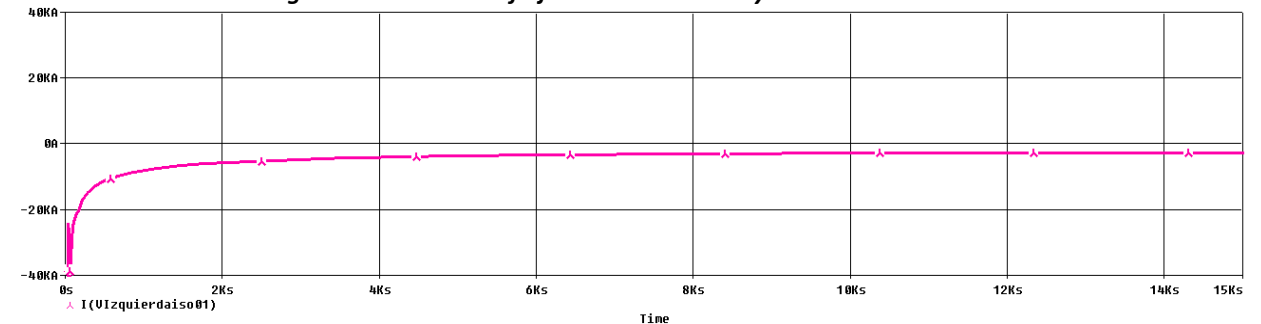
**Figura 0.97 Flujos de calor**



**Figura 0.98 Evolución temperaturas**



**Figura 0.99 Evolución flujo calor convección y radiación**



**Figura 0.100 Evolución flujo calor isotermo**

Escenario e17

**DATOS**

Lana de Roca	
Conductividad	0,045 W/(m K)
Espesor	3 cm

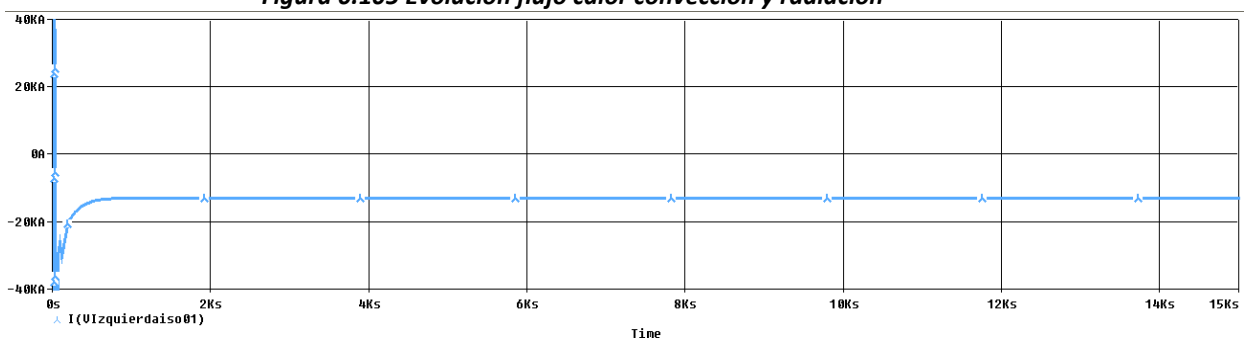
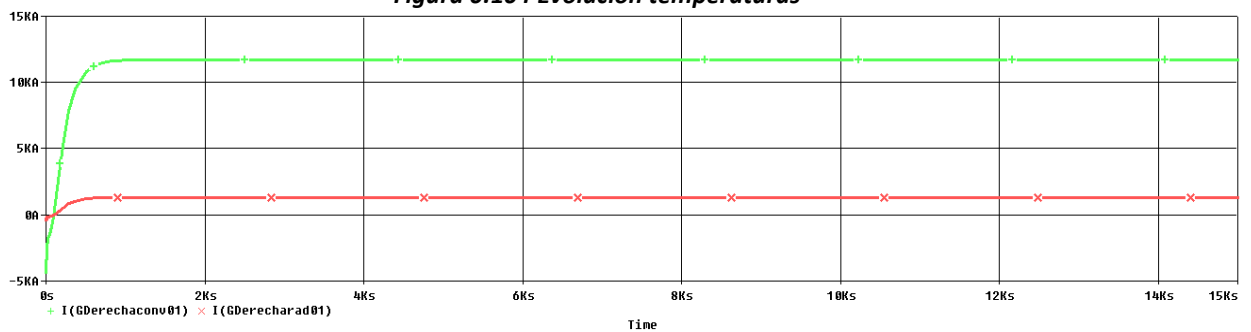
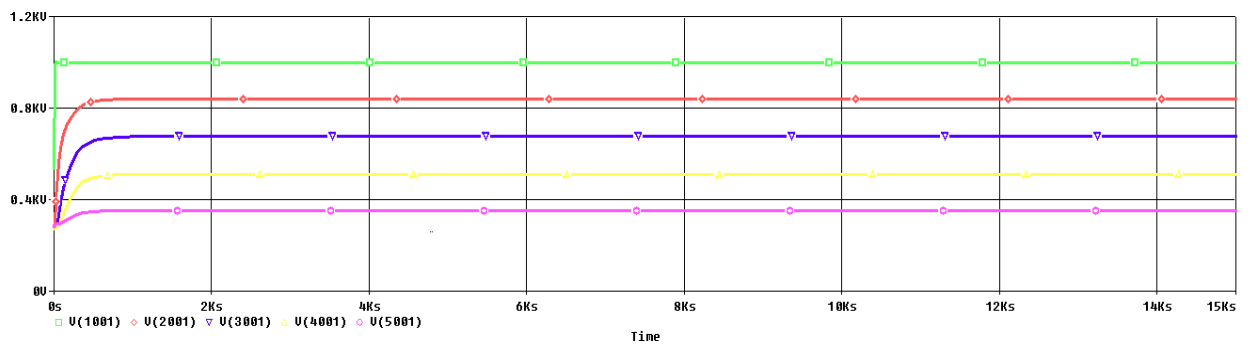
Figura 0.101 Datos

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
10	999,8
20	840,26
30	674,76
40	511,67
50	350,93

Figura 0.102 Temperaturas

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-13004
Convección	11678
Radiación	1325,8

Figura 0.103 Flujos de calor



### Escenario e18

#### DATOS

Lana de Roca	
Conductividad	0,045 W/(m K)
Espesor	5 cm

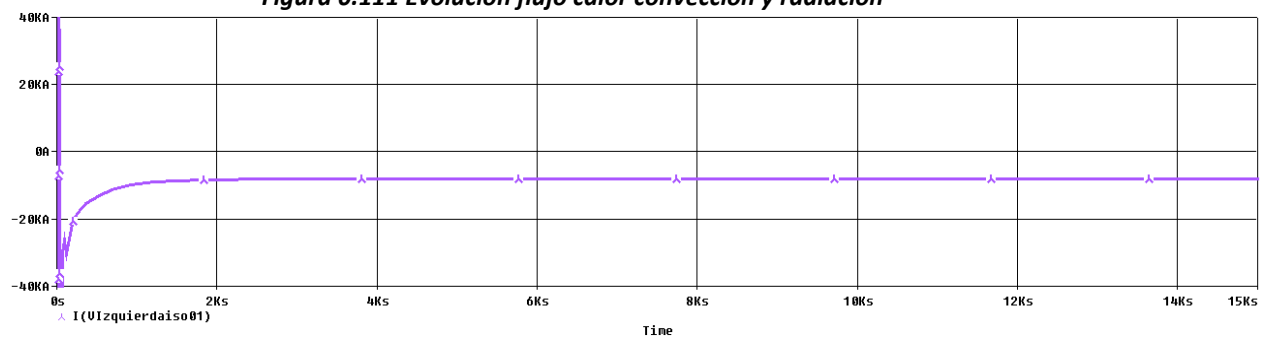
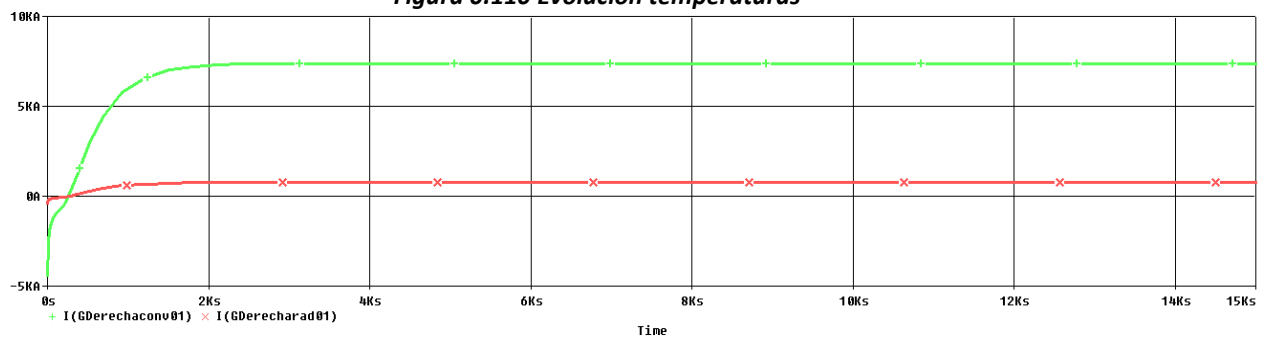
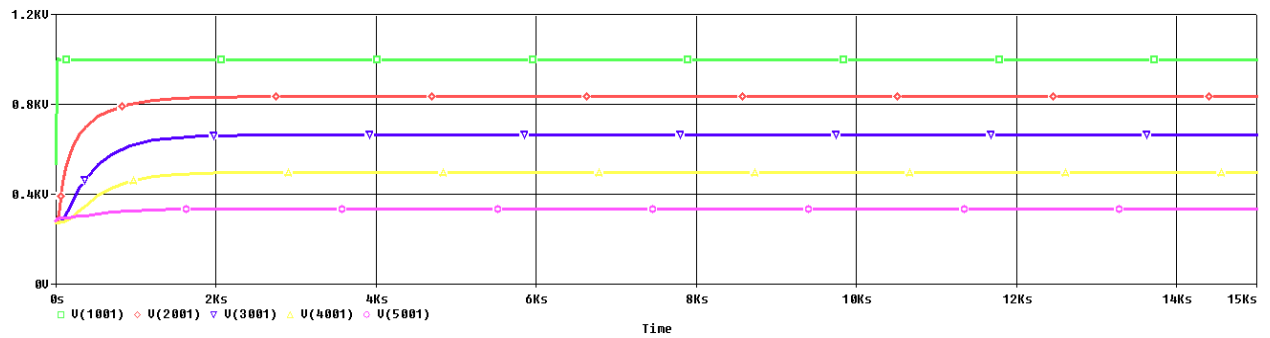
**Figura 0.107 Datos**

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
<b>10</b>	999,9
<b>20</b>	833,87
<b>30</b>	663,27
<b>40</b>	496,76
<b>50</b>	334,18

**Figura 0.108 Temperaturas**

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-8157
Convección	7384,8
Radiación	772,24

**Figura 0.109 Flujos de calor**





Escenario e19

**DATOS**

Lana de Roca	
Conductividad	0,045 W/(m K)
Espesor	10 cm

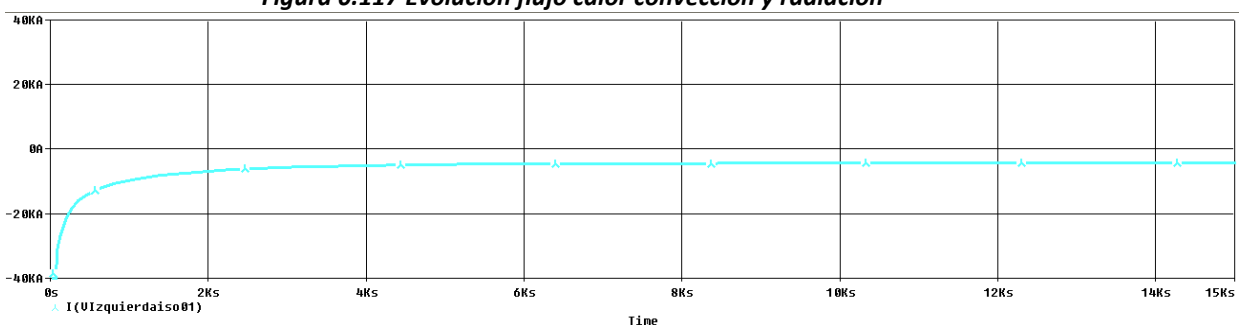
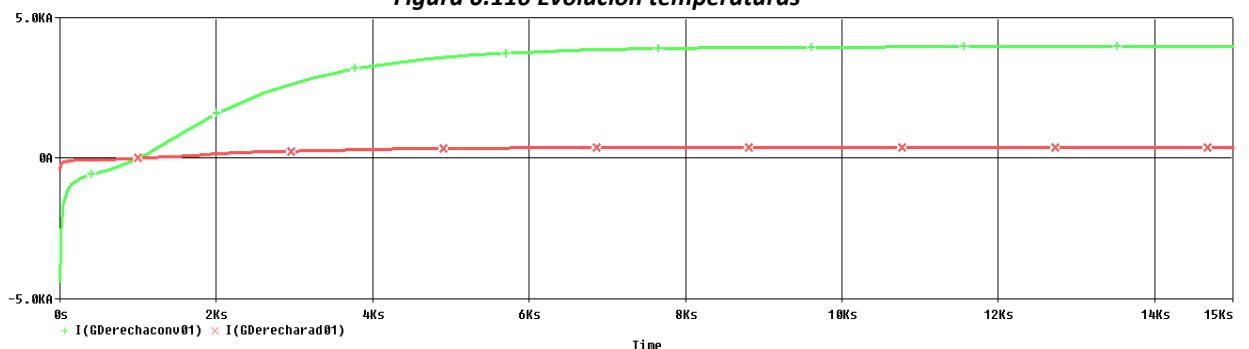
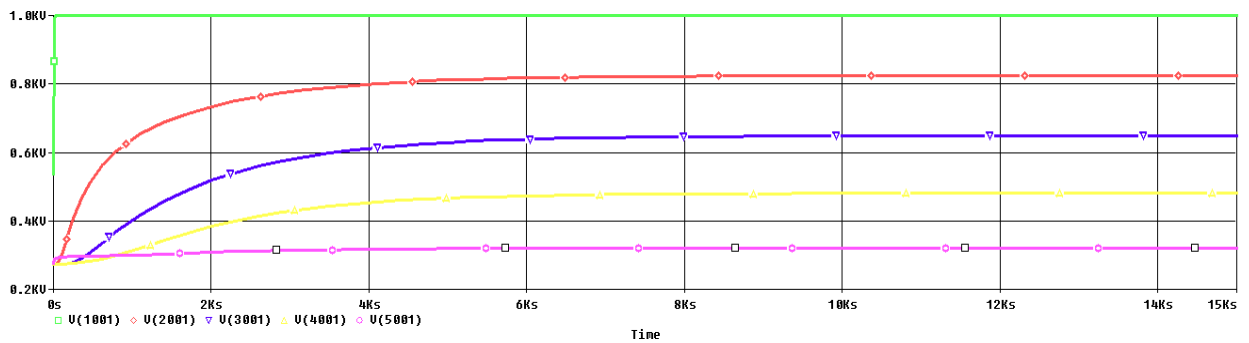
Figura 0.113 Datos

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
10	999,9
20	824,67
30	648,71
40	480,87
50	320,63

Figura 0.114 Temperaturas

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-4356,6
Convección	3966,8
Radiación	388,35

Figura 0.115 Flujos de calor





Escenario e20

**DATOS**

Lana de Roca	
Conductividad	0,045 W/(m K)
Espesor	12 cm

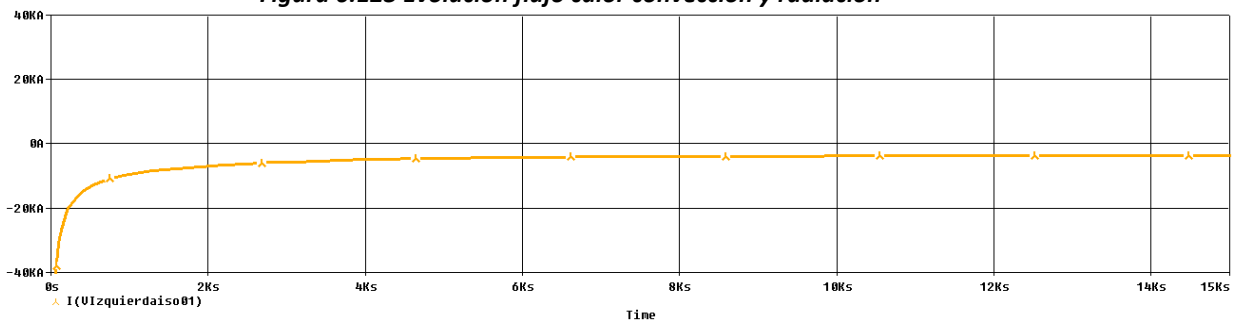
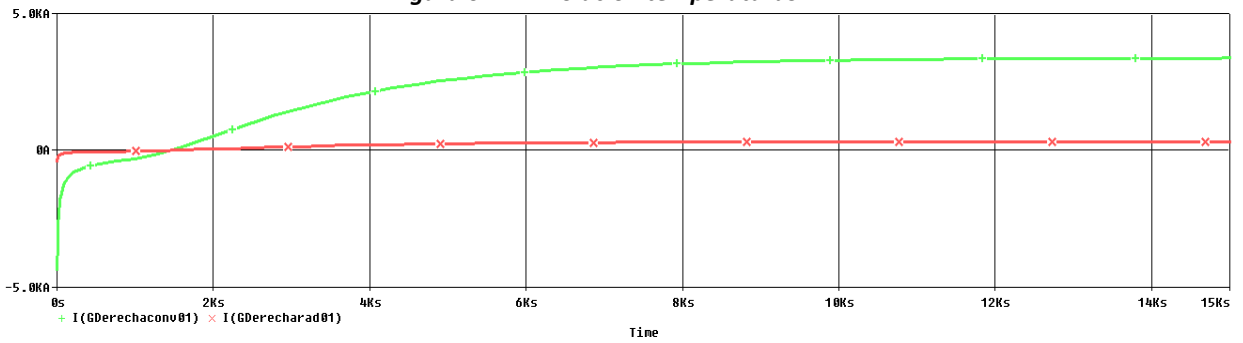
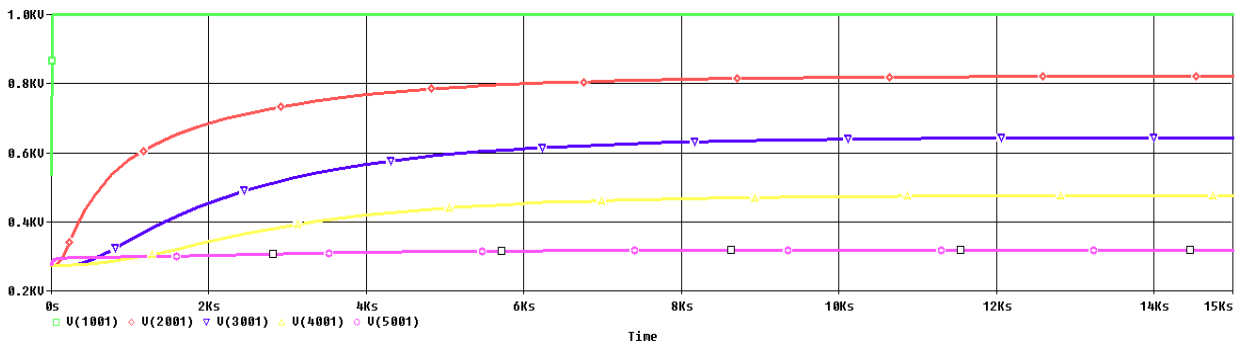
Figura 0.119 Datos

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
10	999,9
20	821,34
30	643,88
40	476,46
50	318,21

Figura 0.120 Temperaturas

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-3717,5
Convección	3370,2
Radiación	326,22

Figura 0.121 Flujos de calor



Escenario e21

**DATOS**

Lana de Roca	
Conductividad	0,05 W/(m K)
Espesor	3 cm

Figura 0.125 Datos

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
10	999,8
20	841,30
30	676,90
40	514,90
50	355,23

Figura 0.126 Temperaturas

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-14353
Convección	12861
Radiación	1491,3

Figura 0.127 Flujos de calor

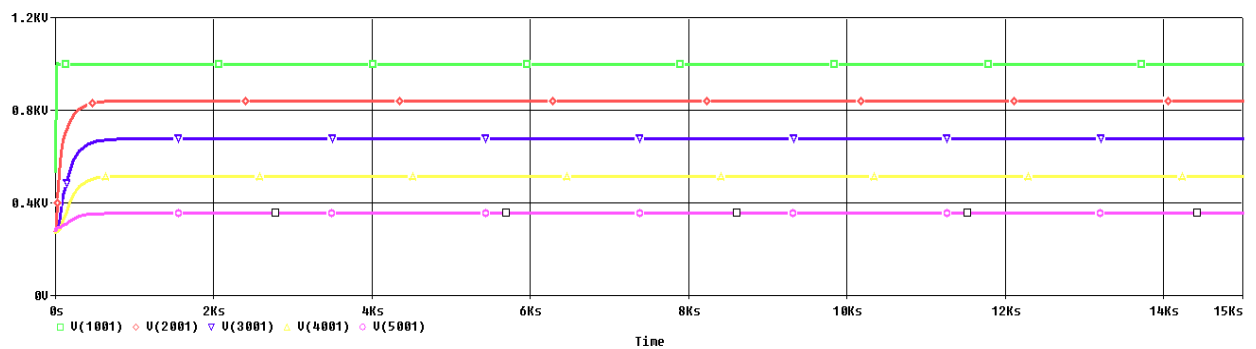


Figura 0.128 Evolución temperaturas

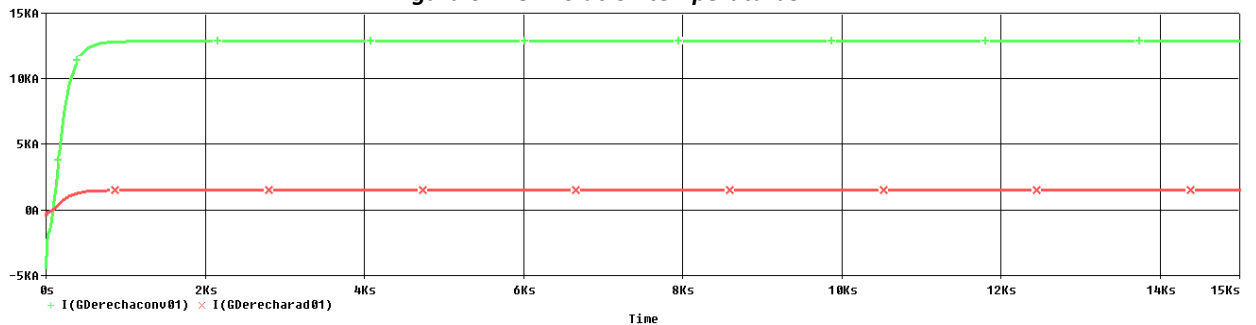


Figura 0.129 Evolución flujo calor convección y radiación

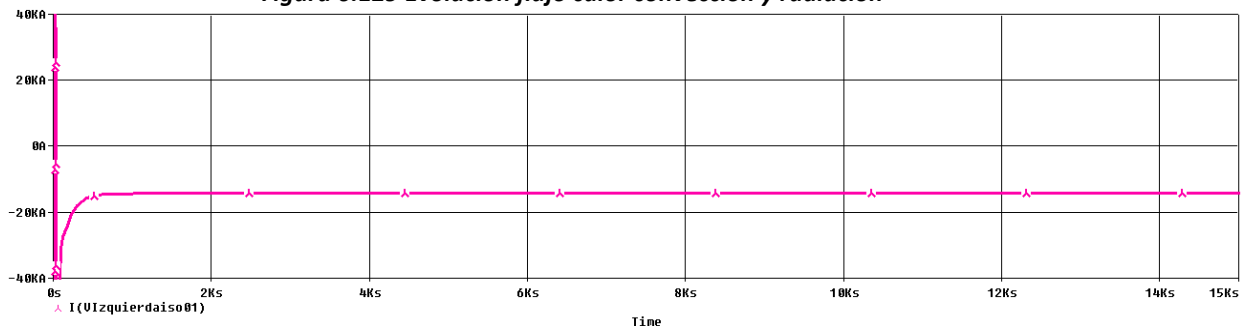


Figura 0.130 Evolución flujo calor isotermo

## Escenario e22

### DATOS

Lana de Roca	
Conductividad	0,05 W/(m K)
Espesor	5 cm

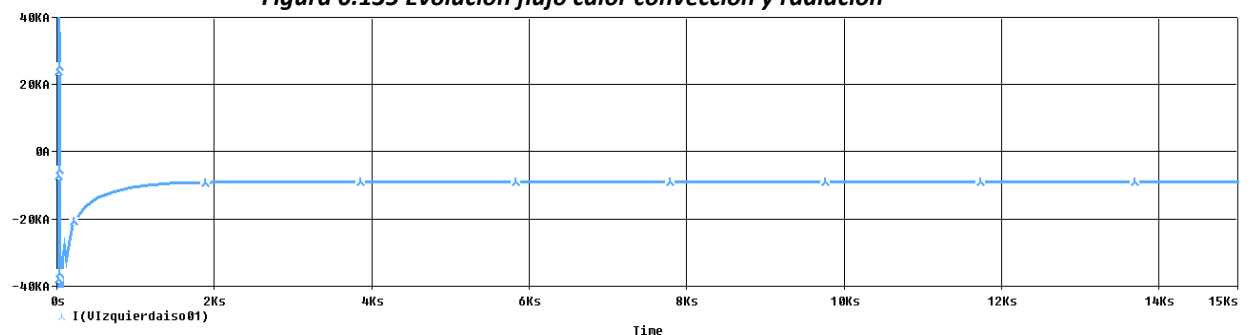
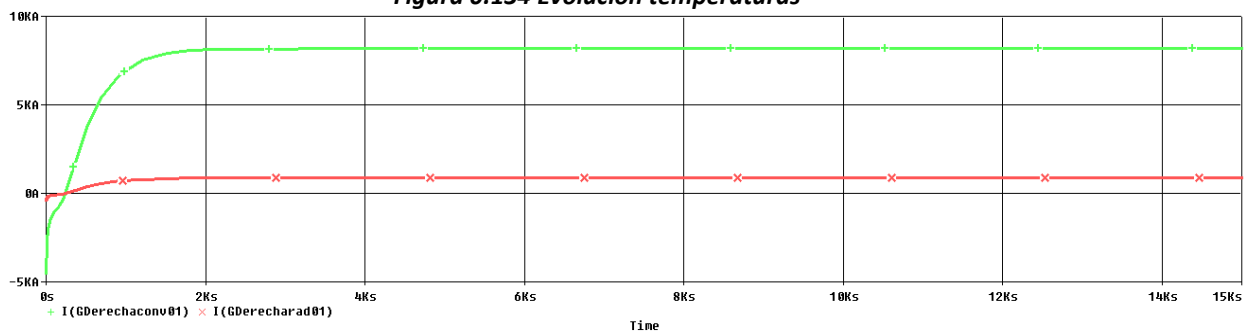
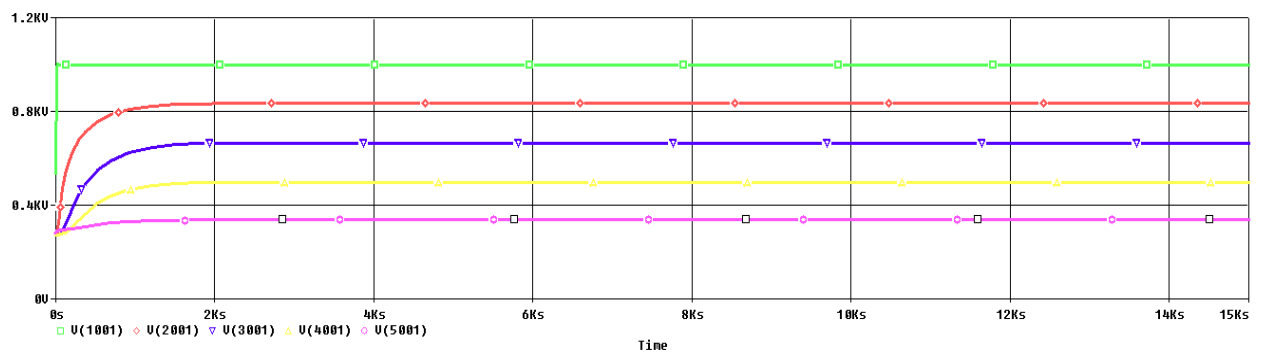
**Figura 0.131 Datos**

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
<b>10</b>	999,8
<b>20</b>	834,54
<b>30</b>	664,65
<b>40</b>	498,81
<b>50</b>	336,89

**Figura 0.132 Temperaturas**

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-9026,2
Convección	8161,1
Radiación	865,03

**Figura 0.133 Flujos de calor**





Escenario e23

**DATOS**

Lana de Roca	
Conductividad	0,05 W/(m K)
Espesor	10 cm

Figura 0.137 Datos

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
10	999,9
20	825,03
30	649,43
40	481,93
50	322

Figura 0.138 Temperaturas

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-4830,4
Convección	4396,4
Radiación	433,38

Figura 0.139 Flujos de calor

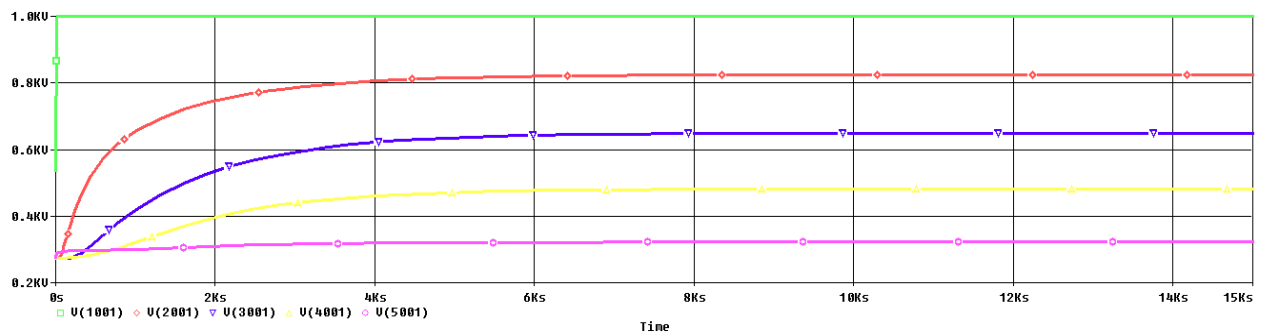


Figura 0.140 Evolución temperaturas

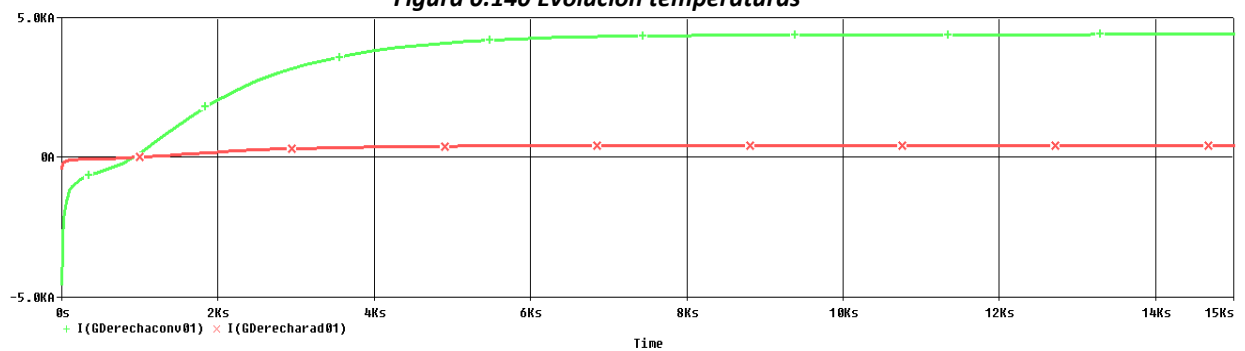


Figura 0.141 Evolución flujo calor convección y radiación

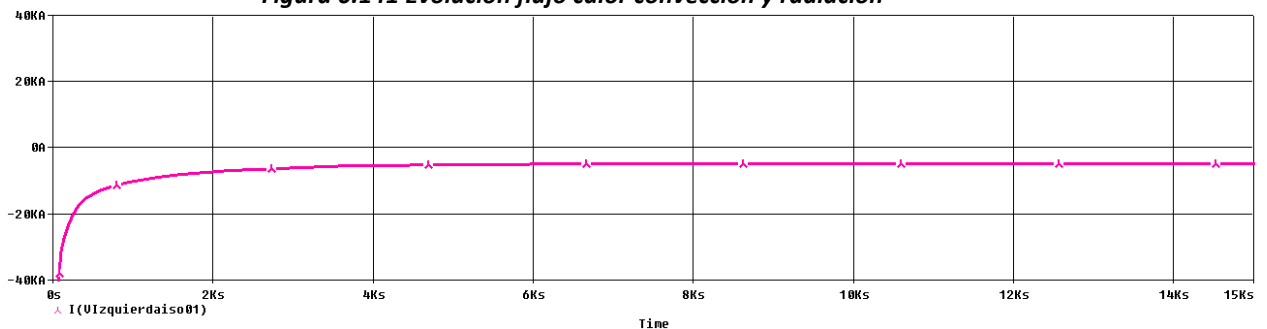


Figura 0.142 Evolución flujo calor isotermo





Escenario e24

**DATOS**

Lana de Roca	
Conductividad	0,05 W/(m K)
Espesor	12 cm

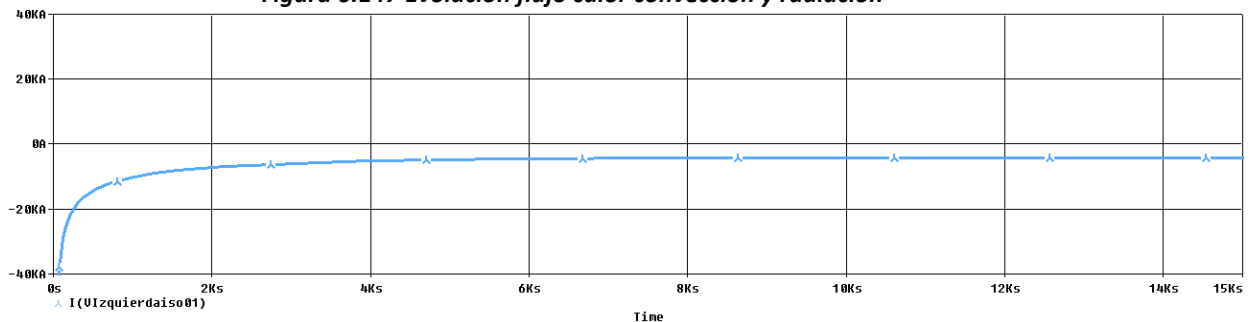
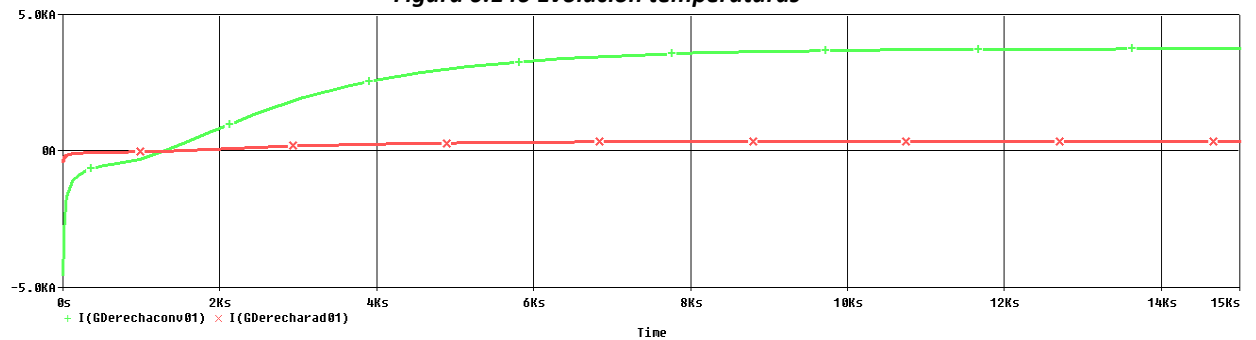
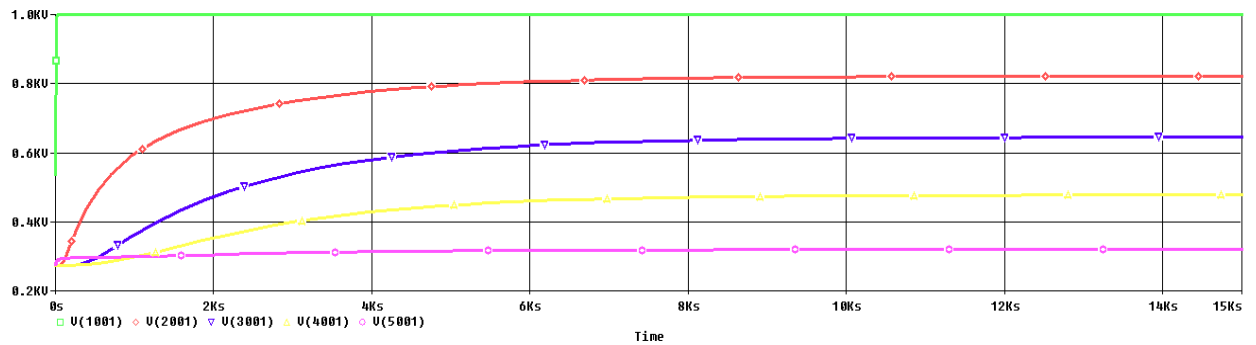
Figura 0.143 Datos



Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
10	999,9
20	821,85
30	644,78
40	477,55
50	319,35

Figura 0.144 Temperaturas

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-4118,2
Convección	3742,4
Radiación	364,29

Figura 0.145 Flujos de calor



	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo IV. ESCENARIOS Y RESULTADOS</b>		<b>FECHA: 09/2015</b>	

## IV.1.3.

# Esfera de Material Aislante Espuma de Poliuretano

La espuma de poliuretano (espuma PU) es un material plástico poroso formado por una agregación de burbujas, conocido también por los nombres coloquiales de gomaespuma en España. También es denominado Poliuretano proyectado, debido a la forma en la que se suele aplicar sobre superficies.

Se forma básicamente por la reacción química de dos compuestos, un polioliol y un isocianato, aunque su formulación necesita y admite múltiples variantes y aditivos. Dicha reacción libera dióxido de carbono, gas que va formando las burbujas.

Considerando que los cauchos de poliuretano sólidos son productos especiales, las espumas de poliuretano son ampliamente utilizadas.

Es un material muy versátil ya que, según los aditivos y los sistemas de fabricación utilizados, se pueden conseguir características muy distintas y espumas destinadas a usos muy diferentes.

Para comparar las distintas espumas se suele utilizar mucho la densidad, pero sólo sirve como elemento comparativo cuando se habla de espumas con la misma composición, ya que distintas fórmulas dan características diferentes. En unas espumas se busca la mayor duración posible, en otras el precio más económico, en otras la transpirabilidad, la capacidad aislante, la facilidad de perfilar o dar forma, la ligereza, etc.

Su conductividad varía entre 0,019 y 0,04 W/(m · K).

## Escenario e25

### DATOS

Espuma de Poliuretano	
Conductividad	0,020 W/(m K)
Espesor	3 cm

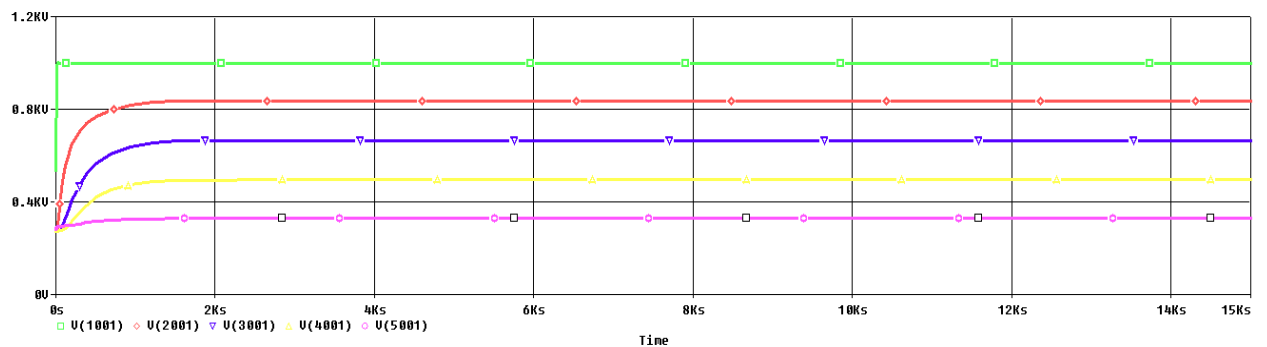
**Figura 0.149 Datos**

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
<b>10</b>	999,9
<b>20</b>	834,78
<b>30</b>	663,46
<b>40</b>	494,63
<b>50</b>	328,23

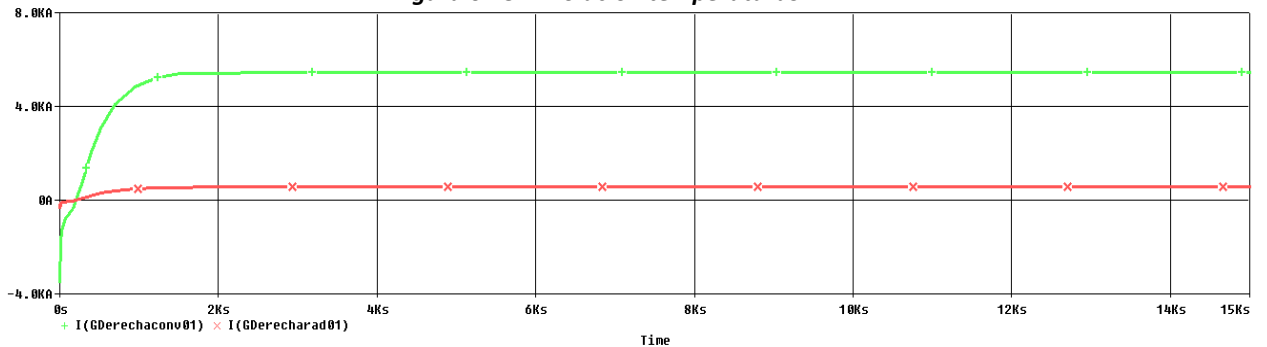
**Figura 0.150 Temperaturas**

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-5982,9
Convección	5431,9
Radiación	551,01

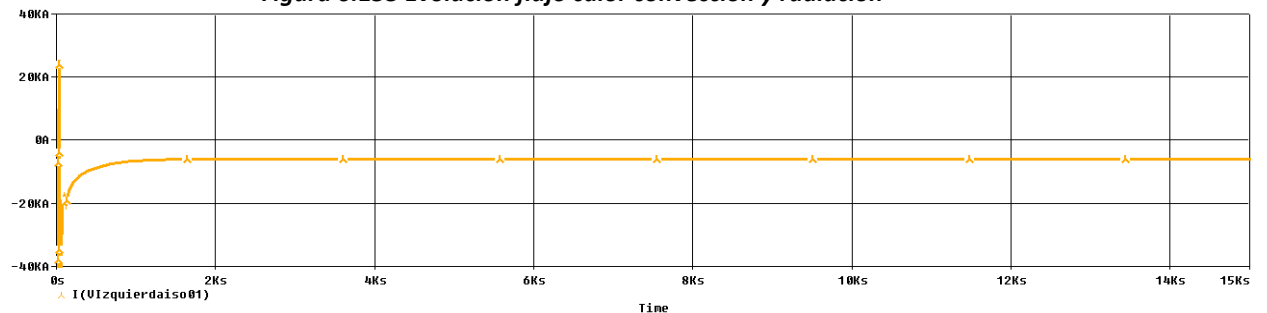
**Figura 0.151 Flujos de calor**



**Figura 0.152 Evolución temperaturas**



**Figura 0.153 Evolución flujo calor convección y radiación**



**Figura 0.154 Evolución flujo calor isotermo**

## Escenario e26

### DATOS

Espuma de Poliuretano	
Conductividad	0,020 W/(m K)
Espesor	5 cm

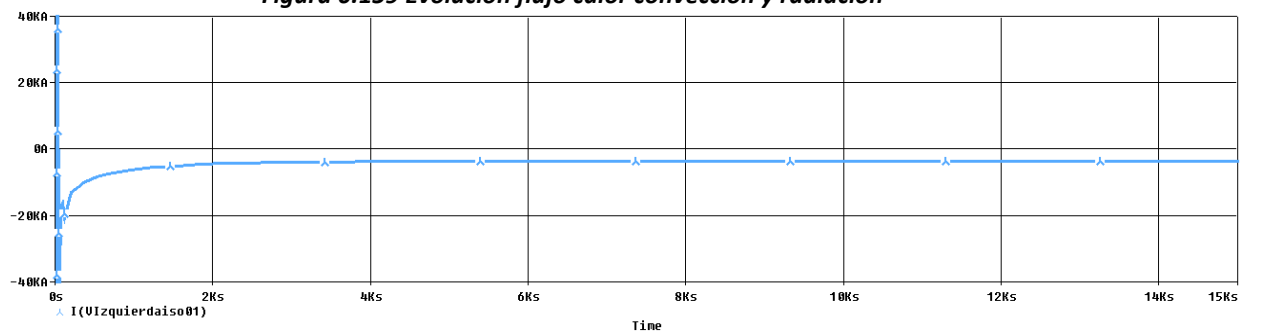
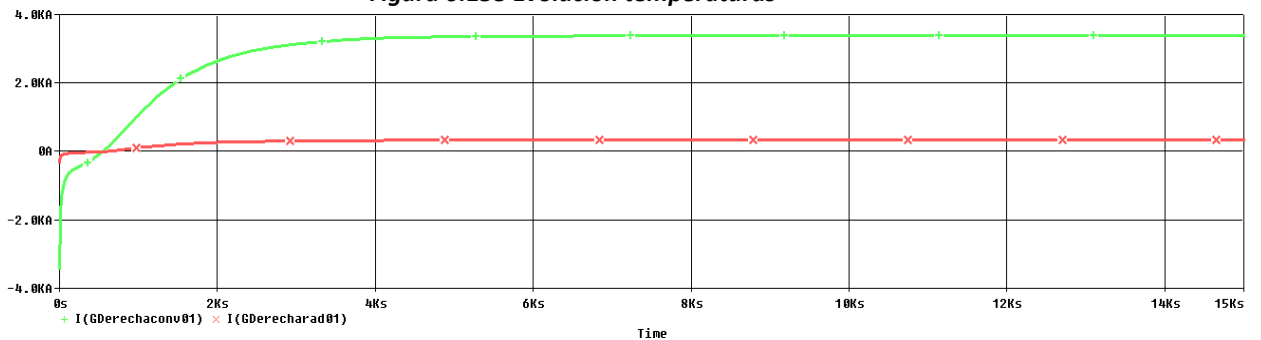
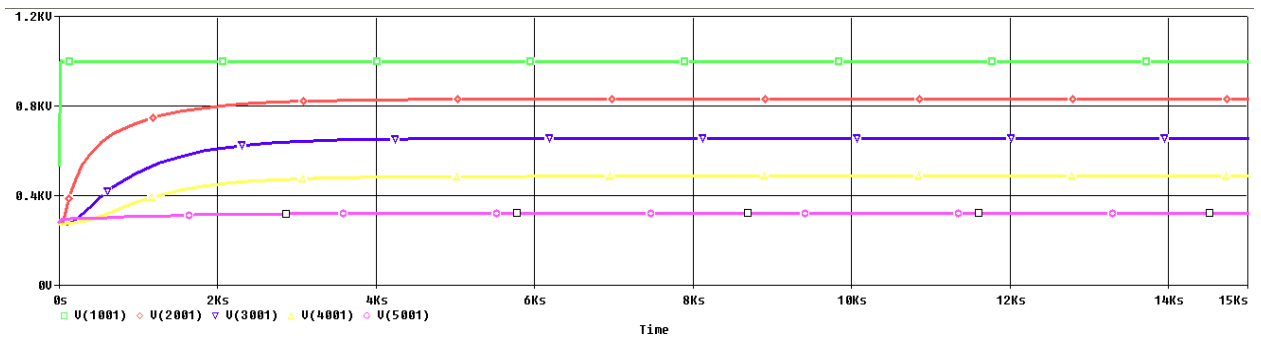
**Figura 0.155 Datos**

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
<b>10</b>	999,8
<b>20</b>	830,43
<b>30</b>	656,23
<b>40</b>	486,18
<b>50</b>	320,14

**Figura 0.156 Temperaturas**

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-3702,2
Convección	3373,4
Radiación	328,84

**Figura 0.157 Flujos de calor**





Escenario e27

DATOS

Espuma de Poliuretano  
Conductividad 0,020 W/(m K)  
Espesor 10 cm

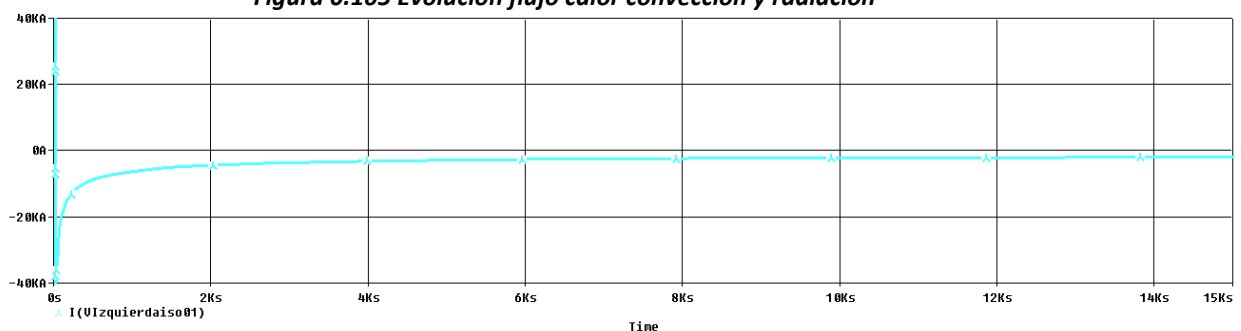
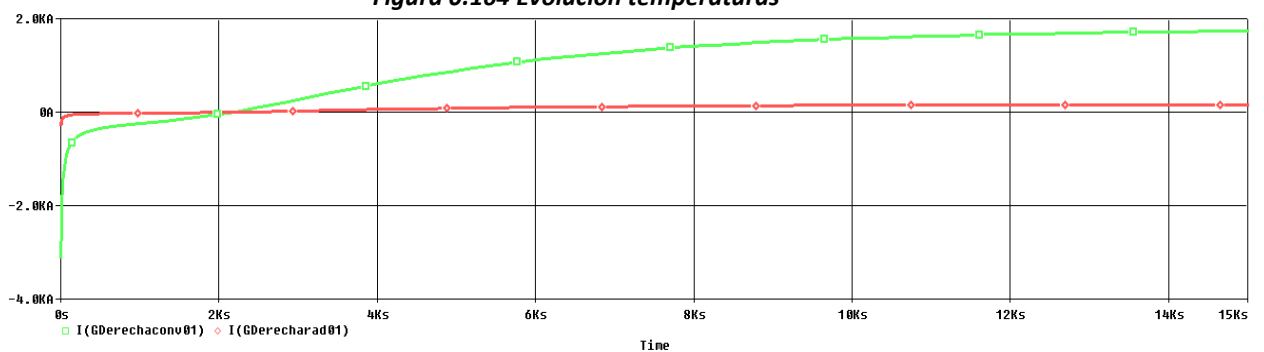
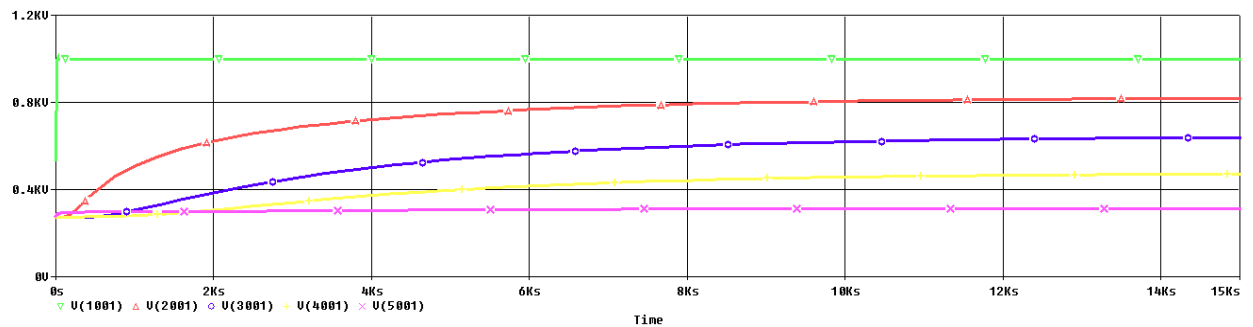
Figura 0.161 Datos

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
10	1000
20	818,8
30	639,18
40	471,22
50	313,29

Figura 0.162 Temperaturas

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-2006
Convección	1736,8
Radiación	164,05

Figura 0.163 Flujos de calor





Escenario e28

**DATOS**

Espuma de Poliuretano	
Conductividad	0,020 W/(m K)
Espesor	12 cm

Figura 0.167 Datos

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
10	1000
20	804,9
30	619,38
40	456,43
50	311,19

Figura 0.168 Temperaturas

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-1818,2
Convección	1359,4
Radiación	127,52

Figura 0.169 Flujos de calor

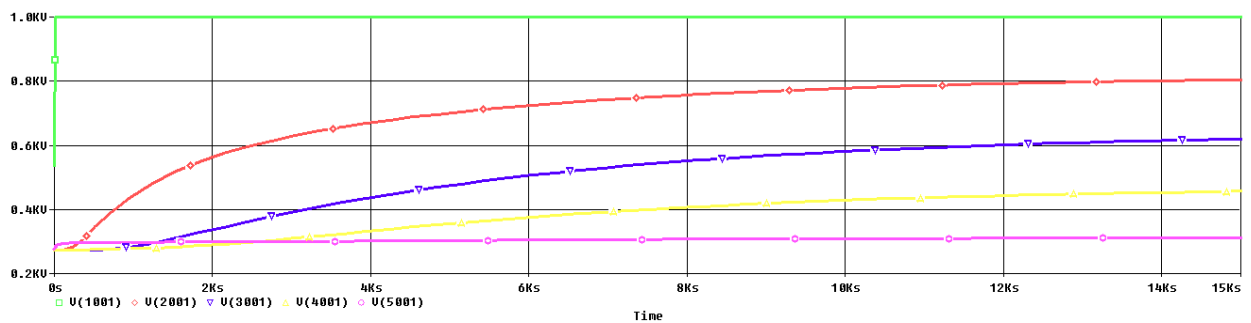


Figura 0.170 Evolución temperaturas

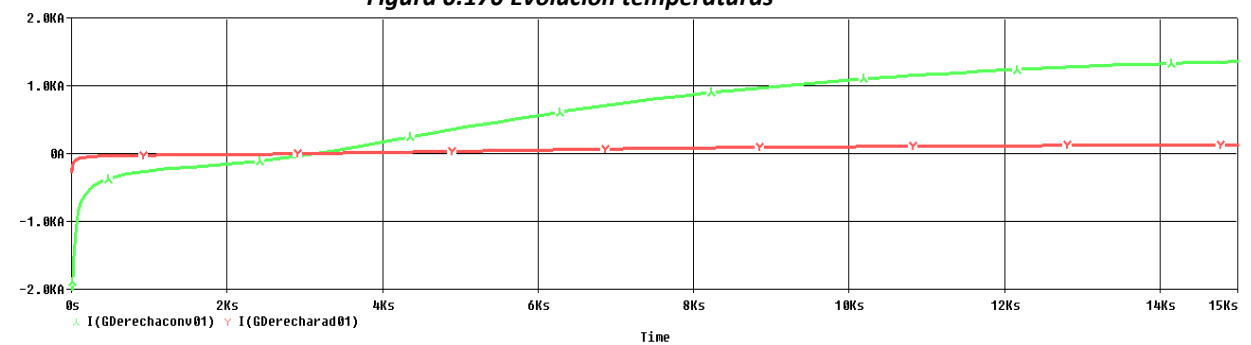


Figura 0.171 Evolución flujo calor convección y radiación

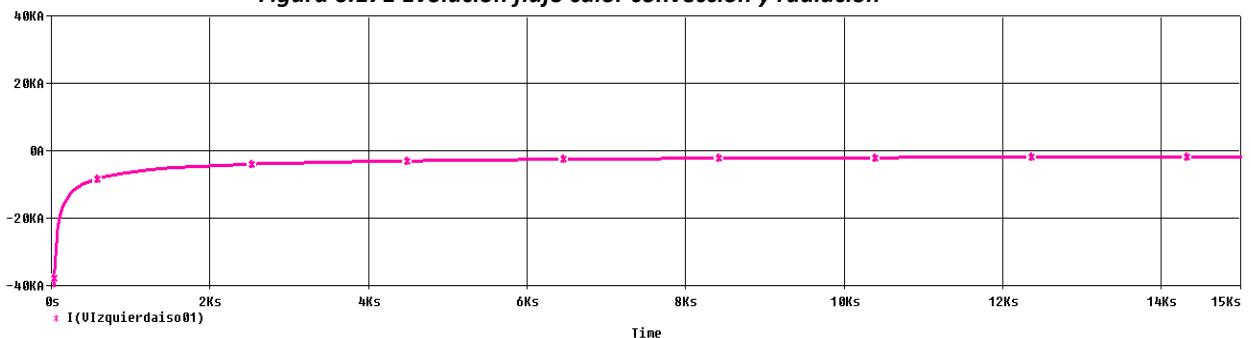


Figura 0.172 Evolución flujo calor isotermo

## Escenario e29

### DATOS

Espuma de Poliuretano	
Conductividad	0,032 W/(m K)
Espesor	3 cm

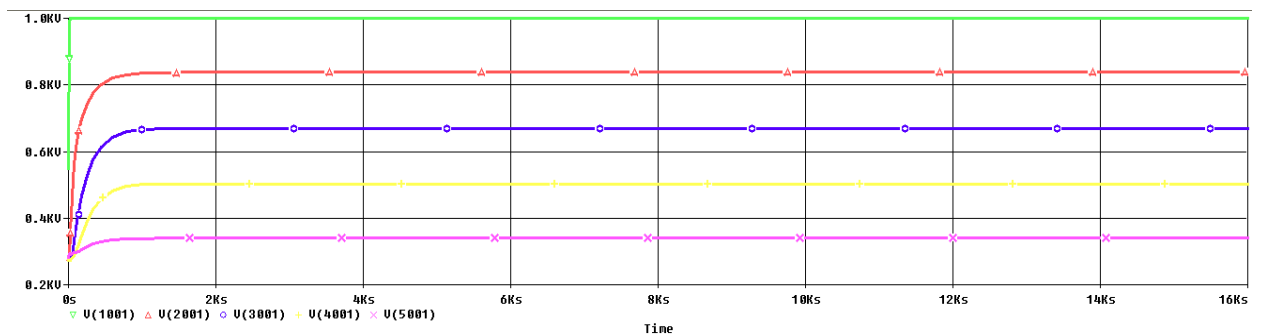
**Figura 0.173 Datos**

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
<b>10</b>	999,8
<b>20</b>	837,49
<b>30</b>	669,01
<b>40</b>	503
<b>50</b>	339,39

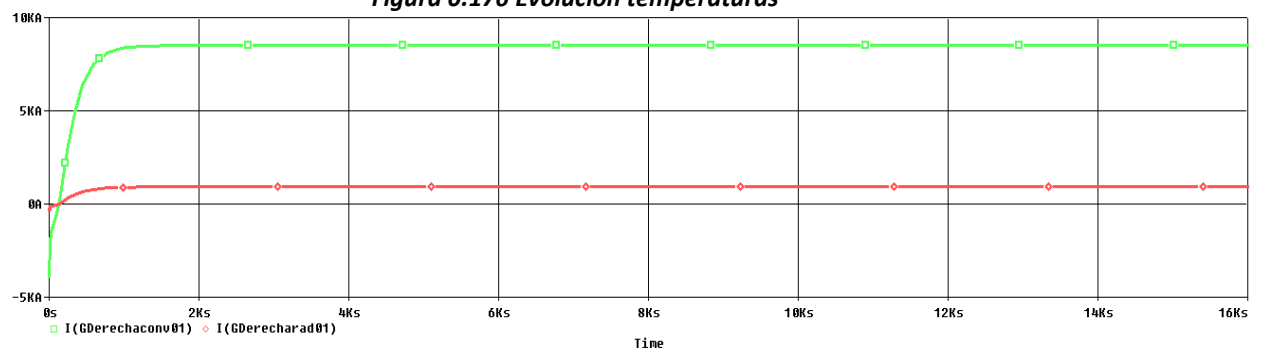
**Figura 0.174 Temperaturas**

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-9412,8
Convección	8501,1
Radiación	911,62

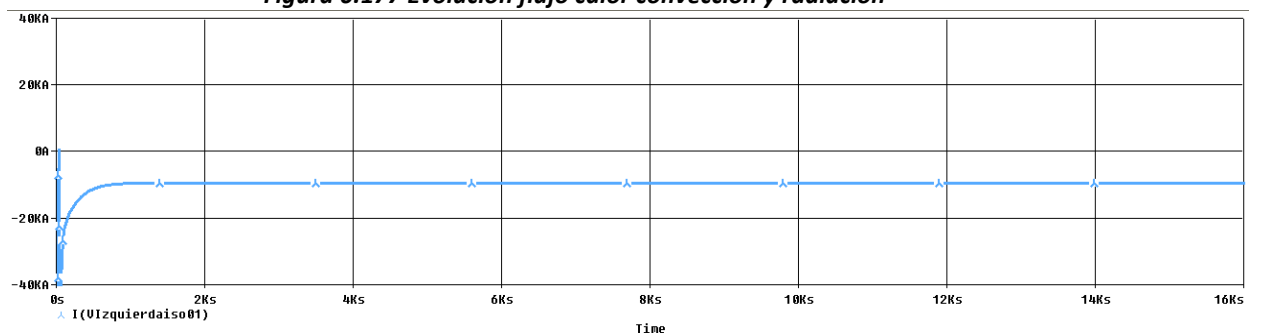
**Figura 0.175 Flujos de calor**



**Figura 0.176 Evolución temperaturas**



**Figura 0.177 Evolución flujo calor convección y radiación**



**Figura 0.178 Evolución flujo calor isotermo**

### Escenario e30

#### DATOS

Espuma de Poliuretano	
Conductividad	0,032 W/(m K)
Espesor	5 cm

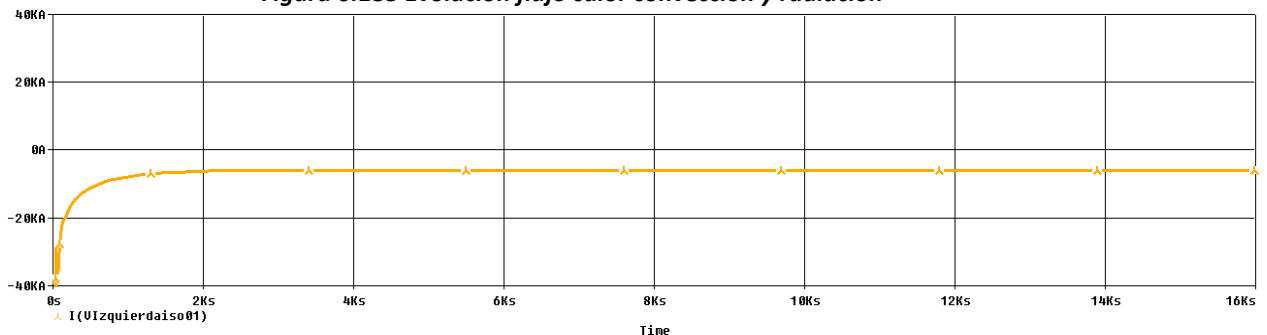
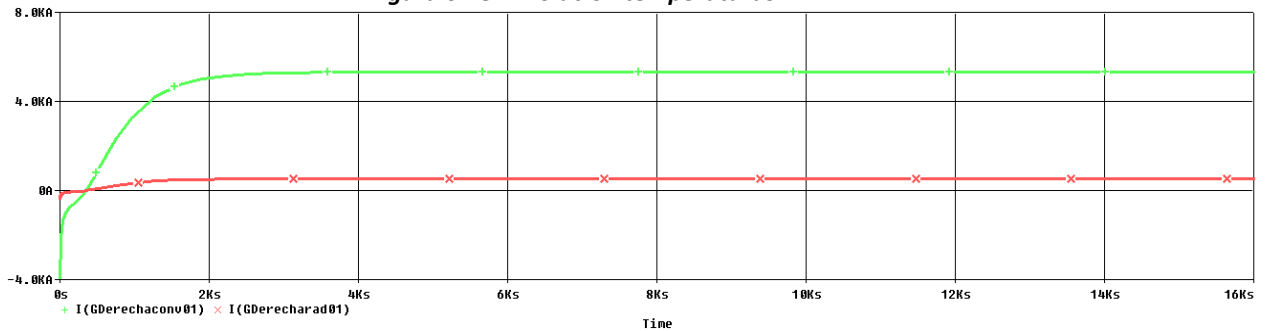
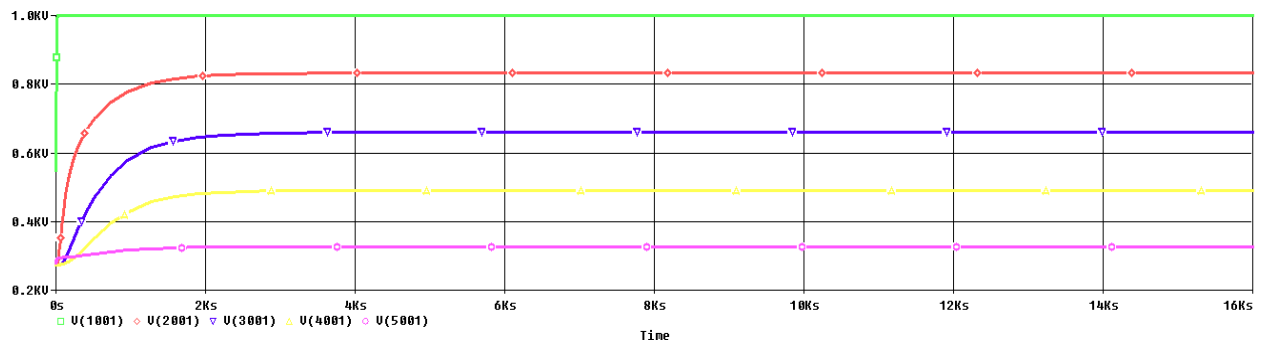
**Figura 0.179 Datos**

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
10	999,9
20	832,11
30	659,66
40	491,33
50	326,97

**Figura 0.180 Temperaturas**

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-5863,7
Convección	5326,4
Radiación	537,32

**Figura 0.181 Flujos de calor**





### Escenario e31

#### DATOS

Espuma de Poliuretano	
Conductividad	0,032 W/(m K)
Espesor	10 cm

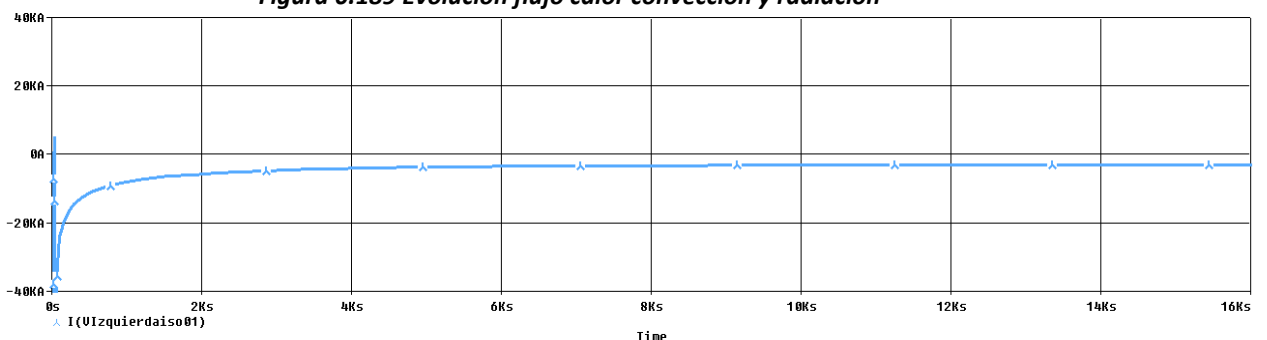
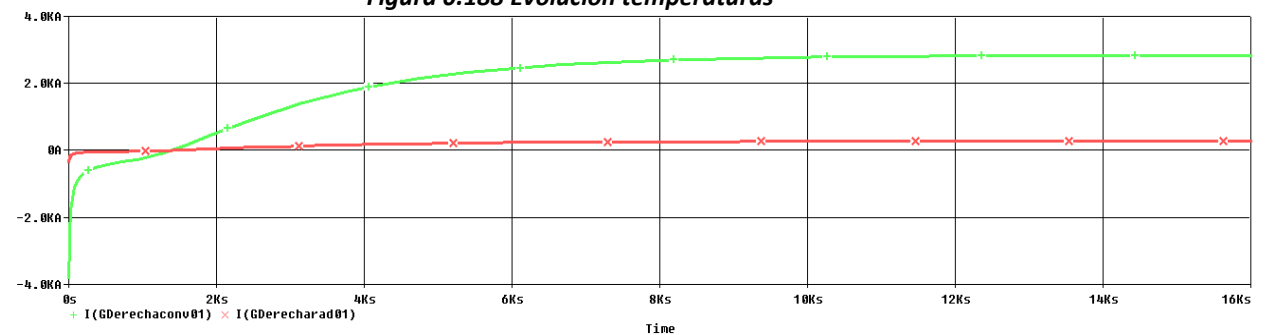
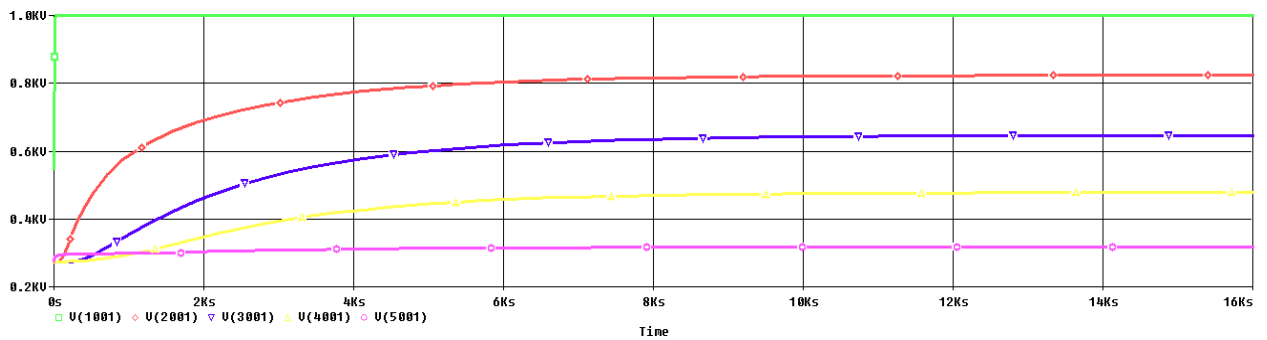
**Figura 0.185 Datos**

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
<b>10</b>	1000
<b>20</b>	823,57
<b>30</b>	646,59
<b>40</b>	477,94
<b>50</b>	317,06

**Figura 0.186 Temperaturas**

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-3118
Convección	2836,9
Radiación	272,74

**Figura 0.187 Flujos de calor**





Escenario e32

**DATOS**

Espuma de Poliuretano	
Conductividad	0,032 W/(m K)
Espesor	12 cm

Figura 0.191 Datos

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
10	1000
20	819,08
30	640,19
40	472,61
50	315,07

Figura 0.192 Temperaturas

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-2678,8
Convección	2386,3
Radiación	227,42

Figura 0.193 Flujos de calor

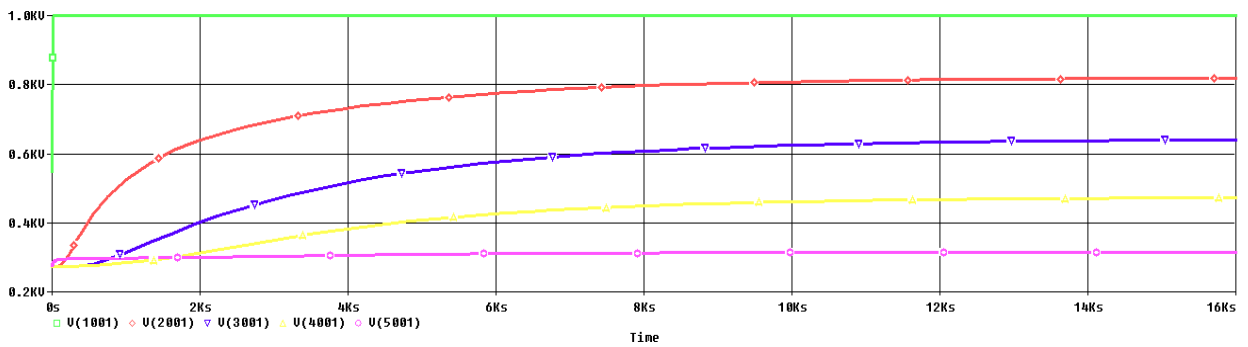


Figura 0.194 Evolución temperaturas

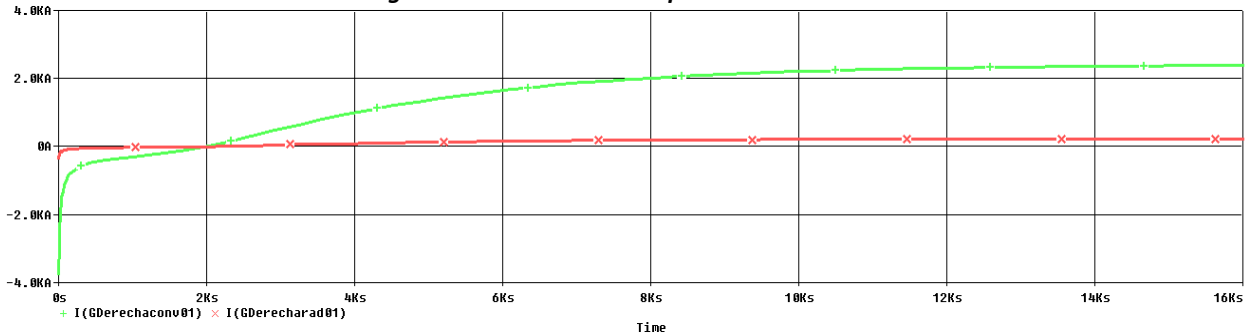


Figura 0.195 Evolución flujo calor convección y radiación

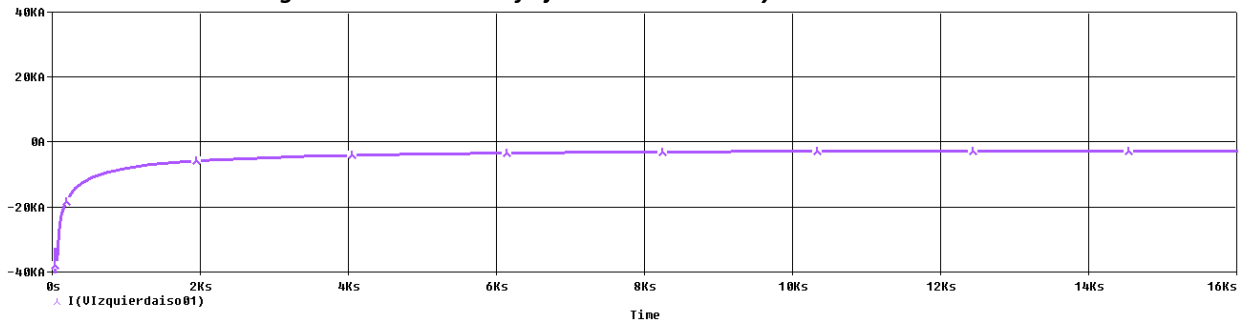


Figura 0.196 Evolución flujo calor isotermo

## Escenario e33

### DATOS

Espuma de Poliuretano	
Conductividad	0,040 W/(m K)
Espesor	3 cm

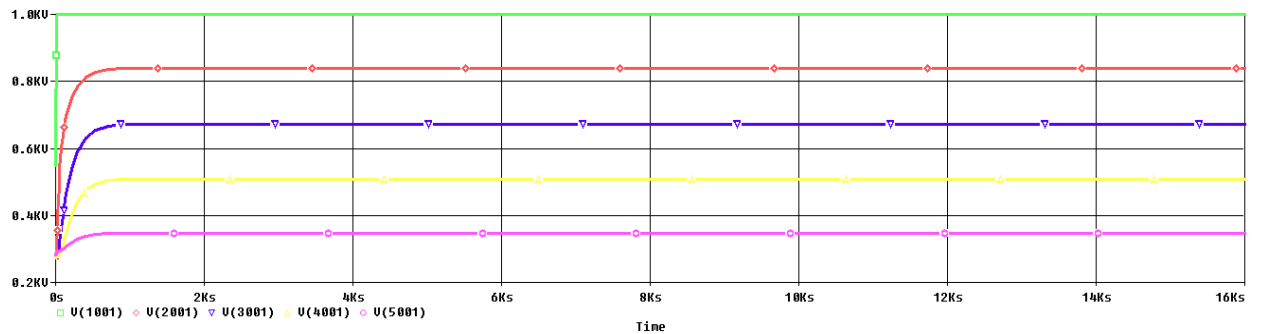
**Figura 0.197 Datos**

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
<b>10</b>	999,8
<b>20</b>	839,2
<b>30</b>	672,58
<b>40</b>	508,39
<b>50</b>	346,56

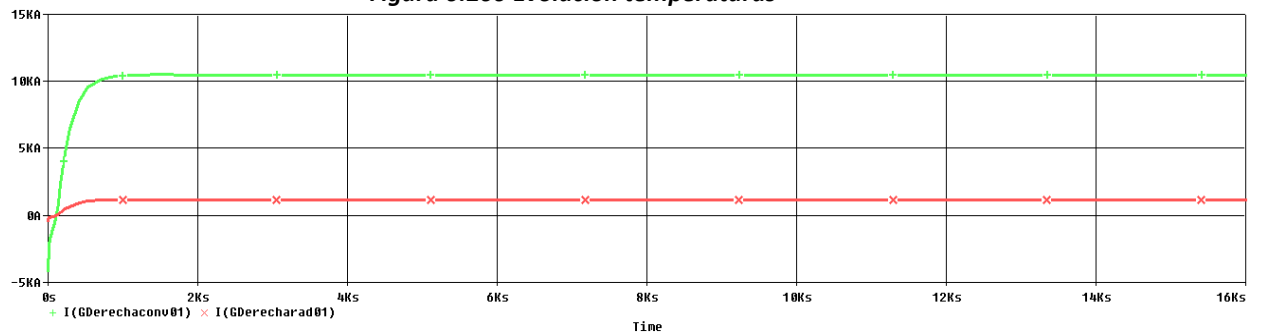
**Figura 0.198 Temperaturas**

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-11638
Convección	10474
Radiación	1163,7

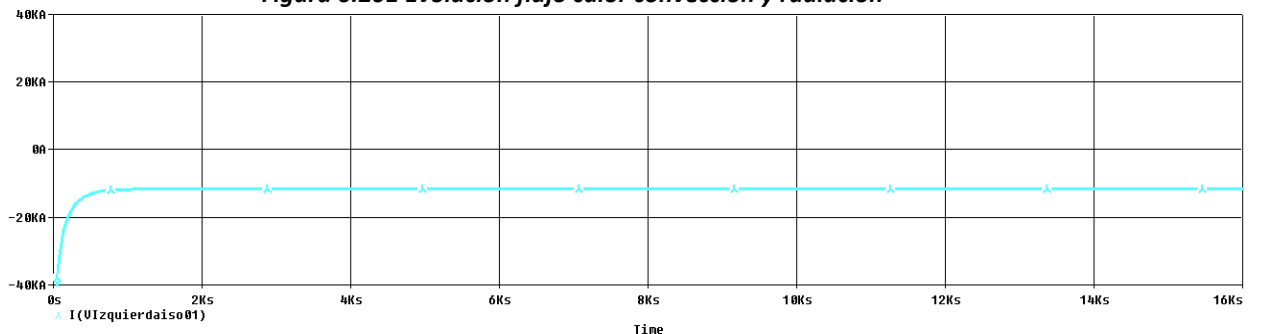
**Figura 0.199 Flujos de calor**



**Figura 0.200 Evolución temperaturas**



**Figura 0.201 Evolución flujo calor convección y radiación**



**Figura 0.202 Evolución flujo calor isotermo**



Escenario e34

DATOS

Espuma de Poliuretano	
Conductividad	0,040 W/(m K)
Espesor	5 cm

Figura 0.203 Datos

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
10	999,8
20	833,20
30	661,91
40	494,69
50	331,43

Figura 0.204 Temperaturas

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-7280,8
Convección	6600
Radiación	680,79

Figura 0.205 Flujos de calor

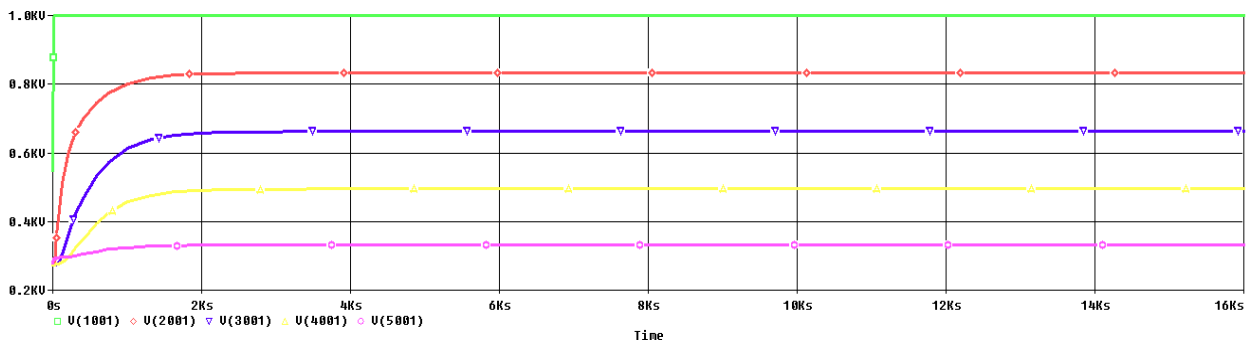


Figura 0.206 Evolución temperaturas

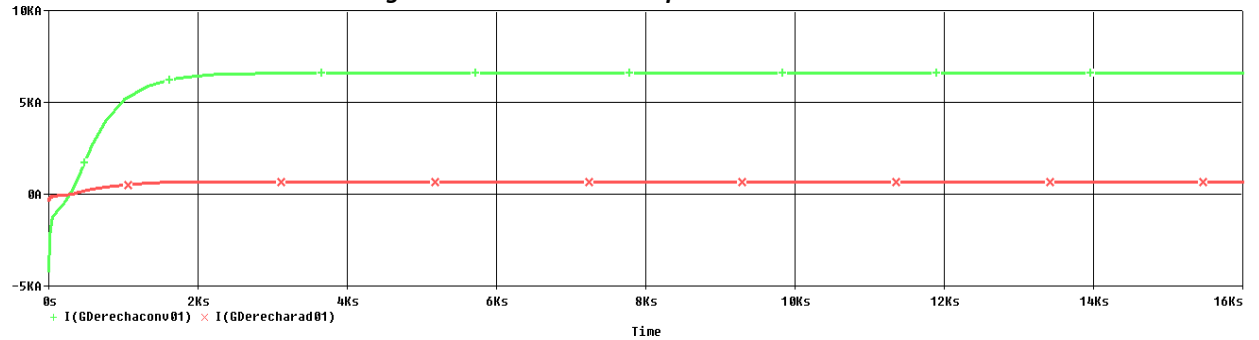


Figura 0.207 Evolución flujo calor convección y radiación

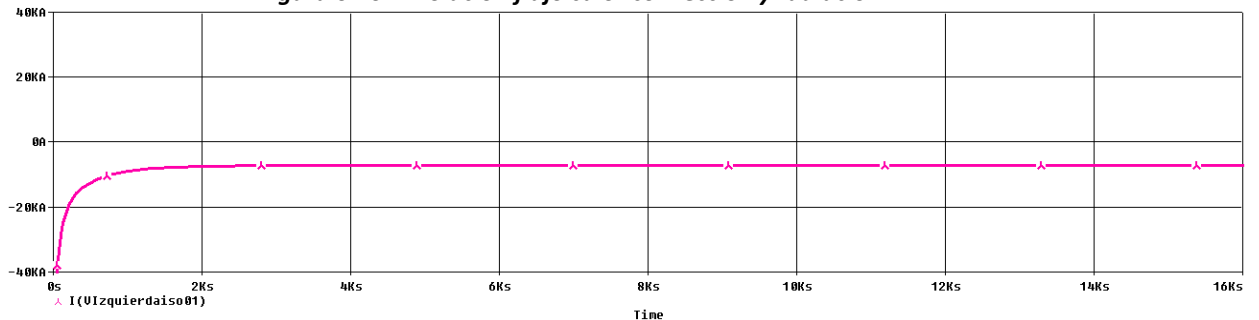


Figura 0.208 Evolución flujo calor isotermo



Escenario e35

DATOS

Espuma de Poliuretano	
Conductividad	0,040 W/(m K)
Espesor	10 cm

Figura 0.209 Datos

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
10	999,9
20	824,31
30	647,98
40	479,81
50	319,25

Figura 0.210 Temperaturas

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-3880,7
Convección	3535,2
Radiación	343,71

Figura 0.211 Flujos de calor

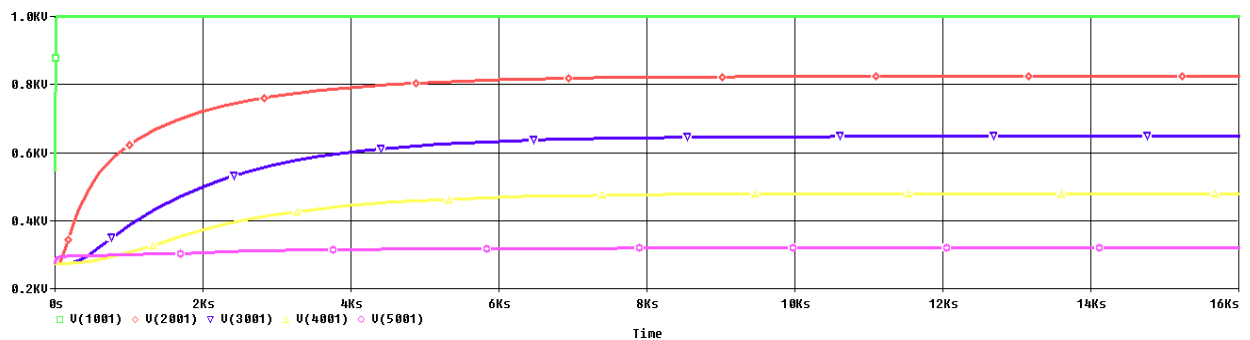


Figura 0.212 Evolución temperaturas

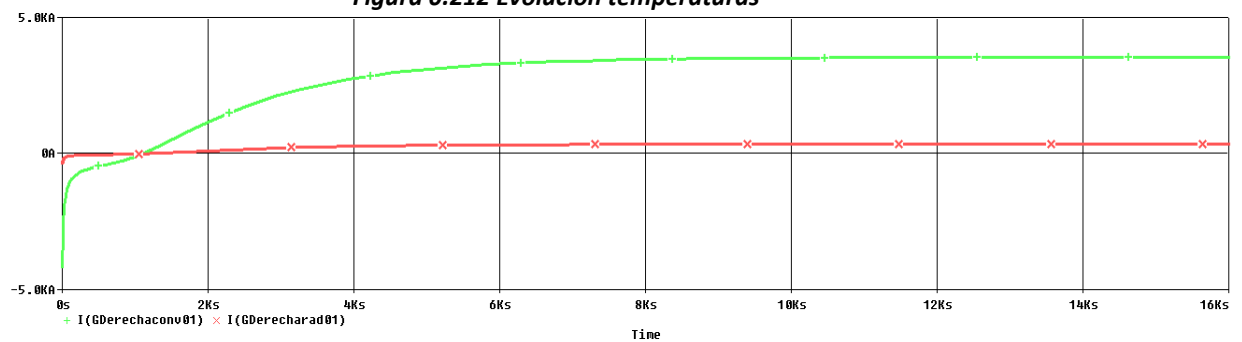


Figura 0.213 Evolución flujo calor convección y radiación

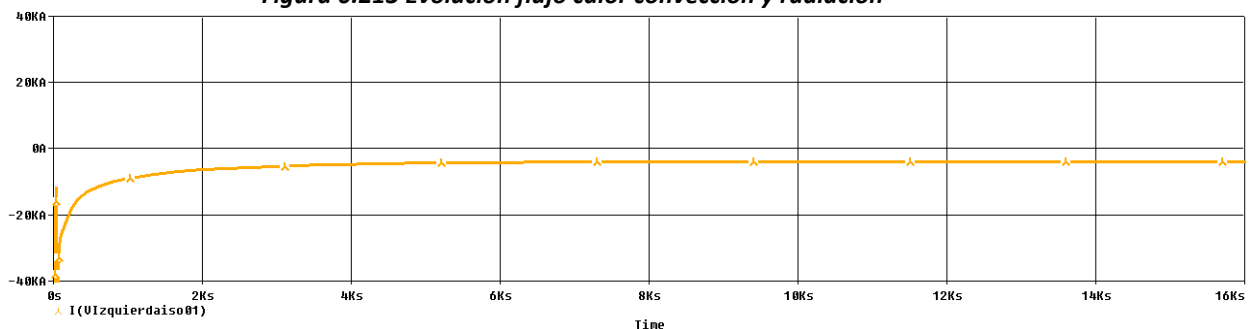


Figura 0.214 Evolución flujo calor isotermo



Escenario e36

DATOS

Espuma de Poliuretano	
Conductividad	0,040 W/(m K)
Espesor	12 cm

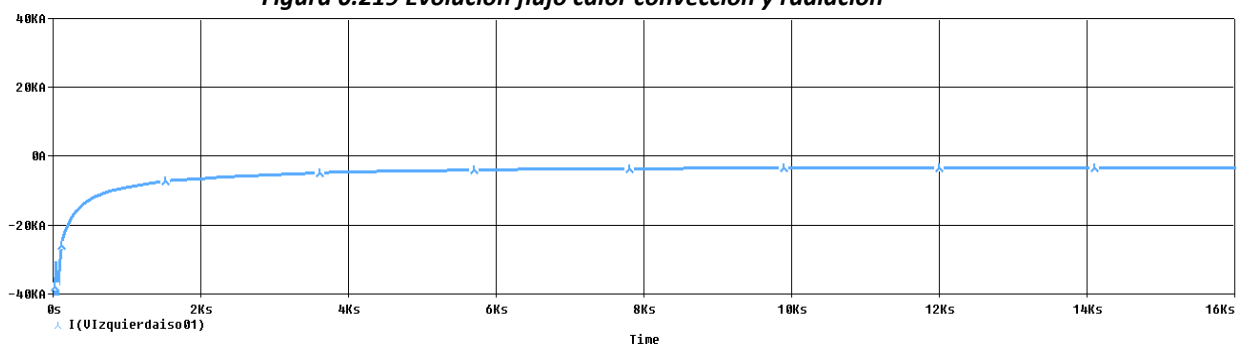
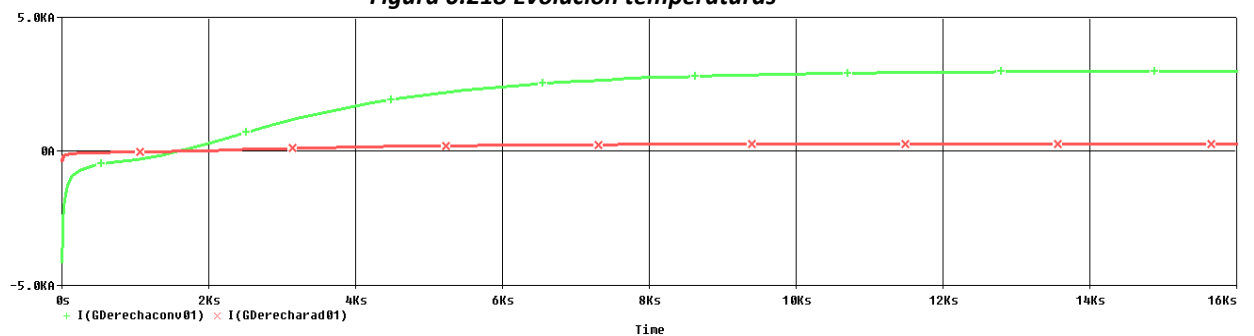
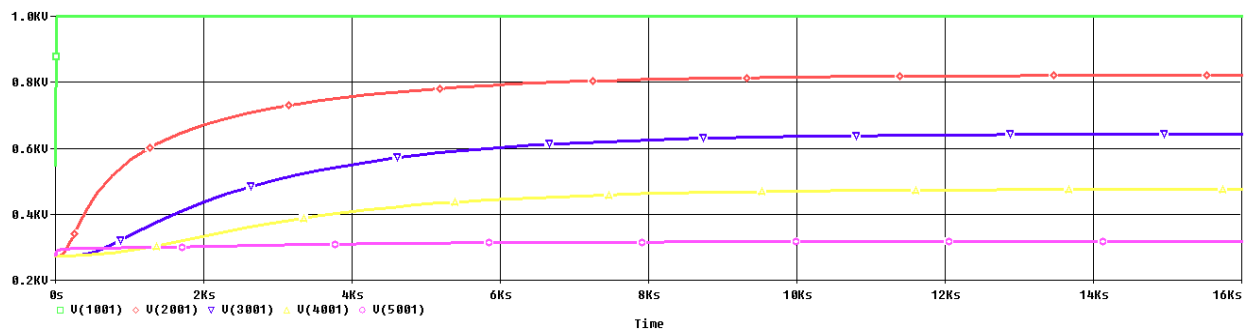
Figura 0.215 Datos

Celda	Temperatura (K) 15000 segundos
10	999,9
20	820,93
30	643,13
40	475,47
50	317,04

Figura 0.216 Temperaturas

Flujo de calor (A) 15000 segundos	
Isotermo	-3312,3
Convección	3000,2
Radiación	288,71

Figura 0.217 Flujos de calor



## IV.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el fin de analizar los efectos de la variación de parámetros sobre la temperatura y el flujo de calor, se van a agrupar los resultados obtenidos en las simulaciones.

### IV.2.1. Temperatura

En los siguientes apartados se representa la variación de temperatura de la capa superficial del recipiente (celda 50) trascurridos 15000 segundos respecto al espesor de la capa de aislante. Se han indicado las temperaturas para los 3 tipos de aislantes utilizados y para cada una de sus conductividades.

#### IV.2.1.1 Esfera de aislante de Lana de Vidrio

Conductividad W/(m·K)	Espesor del aislante (cm)	Temperatura celda 50 (K)
		Convección + Radiación
<b>0,032</b>	3	339,39
	5	326,97
	10	316,94
	12	314,97
<b>0,045</b>	3	350,93
	5	334,18
	10	320,63
	12	319,06
<b>0,05</b>	3	355,23
	5	336,89
	10	322
	12	319,37

**Figura 0.221 Tabla aislante Lana de Vidrio**

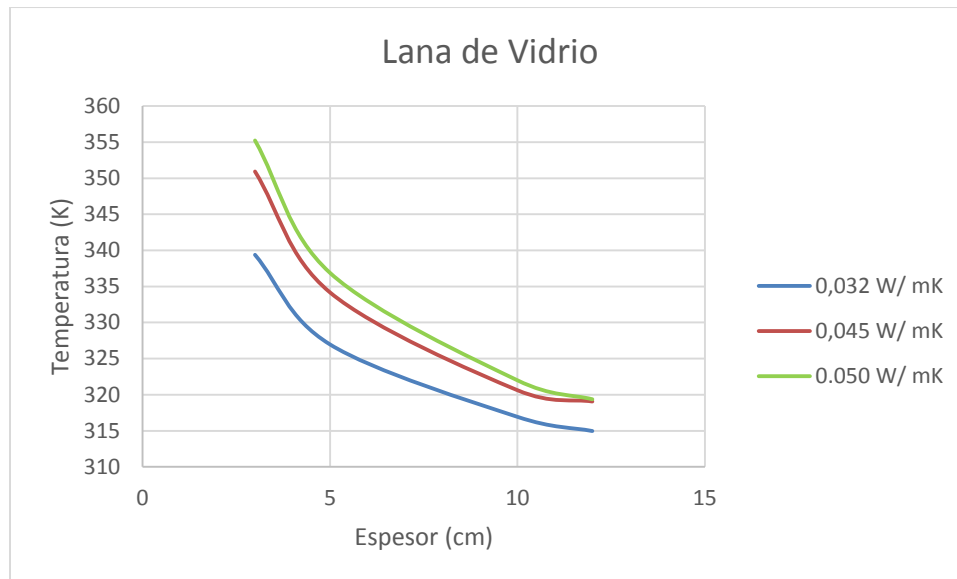


Figura 0.222 Lana de Vidrio

#### IV.2.1.2 Esfera de aislante de Lana de Roca

Conductividad W/(m·K)	Espesor del aislante (cm)	Temperatura celda 50 (K)
		Convección + Radiación
0,032	3	339,39
	5	326,97
	10	316,99
	12	314,98
0,045	3	350,93
	5	334,18
	10	320,63
	12	318,21
0,05	3	355,23
	5	336,89
	10	322
	12	319,35

Figura 0.223 Tabla aislante Lana de Roca



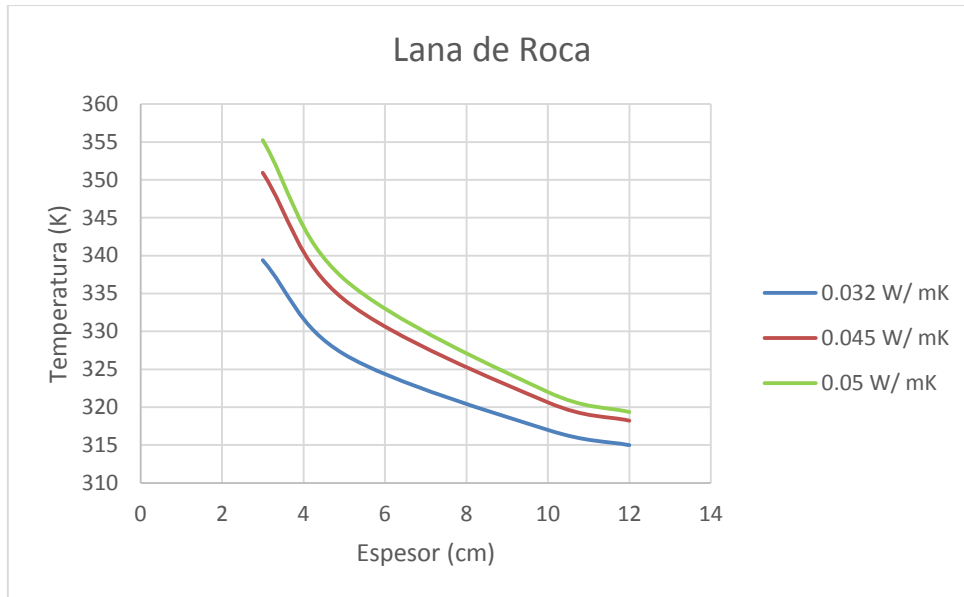


Figura 0.224 Lana de Roca

#### IV.2.1.3 Esfera de aislante de Espuma de Poliuretano

Conductividad W/(m·K)	Espesor del aislante (cm)	Temperatura celda 50 (K)
		Convección + Radiación
0,020	3	328,23
	5	320,14
	10	313,29
	12	311,19
0,032	3	339,39
	5	326,97
	10	317,06
	12	315,07
0,040	3	346,56
	5	331,43
	10	319,25
	12	317,04

Figura 0.225 Tabla aislante Espuma de Poliuretano

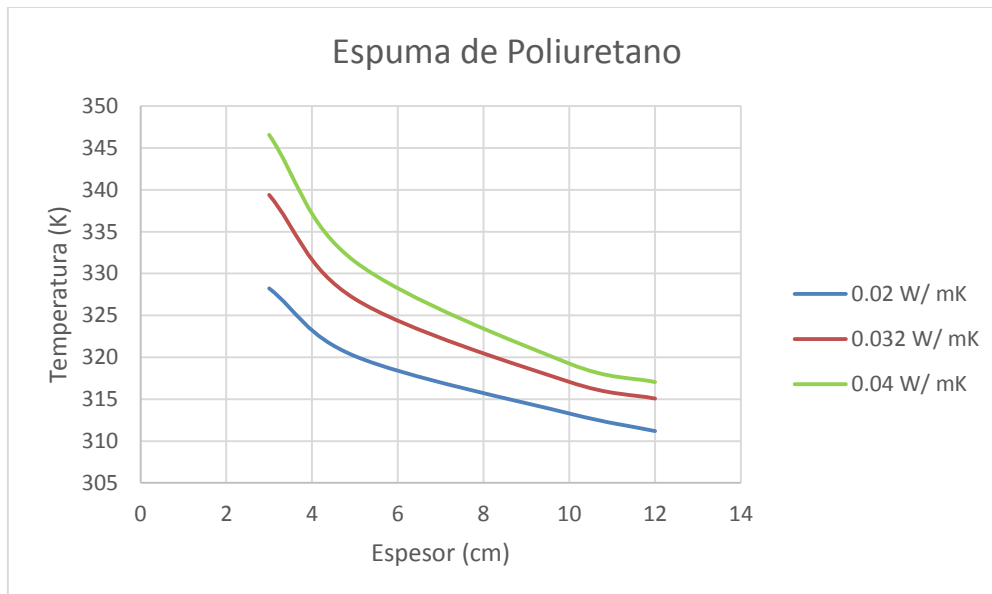


Figura 0.226 Espuma de Poliuretano

#### IV.2.1.4 Análisis de resultados de Temperatura

A la vista de los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas se observa en todos los casos que para la conductividad más baja del aislante se obtiene la temperatura más semejante a la temperatura ambiente fijada en 300 K (27 °C).

Además también se puede conocer la influencia del espesor del aislante, siendo para el mayor espesor de aislante para el que encontramos la menor temperatura en la capa exterior del tanque esférico, notándose una gran diferencia entre los espesores de 3 a 6 cm, donde se obtiene un descenso de temperatura bastante alto en el cambio de un centímetro a otro, encontrando mayor diferencia en el aislante mayor conductividad; mientras que a partir de 6 cm, la temperatura va descendiendo de forma más gradual, existiendo diferencias máximas de 2 K entre un centímetro y otro.

Si hacemos una comparación entre los tres aislantes para la misma conductividad (0,032 W/m·K) se obtiene el gráfico de la figura 0.227, en el que se observa que no existe ninguna diferencia de un aislante a otro para un mismo espesor y conductividad, por lo que se podría decir que es la única propiedad del aislante que influye en el aislamiento de temperatura.

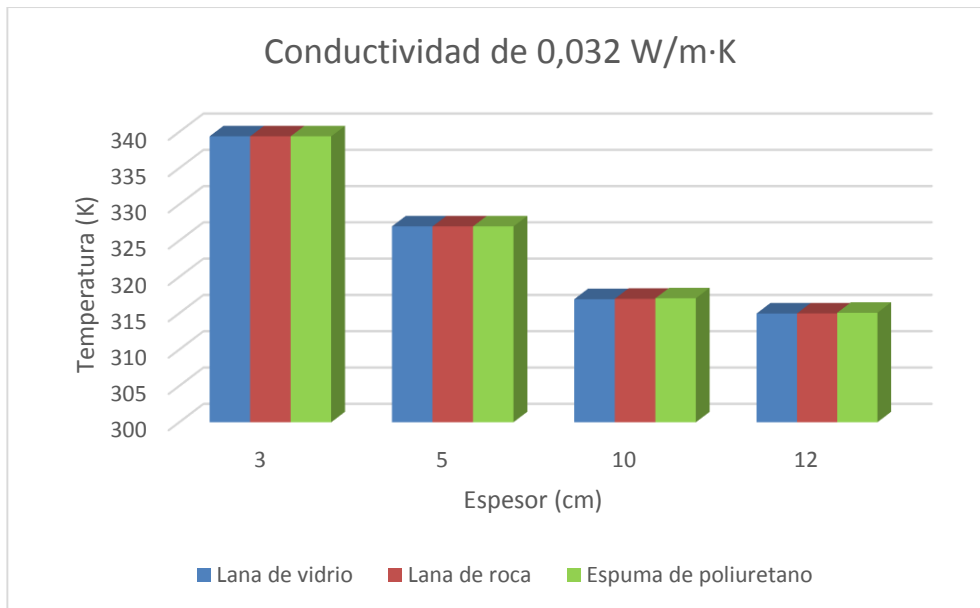


Figura 0.227 Comparación a conductividad de 0,032 W/m·K

Si comprobamos ahora lo que ocurre para un mismo espesor comparando entre conductividad baja, media y alta de un material, en lugar de por su valor, se obtiene el gráfico de la figura IV.228 (espesor de 3 cm) y la figura IV.229 (espesor de 10 cm). Se puede decir que el aislante de espuma de poliuretano, al tener un intervalo de conductividades más bajas, va a alcanzar una temperatura menor en su capa externa.

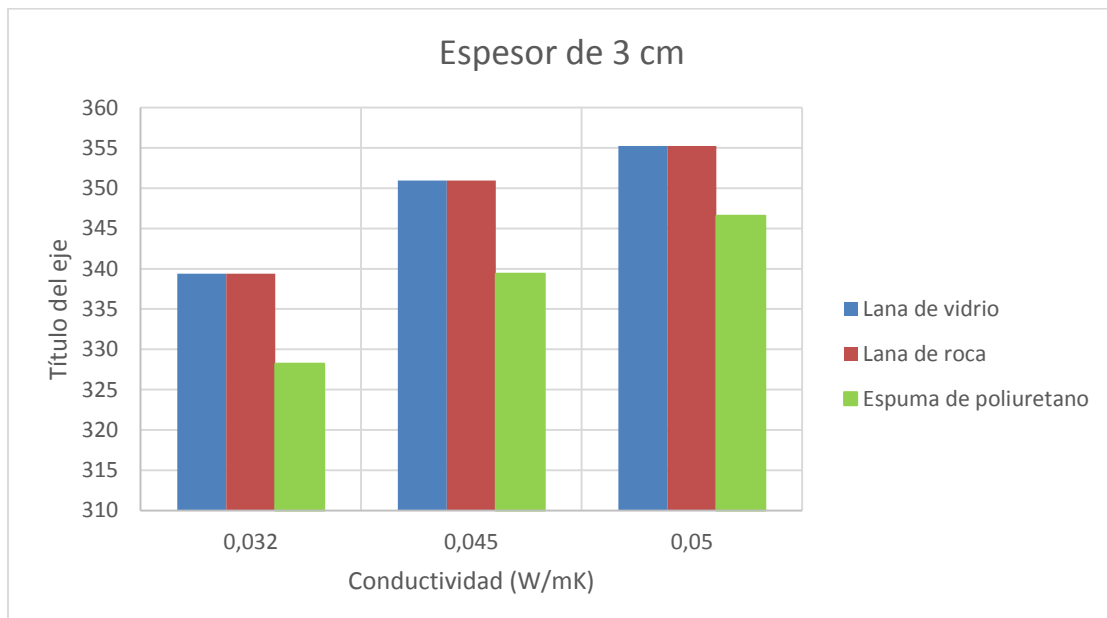
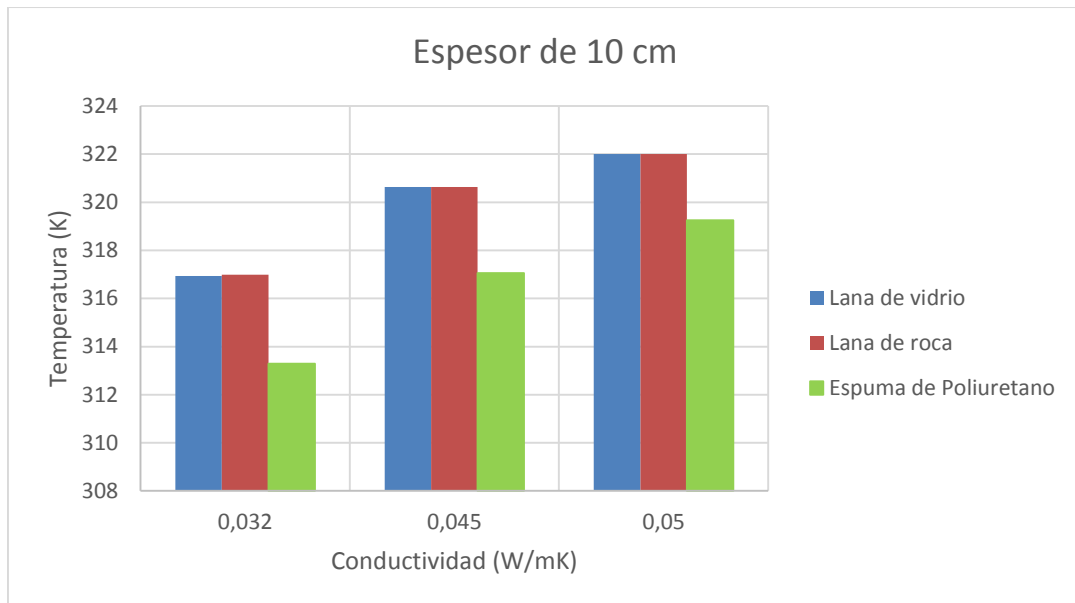


Figura 0.228 Comparación a espesor de 3 cm



**Figura 0.229 Comparación a espesor de 10 cm**

## IV. 2.2. Flujo de Calor

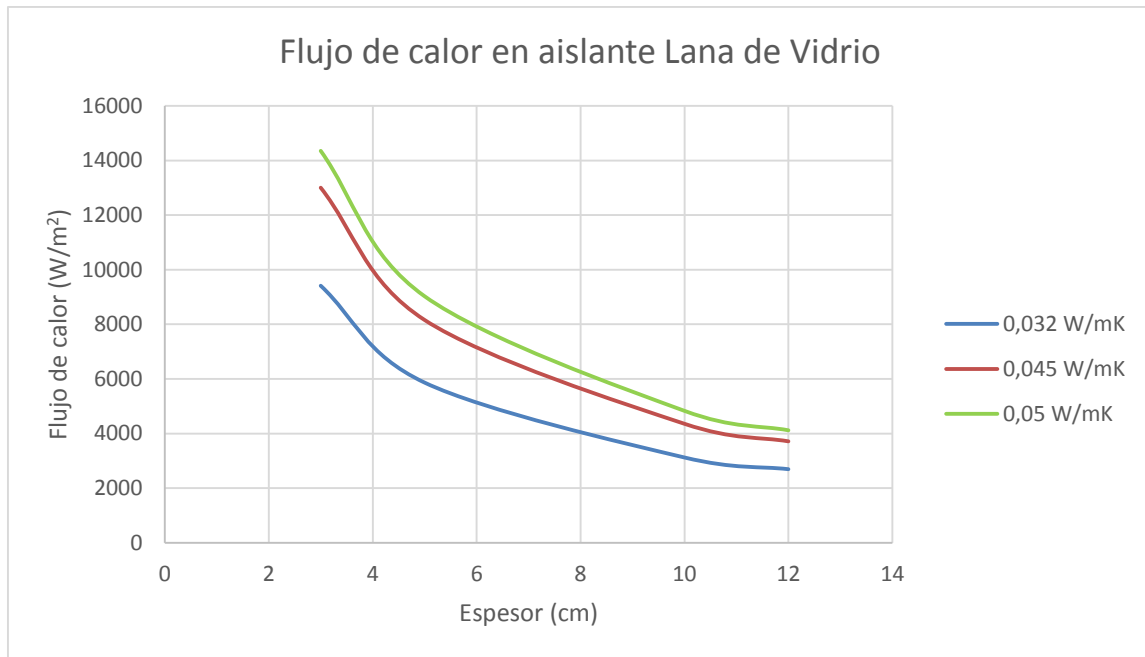
Para el estudio del flujo de calor se ha tomado el calor total en cada uno de los escenarios, en este caso es el isoterma y cuyo valor en estado estacionario es igual en módulo al de convección + radiación.

Además también hemos tomado los valores del flujo de calor de convección y radiación que se produce empleando convección + radiación como condición de contorno en la capa exterior del depósito esférico. Se va a calcular el porcentaje de influencia de cada uno de los efectos en el flujo de calor total.

### IV.2.2.1 Esfera de aislante de Lana de Vidrio

Conductividad (W/m·K)	Espesor (cm)	Flujo de calor W/m <sup>2</sup>			%Conv.	%Rad.
		Isoterma	Convección	Radiación		
0,032	3	9412,8	8501,1	911,62	90,31	9,68
	5	5863,7	5326,4	537,32	90,84	9,16
	10	3122,3	2833,9	272,44	90,76	8,73
	12	2693,6	2371,1	225,97	88,03	8,39
0,045	3	13004	11678	1325,8	89,80	10,20
	5	8157	7384,8	772,24	90,53	9,47
	10	4356,7	3966,7	388,35	91,05	8,91
	12	3713,7	3656	35,47	98,45	0,96
0,05	3	14353	12861	1491,3	89,60	10,39
	5	9026,2	8161,1	865,03	90,42	9,58
	10	4830,4	4396	433,38	91,01	8,97
	12	4118,2	3742,2	364,32	90,87	8,85

**Figura 0.230 Tabla Flujo de calor de Lana de Vidrio**

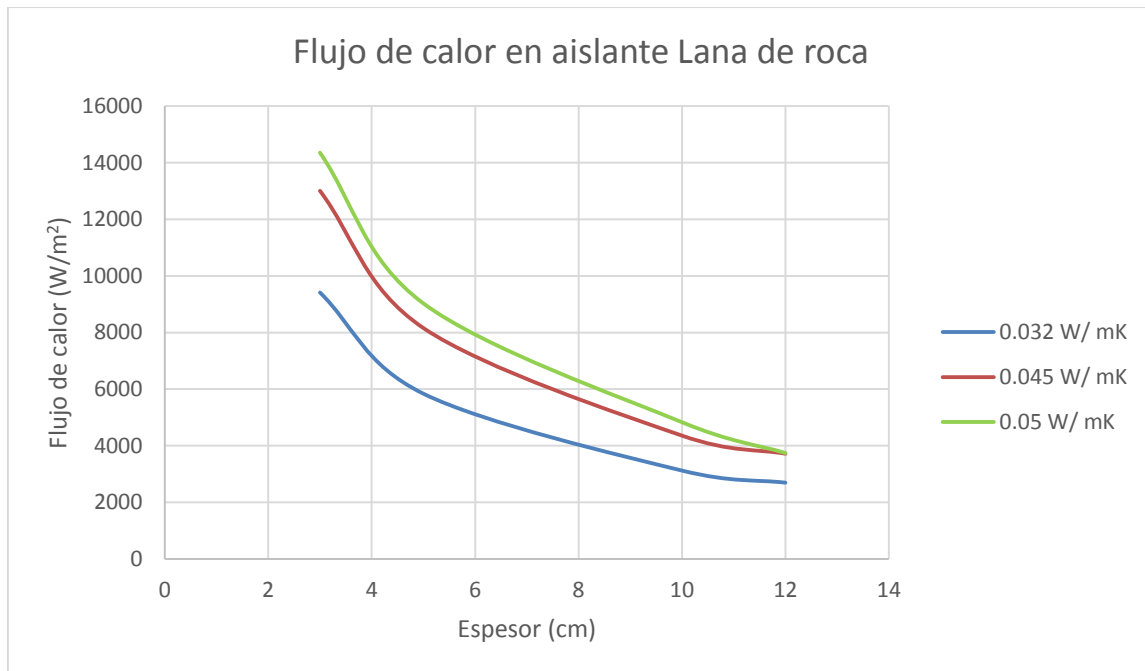


**Figura 0.231 Flujo de calor Lana de vidrio**

#### IV.2.2.2 Esfera de aislante de Lana de Roca

Conductividad (W/m·K)	Espesor (cm)	Flujo de calor W/m <sup>2</sup>			%Conv.	%Rad.
		Isotermo	Convección	Radiación		
<b>0,032</b>	3	9412,8	8501,1	911,62	90,31	9,68
	5	5836,7	5326,4	537,32	91,26	9,21
	10	3121,3	2833,9	272,44	90,79	8,73
	12	2693,6	2371,1	225,6	88,03	8,38
<b>0,045</b>	3	13004	11678	1325,8	89,80	10,20
	5	8157	7384,8	772,24	90,53	9,47
	10	4356,7	3966,7	388,35	91,05	8,91
	12	3717,5	3370,2	326,22	90,66	8,78
<b>0,05</b>	3	14353	12861	1491,3	89,60	10,39
	5	9026,2	8161,1	865,03	90,42	9,58
	10	4830,4	4396,4	433,38	91,02	8,97
	12	3742,4	3742,4	364,29	100,00	9,73

**Figura 0.232 Tabla Flujo de calor de Lana de Roca**



**Figura 0.233 Flujo de calor Lana de roca**

#### IV.2.2.3 Esfera de aislante de Espuma de Poliuretano

Conductividad (W/m·K)	Espesor (cm)	Flujo de calor W/m <sup>2</sup>			%Conv.	%Rad.
		Isotermo	Convección	Radiación		
0,02	3	5982,9	5431,9	551,01	90,79	9,21
	5	3702,2	3373,4	328,81	91,12	8,88
	10	2006	1736,8	164,05	86,58	8,18
	12	1818,2	1359,4	127,52	74,77	7,01
0,032	3	9412,8	8501,1	911,62	90,31	9,68
	5	5863,7	5326,4	537,32	90,84	9,16
	10	3118	2836,9	272,74	90,98	8,75
	12	2678,8	2386,5	227,42	89,09	8,49
0,04	3	11638	10474	1163,7	90,00	10,00
	5	7280,8	6600	680,79	90,65	9,35
	10	3880,7	3535,2	343,71	91,10	8,86
	12	3312,2	3000,2	288,71	90,58	8,72

**Figura 0.234 Tabla Flujo de calor de Espuma de Poliuretano**

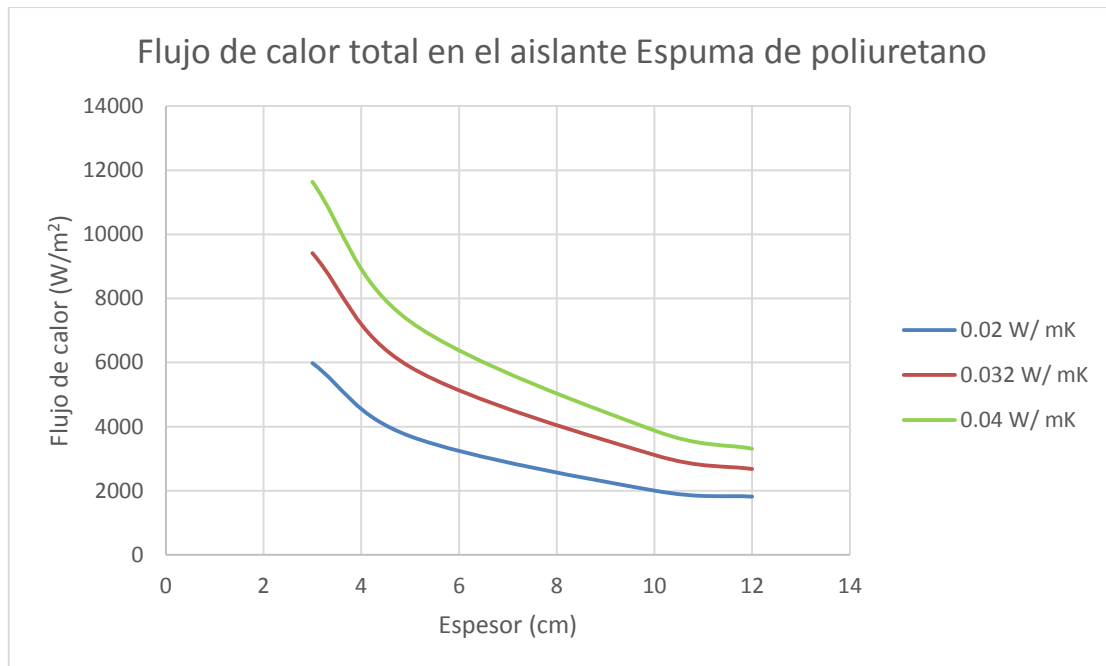


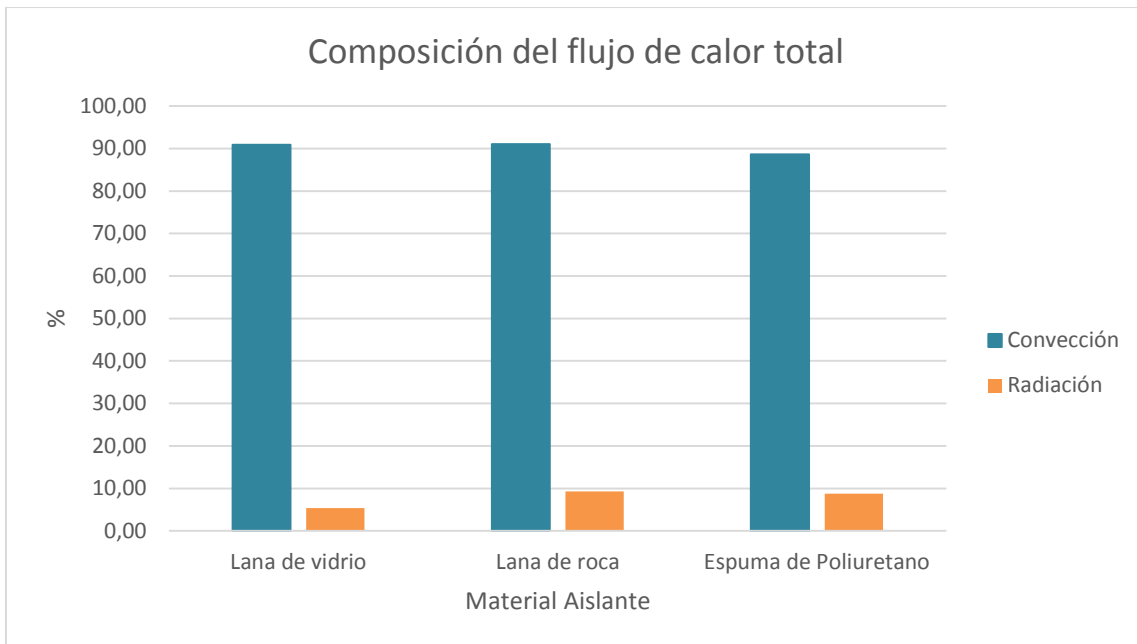
Figura 0.235 Tabla Flujo de calor de Espuma de Poliuretano

#### IV.2.2.4 Análisis de resultados de Flujo de Calor

Como en el estudio 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.

Del mismo modo se puede conocer la influencia del espesor del aislante, siendo para el mayor espesor de aislante para el que encontramos la menor transferencia de calor en la capa exterior del tanque esférico, notándose un gran salto entre los espesores de 3 a 6 cm, donde se obtiene una decadencia en la transferencia del flujo de calor a través de un aislante más fino, encontrando mayor diferencia en el aislante mayor conductividad; mientras que a partir de 6 cm, el flujo va descendiendo de forma más progresiva, existiendo diferencias muy pequeñas entre las distintas conductividades para un espesor de 12 cm.



Si cogemos además el valor medio en porcentaje de convección y de radiación y comparamos su influencia en la transmisión de flujo de calor total obtenemos la siguiente figura.



**Figura 0.236 Composición del Flujo de calor total**

A la vista está que para la condición de contorno establecida a la derecha de nuestro depósito esférico (convección + radiación), la comparación de la transmisión de calor por radiación es casi despreciable frente a la transmisión por convección influyendo ésta en los tres aislantes en un 90 % aproximadamente por menos de 10 % de radiación.



	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo V. CONCLUSIONES</b>		<b>FECHA: 09/2015</b>	

## Capítulo V. CONCLUSIONES

---

### V.1.SOBRE EL SOFTWARE

---

El diseño de PROCCA-09 le distingue de otros programas básicamente orientados al cálculo, con un diseño numérico propio, y que funcionan a modo de cajas negras de contenido normalmente inaccesible al usuario. Se ha podido comprobar la simplicidad de uso del programa y la facilidad de manipulación de los datos, tanto a la hora de introducirlos como trabajando con los resultados.

Su objetivo es tanto científico como didáctico, 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 los contenidos básicos de conducción de calor en medios multicapa de diferentes geometrías. Se ha demostrado la aptitud de PROCCA-09 para la resolución de problemas de conducción de calor. Además, se ha comprobado su versatilidad en la obtención de resultados tanto de manera numérica como gráfica, proporcionando una amplia visión del problema en estudio.

Por otro lado, Por ello, PROCCA-09 es una excelente herramienta para la resolución de multitud de casos de transmisión del calor, problemas muy presentes en la industria en situaciones de aislamiento, para incrementar la eficiencia energética, para reducir riesgos, etc. Esto hace que se reduzcan los costes de optimización de las diferentes variables que intervienen en el problema, ya que permite la simulación sin realizar todos los ensayos de manera real. Los casos se pueden simular en el software, construir un prototipo y pasar al proceso de verificación directamente, lo que supone un gran ahorro de material, mano de obra y energía.

### V.2. SOBRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS



---

Una vez analizados los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas con el programa PROCCA-09 se puede llegar a las siguientes conclusiones finales.

Se ha comprobado que la conductividad del material aislante es la única propiedad que influye a la hora de disipar el calor a través de las capas del depósito, ya que aunque se escogieron aislantes de diferente densidad y calor específico, para la conductividad común a la lana de vidrio, la lana de roca y la espuma de poliuretano, de 0,032 W/m·K, se han obtenido valores tanto de temperatura como de flujo de calor prácticamente idénticos; aseguramos por tanto que la densidad no va a tener ninguna influencia.

Cabe destacar que al haber escogido las mismas conductividades tanto para la lana de vidrio como para la lana de roca, no se aprecia ninguna diferencia entre ambas fibras, por lo que la elección entre una y otra dependerá básicamente del factor económico.

Tal y como se ha analizado en el capítulo anterior, a menor conductividad del material aislante, mayor será el aislamiento, es decir, la temperatura en la capa exterior del depósito será

	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo V. CONCLUSIONES</b>		<b>FECHA: 09/2015</b>	

más próxima a la temperatura ambiente exterior cuanto menor sea su conductividad. Del mismo modo, a mayor espesor de aislante, mayor será también el aislamiento del depósito esférico. Alcanzará prácticamente la temperatura ambiente gradualmente.

Además, observando la evolución de la temperatura a través de las diferentes celdas del depósito en las simulaciones en PSPICE y sus correspondientes animaciones en MATLAB podemos también conocer de qué modo varía el tiempo de estabilización de dichas temperaturas en función del espesor y la conductividad del material aislante. De tal forma que para los espesores más bajos (3 cm) se aprecia un alcance del estado estacionario de su temperatura final para un tiempo alrededor de unos 1600 segundos, mientras que para el espesor de 12 cm, varía más lentamente y de forma gradual estabilizándose la temperatura para un tiempo de 14700 s aproximadamente.



En cuanto a los valores de flujo de calor total de convección y radiación disminuirán con la disminución de la conductividad. Ocurriendo lo contrario con la variación del espesor, para el que encontraremos una mayor transmisión de flujo de calor para los espesores más pequeños, mientras que los valores de espesor más altos casi no se producirán variaciones en lo que a convección y radiación se refiere.

Por otra parte es importante señalar que hemos obtenido resultados tan bajos de transmisión por radiación al no haberle dado a nuestro tanque esférico un acabado con una capa de un material con una emisividad más alta (como cerámica o aluminio); solamente variando el acabado superficial del depósito se mejoraría la radiación al exterior, mientras que mejorar la convección es una opción más costosa.

Desde el punto de vista de la optimización, tanto económica como de materia, podemos decir que la combinación de aislante, conductividad y espesor óptima sería, el material aislante de espuma de poliuretano, ya que su intervalo de conductividades es inferior al de las otras dos fibras naturales, aunque en este caso sea un aislante artificial, y por tanto su conductividad más baja, es decir la de 0,02 W/m·K, nos daría los mejores resultados respecto a aislamiento. En cuanto al espesor de este, la elección más recomendable sería la de 10 cm, debido a que se consigue una temperatura exterior en el depósito lo suficientemente baja, con un descenso progresivo y la diferencia con el espesor de 12 cm es casi despreciable, encontrándose aproximadamente entre 2 y 3 grados kelvin de diferencia.

Son varias las razones de la importancia que tiene la utilización de aislamiento térmico en la industria, fundamentalmente:

- Las necesidades de proceso, ya que deben evitarse transferencias térmicas que disfuncionen el proceso por diferencias de temperaturas no admisibles.
- Seguridad de las personas y bienes. Si no existe aislamiento térmico suficiente, las temperaturas superficiales externas pueden ser elevadas y provocar lesiones y accidentes en las personas. En el límite, producir efectos de combustión e incendio en materiales combustibles próximos a estas superficies.
- El aislamiento térmico reduce las pérdidas energéticas, de tal modo que éstas pueden llegar a ser un 2-3% de las pérdidas energéticas sin aislamiento. Es el mejor método de ahorro de energía conocido, permitiendo la amortización del material aislante instalado en períodos de tiempo muy bajos, por ejemplo, algunas semanas.

	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo VI. BIBLIOGRAFÍA</b>		<b>FECHA: 09/2015</b>	

## Capítulo VI. BIBLIOGRAFÍA

---

### VI.1. BIBLIOGRAFÍA

---

Para el desarrollo de este TFG se ha consultado una amplia lista de documentos bibliográficos basados en la transmisión del calor, más concretamente en la conductividad térmica.

Uno de los libros consultados (Isachenko, V. Osipova, A. Sukomel, 1979) es una obra muy completa sobre la transmisión del calor, de la que además de los conceptos básicos sobre la conducción térmica y los modelos en red, también se ha extraído información sobre la transmisión del calor a través de una pared esférica en estado estacionario puesto que recoge información referente a ésta en el capítulo 2 del apartado de conducción.

Otros textos que también hablan concretamente de este fenómeno, (MILLS, A.F. *Heat Transfer*) y (CHAPMAN, Alan J. *Transmisión del calor*), han servido para complementar y comprender detalladamente la conductividad en sí, y para obtener información sobre las propiedades de los materiales importantes en la transmisión del calor.



Además, se desarrolla como se transmite el flujo de calor en estado estacionario y transitorio, específicamente, en el segundo capítulo (2.3. Conduction across Cylindrical and Spherical Shells) hace referencia al flujo de conducción en recipientes esféricos, explicando detalladamente cada caso. En el capítulo 3 también encontramos información muy necesaria sobre métodos numéricos de solución finita en dos dimensiones.

De igual forma, en el capítulo 5 del Chapman encontramos información, pero más concretamente sobre la aproximación por diferencias finitas.

### VI.2. BIBLIOGRAFÍA DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN

---

Por otro lado, también se ha consultado la bibliografía sobre el programa de simulación, (Simulación y diseño de problemas de conducción térmica con PROCCA-09. Francisco Alhama López y Francisco del Cerro Velázquez. UM.) de la que hemos obtenido información sobre el PROCCA\_09 acerca de su uso, y la cantidad de opciones de modelos en red que se pueden obtener con él, estando entre ellos, nuestro modelo a estudiar. Además de los programas conocidos en los que está basado este programa, como son MATLAB, PSPICE Y EXCEL.

	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL</b>	
<b>Capítulo VI. BIBLIOGRAFÍA</b>		<b>FECHA: 09/2015</b>	

Además nos apoyaremos en otro libro de prácticas para poder trabajar con el programa antes de aplicar nuestro modelo directamente. (Prácticas de transmisión del calor con el programa PROCCA\_09. Iván Alhama. Francisco del Cerro. UPCT)

### VI.3. LISTA BIBLIOGRÁFICA

- ISACHENKO, V. OSIPOVA,V. SUKOMEL,A. *Heat transfer.(traducción) Transmisión del calor*. Marcombo 1973. ISBN 84-267-0239-2.
- 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 Signost.2002. ISBN 81-7736-092-2. India.
- WEIGAND, Bernhard. *Analytical Methods for Heat Transfer and Fluid Flow Problems*. Springer. 2004. ISBN 3-540-22247-2
- MILLS, A.F. *Heat Transfer*. Second edition. Prentice Hall.1999. ISBN 0-13-947624-5
- ALAN J.Chapman. *Transmisión del calor*. 3ª Edición.Bellisco.1984. ISBN 84-85-198-42-5
- CALLEJA P.G. *Introducción a la ingeniería química*. Ed.Síntesis.
- *Fundamentos de transferencia del calor*. Incropera y DeWitt Ed. Prentice-Hall.
- *PSPICE 6.0, Microsim Corporation Fairbanks, California,(1994)*.
- Programa Procca\_09
- ALHAMA LÓPEZ, Francisco. CERRO VELAZQUEZ, Francisco. *Simulación y diseño de problemas de conducción térmica con PROCCA-09*. 1ªEdición, 2010. UM. ISBN 978-8371-060-2010.
- ALHAMA, Iván. DEL CERRO, Francisco. *Prácticas de transmisión del calor con el programa PROCCA\_09*. 1ªEdición, 2013 UPCT. ISBN 978-84-940692-2-2.
- Páginas web
- “<http://libros.redsauce.net/>” Termodinámica técnica, Fernández Díez P., Universidad de Cantabria.
- “<http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp>” Propiedades térmicas de materiales.
- “<http://www.weber.es/sate-aislamiento-termico-por-el-exterior/soluciones/accesorios-para-sate/webertherm-placa-lm.html>”
- “<http://www.ursa.es/es-es/productos/Documents/caracterizacion-lana-mineral-de-vidrio.pdf>”