



**“DETERMINACIÓN DE LAS TEMPERATURAS DE UN CANAL DE  
LA CNE SIN COMBUSTIBLE NI REFRIGERANTE Y AISLADO DEL  
SISTEMA PRIMARIO DE TRANSPORTE DE CALOR”**

***CURSO: ESPECIALIZACIÓN EN REACTORES NUCLEARES  
Y SU CICLO DE COMBUSTIBLE***

Alumna: Ing. Silvana Laura Calá  
Directora del Trabajo Final: Lic. Ana Leticia Parrondo



**UNSAM**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE  
SAN MARTÍN

## Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a la Lic. Ana Parrondo, por su disposición y sus aportes a este trabajo.

A Nucleoelectrica Argentina, por el apoyo brindado para realizar esta especialización y por permitirme dedicarle tiempo a mi formación.

Un agradecimiento a José Fink por realizar los cálculos neutrónicos y por su apoyo durante mis estudios de la especialización.

Finalmente quisiera agradecer también a Pablo Serrano y Facundo Khatchikian por sus valiosos comentarios y sugerencias.

En lo personal, quisiera agradecer a mi familia y a mis compañeros de curso.

# INDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	3
2.	DESCRIPCIÓN DE LOS CÓDIGOS Y MODELOS.....	5
2.1	Códigos de cálculo.....	5
2.1.1	CATHENA.....	5
2.1.2	HEATING.....	5
2.2	Modelos.....	6
2.2.1	Modelo utilizado en CATHENA.....	6
2.2.2	Modelo utilizado en HEATING.....	7
2.3	Entrada de datos.....	8
2.4	Potencia generada en el tubo de presión.....	8
3.	TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN.....	9
3.1	Propiedades constantes.....	9
3.2	Conductividad variable de los materiales.....	10
3.3	Influencia del cambio del coeficiente de transferencia de calor hacia el moderador.....	11
3.4	Cálculos analíticos.....	11
3.4.1	Análisis de las resistencias térmicas.....	11
3.4.2	Análisis de los mecanismos de transferencia de calor.....	12
4.	TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN.....	14
4.1	Modelo utilizado en CATHENA.....	14
4.2	Modelo utilizado en HEATING.....	15
4.3	Comparación entre los códigos.....	15
5.	CONCLUSIONES.....	16
	REFERENCIAS.....	19
	ANEXOS.....	36
ANEXO 1.....		36
Análisis de las propiedades del zircaloy utilizadas.....		36
ANEXO 2.....		40
Entrada de datos para el código CATHENA y memoria de cálculo sencilla.....		40
Entrada de datos con propiedades constantes.....		40
Memoria de cálculo.....		42
ANEXO 3.....		45
Entrada de datos para el código HEATING y memoria de cálculo sencilla.....		45
Entrada de datos con propiedades constantes.....		45
Memoria de cálculo.....		46

## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1: Dimensiones de los modelos</i> .....	20
<i>Tabla 2: Potencia generada en el tubo de presión</i> .....	20
<i>Tabla 3: Potencia asignada a la simulación con HEATING</i> .....	21
<i>Tabla 4: Potencia total por segmento y fracción de potencia para cada nodo axial de CATHENA</i> .....	22
<i>Tabla 5: Propiedades constantes de los materiales utilizados</i> .....	23
<i>Tabla 6: Resultados obtenidos con HEATING. Perfiles radiales en el extremo y centro del tubo de presión</i> .....	23
<i>Tabla 7: Resultados obtenidos con CATHENA. Perfiles radiales en el extremo y centro del tubo de presión</i> .....	24
<i>Tabla 8: Resultados obtenidos con CATHENA. Perfiles axiales. Conducción, Radiación y Conducción y radiación en conjunto</i> .....	24
<i>Tabla 9: Resultados obtenidos con HEATING. Perfiles axiales. Conducción y Radiación</i> .....	25
<i>Tabla 10: Dependencia de la conductancia de contacto con la temperatura</i> .....	27
<i>Tabla 11: Valores de conductancia de contacto para cada segmento del modelo en CATHENA</i> .....	27

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1: Esquema del canal de la CNE</i> .....	28
<i>Figura 2: Disposición del canal en el reactor</i> .....	28
<i>Figura 3: Distribución de generación de potencia en el tubo de presión</i> .....	29
<i>Figura 4: Perfil radial de temperatura en un extremo del tubo de presión. Transferencia de calor por conducción</i> .....	29
<i>Figura 5: Perfil radial de temperatura en el centro del tubo de presión. Transferencia de calor por conducción</i> .....	30
<i>Figura 6: Perfil axial de temperatura en el tubo de presión. Transferencia de calor por conducción. Comparación entre HEATING y CATHENA</i> .....	30
<i>Figura 7: Conductividades del aire y del CO<sub>2</sub> en función de la temperatura</i> .....	31
<i>Figura 8: Conductividad del zircaloy en función de la temperatura</i> .....	31
<i>Figura 9: Perfil axial de temperatura en el tubo de presión. Conductividad de los materiales constantes y variables con la temperatura</i> .....	32
<i>Figura 10: HEATING. Perfil axial de temperatura en el tubo de presión para distintos valores del coeficiente de transferencia de calor hacia el moderador</i> .....	32
<i>Figura 11: Perfil axial de temperatura. Conducción. Comparación entre geometría cilíndrica y aproximación de placas paralelas para el espacio anular utilizando HEATING y CATHENA</i> .....	33
<i>Figura 12: CATHENA. Perfil axial de temperatura. Transferencia de calor por radiación y conducción. Dos modelos diferentes del espacio anular</i> .....	33
<i>Figura 13: CATHENA. Perfil axial de temperatura. Comparación entre conducción y material gap (conducción y radiación)</i> .....	34
<i>Figura 14: HEATING. Perfil axial de temperatura. Comparación entre radiación y conducción</i> .....	34
<i>Figura 15: Perfil axial de temperatura. Comparación del mecanismo de transferencia de calor por radiación en el espacio anular utilizando HEATING y CATHENA</i> .....	35
<i>Figura 16: CATHENA. Perfil axial de temperatura considerando distintos valores de emisividad del tubo de presión</i> .....	35

# 1. INTRODUCCIÓN

La Central Nuclear Embalse (CNE) es un reactor tipo CANDU. El núcleo de este reactor está contenido en un tanque lleno de agua pesada (moderador) denominado calandria, el cual es atravesado por 380 canales combustibles.

Cada canal combustible esta conformado por dos tubos concéntricos. El tubo interior es el tubo de presión y el exterior el de calandria. En la Figura 1 se puede observar un esquema del canal y en la Figura 2 la ubicación del mismo dentro del reactor.

El tubo de presión aloja a 12 elementos combustibles. Cada uno de ellos está constituido por 37 barras combustibles, una central y las otras ubicadas a su alrededor en 3 coronas, de 6, 12 y 18 barras respectivamente. Por el interior del tubo de presión circula el refrigerante que, al igual que el moderador, es agua pesada. Su temperatura de entrada es de 265 °C y la de salida es de 310 °C y 100 bar. Cada extremo del tubo está rolado a un end-fitting, que proporciona la interfaz entre el tubo de presión y la máquina de recambio de combustible. Además cada end-fitting tiene una unión en la que se conecta un feeder del sistema primario de transporte de calor, que permite que el agua refrigerante ingrese o egrese del canal.

El tubo de calandria rodea al tubo de presión. Se encuentra a una temperatura de operación de 70 °C (temperatura del moderador) y presión atmosférica. Los tubos de calandria están unidos a las placas tubo de la calandria en cada uno de sus extremos. Entre cada par de placas tubo se encuentra el blindaje y el sistema de refrigeración del mismo. Este sistema es de agua liviana, la cual entra a 60 °C y sale a 64 °C.

Entre el tubo de presión y el tubo de calandria existe un espacio anular por el que circula dióxido de carbono. El espacio de gas anular continúa en el cuerpo del end-fitting hasta su salida al circuito de gas anular. Este sistema de gas anular es usado como barrera térmica entre los tubos y para detectar pérdidas desde el tubo de presión. Para que sea posible la circulación del gas y evitar el contacto entre los dos tubos existen anillos espaciadores (garter springs). Estos anillos, además de evitar dicho contacto, que puede llevar a una aceleración en la formación de hidruros que conduzca a una fractura del tubo de presión, facilitan el desplazamiento axial del tubo de presión debido a la dilatación térmica.

El sistema de gas anular de CNE controla en forma continua la humedad del CO<sub>2</sub>. El objetivo es detectar pequeñas trazas de humedad de agua pesada en el CO<sub>2</sub>, que pueden dar una indicación temprana de fallas incipientes del tubo de presión de un canal combustible. En el gas anular del canal V08 (periférico y de baja potencia) se han detectado trazas muy pequeñas de agua liviana del sistema de refrigeración de los blindajes de la calandria.

La cantidad de humedad detectada es muy pequeña y no afecta la operación del reactor. Por otro lado, el hecho que sea de agua liviana descarta fallas en el tubo de presión propiamente dicho. De todas maneras, si la pérdida aumentara

podría enmascarar la detección de trazas de agua pesada por parte del sistema de gas anular.

Aunque esa situación se considera de baja probabilidad, la CNE solicitó que se analice la factibilidad de operar con el canal V08 sin combustible, aislado del Sistema Primario de Transporte de Calor y aislado también del sistema de gas anular.

En este trabajo final se analizan las formas de transmisión de la potencia que se genera en el tubo de presión hacia los extremos del mismo y hacia el moderador. La potencia generada en el tubo es por activación, y por absorción y moderación de radiación gamma y neutrones provenientes de fisiones en otros canales cercanos. Se determinan también los perfiles de temperatura con dos códigos diferentes, HEATING y CATHENA.

## **2. DESCRIPCIÓN DE LOS CÓDIGOS Y MODELOS**

### **2.1 Códigos de cálculo**

Los dos códigos que se utilizan para este trabajo, HEATING y CATHENA, tienen características diferentes. HEATING es un código para cálculos de transferencia de calor en general. Por el contrario, el paquete de transferencia de calor de CATHENA es específico para la transmisión de calor de las paredes de las cañerías de un reactor tipo CANDU.

#### **2.1.1 CATHENA**

Es un código unidimensional para cálculos termohidráulicos de dos fluidos. El código resuelve las tres ecuaciones de conservación: masa, energía y momento para el agua y el vapor. Fue desarrollado para simular transitorios de planta en reactores tipo CANDU [Refs./9/ y /6/].

La principal función de CATHENA es simular el comportamiento de un sistema termohidráulico complejo y el cálculo de las transferencias de calor es anexo y específico para este fin.

CATHENA cuenta con un paquete para modelar la transferencia de calor por conducción en sólidos, para paredes de cañerías o elementos combustibles, y su conexión con nodos termohidráulicos. Este paquete es llamado GENHTP (GENeralizad Heat Transfer Package [Ref./10/]).

La transmisión de calor en CATHENA, se realiza a través o dentro de estructuras de calor llamados "solid models". Cada uno de estos puede tener varias regiones radiales con diferentes materiales cuyas propiedades pueden depender del tiempo, la temperatura o la posición.

CATHENA calcula en coordenadas cilíndricas en dos dimensiones: radial y azimutal. No considera la transmisión de calor en sentido axial.

La tasa de generación de calor puede ser constante o depender del tiempo, la temperatura o la posición. Las condiciones de contorno en CATHENA pueden ser temperaturas, flujos de calor o coeficientes superficiales de transferencia de calor, fijos o variables, o también un nodo hidráulico.

#### **2.1.2 HEATING**

Es un código de transferencia de calor que puede resolver estados estacionarios y transitorios en una, dos y tres dimensiones en coordenadas cartesianas, cilíndricas o esféricas [Ref./11/ ].

Se pueden incluir materiales múltiples cuyas propiedades pueden variar con el tiempo o la temperatura y también pueden presentar cambios de fase.

La tasa de generación de calor puede ser constante o depender del tiempo, la temperatura o la posición. En cuanto a las condiciones de contorno, se puede incluir una temperatura fija o transferencia de calor por convección forzada, natural o por radiación. Las condiciones de contorno pueden ser dependientes del tiempo y/o la temperatura.

## 2.2 Modelos

Se modelan dos cilindros concéntricos. El interior representa el tubo de presión (TP) y el exterior el tubo de calandria (TC), ambos de zircaloy. El espacio anular entre los tubos está ocupado con CO<sub>2</sub> y el tubo de presión contiene aire en su interior. Las dimensiones se muestran en la Tabla 1.

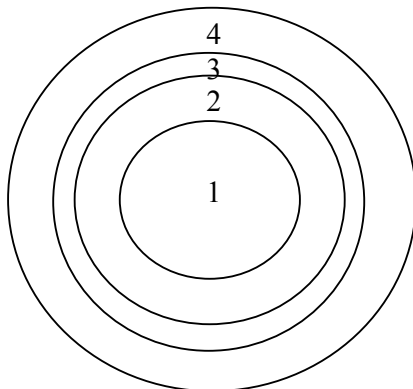
### 2.2.1 Modelo utilizado en CATHENA

El modelo de CATHENA tiene cuatro regiones radiales (aire, tubo de presión, gas anular, tubo de calandria) y doce nodos axiales siguiendo la cantidad de segmentos en que se tienen los datos de potencia. El programa toma la potencia total del nodo y la divide por su longitud para obtener la potencia lineal y ejecutar el cálculo. La distribución radial de temperaturas es la misma para todo el segmento axial. CATHENA no calcula transmisión de calor en la dirección axial.

La condición de contorno que se establece en este modelo es la de convección a través del área lateral del tubo de calandria hacia el moderador que se encuentra a 70 °C, siendo el coeficiente de transferencia de 50000 W/m<sup>2</sup> °C (este valor fue tomado de los ejemplos del manual del código).

#### Esquema del modelo

Configuración TP y TC



#### Regiones:

- 1: Aire
- 2: Tubo de presión
- 3: Gap (CO<sub>2</sub>)
- 4: Tubo de calandria

## 2.2.2 Modelo utilizado en HEATING

El modelo radial tiene las mismas regiones que el de CATHENA y cuenta con 60 nodos axiales en el tubo de presión. También se fija la misma condición de contorno de convección del calor hacia el moderador.

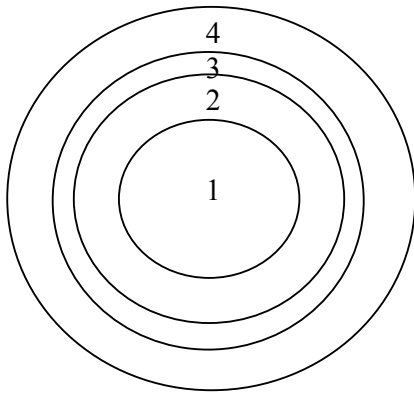
Como HEATING resuelve la transferencia de calor axial se imponen sobre los extremos del tubo de presión y calandria condiciones de temperatura constante sobre una superficie. Para imponer estas condiciones, el modelo cuenta con dos tapas, una en cada extremo del tubo de presión. Estas tapas consisten en dos cilindros concéntricos de zircaloy sin generación de energía, como indica el esquema del modelo.

El cilindro interior ('A', en el esquema del modelo) posee el mismo diámetro externo que el tubo de presión y el cilindro exterior ('B', en el esquema del modelo) se extiende hasta el diámetro externo del tubo de calandria. La longitud de estos cilindros es de 10 cm.

El cilindro interior se encuentra a 64 °C (interior del end-fitting) y el cilindro que rodea a este a 70 °C (temperatura de la calandria y el moderador).

### Esquema del modelo

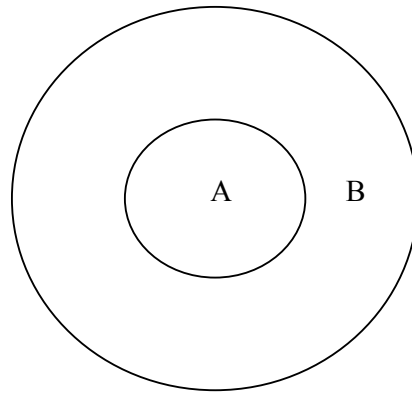
Configuración TP y TC



**Regiones:**

- 1: Aire
- 2: Tubo de presión
- 3: Gap (CO<sub>2</sub>)
- 4: Tubo de calandria

Configuración de los cilindros  
adicionados en los extremos (Tapas)



**Regiones:**

- A: cilindro interior
- B: cilindro exterior

## **2.3 Entrada de datos**

En el Anexo 2, se muestra un ejemplo de entrada de datos para CATHENA correspondiente al caso de conductividad de los materiales constantes con una descripción de su contenido.

En el Anexo 3, se muestra un ejemplo de entrada de datos para HEATING y su explicación. También en este caso con propiedades constantes.

## **2.4 Potencia generada en el tubo de presión**

Previo al armado de los modelos para cada código, se realizaron cálculos neutrónicos para determinar la potencia que se genera en el tubo de presión por activación del mismo, y por absorción y moderación de radiación gamma y neutrones provenientes de fisiones en otros canales cercanos [Ref./1/]. La distribución de la generación de potencia se muestra en la Tabla 2 y en la Figura 3. Estos cálculos se consideran datos externos al trabajo por lo que no se explican aquí los métodos de obtención de la potencia. En las Tabla 3 y 4 se muestran los valores de potencia ingresados a los códigos HEATING y CATHENA respectivamente.

### 3. TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN

#### 3.1 Propiedades constantes

A fin de comparar los perfiles de temperaturas obtenidos por ambos códigos en el tubo de presión, se consideran constantes las propiedades del zircaloy [Ref./2/], aire [Ref./3/] y CO<sub>2</sub> [Ref./4/]. Los valores utilizados se muestran en la Tabla 5.

Como se explicó en la Sección 2.1 los dos códigos presentan características diferentes. Es por esto que se realiza la comparación de los valores de temperatura obtenidos para ver si ellos presentan diferencias significativas.

Al observar el perfil radial en un extremo de la configuración aire-TP-CO<sub>2</sub>-TC, (Figura 4, Tablas 6 y 7) se aprecian diferencias entre los valores calculados por los códigos. Los obtenidos con HEATING son más bajos que los obtenidos con CATHENA. Esta diferencia se debe a que el código HEATING tiene en cuenta la transferencia de calor radial y axial, mientras que CATHENA solo considera conducción radial.

Dicho efecto no es apreciable en el perfil radial de temperatura en el centro del modelo (Figura 5, Tablas 6 y 7), las temperaturas calculadas por los dos códigos coinciden. Esto se debe a que el calor transferido en forma axial es despreciable frente al calor que se evacua radialmente (ver Sección 3.4.2), por lo que el efecto de la disminución de temperatura solo se observa en los extremos.

Se puede observar que el perfil axial en el tubo de presión obtenido con los dos códigos son similares (Figura 6, Tablas 8 y 9).

Para analizar en forma cuantitativa la cantidad de calor transferida por conducción axial vs. conducción radial, se observaron los resultados calculados con el código HEATING. La potencia total a extraer es de 3786.15 W la cual se transmite de la siguiente manera:

Calor transferido por:	Potencia (W)	Porcentaje
Extremo inicial del canal	14,4	0,38
Extremo final del canal	13,48	0,356
Área lateral	3758,22	99,264
Total	3786,1	100

Con estos valores queda en evidencia que casi la totalidad del calor se evacua por el área lateral del tubo de calandria, siendo despreciable el calor eliminado axialmente.

### **3.2 Conductividad variable de los materiales**

Para poder tener unos resultados más realistas de las temperaturas que se alcanzan en el tubo de presión, se modificaron las entradas de datos de ambos códigos para poder incluir la variación de la conductividad de los distintos materiales con la temperatura.

En HEATING, se agrega una tabla con los distintos valores de conductividad para cada temperatura. En CATHENA, en la tabla de conductividad, el código también requiere valores de calor específico y densidad, los cuales se ingresan sin variación con la temperatura.

La variación de la densidad no se considera ya que no se producen cambios en la masa ni se consideran variaciones en el volumen de los materiales. La densidad y el calor específico del aire y del dióxido de carbono se consideran a las condiciones iniciales de 50°C y 1 atm. Las mismas condiciones se suponen para el calor específico del zircaloy y se considera el valor constante de la densidad de este material que suministra el manual del código CATHENA.

En la Figura 7 se muestra la variación de la conductividad con la temperatura para el aire y para el dióxido de carbono y en la Figura 8 para el zircaloy. Los valores de la conductividad del aire, zircaloy y dióxido de carbono se obtuvieron de las referencias /5/, /6/ y /7/ respectivamente.

Los valores de conductividad del zircaloy utilizados son un poco más bajos que los recomendados por la OIEA (Organización Internacional de Energía Atómica) [Ref./2/]. Estos valores se muestran en el Anexo 1. Por esta razón las temperaturas que se obtienen están un poco sobrestimadas. Sin embargo, como se explica en la Sección 3.4.1, una variación en el valor de conductividad del zircaloy no modificará significativamente el perfil de temperaturas ya que este cambia más por variaciones en la conductividad del CO<sub>2</sub> que por variaciones del zircaloy. Por lo que utilizar un valor más pequeño no está provocando un error significativo en el perfil de temperatura.

Al graficar las temperaturas obtenidas (Figura 9, Tablas 8 y 9) se observa un aumento de la temperatura en todo el tubo de presión respecto al cálculo con las propiedades constantes realizado anteriormente. Esto se debe a que el valor de la conductividad del dióxido de carbono constante que se utilizó para la comparación de los códigos es más alto que el que corresponde, entonces al tener una mayor conductividad las temperaturas resultan más bajas.

### 3.3 Influencia del cambio del coeficiente de transferencia de calor hacia el moderador

Todos los resultados obtenidos hasta este momento fueron calculados considerando un coeficiente de transferencia de calor al moderador de 50000 W/m<sup>2</sup> °C. Este valor fue tomado de un ejemplo del manual del código CATHENA.

Sin embargo, según lo mencionado en la [Ref./8] el coeficiente de transferencia de calor hacia el moderador se puede aproximar en 40000 W/m<sup>2</sup> °C. Pero, dado que este valor es alto se suele usar un valor más razonable de 10000 W/m<sup>2</sup> °C. Se realizó un análisis de sensibilidad para analizar la influencia de las variaciones de este parámetro sobre el perfil axial de temperaturas del tubo de presión. Se calculó con el código HEATING, considerando la dependencia de la conductividad con la temperatura en todos los materiales. Se tomaron valores menores de este coeficiente (50000, 40000 y 10000 W/m<sup>2</sup> °C.), lo que implicaba una transferencia de calor hacia el moderador cada vez menor. Los resultados se observan en la Figura 10 quedando en evidencia que las temperaturas del tubo de presión no se ven afectadas por la variación de este coeficiente. Esto es debido a que la mayor resistencia a la transferencia de calor esta dada por la conducción a través del gas anular.

### 3.4 Cálculos analíticos

#### 3.4.1 Análisis de las resistencias térmicas

Se plantean las ecuaciones de conducción a través de las dos regiones exteriores al tubo de presión y la ecuación de transferencia de calor por convección hacia el moderador.

$$Q = -K_{CO_2} \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial r}$$

$$Q = -K_{Zircaloy} \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial r}$$

$$Q = h \cdot A \cdot (T_{extTC} - T_{Moderador})$$

Integrando las dos primeras ecuaciones y resolviendo se obtiene la ecuación análoga a un circuito eléctrico de resistencias en serie.

$$Q = \frac{(T_{RadioextTP} - T_{Moderador})}{R_{CO_2} + R_{TC} + R_{Convección}}$$

La resistencia equivalente es la suma de la resistencia térmica del CO<sub>2</sub>, del zircaloy y la relacionada con la convección al moderador.

Sus expresiones son las siguientes:

$$R_{CO_2} = \frac{\ln(R_{intTC} / R_{extTP})}{2 \cdot \pi \cdot K_{CO_2} \cdot L}$$

$$R_{TC} = \frac{\ln(R_{extTC} / R_{intTP})}{2 \cdot \pi \cdot K_{Zircaloy} \cdot L}$$

$$R_{Convección} = \frac{1}{2 \cdot \pi R_{extTC} \cdot h}$$

Al calcular estas resistencias resultan:  $R_{CO_2} = 0,063$ ,  $R_{TC} = 3,48 \cdot 10^{-5}$  y  $R_{Convección} = 4,76 \cdot 10^{-5}$ . Se concluye que la resistencia dominante es la conducción a través del gas anular. Además, estos resultados confirman el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección no modifica el perfil de temperaturas.

### 3.4.2 Análisis de los mecanismos de transferencia de calor

Se tomaron los valores de temperaturas obtenidas utilizando propiedades constantes y se hicieron cálculos analíticos en el tubo de presión para ver la importancia de la conducción axial y radial. También se analizó si era necesario tener en cuenta el fenómeno de radiación como una manera eficiente de transferir el calor generado.

#### A. CONDUCCIÓN AXIAL

Para analizar la conducción axial se estudia un cilindro con la misma área transversal que el tubo de presión y del mismo material (zircaloy). Se fija en uno de los extremos, como condición de contorno la temperatura del tubo de presión obtenida con los códigos en el centro de la longitud del cilindro (442,02 °C) y en el otro extremo se fija una temperatura de 64 °C, que es la temperatura del agua de blindaje. Lo que se está calculando es el calor transmitido hacia uno de los extremos, por simetría se considera que será similar el calor que se evacua por el otro extremo.

Según la ley de Fourier,

$$Q = -K_{Zircaloy} \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{L} \quad A = \pi \cdot (R_{extPT}^2 - R_{intTP}^2) = 1,4075 \cdot 10^{-3} m^2$$

$$\underline{\underline{Q = \frac{8,459}{L} W \cdot m}} \quad K = 15,9 \frac{W}{mK} \quad \Delta T = 442,02 - 64 = 378,02^\circ C$$

Esto implica que aun suponiendo que este gradiente de temperatura de 442,02 a 64 °C se produce sólo en 5 cm del tubo de presión, la cantidad de calor transmitido es de sólo 170 W. Esto confirma los resultados anteriores de que el calor transmitido axialmente es despreciable.

## B. CONDUCCIÓN RADIAL

Para evaluar la transferencia de calor radial se aplica también la ley de Fourier poniendo como condiciones la temperatura del tubo de presión (442,02 °C) en el radio externo del mismo y la temperatura del moderador (70 °C) en el radio interno del tubo de calandria. Se evalúa la conducción radial a través del gap, por lo que la conductividad usada es la del CO<sub>2</sub>.

$$Q = -K_{CO_2} \cdot A \cdot \frac{dT}{dr} \quad A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L$$

$$\frac{Q}{L} = \frac{K_{CO_2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \Delta T}{\ln(R_{TC} / R_{TP})}$$

$$\frac{Q}{L} = 989,53 \frac{W}{m} \quad K = 0,06724 \frac{W}{mK}$$

Esta última ecuación muestra que a la temperatura de los dos manojos centrales (442,02 °C) prácticamente todo el calor generado en dichos manojos (manojos 6 y 7 de la Tabla 4) es evacuado por conducción radial, tal como resulta de la simulación anterior.

## C. RADIACIÓN

También se quiso analizar si la transferencia de calor por radiación es un mecanismo importante o si se podía despreciar.

El cálculo de calor transferido por radiación se realiza considerando las mismas temperaturas que en el caso de conducción radial, y considerando el tubo de presión y calandria como cuerpos grises, con emisividades de 0,8 y 0,2 respectivamente (estos valores fueron tomados de ejemplos del programa CATHENA). El factor  $F_{12}$ , factor de forma o vista, vale 1.  $X_{12}$ , es una función de consideraciones geométricas y de las emisividades.

$$Q = A \cdot X_{12} \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad X_{12} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1\right) + F_{12} + \frac{A_1}{A_2} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1\right)} = 0.215$$

$$\frac{Q}{L} = 1059.12 \frac{W}{m}$$

Este resultado indica que a la temperatura considerada el calor transferido por radiación es mayor al transferido por conducción.

Luego de realizados estos cálculos queda confirmado que la transferencia de calor axial es despreciable. También queda en evidencia la importancia del mecanismo de radiación para la transmisión del calor generado y que no es posible despreciarlo.

## 4. TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN

En el modelado del mecanismo de radiación, tanto para CATHENA como para HEATING, no se considera absorción ni emisividad del gas anular.

### 4.1 Modelo utilizado en CATHENA

Este código de cálculo permite incorporar la transferencia de calor por radiación de dos maneras diferentes:

- a) Considerando una sola estructura de calor, es decir, con el modelo de los dos cilindros concéntricos, tal como se venía trabajando pero con una pequeña modificación. En el espacio anular (espesor  $9,615 \cdot 10^{-3} \text{m}$ ), lugar donde antes había  $\text{CO}_2$  se lo sustituye por un material propio del código, denominado material "gap". A este material necesita ingresársele tres valores: una conductancia de contacto (definida como la conductividad del  $\text{CO}_2$ /espesor del gap) y las emisividades del tubo de presión (0,8) y del tubo de calandria (0,2). Los valores de conductancia son ingresados mediante el uso de una tabla para poder considerar la dependencia de esta propiedad con la temperatura (Tabla 10).
- b) Considerando dos estructuras de calor. Una constituida por el tubo de presión y otra por el tubo de calandria. La conducción en el  $\text{CO}_2$  entre estas dos estructuras se realiza superponiendo el modelo auxiliar de CATHENA "Solid-Solid Contact Model". A este modelo se le debe ingresar, al igual que al usar el material gap, la conductancia de contacto. Se deben especificar los nodos axiales, sectores y cilindros entre los cuales se transfiere el calor y a través de que porcentaje del área de los mismos. En este caso se ponen en contacto en cada nodo axial todos los sectores con un área de contacto del 100 %.

En este caso hay doce modelos auxiliares "Solid-Solid Contact Model", uno para cada segmento axial del tubo de presión. El valor de la conductancia de contacto que se le ingresa a cada uno de ellos se fija de la siguiente manera. En cada segmento axial se calcula la temperatura de la pared externa del tubo de presión y de la interna del tubo de calandria, usando el modelo de una única estructura de calor. Se promedian estas temperaturas, y con esta temperatura promedio se calcula la conductividad del  $\text{CO}_2$ . Luego se la divide por el espesor del gap, y este es el valor de la conductancia de contacto que se ingresa para ese segmento (Tabla 11).

Para considerar la transferencia de calor a través del gap, CATHENA utiliza la aproximación de placas paralelas. El error que se está cometiendo por considerar esta aproximación en lugar de resolver el problema con la geometría cilíndrica correspondiente es de 30 °C aproximadamente en la temperatura del centro del canal, que es la más alta (Figura 11, Tablas 8 y 9). Este error es por exceso, por lo tanto las temperaturas calculadas considerando radiación están sobrestimadas como máximo en este valor.

La radiación entre la pared externa del tubo de presión y la pared interna del tubo de calandria se realiza superponiendo en el espacio anular el modelo auxiliar de CATHENA "Radiation Model". Al modelo de radiación de CATHENA se le suministran datos sobre las superficies entre las cuales se va a efectuar la radiación, emisividades y factores de visión.

Los factores de visión se calculan a través de un programa utilitario de CATHENA llamado MATRIX. Este programa, a partir del ingreso de la geometría y cantidad de sectores que se desean utilizar en la entrada de datos de CATHENA suministra los factores de visión.

Los resultados obtenidos utilizando estos dos modos de cálculo del código CATHENA se observan en la Figura 12 y los valores se encuentran en la Tabla 8. Puede verse que ambos modelos calculan valores similares de temperatura.

En la Figura 13 y en la Tabla 8 se muestra la comparación entre las temperaturas obtenidas considerando solo conducción y agregando también la transferencia de calor por radiación. Allí puede verse como al considerar conducción y radiación la temperatura máxima desciende de los 660 °C a los 370 °C aproximadamente.

## **4.2 Modelo utilizado en HEATING**

Para considerar el mecanismo de transferencia de calor por radiación se debió modificar el modelo para el código HEATING. En este caso es utilizando el "Gap Radiation Model". Con esta aproximación la radiación es modelada estrictamente en una dirección, es decir para este caso un nodo del tubo de presión intercambia calor por radiación con el nodo que está estrictamente enfrente de él en el tubo de calandria. Para los otros dos materiales, aire y zircaloy, se considera a la conductividad variable con la temperatura y el resto de las propiedades, densidad y calor específico, constantes. No se considera conducción en el gas anular.

En la Figura 14 y Tabla 9 se muestra la comparación entre las temperaturas obtenidas considerando solo conducción y utilizando el modelo de Gap Radiation Model. Allí puede verse como al considerar sólo radiación la temperatura máxima es de 430 °C aproximadamente y cuando se considera sólo conducción la temperatura máxima es de 660 °C.

## **4.3 Comparación entre los códigos**

Si se comparan los resultados hallados con HEATING y CATHENA teniendo en cuenta solo radiación (Figura 15, Tablas 8 y 9), sin considerar la conducción a través del gas anular (es decir, utilizando en HEATING el Gap Radiation Model y en CATHENA el Radiation Model sin Solid-Solid Contact Model) no se observan diferencias significativas en las temperaturas del tubo de presión.

## 5. CONCLUSIONES

Entre todos los perfiles de temperaturas axiales calculados se elige finalmente es el obtenido con CATHENA considerando conducción (conductancia variable del CO<sub>2</sub> con la temperatura en el gas anular) y radiación ( $\epsilon_{TP}= 0,2$ ,  $\epsilon_{TC}= 0,2$ ) a través de las paredes laterales del canal para el perfil axial de potencia de la Tabla 2.

Longitud TP (m)	Temperatura TP (°C)
0,25	165,9
0,74	274,0
1,24	344,0
1,73	389,9
2,23	417,2
2,72	430,0
3,22	430,1
3,71	417,2
4,21	387,6
4,71	337,0
5,20	264,7
5,70	160,2

Estos valores, si bien calculados en forma realista (con conductividades variables con la temperatura documentadas) están sobrestimados debido a:

- a) *La aproximación de placas paralelas que utiliza CATHENA para conducción en el "Solid-Solid Contact Model" o el material "Gap".*

CATHENA puede calcular simultáneamente conducción y radiación a través de la pared lateral del canal. El cálculo de conducción en este caso se basa en aplicar al espacio anular la aproximación de placas paralelas, con una conductancia equivalente  $K/L$ , siendo  $L$  la distancia entre las placas. El error al considerar esta aproximación es de aproximadamente 30 °C en la temperatura máxima.

- b) *La emisividad del tubo de presión se consideró constante con la temperatura  $\epsilon_{TP}= 0,2$  y ésta es de los valores más bajos de emisividad de la aleación Zr-2,5 Nb.*

En la mayoría de los perfiles de temperatura se ha considerado como dato de la emisividad del tubo de presión 0,8 que se sugiere en manuales de CATHENA. Nuevos datos [Ref./2/] indican que la emisividad para tubos de aleación Zr-2,5Nb es menor. Es por esto que se calcula también el perfil de temperaturas con el valor de emisividad del tubo de presión de 0,2 que es

cercano al menor valor de emisividad que indican los nuevos datos (Figura 16). Se observa en el cálculo con distintas emisividades muestra una diferencia de 65 °C en la temperatura máxima. La planta deberá acordar que valor de emisividad hay que considerar para obtener un perfil más realista.

- c) *La conductividad variable del zircaloy con la temperatura (manual de CATHENA) es levemente inferior a las recomendadas por la OIEA [Ref./2/]*

La conductividad variable del zircaloy utilizada es próxima a los valores recomendados por la OIEA, pero un poco menor. Es por esto que las temperaturas están un poco sobrestimadas.

- d) *No se considera conducción axial*

No considerar la conducción axial no variará la temperatura máxima en el centro de canal, pero habrá una pequeña influencia en las temperaturas cercanas a los extremos del canal.

Para determinar si este perfil sobrestimado es conservativo (pesimista) se deben analizar los fenómenos físicos, químicos o mecánicos que sufra el tubo de presión luego del procedimiento de aislamiento. Podría suceder que fuera mejor tener un perfil de temperaturas mayor, por ejemplo relacionado al fenómeno de precipitación del hidrógeno adsorbido en el tubo de presión.

Por otro lado, como se tiene la capacidad para variar propiedades de los materiales o cambiar estos materiales por otros en el cálculo (el aire del interior del tubo de presión por otro gas, o el CO<sub>2</sub> por otro) se puede realizar nuevamente la simulación luego de conocer cuales son los pasos del procedimiento que se realizará para el aislado del canal.

Si se desconecta este canal del sistema de gas anular, se deja entrar aire y después se cierra, habría que utilizar la conductividad del aire, algo mayor que la del CO<sub>2</sub>, obteniendo temperaturas algo menores. Si se desea bajar más la temperatura puede realizarse el cálculo y analizar la posibilidad de inyectar en el espacio anular algún otro gas de mayor conductividad térmica.

De la comparación de la resistencia térmica que provee el gas anular, el tubo de calandria y la transferencia de calor al moderador se muestra que la primera es dominante. La conducción en el gas anular es determinante para el perfil de temperatura.

En cuanto a la comparación de los códigos utilizados:

- a) Los resultados para la temperatura máxima que alcanza el tubo de presión calculados con los códigos HEATING y CATHENA coinciden en un modelo de varias regiones, con las mismas propiedades de los materiales, considerando la conducción como método de transferencia de calor.
- b) El cálculo de HEATING considera conducción axial. Sin embargo, se muestra en la Sección 3.4 que la contribución de esta forma de transporte de calor es despreciable. Casi todo el calor generado se transfiere por conducción y radiación a través de las paredes laterales del canal.

- c) Los valores de temperatura obtenidos considerando únicamente radiación por las paredes del tubo por HEATING y CATHENA coinciden.

Como valor agregado de este trabajo se puede mencionar la validación del modelado de la transferencia de calor en un canal combustible particular de Embalse. El modelo de este canal aislado se utiliza para conocer las temperaturas que alcanza la pared del canal más exigido en accidentes hipotéticos donde las barras combustibles quedan en vapor. Estas barras radían calor a través de las paredes laterales del canal. Para este caso es necesario obtener el mejor modelo posible para las paredes del canal.

Actualmente en NASA se está aplicando el modelo auxiliar de radiación para los cálculos de canal, no el “Solid-Solid Contact Model”, el error que se estaría cometiendo en la temperatura máxima sería de 63 °C, para el rango de temperaturas de este trabajo. Este valor surge de la comparación de los resultados obtenidos con el modelo “Radiation Model” y “Radiation Model” y “Solid-Solid Contact Model” en conjunto.

Otro resultado interesante es que el “Material Gap” definido en CATHENA estaría dando resultados similares al “Solid – Solid Contact Model” junto con el “Radiation Model”, pudiendo utilizarse para este rango de temperaturas indistintamente.

## REFERENCIAS

1. Cálculos de potencia generada en el tubo de presión. Informe en publicación. José Fink, Grupo Física y Análisis, Nucleoelectrica Argentina S.A.
2. Thermophysical Properties of Materials for Water Cooled Reactors, IAEA-TECDOC-949, June 1997.
3. Perry's Chemical Engineers' Handbook, 1999.
4. [www.messer.es/fichas\\_gases\\_publicaciones\\_tecnicas/fichas\\_gases/FT\\_Dioxido\\_de\\_Carbono.pdf](http://www.messer.es/fichas_gases_publicaciones_tecnicas/fichas_gases/FT_Dioxido_de_Carbono.pdf)
5. A Heat Transfer Textbook, Third Edition, John H. Lienhard IV, John H. Lienhard V, 2001
6. CATHENA MOD-3.5c/Rev0 Theoretical Manual, T.G. Beuthe and B.N. Hanna, November 2000.
7. Thermal Conductivity and effective diffusion coefficient for vibrational energy: Carbon dioxide (350-2000K) S H P Chen, P C Saxena 1975. J Phys. B: At. Mol. Phys. 8 1962-1972
8. Investigation of Pressure-Tube and Calandria-Tube. Deformation following a Single Channel Blockage. Event in ACR 700 by Craig Douglas Gerardi. B.S Mechanical Engineering, B.S. Engineering- Nuclear University of Maryland, 1994.
9. CATHENA: A thermalhydraulic code for CANDU analysis. B.N. Hanna. Nuclear Engineering and Design 180 (1998) 113–131
10. CATHENA Mod-3.5d/Rev1 GENHTP Input Reference, November 2004.
11. HEATING 7.2 USER'S MANUAL, K. W. Childs, February 1993.

**Tabla 1: Dimensiones de los modelos**

	Dimensiones (m)
Radio interno del TP	0,051689
Radio externo del TP	0,055855
Espesor del Gap	0,009615
Radio interno del TC	0,065470
Radio externo del TC	0,066840
Longitud de los cilindros	5,9436

**Tabla 2: Potencia generada en el tubo de presión**

Número de Segmento	Z1(cm)	Z2(cm)	Neutrones + gammas	Activación	Total
			W/cm de canal		
1	0	49,53	1,1168	0,2654	1,3822
2	49,53	99,06	3,1304	0,7441	3,8745
3	99,06	148,59	4,9831	1,1845	6,1676
4	148,59	198,12	6,4857	1,5416	8,0273
5	198,12	247,65	7,5006	1,7829	9,2835
6	247,65	297,18	8,0098	1,9039	9,9137
7	297,18	346,71	8,0145	1,9050	9,9195
8	346,71	396,24	7,5016	1,7831	9,2847
9	396,24	445,77	6,4054	1,5225	7,9279
10	445,77	495,30	4,7770	1,1355	5,9125
11	495,30	544,83	2,9203	0,6942	3,6145
12	544,83	594,36	1,0352	0,2461	1,2813

**Tabla 3: Potencia asignada a la simulación con HEATING**

Z (m)	Densidad de Potencia (W/m <sup>3</sup> )
0	0
0,0999	0
0,1000	97997,30
0,5953	97997,30
0,5954	274700,15
1,0906	274700,15
1,0907	437279,81
1,5859	437279,81
1,5860	569131,63
2,0812	569131,63
2,0813	658195,59
2,5765	658195,59
2,5766	702876,46
3,0718	702876,46
3,0719	703287,68
3,5671	703287,68
3,5672	658280,67
4,0624	658280,67
4,0625	562084,22
4,5577	562084,22
4,5578	419193,35
5,0530	419193,35
5,0540	256266,28
5,5483	256266,28
5,5484	90843,54
6,0436	90843,54
6,0437	0
6,1436	0

**Tabla 4: Potencia total por segmento y fracción de potencia para cada nodo axial de CATHENA.**

Segmento	W / segmento	Fracción de potencia para cada nodo axial de CATHENA
1	68,460366	0,01804693
2	191,903985	0,05058807
3	305,481228	0,08052833
4	397,592169	0,10480982
5	459,811755	0,12121161
6	491,025561	0,12943992
7	491,312835	0,12951565
8	459,871191	0,12122727
9	392,668887	0,10351198
10	292,846125	0,07719757
11	179,026185	0,04719334
12	63,462789	0,01672951
TOTAL (W):	3793,463076	

**Tabla 5: Propiedades constantes de los materiales utilizados**

Materiales	Propiedades		
	Conductividad (W/m K)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Capacidad calorífica (J/Kg K)
Zircaloy	15,9	6533	276,9
Aire	0,0332	0,8694	1013
CO <sub>2</sub>	0,06724	1,8474	850,4

**Tabla 6: Resultados obtenidos con HEATING. Perfiles radiales en el extremo y centro del tubo de presión.**

Nodos HEATING (cm)	Temperaturas (°C)	
	EXTREMO TP	CENTRO TP
0	102,75	442,48
1,29222	102,83	442,48
2,58445	103,08	442,48
3,87668	103,50	442,48
5,16890	104,08	442,49
5,30777	104,08	442,45
5,44663	104,07	442,32
5,58550	104,05	442,12
5,90600	92,09	311,49
6,22650	80,77	187,77
6,54700	70,02	70,25
6,59267	70,02	70,18
6,63833	70,01	70,12
6,68400	70,00	70,05

**Tabla 7: Resultados obtenidos con CATHENA. Perfiles radiales en el extremo y centro del tubo de presión.**

Nodos CATHENA (cm)	Temperaturas (°C)	
	EXTREMO TP	CENTRO TP
0	115,9804	443,0829
1,292225	115,9897	443,0829
2,58445	116,0113	443,0830
3,876675	116,0464	443,0830
5,1689	116,095	443,0831
5,3772	116,0832	442,9877
5,5855	116,0486	442,7073
6,06625	92,1274	249,1007
6,547	70,0312	70,2527
6,6155	70,0185	70,1494
6,684	70,0058	70,0472

**Tabla 8: Resultados obtenidos con CATHENA. Perfiles axiales. Conducción, Radiación y Conducción y radiación en conjunto.**

Longitud TP (m)	Temperaturas (°C)			
	Solo conducción			Solo radiación
	Propiedades constantes (Tabla 5)	Conductividades variables (Figuras 7 y 8)	Aproximación Placas Paralelas	Radiation model ( $\epsilon_{TP}=0,8$ $\epsilon_{TC}=0,2$ )
0,25	122,0031	207,4361	214,9664	191,6998
0,74	215,7721	376,9327	394,0893	297,6272
1,24	302,0465	497,9507	520,7446	360,0711
1,73	372,0148	583,1775	609,7084	399,8142
2,23	419,2774	636,3692	664,6774	423,1387
2,72	442,9877	661,8505	691,0794	434,0104
3,22	443,2059	662,0816	691,3212	434,1075
3,71	419,3225	636,4185	664,7283	423,1606
4,21	368,275	578,8337	605,2001	397,8629
4,71	292,4487	485,4497	507,6773	353,9989
5,2	205,99	361,6263	377,9975	289,1102
5,7	118,2069	199,058	206,0649	185,5648

(Continuación Tabla 8)

Longitud TP (m)	Temperaturas (°C)		
	Conducción y radiación		
	Radiation model ( $\epsilon_{TP}=0,8$ $\epsilon_{TC}=0,2$ ) + Solid Solid Contact Model (K/e: Tabla 11)	Material Gap (K/e: Tabla 10) ( $\epsilon_{TP}=0,8$ $\epsilon_{TC}=0,2$ )	Material Gap (K/e: Tabla 10) ( $\epsilon_{TP}=0,2$ $\epsilon_{TC}=0,2$ )
0,25	139,1674	147,0068	165,9257
0,74	230,9335	235,9213	273,9750
1,24	293,4504	293,9464	343,9420
1,73	334,8952	332,2747	389,8879
2,23	359,5737	355,1156	417,2112
2,72	371,1391	365,8332	430,0189
3,22	371,2426	365,9297	430,1343
3,71	359,5969	355,1364	417,2361
4,21	332,8405	330,3736	387,6120
4,71	287,2081	288,1677	337,0030
5,20	222,7647	228,2618	264,7351
5,70	134,6688	142,3890	160,2498

**Tabla 9: Resultados obtenidos con HEATING. Perfiles axiales. Conducción y Radiación.**

Longitud TP (m)	Temperaturas (°C)		
	Propiedades constantes	Conductividades variables	Gap Radiation Model
0	71,17	72,2	72,06
0,09906	104,07	146,07	139,2
0,19812	116,51	183,59	169,23
0,29718	122,76	207,07	185,24
0,39624	129,98	229,79	199,19
0,49530	146,44	264,21	221,26
0,59436	191,07	328,71	270,95
0,69342	207,66	358,39	287,22
0,79248	215,25	374,99	294,47
0,89154	222,55	390,15	300,01
0,99060	237,93	414,21	310,96
1,08966	279,05	463,04	344,61
1,18872	294,27	484,64	353,51
1,28778	301,06	496,16	357,38
1,38684	307,21	506,42	359,74
1,48590	319,75	523,07	366,67
1,58496	353,10	558,30	388,77
1,68402	365,38	573,56	395,21

(Continuación Tabla 9)

Longitud TP (m)	Temperaturas (°C)		
	Propiedades constantes	Conductividades variables	Gap Radiation Model
1,78308	370,68	581,36	396,83
1,88214	375,09	587,89	397,92
1,98120	383,64	598,28	402,61
2,08026	406,18	620,57	414,79
2,17932	414,42	630,09	419,92
2,27838	417,83	634,7	419,71
2,37744	420,30	638,15	420,61
2,4765	424,68	643,23	423,01
2,57556	435,99	654,00	428,15
2,67462	440,04	658,48	431,39
2,77368	441,50	660,34	430,28
2,87274	442,02	661,11	431,42
2,97180	442,22	661,42	430,99
3,07086	442,32	661,51	431,02
3,16992	442,20	661,28	431,54
3,26898	441,69	660,53	430,35
3,36804	440,23	658,67	431,50
3,46710	436,15	654,16	428,22
3,56616	424,75	643,29	423,03
3,66522	420,32	638,13	420,68
3,76428	417,75	634,53	419,63
3,86334	414,11	629,60	419,93
3,9624	405,22	619,33	414,38
4,06146	380,88	595,22	401,12
4,16052	371,64	583,95	396,07
4,25958	366,88	576,85	394,87
4,35864	361,14	568,36	393,00
4,45770	347,84	551,71	386,04
4,55676	311,72	513,26	361,65
4,65582	298,18	495,08	354,03
4,75488	291,67	484,06	351,40
4,85394	284,75	472,02	347,23
4,953	269,46	449,86	337,97
5,05206	228,25	400,10	303,36
5,15112	212,87	375,47	291,90
5,25018	205,68	359,99	285,94
5,34924	198,40	343,3	278,55
5,44830	182,71	313,85	262,04
5,54736	140,60	250,45	212,84
5,64642	124,28	213,56	188,75
5,74548	115,01	183,61	167,80
5,84454	102,19	144,10	136,88
5,94360	71,09	71,20	71,95

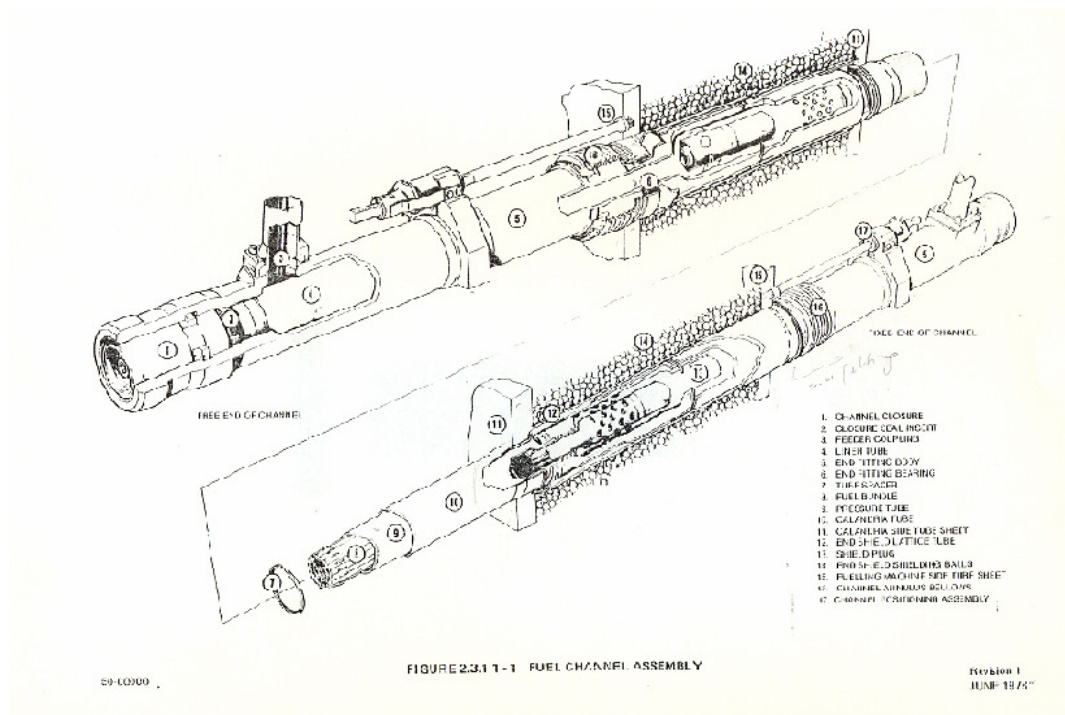
**Tabla 10: Dependencia de la conductancia de contacto con la temperatura.**

Temperatura (°C)	K/e (W/m <sup>2</sup> K)
77	2,124883086
177	2,956730642
277	3,755725676
377	4,523521230
477	5,261770346
577	5,972126066
627	6,317360478
677	6,656241433
727	6,988975559
827	7,636829849

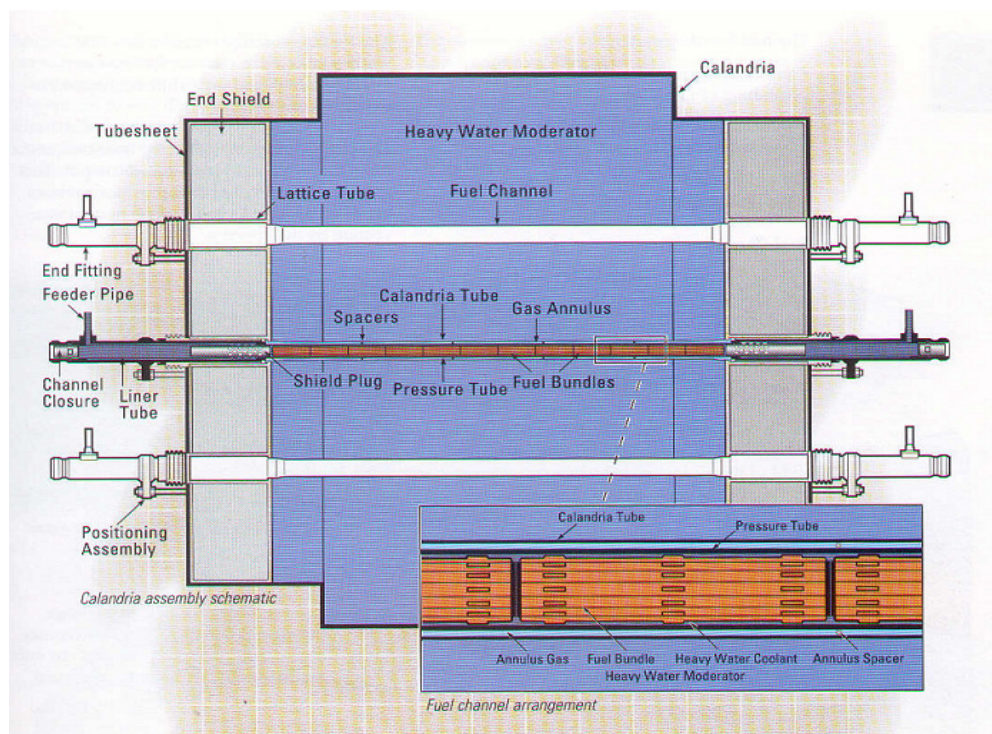
**Tabla 11: Valores de conductancia de contacto para cada segmento del modelo en CATHENA.**

Número de Segmento	K/e (W/m <sup>2</sup> K)
1	2,39058098
2	2,75982757
3	2,99726956
4	3,15261000
5	3,24462054
6	3,28765050
7	3,28803819
8	3,24470411
9	3,14493309
10	2,97374576
11	2,72827796
12	2,37122249

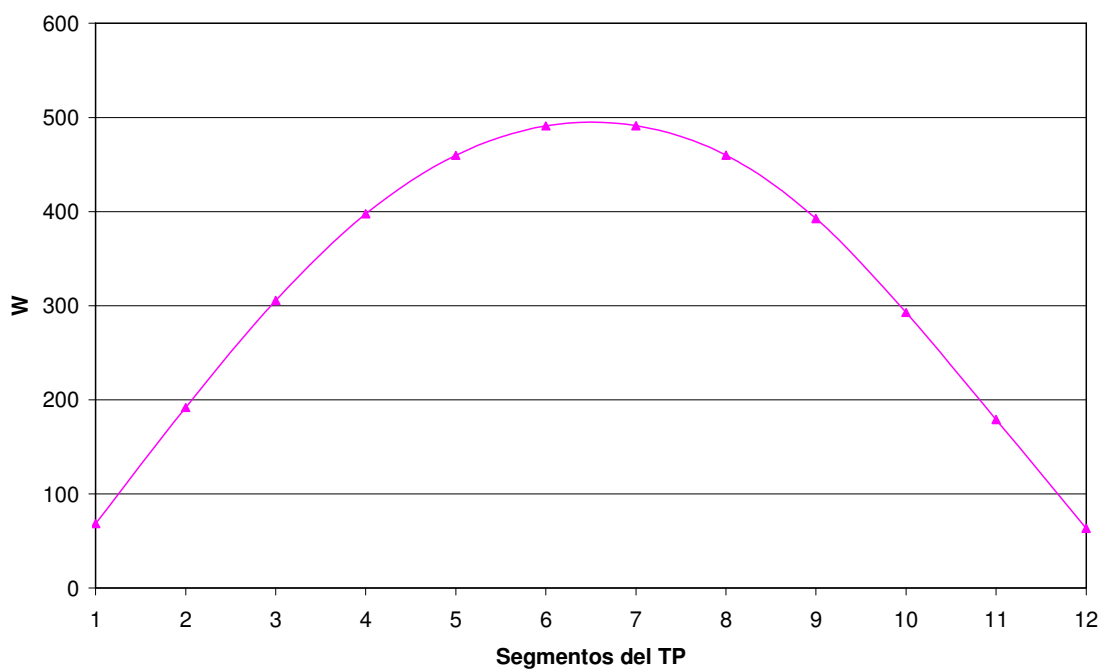
**Figura 1: Esquema del canal de la CNE.**



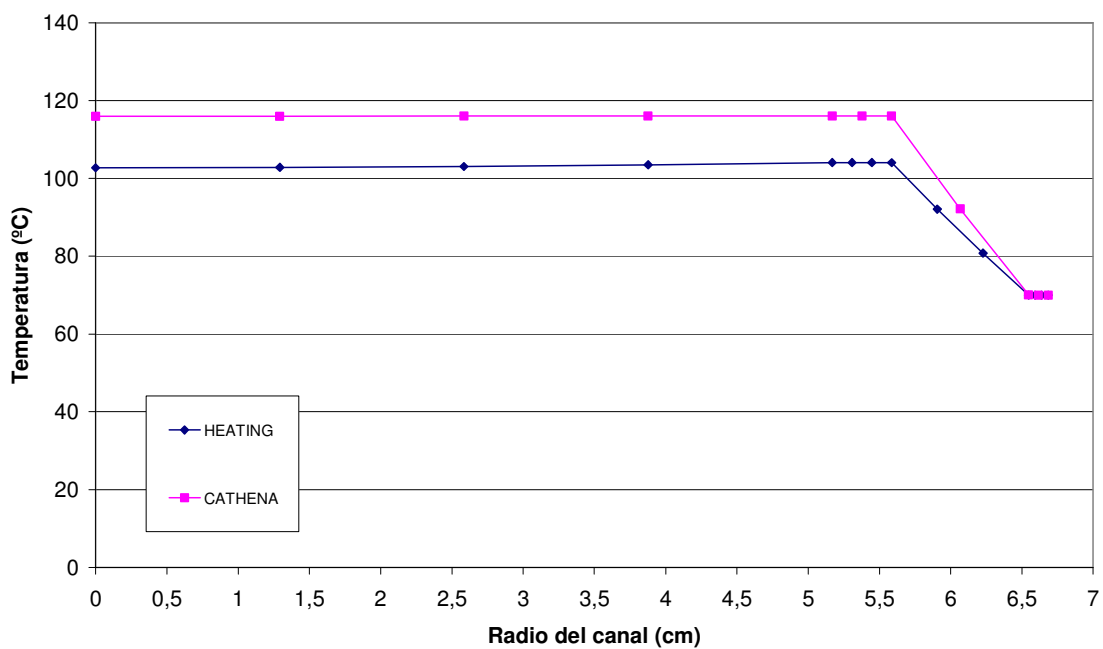
**Figura 2: Disposición del canal en el reactor.**



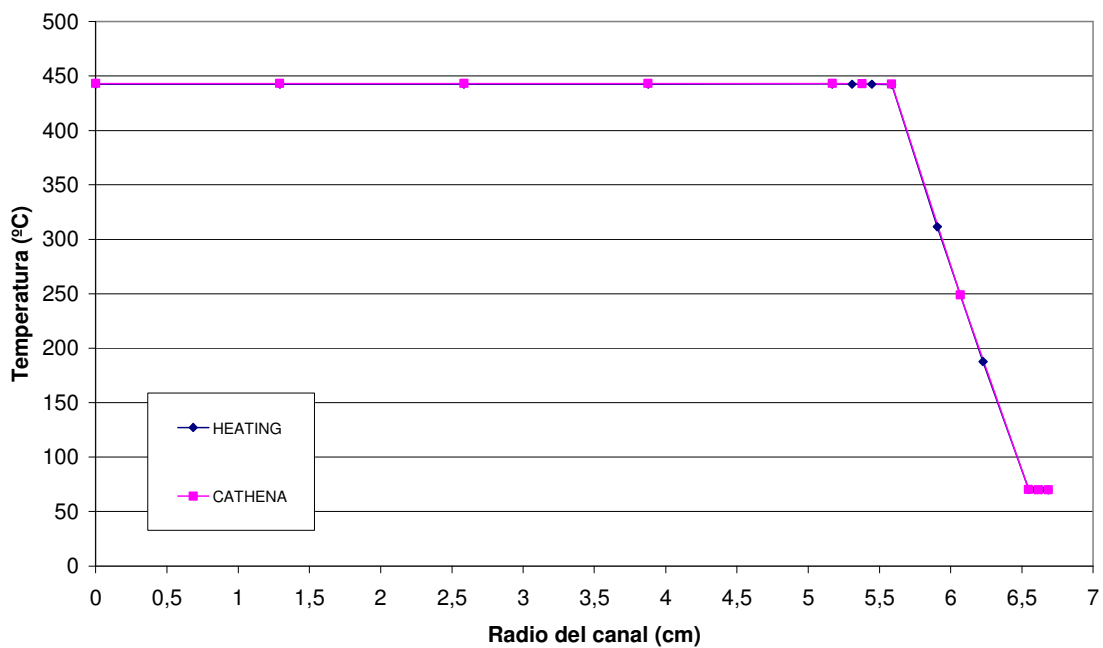
**Figura 3: Distribución de generación de potencia en el tubo de presión.**



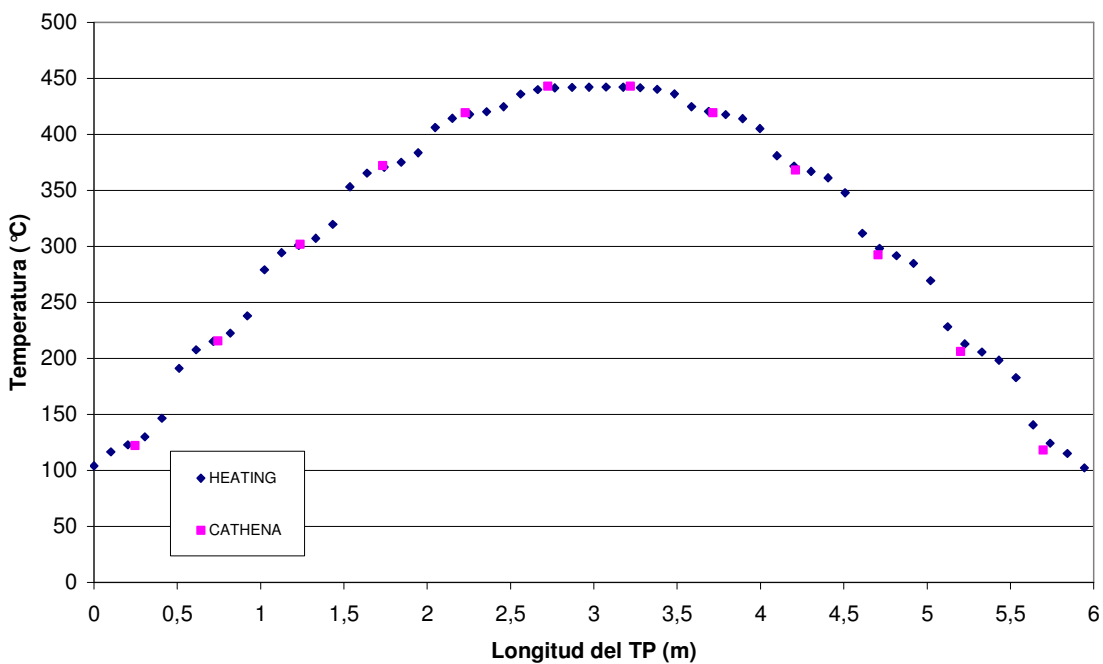
**Figura 4: Perfil radial de temperatura en un extremo del tubo de presión. Transferencia de calor por conducción.**



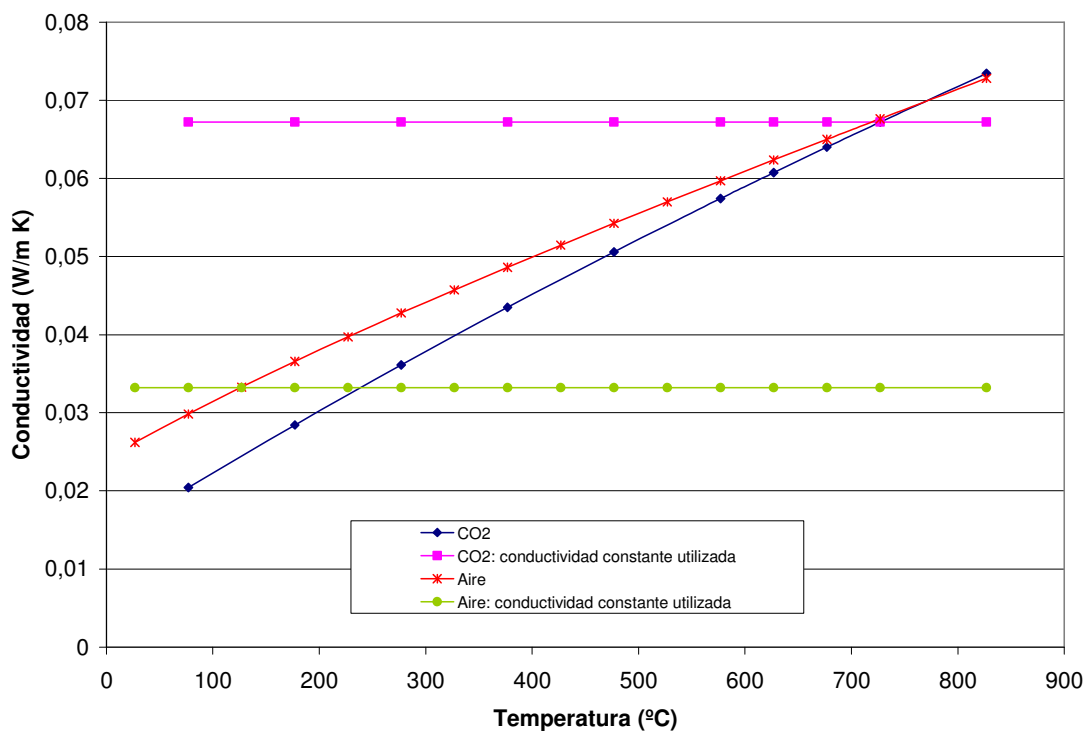
**Figura 5: Perfil radial de temperatura en el centro del tubo de presión. Transferencia de calor por conducción.**



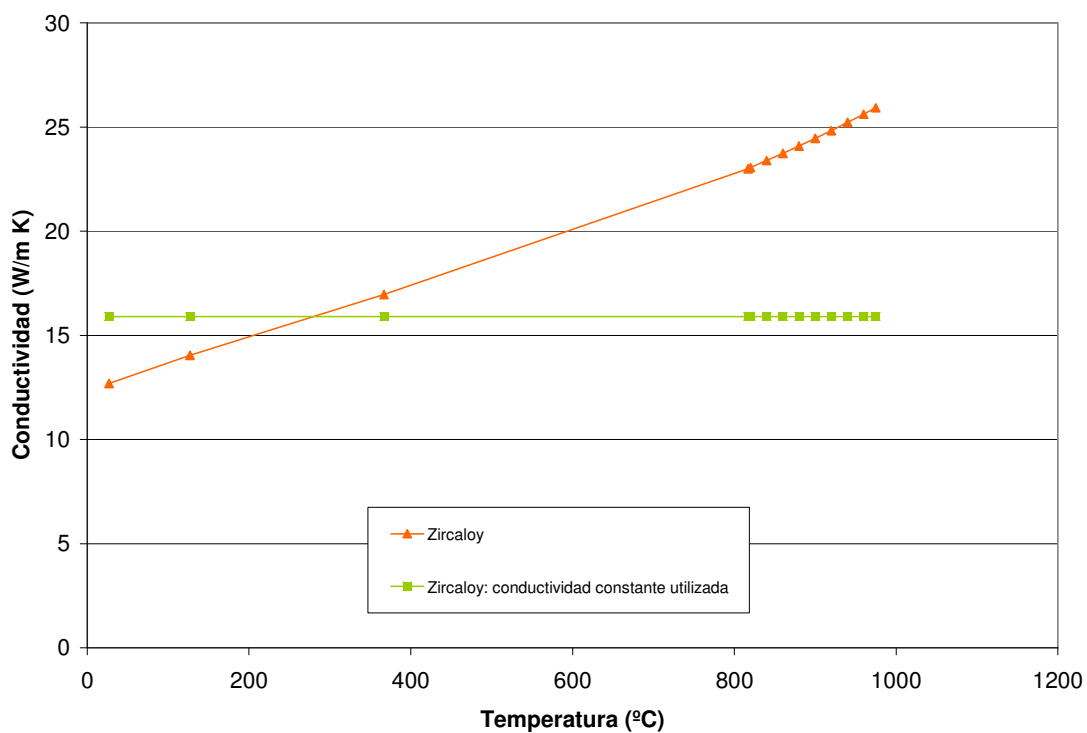
**Figura 6: Perfil axial de temperatura en el tubo de presión. Transferencia de calor por conducción. Comparación entre HEATING y CATHENA.**



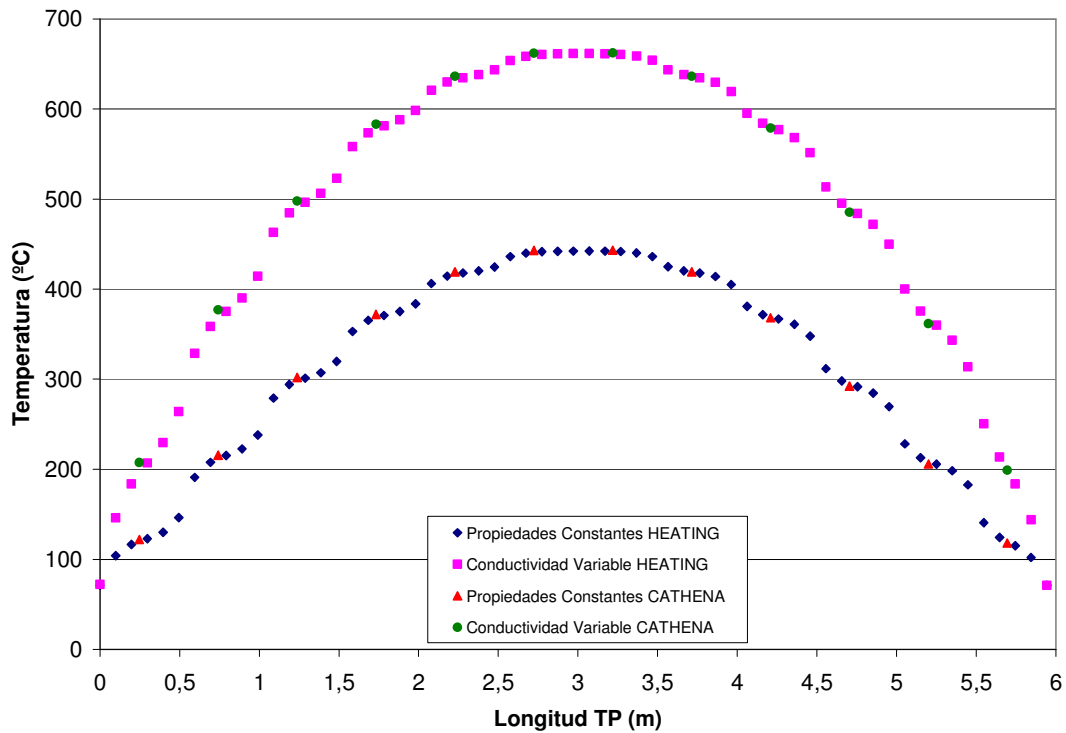
**Figura 7: Conductividades del aire y del CO<sub>2</sub> en función de la temperatura.**



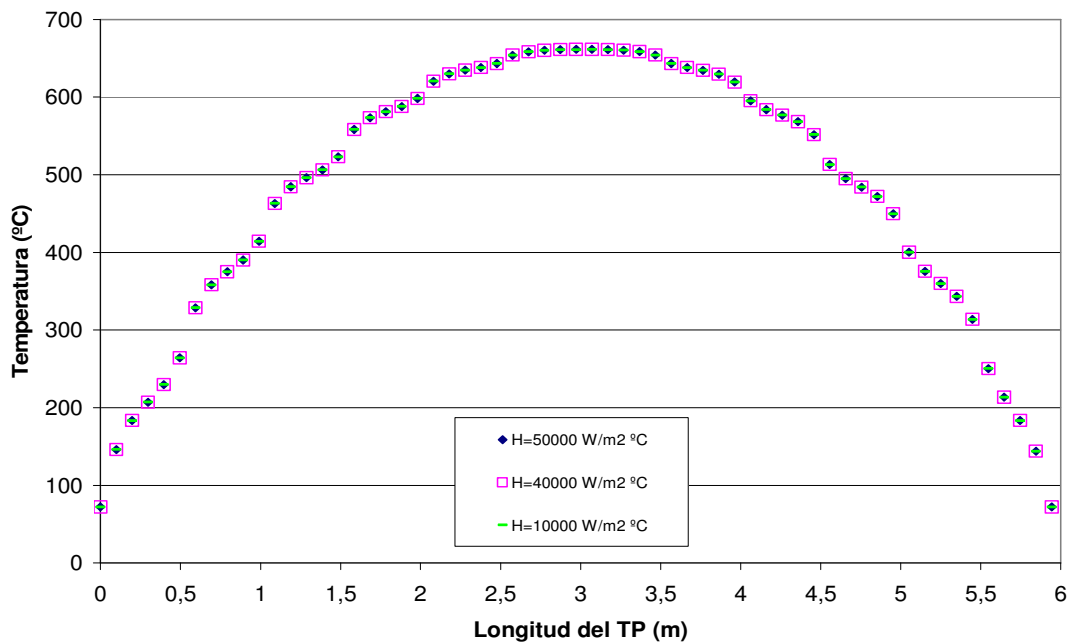
**Figura 8: Conductividad del zircaloy en función de la temperatura.**



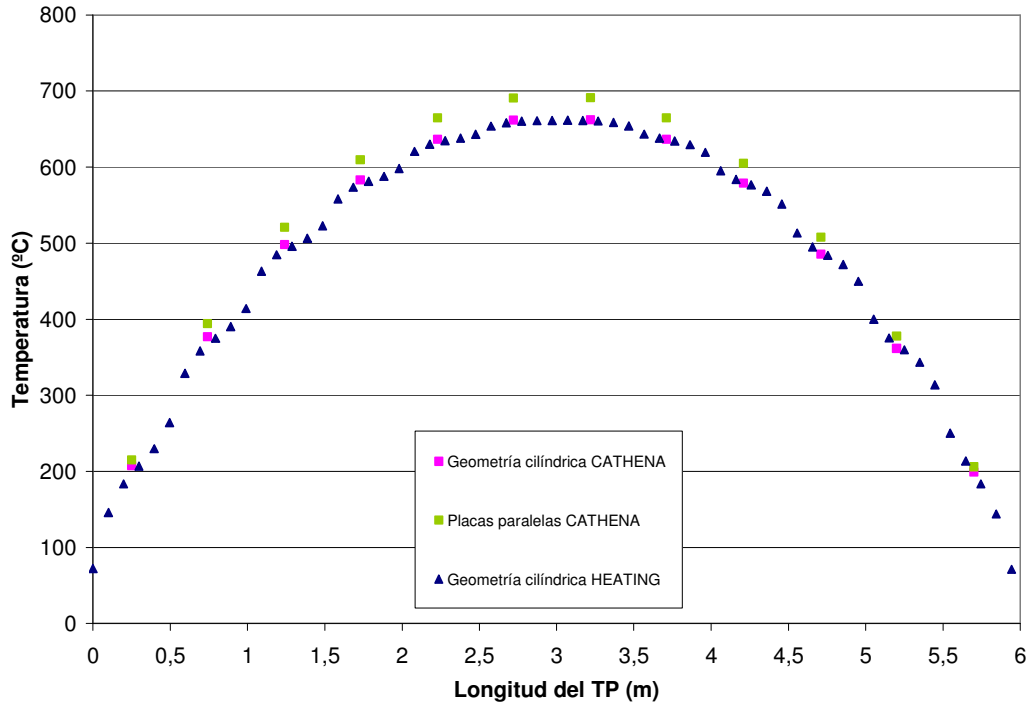
**Figura 9: Perfil axial de temperatura en el tubo de presión. Conductividad de los materiales constantes y variables con la temperatura.**



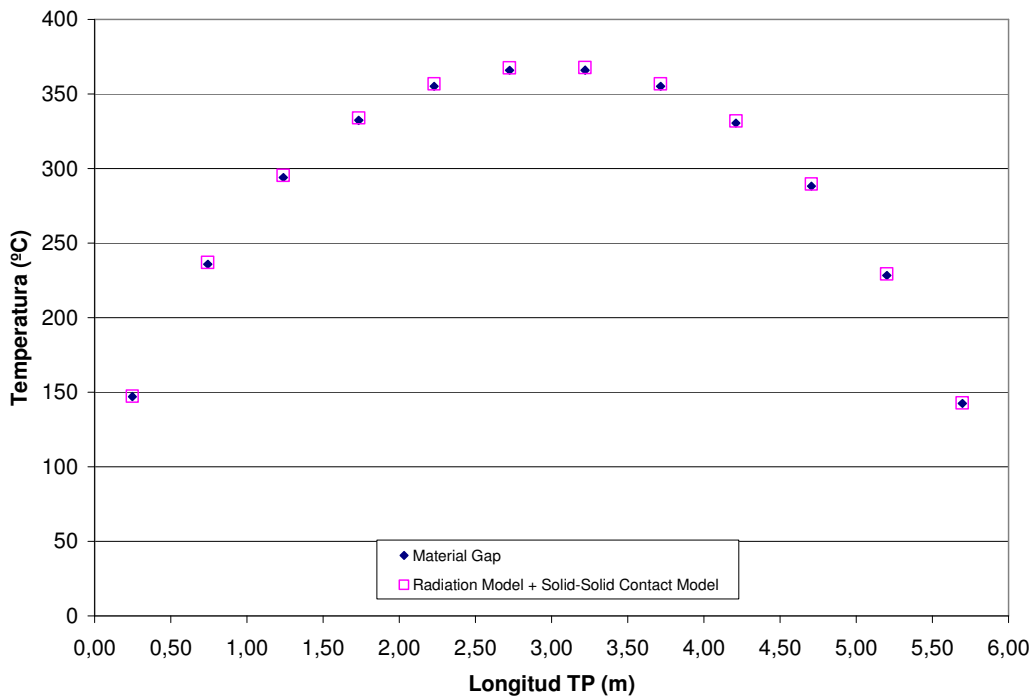
**Figura 10: HEATING. Perfil axial de temperatura en el tubo de presión para distintos valores del coeficiente de transferencia de calor hacia el moderador.**



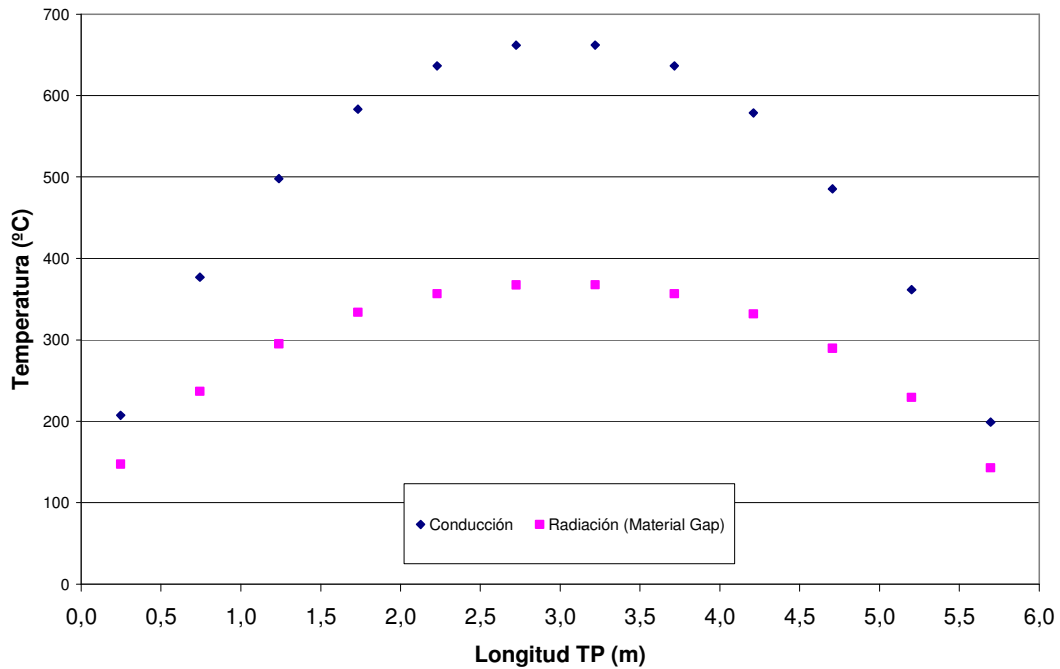
**Figura 11: Perfil axial de temperatura. Conducción. Comparación entre geometría cilíndrica y aproximación de placas paralelas para el espacio anular utilizando HEATING y CATHENA.**



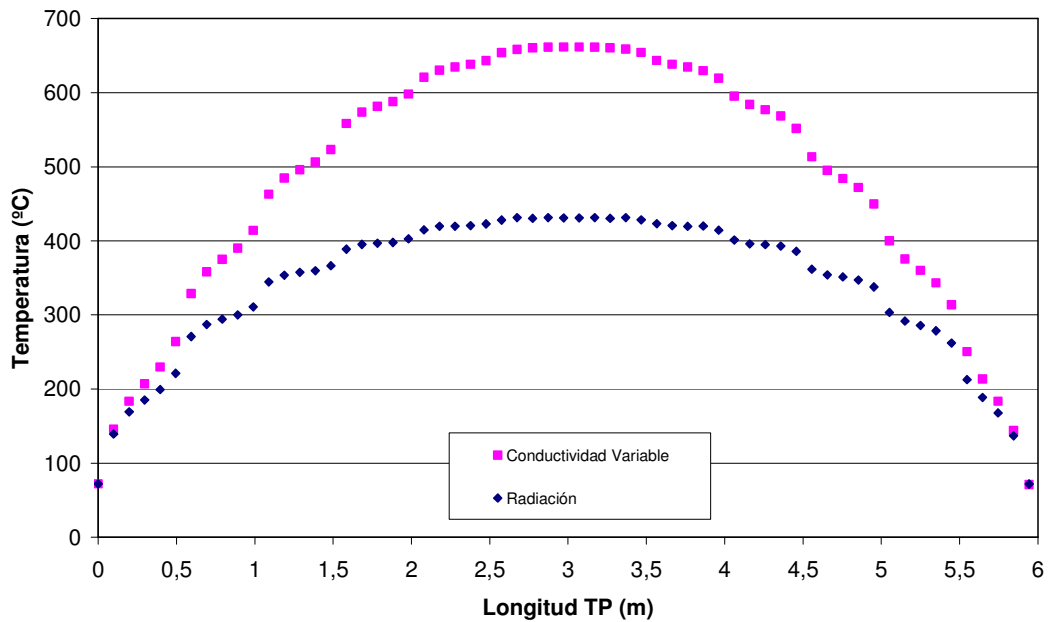
**Figura 12: CATHENA. Perfil axial de temperatura. Transferencia de calor por radiación y conducción. Dos modelos diferentes del espacio anular.**



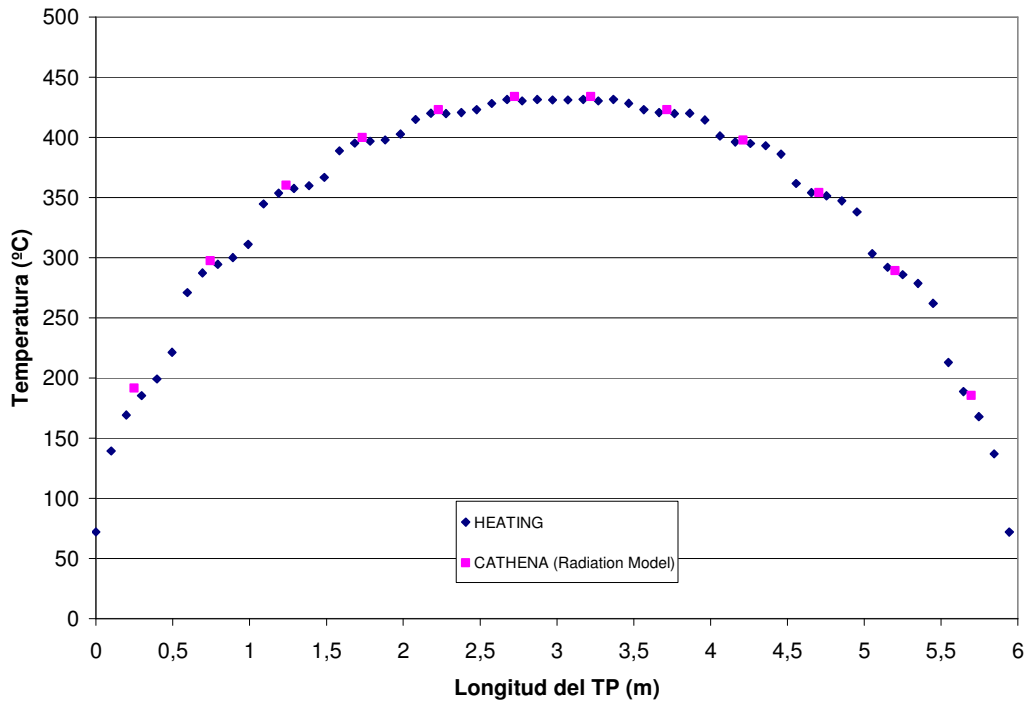
**Figura 13: CATHENA. Perfil axial de temperatura. Comparación entre conducción y material gap (conducción y radiación).**



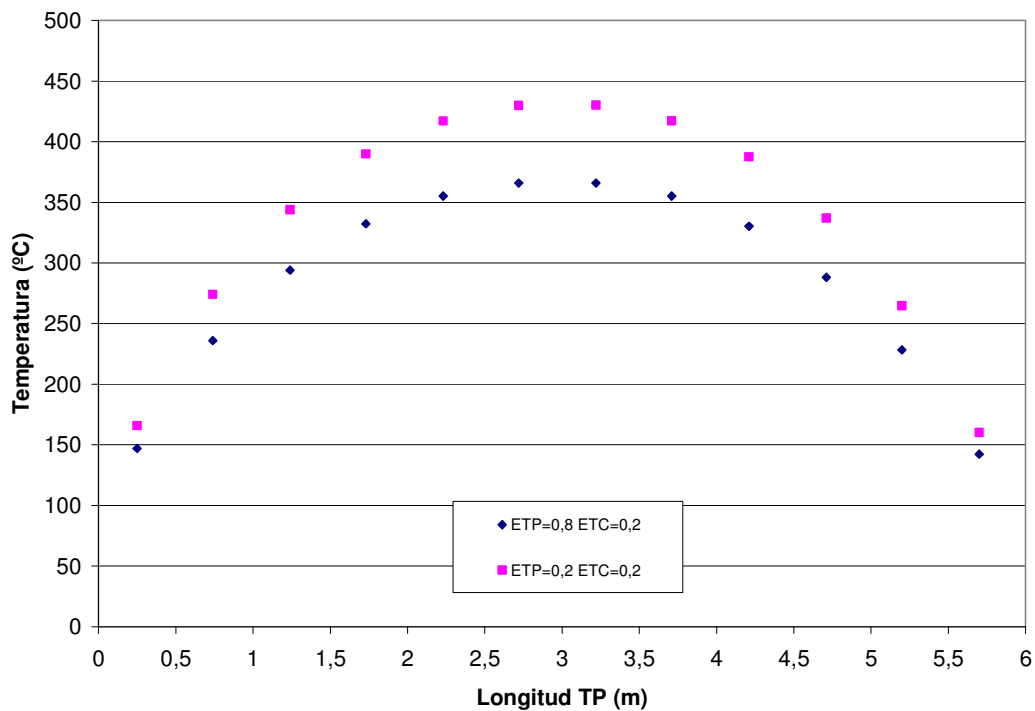
**Figura 14: HEATING. Perfil axial de temperatura. Comparación entre radiación y conducción.**



**Figura 15: Perfil axial de temperatura. Comparación del mecanismo de transferencia de calor por radiación en el espacio anular utilizando HEATING y CATHENA.**



**Figura 16: CATHENA. Perfil axial de temperatura considerando distintos valores de emisividad del tubo de presión.**



# ANEXOS

## ANEXO 1

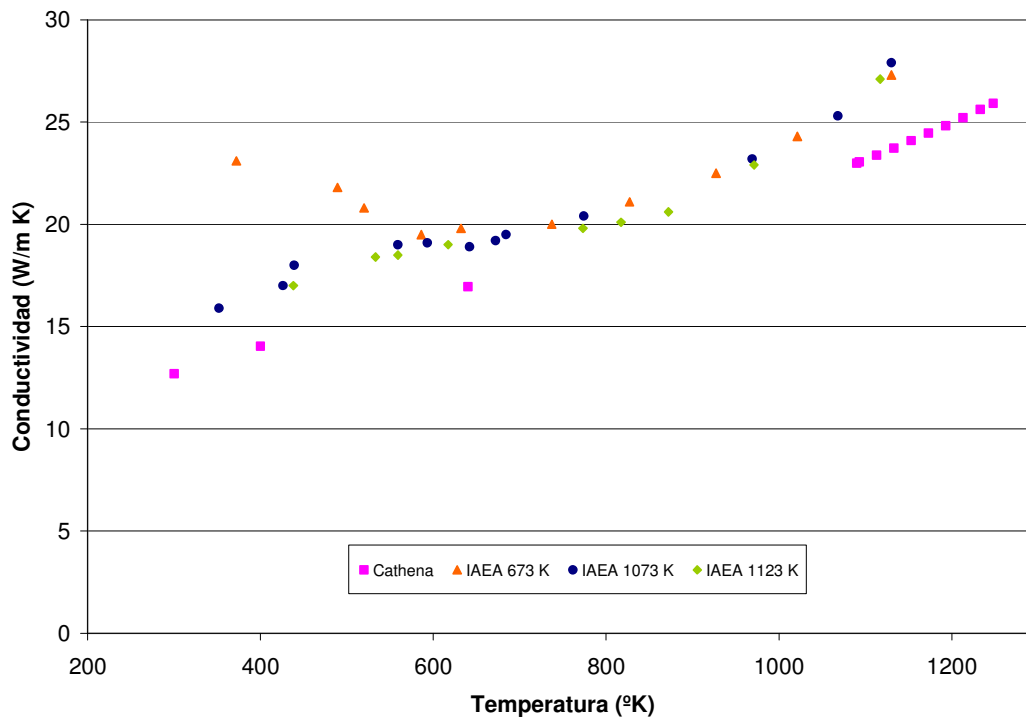
### ***Análisis de las propiedades del zircaloy utilizadas***

En todo el desarrollo de los cálculos se utilizó, tanto para el tubo de presión como para el de calandria, las propiedades del material que el programa CATHENA llama zircaloy. Sin embargo, el tubo de presión es de una aleación Zr-2,5Nb, y el tubo de calandria de otra Zircaloy-2 compuesta por circonio, estaño, hierro, cromo y níquel. Es por esto que ahora se comparan los valores de las propiedades de estas aleaciones con los utilizados en los cálculos para analizar si las diferencias son significativas.

#### Aleación Zr-2,5Nb

- Conductividad

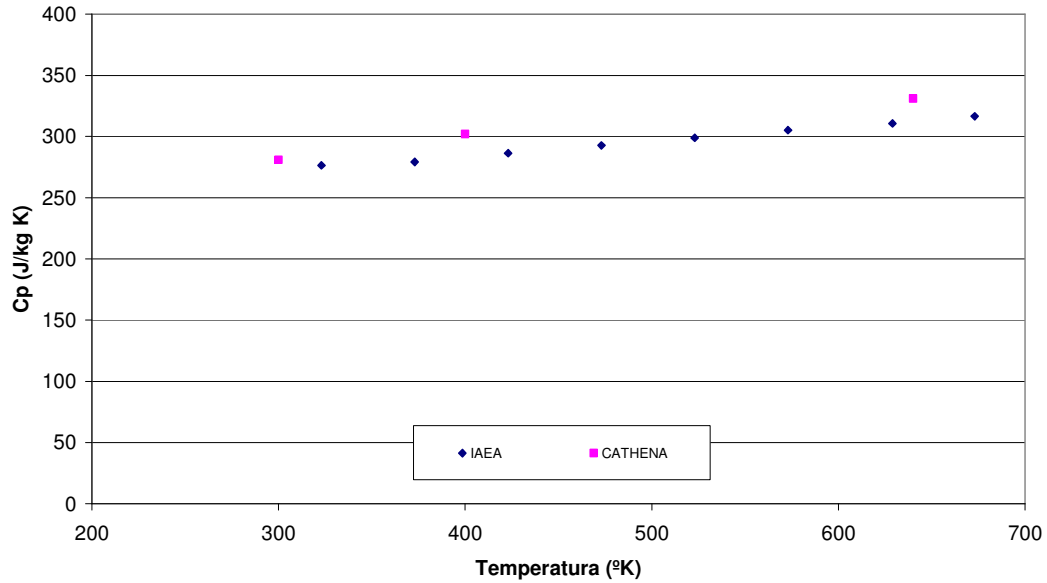
En este caso se comparan los valores utilizados con valores proporcionados por la OIEA (Organización Internacional de Energía Atómica) (Ref./2/) para diferentes temperaturas de recocido de esta aleación. Los resultados pueden verse en el siguiente gráfico:



En este caso, la conductividad utilizada es menor que la proporcionada por la OIEA. Al utilizar una conductividad menor las temperaturas resultarán sobreestimadas ya que una menor conductividad implica como resultado temperaturas más altas.

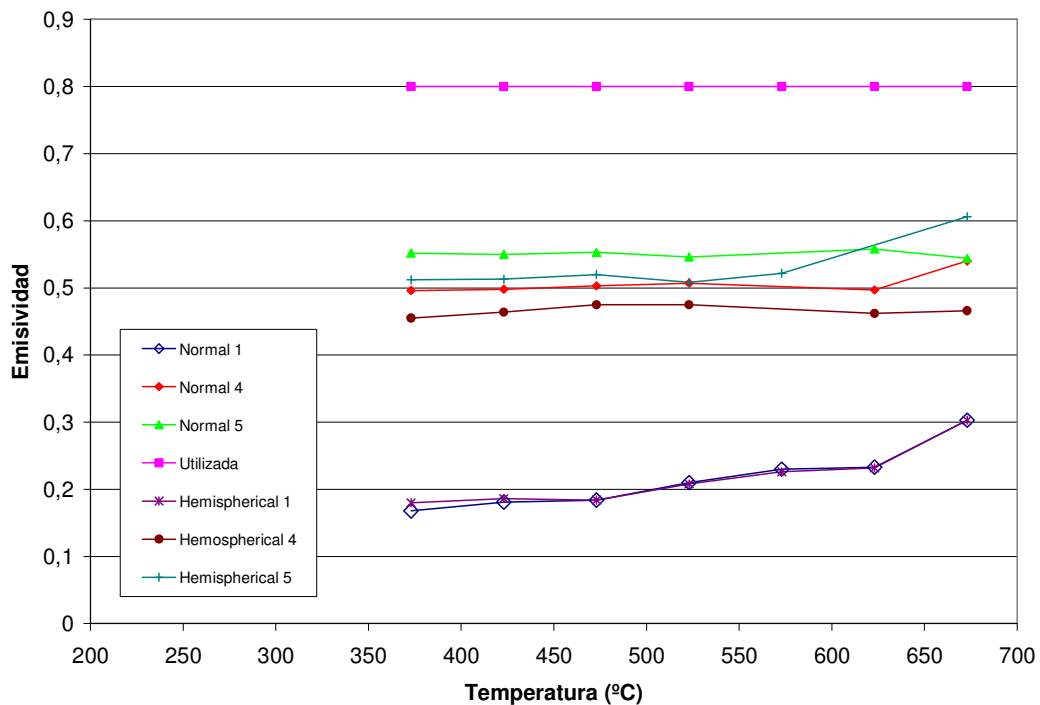
- Calor específico

Para esta propiedad también se comparan los datos usados con datos de la OIEA, resultando los mismos similares entre si.



- Emisividad

Se compara la emisividad constante que se usó (0,8) con valores de distintas muestras analizadas. Estos datos son de AECL (Atomic Energy of Canada, Ltd).



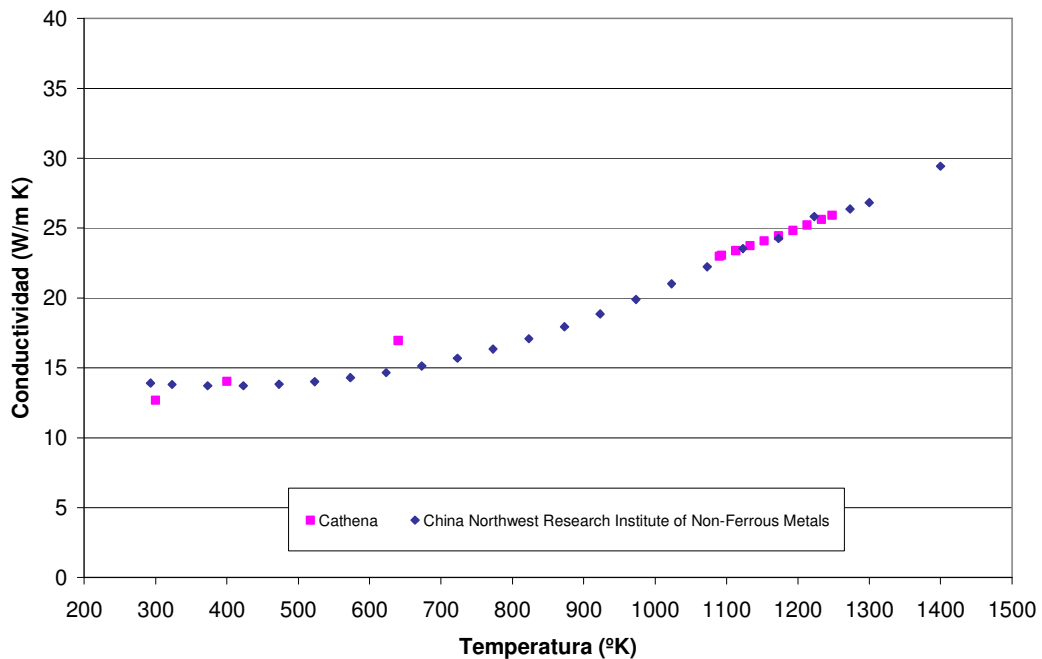
Condiciones metalúrgicas y espesor de óxido en las muestras:

- (1) Steel wool polished
- (4) Pickled + 2 hours steam at 673 K and 10,4 MPa. 0,46  $\mu\text{m}$ .
- (5) Pickled + 60 hours steam at 673 K and 10,4 MPa. 2,0  $\mu\text{m}$ .

### Aleación Zircaloy-2

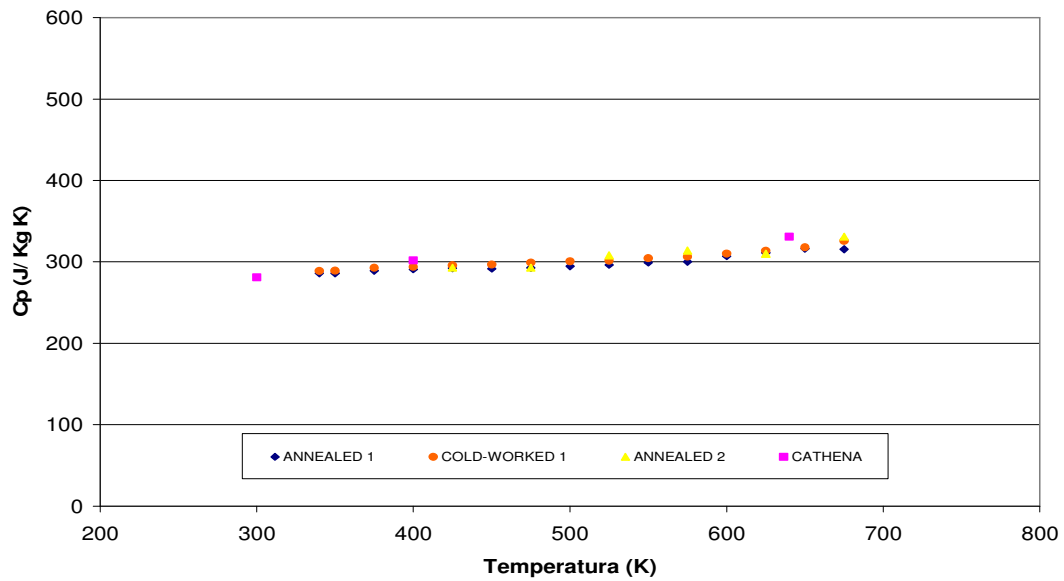
#### - Conductividad

Se comparan los valores utilizados con los calculados por el China Northwest Research Institute of Non-Ferrous Metals. Los valores son similares, por lo que utilizar uno u otros no modifica los valores de temperaturas hallados.



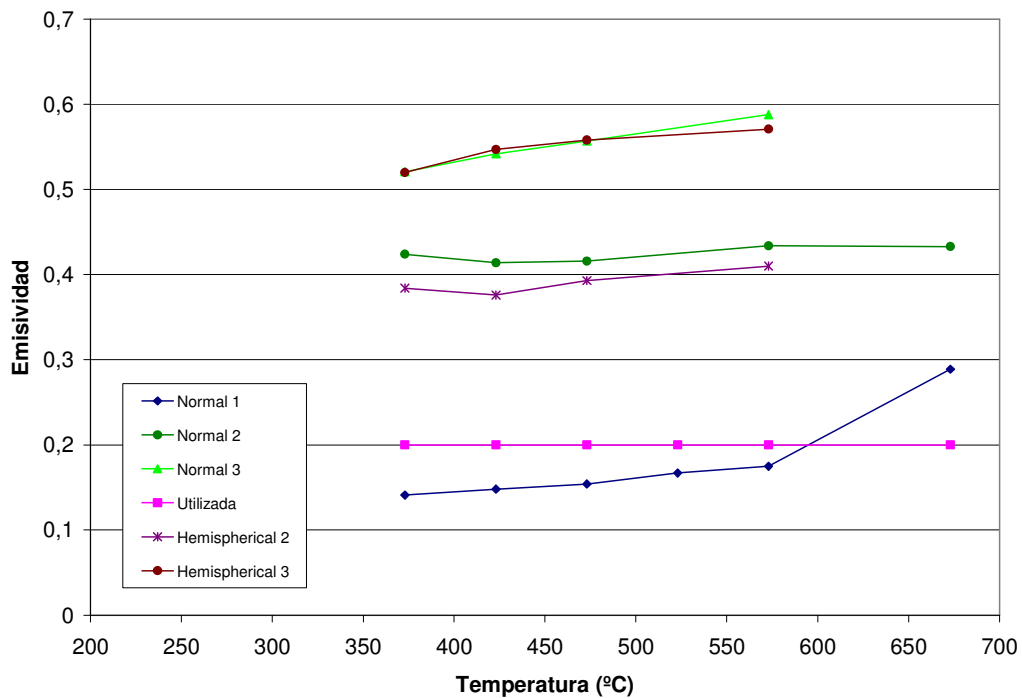
#### - Calor específico

Se comparan los valores utilizados con datos experimentales (AECL), resultando similares en el rango de trabajo.



- Emisividad

Se compara la emisividad constante que se uso (0,2) con valores de distintas muestras analizadas. Estos datos son de AECL.



Condiciones metalúrgicas y espesor de óxido en las muestras:

- (1) Pickled
- (2) Pickled + 2 days in air at 673 K , 0,9  $\mu\text{m}$
- (3) Pickled + 10 days in air at 673 K , 1,48  $\mu\text{m}$

## **ANEXO 2**

### ***Entrada de datos para el código CATHENA y memoria de cálculo sencilla.***

#### **Entrada de datos con propiedades constantes**

```
'CILINDRO'  
'CONTROL PARAMETERS'/  
'SOLUTION CONTROL'/  
0.0,10000.0,,0.01,0.001,0.1/  
'RESTART CONTROL'/  
, '1CONDESS1.RST' ,,1/  
'PRINT CONTROL'/  
,,1./  
'NUMERICS OPTION'/  
'END'/  
'COMPONENTS'/  
'END'/  
'CONNECTIONS'/  
'END'/  
'SYSTEM MODELS'/  
'END'/  
'SYSTEM CONTROL MODELS'/  
'OUTPUT', 'TWALL1'/  
6, '1-6.dat', '(1X,F13.6,6(2X,F13.4))', 1/  
    'TWALL:TUBE(1,6,1,1)'/  
    /  
    'TWALL:TUBE(2,6,1,1)'/  
    /  
    'TWALL:TUBE(3,6,1,1)'/  
    /  
    'TWALL:TUBE(4,6,1,1)'/  
    /  
    'TWALL:TUBE(5,6,1,1)'/  
    /  
    'TWALL:TUBE(6,6,1,1)'/  
    /  
  
'OUTPUT', 'TWALL2'/  
6, '7-12.dat', '(1X,F13.6,6(2X,F13.4))', 1/  
    'TWALL:TUBE(7,6,1,1)'/  
    /
```

```

'TWALL:TUBE(8,6,1,1)'/
/
'TWALL:TUBE(9,6,1,1)'/
/
'TWALL:TUBE(10,6,1,1)'/
/
'TWALL:TUBE(11,6,1,1)'/
/
'TWALL:TUBE(12,6,1,1)'/
/
'END'/
'HEAT TRANSFER PACKAGE'/
'MODEL:(TUBE)', 'RADIAL AND CIRCUMFERENTIAL CONDUCTION', 'HTC NO
SMOOTHING'/
'RADIAL:(4,0.0,5,0.051689,3,0.055855,3,0.065470,3,0.066840)',
'AXIAL:(5.9436,12)-EQUAL-SEGMENT', 'SECTOR:(9,9*2)', 'CYLINDER:(1,1)'/
'BOUNDARY CONDITIONS:(0,1)'/
'OUTSIDE PRESCRIBED:(MOD)', 'SURFACE OPTION:(1)'/
'SURF-HC,TF:(5.0E4,70.0)'/
'MPF:(0.0332,880.7)'/AIRE
'MPF:(15.9,1808987.7)'/ PRESSURE TUBE
'MPF:(0.06724,1571.03)'/CO2
'MPF:(15.9,1808987.7)'/ CALANDRIA TUBE
'HQ-NIL'/ AIRE
'HQ-SPACE:(3793,463076)'/ PRESSURE TUBE
,, 'A-USER: '/
0.01804693,0.05058807,0.08052833,0.10480982,0.12121161,0.12943992,0.12951565,0.1
2122727,0.10351198,0.07719757,0.04719334,0.01672951/
'HQ-NIL'/ CO2
'HQ-NIL'/ CALANDRIA TUBE
'TEMP-0D:(70.0)'/
'PRINT:(00337)'/

'END'/
'INITIAL CONDITIONS'/
'END'/

```

## **Memoria de cálculo**

**'Cilindro': Titulo**

**'CONTROL PARAMETERS'**

**'SOLUTION CONTROL'**

**(0.,10000.0,,0.01,0.001,0.1)**

0. : Tiempo de inicio de la simulación

10000.0 : Tiempo final de la simulación

,, : Número de pasos de tiempo hasta la finalización del problema (Default: ∞)

0.01 : Paso de tiempo al principio de la simulación

0.001: Paso de tiempo mínimo

0.01: Paso de tiempo máximo

**'RESTART CONTROL'**

**,'1CONDESS.RST',,1**

,, : Nombre del archivo de los datos de entrada

1CONDESS.RST: Nombre del archivo donde se escribe la salida para un restart

,, : Intervalo de tiempo en el cual los datos son escritos en el restart (Default: ∞)

1: Número de los pasos de tiempo entre la escritura de los datos del restart

**'PRINT CONTROL',,1.**

,, : Intervalo de tiempo entre las salidas escritas de los resultados de cálculos termohidraulicos (Default: ∞)

1.: : Intervalo de tiempo entre las salidas escritas de los resultados de los modelos y modelos de control.

**'NUMERICS OPTION'**

No se realizan entradas en esta sección

**'END'**

**'COMPONENTS'**

No se realizan entradas en esta sección

**'END'**

**'CONNECTIONS'**

No se realizan entradas en esta sección

**'END'**

**'SYSTEM MODELS'**

No se realizan entradas en esta sección

**'END'**

**'SYSTEM CONTROL MODELS'**

Se incluye en esta sección los pedidos de datos de temperatura en la pared del tubo de presión.

**'END'**

'HEAT TRANSFER PACKAGE'

'MODEL:(TUBE)', 'RADIAL AND CIRCUMFERENTIAL CONDUCTION', 'HTC NO SMOOTHING'/'

'RADIAL:(4,0.0,5,0.051689,3,0.055855,3,0.065470,3,0.066840)',

'AXIAL:(5.9436,12)-EQUAL-SEGMENT', 'SECTOR:(9,9\*2)', 'CYLINDER:(1,1)'/

'BOUNDARY CONDITIONS:(0,1)'/

'OUTSIDE PRESCRIBED:(MOD)', 'SURFACE OPTION:(1)'/

'SURF-HC,TF:(5.0E4,70.0)'/

'MPF:(0.0332,880.7)'/AIRE

'MPF:(15.9,1808987.7)'/ PRESSURE TUBE

'MPF:(0.06724,1571.03)'/CO2

'MPF:(15.9,1808987.7)'/ CALANDRIA TUBE

'HQ-NIL'/ AIRE

'HQ-SPACE:(3793,463076)'/ PRESSURE TUBE

., 'A-USER:.'/

0.01804693,0.05058807,0.08052833,0.10480982,0.12121161,0.12943992,0.12951565,0.12122727,0.10351198,0.07719757,0.04719334,0.01672951/

'HQ-NIL'/ CO2

'HQ-NIL'/ CALANDRIA TUBE

'TEMP-0D:(70.0)'/

'PRINT:(00337)'/

MODEL(TUBE):	TUBE	Nombre del modelo
RADIAL AND CIRCUMFERENTIAL CONDUCTION	Esquema de conducción de calor	Transfiere calor por conducción radial y azimutal
HTC NO SMOOTHING	Opción por defecto	
RADIAL	4	Cantidad de regiones
	0	Radio interno de la primera región
	5	Cantidad de nodos en la primera región
	0,051689	Radio externo de la primera región e interno de la segunda (Coincide con el radio interno del tubo de presión)
	3	Cantidad de nodos en la segunda región
	0,055855	Radio externo de la segunda región e interno de la tercera (Coincide con el radio externo del tubo de presión)
	3	Cantidad de nodos en la tercer región
	0,06547	Radio externo de la tercera región e interno de la cuarta (Coincide con el radio interno del tubo de calandria)
	3	Cantidad de nodos en la cuarta región
	0,06684	Radio externo de la cuarta región (Coincide con el radio externo del tubo de calandria)
AXIAL	5,9436	Longitud del tubo de presión
	12	Cantidad de nodos en la dirección axial
	EQUAL-SEGMENT	Modo en que se dividen los segmentos (de igual longitud en este caso)

SECTOR	9	Nueve sectores en la mitad del cilindro
	9*2	Indica simetría en la otra mitad del cilindro
CYLINDER	1	Número de grupos de cilindros en el que el modelo está dividido
	1	Número de cilindros en el primer grupo
BOUNDARY CONDITIONS	0	No hay condición de borde en la superficie interior del modelo
	1	Condición de borde en la superficie exterior del modelo
OUTSIDE PRESCRIBED SURFACE OPTION	MOD	Nombre de la condición
	1	Número de opción de superficie
SURF-HC,TF	50000	Valor del coeficiente de transferencia de calor
	70	Valor de temperatura
MPF	0,0332	Valor de la conductividad para el aire
	880,7	Producto de la densidad por el calor específico para el aire
MPF	15,9	Valor de la conductividad para el zircaloy
	1808987,7	Producto de la densidad por el calor específico para el zircaloy
MPF	0,06724	Valor de la conductividad para el CO <sub>2</sub>
	1571,03	Producto de la densidad por el calor específico para el CO <sub>2</sub>
HQ-NIL		Indica que no hay generación de calor en la primera región (aire)
HQ-SPACE		Indica que hay generación de calor en la segunda región (TP) dependiente de la longitud axial
	3793,463076	Valor de la generación total de calor para la región
	A-USER	Indica que el usuario define la distribución de potencia axial. Se indican la fracción de potencia generada en cada segmento axial
HQ-NIL		Indica que no hay generación de calor en la tercera región (CO <sub>2</sub> )
HQ-NIL		Indica que no hay generación de calor en la cuarta región (TC)
TEMP-0D	70	Temperatura inicial de todos los nodos del modelo
PRINT	0	No imprime temperaturas promediadas en volumen
	0	No imprime el modelo de temperaturas
	3	Imprime los coeficientes de transferencia de calor interno y externos
	3	Imprime los flujos de calor en las superficies interna y externa del modelo
	7	Imprime las temperaturas interna y externa luego de actualizarlas

**'INITIAL CONDITIONS'**

No se realizan entradas en esta sección

**'END'**

### ANEXO 3

#### Entrada de datos para el código HEATING y memoria de cálculo sencilla.

#### Entrada de datos con propiedades constantes

```
cil9
10 3
REGIONS
1 1 5.1689E-02 5.5855E-02 0 0 0.1 6.0436
0 1 0 0 0 0 0 0
2 2 0.0 5.1689E-02 0 0 0.1 6.0436
1 0 0 0 0 0 0 0
3 1 0.0 5.5855e-02 0 0 0.0 0.1
0 0 0 0 0 0 8 0
4 1 0.0 5.5855e-02 0 0 6.0436 6.1436
0 0 0 0 0 0 0 10
5 3 5.5855E-02 6.5470E-02 0 0 0.1 6.0436
0 0 0 0 0 0 0 0
6 1 6.5470E-02 6.6840e-02 0 0 0.1 6.0436
0 0 0 2 0 0 0 0
7 1 5.5855e-2 6.6840e-2 0 0 0.0 0.1
0 0 0 7 0 0 7 0
8 1 5.5855e-2 6.6840e-2 0 0 6.0436 6.1436
0 0 0 4 0 0 0 4
MATERIALS
1 zircaloy 15.9 6533 276.9
2 aire 0.0332 0.8694 1013
3 CO2 0.06724 1.8474 850.4
INITIAL TEMPERATURES
1 40 0 0 0
HEAT GENERATION
1 0 0 0 0 0 -1
BOUNDARY CONDITIONS
2 1 70
50000
7 2 70
0
8 2 64
0
4 2 70
0
10 2 64
0
XGRID
0.0 5.1689E-02 5.5855E-02 6.5470e-2 6.6840e-2
4 3 3 3
ZGRID
0.0 0.1 6.0436 6.1436
4 60 4
```

TABULAR FUNCTION

1

0.0 0.0, 0.0999 0.0, 0.1 97997.30156, 0.5953 97997.30156,  
 @0.5954 274700.1483,1.0906 274700.1483,1.0907 437279.8127,  
 @1.5859 437279.8127,1.586 569131.6299,2.0812 569131.6299,  
 @2.0813 658195.5933,2.5765 658195.5933,2.5766 702876.464,  
 @3.0718 702876.464, 3.0719 703287.6811, 3.5671 703287.6811,  
 @3.5672 658280.6727,4.0624 658280.6727, 4.0625 562084.2187,  
 @4.5577 562084.2187,4.5578 419193.3479,5.053 419193.3479,  
 @5.054 256266.2759, 5.5483 256266.2759,5.5484 90843.54109,  
 @6.0436 90843.54109, 6.0437 0.0, 6.1436 0.0

STEADY STATE

2

%

**Memoria de cálculo**

<b>PARAMETER CARD</b>		
Cpu time	10	
Tipo de geometría	3	Cilíndrica: r, z
Inicial time	---	Para estado estacionario, si queda vacío indica el comienzo del transitorio.
Unidades de temperatura	---	Solo se necesita si se propone radiación
<b>REGIONS</b>		
Región 1		
R1	1	Número de la región
	1	Nro. Material: Tubo de presión
	5,1689e-02	Radio interno
	5,5855e-02	Radio externo
	0	Longitud para $\theta_0$
	0	Longitud para $\theta_f$
	0,1	Longitud Para Z0
	6,0436	Longitud Para Zf
R2		
Número de identificación para Temperatura inicial de la región	0	
Número de identificación para el calor generado en la región	1	
Número de identificación para la Condición para Radio interno	0	No se establece ya que limita con la Región 2
Número de identificación para la Condición para radio externo	0	No se establece ya que limita con la Región 5
Número de identificación la Condición para $\theta_0$	0	
Número de identificación para la Condición para $\theta_f$	0	
Número de identificación para la Condición para Z0	0	No se establece ya que limita con la Región 3
Número de identificación para la Condición para Zf	0	No se establece ya que limita con la Región 4

Región 2		
R1	2	Número de la región
	2	Nro. Material: Aire
	0,0	Radio interno
	5,1689e-02	Radio externo
	0	Longitud para $\theta 0$
	0	Longitud para $\theta f$
	0,1	Longitud Para Z0
	6,0436	Longitud Para Zf
R2		
Número de identificación para Temperatura inicial de la región	1	
Número de identificación para el calor generado en la región	0	
Número de identificación para la Condición para Radio interno	0	No se establece ya que corresponde al eje del cilindro
Número de identificación para la Condición para radio externo	0	No se establece ya que limita con la Región 1
Número de identificación la Condición para $\theta 0$	0	
Número de identificación para la Condición para $\theta f$	0	
Número de identificación para la Condición para Z0	0	No se establece ya que limita con la Región 3
Número de identificación para la Condición para Zf	0	No se establece ya que limita con la Región 4
Región 3		
R1	3	Número de la región
	1	Nro. Material: tapa de zircaloy
	0,0	Radio interno
	5,5855e-02	Radio externo
	0	Longitud para $\theta 0$
	0	Longitud para $\theta f$
	0,0	Longitud Para Z:0
	0,1	Longitud Para Zf
R2		
Número de identificación para Temperatura inicial de la región	0	
Número de identificación para el calor generado en la región	0	
Número de identificación para la Condición para Radio interno	0	No se establece ya que corresponde al eje del cilindro
Número de identificación para la Condición para radio externo	0	No se establece ya que limita con la Región 7
Número de identificación la Condición para $\theta 0$	0	
Número de identificación para la Condición para $\theta f$	0	
Número de identificación para la Condición para Z0	8	
Número de identificación para la Condición para Zf	0	No se establece ya que limita con la Regiones 1 y 2
Región 4		
R1	4	Número de la región
	1	Nro. Material: tapa de zircaloy

	0,0	Radio interno
	5,5855e-02	Radio externo
	0	Longitud para $\theta 0$
	0	Longitud para $\theta f$
	6,0436	Longitud Para Z0
	6.1436	Longitud Para Zf
R2		
Número de identificación para Temperatura inicial de la región	0	
Número de identificación para el calor generado en la región	0	
Número de identificación para la Condición para Radio interno	0	No se establece ya que corresponde al eje del cilindro
Número de identificación para la Condición para radio externo	0	No se establece ya que limita con la Región 8
Número de identificación la Condición para $\theta 0$	0	
Número de identificación para la Condición para $\theta f$	0	
Número de identificación para la Condición para Z0	0	
Número de identificación para la Condición para Zf	10	No se establece ya que limita con la Regiones 1 y 2
Región 5		
R1	5	Número de la región
	3	Nro. Material: Gap CO <sub>2</sub>
	5.5855e-02	Radio interno
	6.5470e-02	Radio externo
	0	Longitud para $\theta 0$
	0	Longitud para $\theta f$
	0,1	Longitud Para Z0
	6,0436	Longitud Para Zf
R2		
Número de identificación para Temperatura inicial de la región	0	
Número de identificación para el calor generado en la región	0	
Número de identificación para la Condición para Radio interno	0	No se establece ya que limita con la Región 1
Número de identificación para la Condición para radio externo	0	No se establece ya que limita con la Región 6
Número de identificación la Condición para $\theta 0$	0	
Número de identificación para la Condición para $\theta f$	0	
Número de identificación para la Condición para Z0	0	No se establece ya que limita con la Región 7
Número de identificación para la Condición para Zf	0	No se establece ya que limita con la Región 8
Región 6		
R1	6	Número de la región
	1	Nro. Material: Tubo de calandria
	6.5470e-02	Radio interno
	6.6840e-02	Radio externo
	0	Longitud para $\theta 0$

	0	Longitud para $\theta f$
	0,1	Longitud Para Z0
	6,0436	Longitud Para Zf
R2		
Número de identificación para Temperatura inicial de la región	0	
Número de identificación para el calor generado en la región	0	
Número de identificación para la Condición para Radio interno	0	No se establece ya que limita con la Región 5
Número de identificación para la Condición para radio externo	2	
Número de identificación la Condición para $\theta 0$	0	
Número de identificación para la Condición para $\theta f$	0	
Número de identificación para la Condición para Z0	0	No se establece ya que limita con la Región 7
Número de identificación para la Condición para Zf	0	No se establece ya que limita con la Región 8
Región 7		
R1	7	Número de la región
	1	Nro. Material: tapa de zircaloy
	5,5855e-02	Radio interno
	6.6840e-02	Radio externo
	0	Longitud para $\theta 0$
	0	Longitud para $\theta f$
	0,0	Longitud Para Z0
	0,1	Longitud Para Zf
R2		
Número de identificación para Temperatura inicial de la región	0	
Número de identificación para el calor generado en la región	0	
Número de identificación para la Condición para Radio interno	0	No se establece ya que limita con la Región 3
Número de identificación para la Condición para radio externo	7	
Número de identificación la Condición para $\theta 0$	0	
Número de identificación para la Condición para $\theta f$	0	
Número de identificación para la Condición para Z0	7	
Número de identificación para la Condición para Zf	0	No se establece ya que limita con las Regiones 5 y 6
Región 8		
R1	8	Número de la región
	1	Nro. Material: Tapa de zircaloy
	5,5855e-02	Radio interno
	6,6840e-02	Radio externo
	0	Longitud para $\theta 0$
	0	Longitud para $\theta f$
	6,0436	Longitud Para Z0

	6,1436	Longitud Para Zf
R2		
Número de identificación para Temperatura inicial de la región	0	
Número de identificación para el calor generado en la región	0	
Número de identificación para la Condición para Radio interno	0	No se establece ya que limita con la Región 3
Número de identificación para la Condición para radio externo	4	
Número de identificación la Condición para $\theta 0$	0	
Número de identificación para la Condición para $\theta f$	0	
Número de identificación para la Condición para Z0	0	No se establece ya que limita con las Regiones 5 y 6
Número de identificación para la Condición para Zf	4	
<b>MATERIALS</b>		
M		
Número del material	1	
Nombre del material	zircaloy	
Conductividad	15,9	Constante W/m K
Densidad	6533	Constante kg/m <sup>3</sup>
Calor específico	276,9	Calor específico constante J/kg K
Conductividad vs T	-----	
Densidad vs T	-----	
Calor específico vs T	-----	
Indicador de cambio de fase	-----	
M		
Número del material	2	
Nombre del material	aire	
Conductividad	0,0332	Constante W/m K
Densidad	0,8694	Constante kg/m <sup>3</sup>
Calor específico	1013	Calor específico constante J/kg K
Conductividad vs T	-----	
Densidad vs T	-----	
Calor específico vs T	-----	
Indicador de cambio de fase	-----	
M		
Número del material	3	
Nombre del material	CO <sub>2</sub>	
Conductividad	0,06724	
Densidad	1,8474	
Calor específico	850,4	
Conductividad vs T	-----	
Densidad vs T	-----	
Calor específico vs T	-----	
Indicador de cambio de fase	-----	
<b>HEAT GENERATIONS</b>		
G	1	Número de identificación para el calor generado en la región
	0	Valor de la generación de calor W/m <sup>3</sup> : se ingresa cero y luego la tabla de la potencia en función de la posición
	0	La generación de potencia no depende

		del tiempo
	0	La generación de potencia no depende de la temperatura
	0	La generación de potencia no depende de la coordenada radial
	0	La generación de potencia no depende de la coordenada azimutal
	-1	La generación de potencia depende de la coordenada axial y se ingresa esta dependencia en la tabla con número de identificación 1.
<b>BOUNDARY CONDITIONS</b>		
Condición 1		
B1	2	Número de identificación para la Condición
	1	Tipo de condición (Surface to environment)
	70	Temperatura
B2	5. e04	Coefficiente de transferencia de calor por convección h al moderador. (W/m <sup>2</sup> °C)
Condición 2		
B1	7	Número de identificación para la Condición
	2	Tipo de condición de borde (2: prescribed surface temperature)
	70	Temperatura
B2	0	
Condición 3		
B1	8	Número de identificación para la Condición
	2	Tipo de condición de borde (2: prescribed surface temperature)
	64	Temperatura
B2	0	
Condición 4		
B1	4	Número de identificación la Condición para Zf
	2	Tipo de condición de borde (2: prescribed surface temperature)
	70	Temperatura
B2	0	
Condición 5		
B1	10	Número de identificación para la Condición
	2	Tipo de condición de borde (2: prescribed surface temperature)
	64	Temperatura
B2	0	
XGrid		
X1	0,0	Divisiones por región
	5,1689e-02	
	5,5855e-02	
	6,5470e-02	
	6,6840e-2	
X2	4	Cantidad de nodos por región
	3	
	3	

	3	
ZGrid		
Z1	0,0	Divisiones por región
	0,1	
	5,9436	
	6,0436	
Z2	4	Cantidad de nodos por región
	60	
	4	
<b>TABULAR FUNCTION</b>		
	1	Número de identificación de la tabla
	0.0 0.0, 0.0999 0.0, 0.1 97997.30156, 0.5953 97997.30156,....	Valores de la tabla: se ingresa primero la coordenada z y luego la potencia correspondiente (W/m <sup>3</sup> ).
<b>STEADY STATE</b>		
SS	2	Técnica de solución del estado estacionario (2:direct -solution)