

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS Y ENERGÍA

Titulación: **GRADO EN INGENIERÍA DE LA ENERGÍA**

Intensificación: **Tecnologías Energéticas**

PROYECTO FIN DE GRADO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA, ETSI INDUSTRIALES

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA TEMPERATURA DE COMBUSTIBLE
NUCLEAR A LOS PARÁMETROS FÍSICOS Y DEL MODELO EN UN ELEMENTO
PWR.

PEDRO TIRADO VEGA

SEPTIEMBRE 2017

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS Y ENERGÍA

Titulación: **GRADO EN INGENIERÍA DE LA ENERGÍA**

Intensificación: **Tecnologías Energéticas**

Análisis de sensibilidad de la temperatura de combustible nuclear a los parámetros físicos y del modelo en un elemento PWR.

Realizado por

Pedro Tirado Vega

Dirigido por

Diana Cuervo Gómez, Departamento de Ingeniería Energética, ETSI Industriales

Agradecimientos

Me gustaría agradecer este Proyecto de fin de grado a las distintas personas que me han ayudado y apoyado durante la realización del mismo.

En primer lugar, a mi tutora Diana Cuervo Gómez, quien me ofreció el proyecto, me gustaría agradecer su especial interés, disposición y, sobre todo, el tiempo empleado en ayudarme. También quisiera agradecer este trabajo a Adrián Sabater Alcaraz, presente también en el departamento de nuclear de ETSII, que me ha ayudado en numerables ocasiones.

En segundo lugar, quisiera dedicarle este trabajo a mi gran amigo Luis Filiberto García Hoyos, que ha sido mi compañero durante todos estos años de carrera y con quien he colaborado en este trabajo. También a Carmen Millá Pardo, la persona que más me ha apoyado en estos años de carrera y me ha amenizado este recorrido en todo momento.

Por último, pero no por ello menos importante, me gustaría dedicar este trabajo a mis padres, cuyo trabajo y compromiso han sido de vital importancia para seguir adelante, y a mi hermano, con quien he crecido y me ha ayudado a ser quien soy.

En honor a ellos, el siguiente trabajo.

Índice

Agradecimientos	I
Índice	III
Índice de figuras	VI
Índice de tablas	VII
Resumen	IX
Abstract.....	XI
DOCUMENTO 1: MEMORIA	I
Capítulo 1.	3
Justificación, objetivos y alcance. Estructura del trabajo.....	3
1.1 Justificación, objetivos y alcance.....	3
1.2 Antecedentes	3
1.3 Estructura del trabajo.....	4
Capítulo 2.	5
Reactores nucleares PWR.....	5
2.1 Diseño y funcionalidad.....	5
2.2 Núcleo.....	7
2.2.1 Varillas de combustible	8
2.2.2 Elementos de control	10
Capítulo 3.	11
Bases teóricas	11
3.1 Análisis termohidráulico de reactores	11
3.2 Código CTF.....	11
3.2.1 Ecuaciones de conservación generales	12
3.2.2 Ecuaciones de conservación expandidas	13
3.2.3 Archivo de entrada (Input) de COBRA-TF	16

3.3 Variables de seguridad.....	17
Capítulo 4.	20
Descripción de los casos a analizar	20
4.1 Distribución de potencia.....	20
4.2 Número de nodos radiales	23
4.3 Conductividad.....	24
4.4 Quemado del combustible	25
Capítulo 5.	27
Análisis de resultados	27
5.1 Número de nodos radiales	27
5.2 Conductividad.....	28
5.3 Quemado del combustible	30
5.3.1 Modified NFI model.....	30
5.3.2 Halden model.....	32
Capítulo 6.	34
Conclusiones.....	34
Capítulo 7.	36
Referencias	36
DOCUMENTO 2: ESTUDIO ECONÓMICO	0
Capítulo 8.	1
Estudio económico	1
8.1 Coste de los recursos humanos.....	1
8.2 Coste de los equipos	1
8.3 Coste del software	1
8.3 Coste total.....	2
DOCUMENTO 3: ANEXOS	0

ANEXO 1. TABLAS CONDUCTIVIDAD-CALOR ESPECÍFICO- TEMPERATURA.....	1
ANEXO 2. TABLAS CONDUCTIVIDAD-TEMPERATURA SEGÚN EL MODELO NFI.....	3
ANEXO 3. TABLAS CONDUCTIVIDAD-TEMPERATURA SEGÚN EL MODELO HALDEN.....	6

Índice de figuras

Figura 1. Esquema de una central nuclear PWR

Figura 2. Disposición de las varillas y de los elementos combustible

Figura 3. Formación de un elemento combustible

Figura 4. Sección detallada de una varilla de combustible

Figura 5. Perfil de temperaturas en una barra de combustible

Figura 6. Representación de la distribución axial de potencia del Caso 1

Figura 7. Representación gráfica de la distribución axial de potencia para el Caso 2

Figura 8. Gráficas conductividad-temperatura según: Stora, Nishijima, Daniel y Vogt

Figura 9. Representación de la temperatura del centro de combustible en cada nodo axial en el Caso 1 para diferente nodalización radial.

Figura 10. Representación de la temperatura del centro de combustible en cada nodo axial en el Caso 2 para diferente nodalización radial.

Figura 11. Representación de la temperatura del centro de combustible en cada nodo axial para el Caso 1 según las medidas de conductividad de: Stora, Daniel, Nishijima, Vogt y la tabla implementada en el código de COBRA

Figura 12. Representación de la temperatura del centro de combustible en cada nodo axial para el Caso 2 según las medidas de conductividad de: Stora, Daniel, Nishijima, Vogt y la tabla implementada en el código de COBRA

Figura 13. Representación de la conductividad-temperatura según el modelo NFI para diferentes grados de quemado

Figura 14. Representación de la temperatura del centro de combustible en cada nodo axial para el Caso 1 según el modelo NFI para diferentes grados de quemado

Figura 15. Representación de la temperatura del centro de combustible en cada nodo axial para el Caso 2 según el modelo NFI para diferentes grados de quemado

Figura 16. Representación de la conductividad-temperatura según el modelo NFI para diferentes grados de quemado

Figura 17. Representación de la temperatura del centro de combustible en cada nodo axial para el Caso 1 según el modelo Halden para diferentes grados de quemado

Figura 18. Representación de la temperatura del centro de combustible en cada nodo axial para el Caso 2 según el modelo Halden para diferentes grados de quemado

Índice de tablas

Tabla 1. Características físicas de los elementos combustible

Tabla 2. Características nucleares y radiactivas de los elementos combustible

Tabla 3. Número de tarjetas del input de COBRA e información que recogen

Tabla 4. Distribución de potencia en el Caso 1

Tabla 5. Distribución de potencia sin normalizar para el Caso 2

Tabla 6. Distribución de potencia normalizada para el Caso 2

ANEXOS

Tabla I. Medidas de temperatura, calor específico y conductividad según Stora

Tabla II. Medidas de temperatura, calor específico y conductividad según Nishijima

Tabla III. Medidas de temperatura, calor específico y conductividad según Daniel

Tabla IV. Medidas de temperatura, calor específico y conductividad según Vogt

Tabla V. Conductividad-Temperatura con un grado de quemado de 10 Mwd/Tu según el modelo NFI

Tabla VI. Conductividad-Temperatura con un grado de quemado de 20 Mwd/Tu según el modelo NFI

Tabla VII. Conductividad-Temperatura con un grado de quemado de 30 Mwd/Tu según el modelo NFI

Tabla VIII. Conductividad-Temperatura con un grado de quemado de 40 Mwd/Tu según el modelo NFI

Tabla IX. Conductividad-Temperatura con un grado de quemado de 50 Mwd/Tu según el modelo NFI

Tabla X. Conductividad-Temperatura con un grado de quemado de 10 Mwd/Tu según el modelo Halden

Tabla XI. Conductividad-Temperatura con un grado de quemado de 20 Mwd/Tu según el modelo Halden

Tabla XII. Conductividad-Temperatura con un grado de quemado de 30 Mwd/Tu según el modelo Halden

Tabla XIII. Conductividad-Temperatura con un grado de quemado de 40 Mwd/Tu según el modelo Halden

Tabla XIV. Conductividad-Temperatura con un grado de quemado de 50 Mwd/Tu según el modelo Halden

Resumen

El sector nuclear, su conocimiento y las tecnologías que le pertenecen están en continuo desarrollo, cada vez son más los intentos de realizar análisis y estudios más realistas. Esta necesidad hace de la ciencia nuclear un sector complejo, ya que pertenece, en parte, a la neutróica y a la física nuclear. La unión de ambas con la mecánica y la termohidráulica engloban el conjunto de ciencias dentro de un reactor nuclear.

Debido a la importancia que tiene la seguridad en una central nuclear, es fundamental controlar los distintos parámetros que intervienen en ella. La temperatura que alcanza el combustible nuclear en un reactor es uno de los parámetros críticos que necesitan estar limitados para una operación segura del reactor. La conductividad térmica afecta directamente a la temperatura de combustible y existen múltiples factores, como el grado de quemado, que la modifican.

En el presente Trabajo de Fin de Grado, se analizan los diferentes factores que pueden afectar a la variación de la temperatura del combustible mediante un código termohidráulico CTF para el análisis de reactores nucleares, y así poder obtener conclusiones de interés sobre el código y parámetros críticos de las partes de un elemento combustible, como la pastilla de combustible, la vaina y el refrigerante.

Abstract

The nuclear sector, its knowledge and the technologies that belong to it are in continuous development, more and more attempts are made to make more realistic analyzes and studies. This necessity makes nuclear science a complex sector, because it belongs, in part, to neutron and nuclear physics. The union of this with mechanic and thermohydraulic sciences encompasses the whole of science within a nuclear reactor.

Due to the importance of security in a nuclear power station, it is essential to control the different parameters involved in it. The temperature reaching the nuclear fuel in a reactor is one of the critical parameters that need to be limited for the safe operation of the reactor. Conductivity directly affects fuel temperature and there are many factors, such as the degree of burning, that modify it.

In the present TFG, we analyze the different factors that can affect the variation of the temperature of the fuel by means of a thermohydraulic code CTF for the analysis of nuclear reactors, and thus to be able to obtain conclusions of interest on the code and critical parameters of the parts of a fuel element, such as the fuel pellet, the clad and the coolant.

**ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA TEMPERATURA DE
COMBUSTIBLE NUCLEAR A LOS PARÁMETROS FÍSICOS Y
DEL MODELO EN UN ELEMENTO PWR.**

DOCUMENTO 1: MEMORIA

Capítulo 1.

Justificación, objetivos y alcance. Estructura del trabajo

1.1 Justificación, objetivos y alcance

El objetivo de este trabajo es utilizar un código termohidráulico CTF para realizar distintos análisis sobre la temperatura del combustible en el núcleo de un reactor de una central nuclear PWR. La temperatura de combustible, como muchas otras variables, juega un papel fundamental en la seguridad del reactor. Es dependiente de la conductividad de la pastilla, propiedad que, a su vez, depende de muchos otros parámetros como el quemado del combustible.

Mediante el código COBRA-TF, y con ayuda del programa SALOME, se modificarán distintas variables del reactor y se recogerán los resultados de la temperatura del combustible para su posterior estudio. También se observará cómo está diseñado el código COBRA: su sensibilidad frente a una distinta discretización y el tiempo de cálculo utilizado en cada caso.

1.2 Antecedentes

La tecnología está en una fase de continuo desarrollo, los ordenadores son cada vez más rápidos y los programas informáticos son cada vez más eficientes. Esto afecta a directamente a la ingeniería nuclear, que utiliza distintos códigos termohidráulicos para los análisis en el reactor y en la planta.

Debido a la gran importancia que tiene la seguridad en el sector nuclear, es importante seguir desarrollando y mejorando los códigos termohidráulicos de análisis de reactores nucleares. Es el caso de COBRA-TF, que empezó siendo un código termohidráulico para el análisis de un haz de barras y, con el paso de los años, ha conseguido realizar análisis muy cercanos a la realidad, gracias al uso de una aproximación de subcanales para modelizar un de flujo bifásico con la consideración de tres campos de fluido independientes: líquido, vapor y gotas dispersas.

1.3 Estructura del trabajo

El presente trabajo que se presenta a continuación se divide en tres documentos: el documento 1, al que pertenece este apartado y contiene la memoria principal del trabajo, el documento 2, donde se muestra un estudio económico del proyecto y el documento 3, donde se incluyen los anexos.

El primer y presente capítulo expone el objetivo del trabajo y su estructura principal, seguido de un capítulo que explica los conocimientos básicos de una central nuclear PWR. En el capítulo 3 se recogen las bases teóricas y el código utilizado para el programa. Estos capítulos corresponden a la parte introductoria del trabajo.

El análisis realizado con el código COBRA-TF se divide en dos partes: un capítulo de descripción de los casos a analizar y el objetivo a conseguir, y otro capítulo de análisis de los resultados obtenidos.

Finalmente, el documento termina con un capítulo de conclusiones generales y otro de referencias

Capítulo 2.

Reactores nucleares PWR

El reactor nuclear PWR (Pressurized Water Reactor), es un tipo de reactor nuclear caracterizado por utilizar agua ligera a alta presión como refrigerante y como moderador. Emplea dióxido de uranio (UO₂) enriquecido (2-4 % de U²³⁵) como combustible.

Según los datos publicados por la IAEA en *Nuclear Power Reactors in the World* (2017), los reactores de agua a presión constituyen el 65 % del número de reactores nucleares que existen mundialmente (289 de 448 totales).

2.1 Diseño y funcionalidad

En este apartado se exponen las características de diseño y funcionalidades básicas de este tipo de reactores, así como una descripción detallada del núcleo y los elementos combustible que lo componen.

En la siguiente figura se muestra el esquema de una planta que utiliza un reactor de agua a presión (PWR) para la generación de energía.

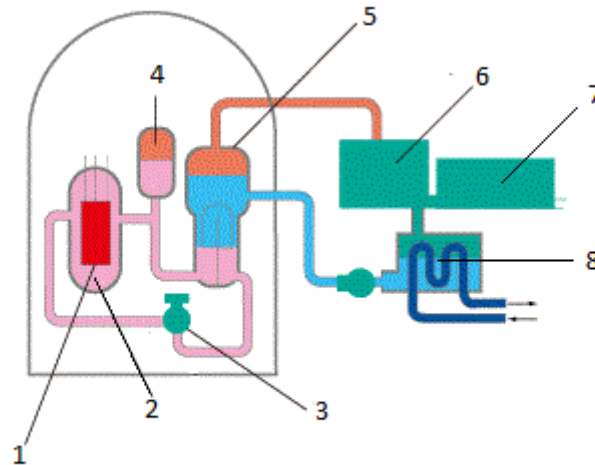


Figura 19. Esquema de una central nuclear PWR

El combustible nuclear (1) se calienta y transmite el calor al refrigerante (2) a través de las paredes de las vainas. El refrigerante circula a través del reactor mediante el impulso de una o dos bombas de alta presión (3). El elemento que distingue este tipo de reactores nucleares es el presurizador (4), un dispositivo cilíndrico vertical que se encarga de limitar los cambios de presión transitorios y mantener la presión adecuada dentro de los márgenes de operación, evitando así la ebullición del refrigerante. El agua ingresa a los generadores de vapor (5) donde es refrigerada y, al salir, repite el ciclo. Estos elementos componen el circuito primario del reactor.

El circuito primario enlaza con el circuito secundario a través del generador de vapor (5), un intercambiador de calor de carcasa y tubos que permite la transmisión de calor entre ambos circuitos. La transmisión de calor se lleva a cabo sin que ambos líquidos se mezclen, de esta manera se evita el contacto del agua contaminada con el circuito secundario.

El agua del circuito secundario, al pasar por el generador de vapor, se convierte en vapor saturado y se dirige por los tubos hasta la turbina (6), donde se expande, haciéndola girar. La energía mecánica de la turbina se convierte en electricidad mediante el generador eléctrico (7). El vapor se enfría en el condensador (8) donde se tiene nuevamente agua líquida que se bombea para repetir el proceso.

Esta condensación se realiza gracias a un circuito externo terciario que utiliza un gran caudal de agua (mar, río o torres de refrigeración).

2.2 Núcleo

El núcleo del reactor se encarga de iniciar, mantener y controlar las reacciones de fisión en cadena. Está formado por el ensamblado de 157 elementos combustible, unidades que contienen el grupo de vainas del combustible.

Cada elemento combustible está formado por una disposición cuadrangular de 17x17 varillas, de las cuales 264 son varillas de combustible, 24 son tubos guía y 1 tubo de instrumentación.

En la siguiente figura se muestra la disposición de los elementos combustible, así como la disposición de las varillas en el elemento:

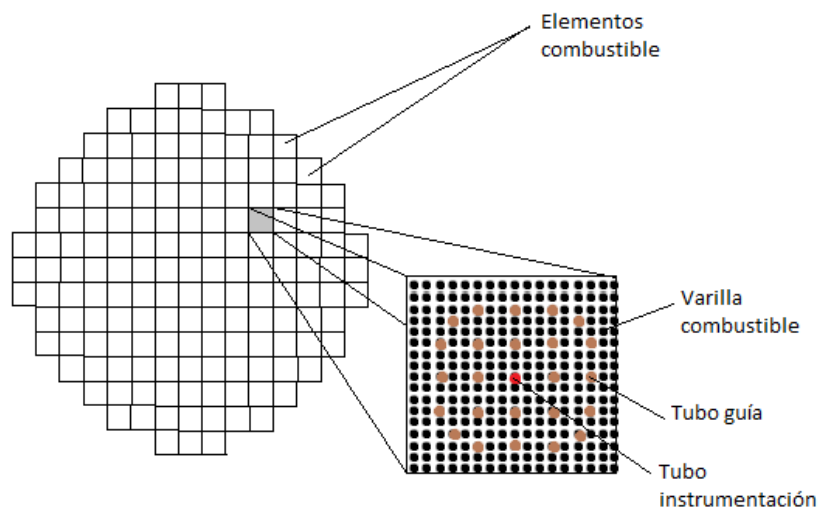


Figura 20. Disposición de las varillas y de los elementos combustible

Los elementos de combustible también disponen de dos cabezales, uno superior y otro inferior, rejillas para sujetar las varillas y mantenerlas espaciadas unas de otras, y aletas mezcladoras de caudal.

En la siguiente tabla se muestran las características físicas de los elementos de combustible:

Longitud total (mm)	4059
Longitud barras de combustible (mm)	3851
Número de barras combustible	264
Número de tubos guía	25
Disposición de las barras	17x17
Sección transversal (mm ²)	214x214
Peso total (Kg)	668.6
Zircaloy-4 (Kg)	129.7
Acero inoxidable-304 (Kg)	10
Inconel-718 (Kg)	5.5
Número de elementos combustible	157

Tabla 7. Características físicas de los elementos combustible

A continuación, se recogen las características nucleares y radiactivas de los elementos de combustible:

Óxido de Uranio inicial (Kg)	523.5
Uranio inicial (Kg)	461.5
U-234 (%)	0.025
U-235 (%)	3.275
U-238 (%)	96.7
Grado de quemado (Mwd/tU)	33000

Tabla 8. Características nucleares y radiactivas de los elementos combustible

2.2.1 Varillas de combustible

El uranio natural se compone de tres isótopos, siendo el más abundante el U^{238} . Para aprovechar la energía de la fisión nuclear, el uranio se enriquece con U^{235} (3,5 %) mediante varias técnicas, como la difusión a través de membranas porosas y la centrifugación.

Después de una serie de procesos, se obtiene un polvo de dióxido de uranio que es prensado, granulado y sinterizado a la densidad deseada (alrededor del 95 %), formando pequeñas pastillas (conocidas como “pellets”) de entre 8 y 10 mm de diámetro y entre 10 y 14 mm de longitud. Las pastillas, con una densidad y propiedades físicas aptas, se introducen en las barras de zircaloy, una aleación de zirconio avanzada, presurizadas internamente con un gas inerte (Helio). Esta barra llena de pastillas de uranio es taponada y sellada herméticamente para encapsular el combustible y formar una varilla de combustible.

Las siguientes figuras representan la formación de un elemento combustible y la sección detallada de una varilla de combustible:

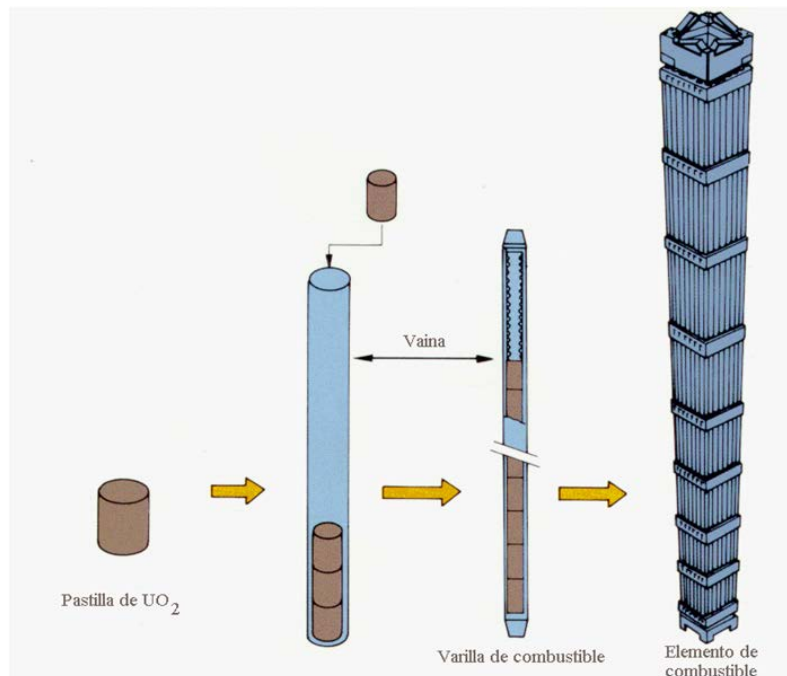


Figura 21. Formación de un elemento combustible

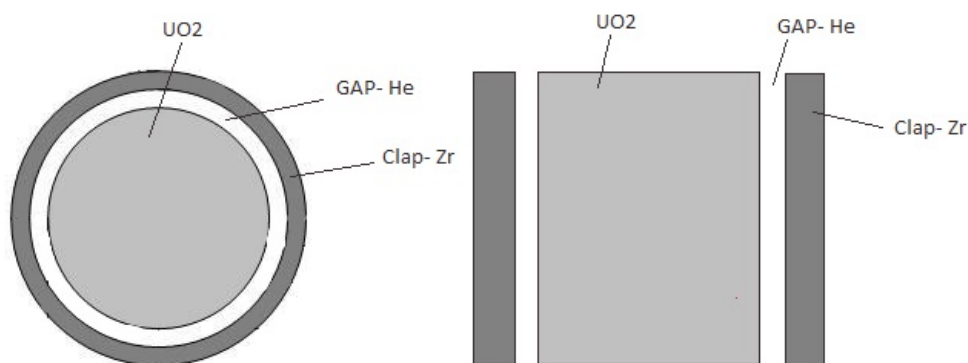


Figura 22. Sección detallada de una varilla de combustible

En la fisión del átomo de uranio aparecen metales, gases a alta presión, cesio y elementos volátiles que producen un hinchamiento del combustible. Este efecto produce fallos en los elementos combustibles.

Es por ello por lo que se deja un hueco (gap) entre la vaina y el combustible y se fabrican éstos con una densidad del 94-96 % de su densidad teórica. De este modo los gases pueden escapar de la matriz y puede producirse hinchamiento del combustible sin que alcance y rompa la vaina.

Las pastillas de combustible son cóncavas en los extremos, lo que permite una mayor expansión axial y la formación de un pequeño “hueco” entre cada pastilla donde se almacenen productos y gases de fisión.

2.2.2 Elementos de control

Las barras de control constituyen uno de los principales métodos de control de la reactividad. Son tubos cilíndricos, hechos de un material absorbente de neutrones (como carburo de boro, o aleaciones de cadmio y plata) que se insertan desde la parte superior de la vasija y proporcionan una respuesta rápida de cambio de potencia, o parada del reactor en caso de emergencia.

Capítulo 3.

Bases teóricas

3.1 Análisis termohidráulico de reactores

La termohidráulica es uno de los campos más importantes de la ingeniería nuclear. Los códigos que utilizan la termohidráulica son una herramienta muy extendida en esta industria, ya que permiten realizar análisis completos en distintas situaciones de operación, además de estudiar su seguridad. Existen múltiples tipos de código: códigos de planta, de núcleo, de accidente, etc.

Los códigos termohidráulicos de núcleo están diseñados para analizar en detalle las variables de un elemento combustible y los distintos fenómenos que ocurren a ese nivel. Dada su importancia, este tipo de códigos han sido mejorados con el paso del tiempo hasta el punto en el que se dan situaciones muy cercanas a la realidad. Se encargan principalmente de hacer un seguimiento a la neutrónica del núcleo para poder calcular los distintos parámetros de importancia en el reactor.

En el presente trabajo se utiliza un código CTF (Computational Fluid Dynamics), llamado COBRA. Los códigos CTF incluyen modelos muy detallados para fluidos multifásico y multicomponente y permiten analizar con precisión la fenomenología termohidráulica.

3.2 Código CTF

El código termohidráulico COBRA (Coolant Boiling in Rod Arrays) es una herramienta computacional que sirve para evaluar el comportamiento de las centrales nucleares. El código se empezó a desarrollar en 1980 por el *Pacific Northwest Laboratory* bajo el patrocinio de la *National Regulatory Commission (NRC)*.

COBRA empezó siendo un código termohidráulico para analizar un haz de barras, pero con el paso de los años, se ha ido expandiendo y desarrollando. Utiliza una

aproximación de subcanales para modelizar un de flujo bifásico (fase líquida y fase gaseosa) con la consideración de tres campos de fluido independientes: líquido, vapor y gotas dispersas.

Las tres ecuaciones que se utilizan para modelar independientemente estos tres campos son las ecuaciones de conservación de la masa, el momento y la energía. Cada uno se modela con sus propias ecuaciones de conservación, a excepción del campo líquido y gotas dispersas que, al asumirse que están en equilibrio térmico, comparten la ecuación de conservación de la energía.

3.2.1 Ecuaciones de conservación generales

En este apartado se muestran las ecuaciones de conservación de la masa, momento y energía generales en las que se basa COBRA-TF.

La ecuación de conservación de la masa tiene la siguiente expresión:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_k \rho_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \vec{V}_k) = L_k + M_e^T$$

Donde:

El subíndice k denota el campo en consideración (siendo v para el vapor, l para el líquido y e para las gotas dispersas). El primer término refiere a la variación de la masa con respecto al tiempo y el segundo término es el desplazamiento de la masa a través del volumen. El término L_k representa la transferencia de masa durante un cambio de fase (evaporación-condensación, o entrada/salida de la fase de dispersión de gotas), y el término M_e^T es la transferencia de masa debido a la mezcla turbulenta y con huecos. Este último término no entra en las ecuaciones de COBRA-TF, sino que se asume un modelo simple para calcular la transferencia turbulenta del momento axial a través de las brechas de los subcanales.

La ecuación de la conservación del momento tiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_k \rho_k \vec{V}_k) + \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_k \rho_k u_k \vec{V}_k) + \frac{\partial}{\partial y} (\alpha_k \rho_k v_k \vec{V}_k) + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha_k \rho_k w_k \vec{V}_k) \\ & = \alpha_k \rho_k \vec{g} - \alpha_k \nabla P + \nabla \cdot [\alpha_k (\boldsymbol{\tau}_k^{ij} + \mathbf{T}_k^{ij})] + \vec{M}_k^L + \vec{M}_k^d + \vec{M}_k^T \end{aligned}$$

Donde:

Los cuatro términos de la parte izquierda corresponden a la variación del momento con respecto al tiempo y con un desplazamiento dentro de las coordenadas cartesianas (se multiplican por V_k , un vector con componentes i, j, k). Los términos de la parte derecha son, en orden: la fuerza gravitacional, la presión, los esfuerzos viscosos y turbulentos, transferencia del momento debido al cambio de fase, fuerza de arrastre y transferencia del momento debido a la mezcla turbulenta. Como en la ecuación de conservación de la masa, CTF no incluye el término del esfuerzo por la turbulencia, y utiliza una aproximación simple de difusión turbulenta.

La tercera ecuación corresponde a la conservación de la energía, cuya expresión es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_k \rho_k h_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k h_k \vec{V}_k) = - \nabla \cdot [\alpha_k (\vec{Q}_k + \vec{q}_k^T)] + \Gamma_k h_k^i + q_{wk}''' + \alpha_k \frac{\partial P}{\partial t}$$

Donde:

Los términos de la izquierda refieren a la variación de la energía con respecto al tiempo y al desplazamiento de ésta a través del volumen definido por la celda. El primer término de la derecha corresponde a la conducción en la fase en la que se encuentre y el flujo de calor por la turbulencia. El segundo término corresponde a la energía transferida durante un cambio de fase, el tercero a la transferencia de calor de la pared y el último al trabajo por presión.

3.2.2 Ecuaciones de conservación expandidas

Como se ha mencionado anteriormente, en CTF algunos términos se aproximan, debido a la complejidad que supondría la computación de los mismos, y cada campo (líquido, vapor o gotas de dispersión) tiene su propia ecuación de conservación.

La ecuación expandida de conservación de la masa para el vapor es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_v \rho_v) + \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_v \rho_v u_v) + \frac{\partial}{\partial y} (\alpha_v \rho_v v_v) + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha_v \rho_v w_v) = \Gamma_v''' + M_v^{T''''}$$

Para el líquido:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_l \rho_l) + \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_l \rho_l u_l) + \frac{\partial}{\partial y} (\alpha_l \rho_l v_l) + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha_l \rho_l w_l) = -\Gamma'''(1 - \eta) - S''' + M_l^{T''''}$$

Y para la dispersión de gotas:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_e \rho_l) + \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_e \rho_l u_e) + \frac{\partial}{\partial y} (\alpha_e \rho_l v_e) + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha_e \rho_l w_e) = -\Gamma''' \eta + S''' + M_e^{T''''}$$

Se puede apreciar que el término de la ecuación general de conservación de la masa L_k se ha dividido en dos componentes: Γ''' y η , para diferenciar si la evaporación proviene del líquido o de la dispersión de gotas. Además, elimina el término de transferencia de masa debido a la mezcla turbulenta.

En cuanto a las ecuaciones del momento, cabe añadir que cada campo se puede mover en tres direcciones según las coordenadas cartesianas, por lo que hay tres ecuaciones (direcciones x , y , z) para cada campo.

Las ecuaciones de conservación del momento para el vapor son las siguientes:

Para la dirección x :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_v \rho_v u_v) + \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_v \rho_v u_v u_v) + \frac{\partial}{\partial y} (\alpha_v \rho_v u_v v_v) + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha_v \rho_v u_v w_v) \\ & = -\alpha_v \frac{\partial P}{\partial x} - \alpha_v \rho_v g - \tau_{wx,v}''' - \tau_{ix,v1}''' - \tau_{ix,v0}''' + \Gamma''' u + \sum_{k=1}^{nk} (M_v^T)'''_k \end{aligned}$$

Para la dirección y : el término del esfuerzo por la turbulencia

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_v \rho_v v_v) + \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_v \rho_v v_v u_v) + \frac{\partial}{\partial y} (\alpha_v \rho_v v_v v_v) + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha_v \rho_v v_v w_v) \\ & = -\alpha_v \frac{\partial P}{\partial y} - \tau_{wy,v}''' - \tau_{iy,v1}''' - \tau_{iy,v0}''' + \Gamma''' v \end{aligned}$$

Para la dirección z :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_v \rho_v w_v) + \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_v \rho_v w_v u_v) + \frac{\partial}{\partial y} (\alpha_v \rho_v w_v v_v) + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha_v \rho_v w_v w_v) \\ & = -\alpha_v \frac{\partial P}{\partial z} - \tau_{wz,v}''' - \tau_{iz,v1}''' - \tau_{iz,v0}''' + \Gamma''' w \end{aligned}$$

Se observa que la diferencia entre las tres ecuaciones expandidas anteriores y la ecuación general reside en el esfuerzo por la viscosidad y la turbulencia. Éste último no se incluye, y el esfuerzo por la viscosidad se divide para diferenciar los esfuerzos con la pared y los esfuerzos internos.

Las ecuaciones de conservación del momento para el líquido son las siguientes:

Para la dirección x :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_l \rho_l u_l) + \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_l \rho_l u_l u_l) + \frac{\partial}{\partial y} (\alpha_l \rho_l u_l v_l) + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha_l \rho_l u_l w_l) \\ & = -\alpha_l \frac{\partial P}{\partial x} - \alpha_l \rho_l g - \tau_{wx,l}''' + \tau_{ix,vl}''' - \Gamma'''(1-\eta)u + \sum_{k=1}^{nk} (M_l^T)_k''' \end{aligned}$$

Para la dirección y :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_l \rho_l v_l) + \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_l \rho_l v_l u_l) + \frac{\partial}{\partial y} (\alpha_l \rho_l v_l v_l) + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha_l \rho_l v_l w_l) \\ & = -\alpha_l \frac{\partial P}{\partial y} - \tau_{wy,l}''' + \tau_{iy,vl}''' - \Gamma'''(1-\eta)v \end{aligned}$$

Y para la dirección z :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_l \rho_l w_l) + \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_l \rho_l w_l u_l) + \frac{\partial}{\partial y} (\alpha_l \rho_l w_l v_l) + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha_l \rho_l w_l w_l) \\ & = -\alpha_l \frac{\partial P}{\partial z} - \tau_{wz,l}''' + \tau_{iz,vl}''' - \Gamma'''(1-\eta)w \end{aligned}$$

Y las últimas tres ecuaciones del momento para la dispersión de gotas son:

Para la dirección x :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_e \rho_l u_e) + \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_e \rho_l u_e u_e) + \frac{\partial}{\partial y} (\alpha_e \rho_l u_e v_e) + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha_e \rho_l u_e w_e) \\ & = -\alpha_e \frac{\partial P}{\partial x} - \alpha_e \rho_l g - \tau_{wx,e}''' + \tau_{ix,vo}''' - \Gamma''' \eta u + \sum_{k=1}^{nk} (M_e^T)_k''' \end{aligned}$$

Para la dirección y :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_e \rho_l v_e) + \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_e \rho_l v_e u_e) + \frac{\partial}{\partial y} (\alpha_e \rho_l v_e v_e) + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha_e \rho_l v_e w_e) \\ & = -\alpha_e \frac{\partial P}{\partial y} - \tau_{wy,o}''' + \tau_{iy,vo}''' - \Gamma''' \eta v \end{aligned}$$

Y para la dirección z:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_e \rho_l w_e) + \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_e \rho_l w_e u_e) + \frac{\partial}{\partial y} (\alpha_e \rho_l w_e v_e) + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha_e \rho_l w_e w_e) \\ & = -\alpha_e \frac{\partial P}{\partial z} - \tau_{wz,o}''' + \tau_{iz,vo}''' - \Gamma''' \eta w \end{aligned}$$

Como se ha mencionado anteriormente, el campo líquido y gotas dispersas, en cuanto a energía, comparten ecuación ya que están en equilibrio térmico. Por lo tanto, CTF utiliza dos ecuaciones: una para el vapor y otra para el líquido.

La ecuación de la conservación de la energía en el vapor es la siguiente:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_v \rho_v h_v) + \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_v \rho_v h_v u_v) + \frac{\partial}{\partial y} (\alpha_v \rho_v h_v v_v) + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha_v \rho_v h_v w_v) \\ & = \frac{\partial}{\partial y} q_{v,y}^T + \frac{\partial}{\partial z} q_{v,z}^T + \Gamma''' h + q_{wv}''' + \alpha_v \frac{\partial P}{\partial t} \end{aligned}$$

Y en el líquido:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} ((\alpha_l + \alpha_e) \rho_l h_l) + \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_l \rho_l h_l u_l) + \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_e \rho_l h_l u_e) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} (\alpha_l \rho_l h_l v_l) + \frac{\partial}{\partial y} (\alpha_e \rho_l h_l v_e) + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha_l \rho_l h_l w_l) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha_e \rho_l h_l w_e) = \frac{\partial}{\partial y} q_{l,y}^T + \frac{\partial}{\partial z} q_{l,z}^T - \Gamma''' h + q_{wv}''' + (\alpha_l + \alpha_e) \frac{\partial P}{\partial t} \end{aligned}$$

Donde el término q_v^T es la transferencia de energía que experimenta hacia fuera o hacia dentro el volumen de celda, y el término $\Gamma''' h$ es la transferencia de energía por cambio de fase (evaporación-condensación).

3.2.3 Archivo de entrada (Input) de COBRA-TF

Para que COBRA-TF utilice las ecuaciones anteriores para representar el comportamiento de un reactor nuclear, es necesario introducir un archivo de entrada que contenga la información general y las condiciones iniciales sobre el análisis que se desee realizar.

Este archivo de entrada consiste en un único archivo de texto dividido en tarjetas. Cada una de estas tarjetas recoge parámetros que guardan una relación y pertenecen a la misma sección.

La siguiente tabla muestra el tipo información que se define en cada una de las tarjetas:

Número de tarjeta	Tipo de información
1	Selección de los modelos físicos, condiciones de contorno y condiciones iniciales
2	Descripción de los canales
3	Datos de conexión transversal del canal (Huelgo)
4	Datos para la conexión vertical del canal
5	Datos sobre la variación de la geometría
6	Canales y huelgos afectados por la variación de la geometría
7	Definición del coeficiente de pérdida de presión local y los datos de las rejillas.
8	Datos sobre las barras y los conductores que no son calentados
9	Descripción de la geometría del material
10	Tablas de propiedades para los materiales
11	Distribución radial y axial de potencia
12	Datos sobre la mezcla turbulenta
13	Datos sobre las condiciones de contorno
14	Opciones sobre el archivo de salida (Output)
15	Definición del dominio temporal
16	Información sobre la malla
17	Información sobre el mapa de canales y barras

Tabla 9. Número de tarjetas del input de COBRA e información que recogen

3.3 Variables de seguridad

En los análisis termohidráulicos de reactores es necesario conocer los parámetros que presentan límites de seguridad, de esta manera, es posible tener control sobre las variables que pueden causar accidentes en el reactor.

Algunas de estas limitaciones con relación directa con la termohidráulica son las siguientes: la temperatura en el centro del combustible, la temperatura en la vaina y la temperatura del refrigerante.

La siguiente figura representa el perfil de temperaturas en la barra de combustible con vaina:

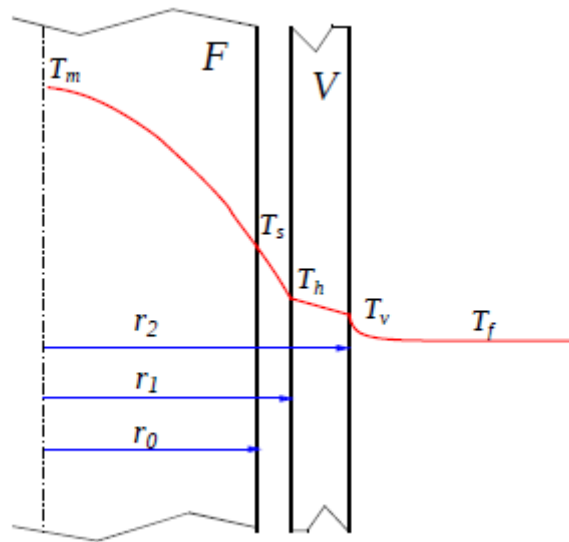


Figura 23. Perfil de temperaturas en una barra de combustible

Donde:

T_m : es la temperatura máxima en el centro de la pastilla de combustible.

T_s : es la temperatura en la superficie del combustible.

T_h : es la temperatura del interior de la vaina.

T_v : es la temperatura del exterior de la vaina.

T_f : es la temperatura del refrigerante.

r_0 : es el radio de la pastilla.

r_1 : es el radio interior de la vaina.

r_2 : es el radio exterior de la vaina.

En los análisis a realizar se tendrán en cuenta estas temperaturas para controlar que no sobrepasen los siguientes límites:

En cuanto a refrigerante, no debe alcanzar el flujo de calor crítico, ya que se perdería el contacto de la fase líquida con la vaina, y puede producir un gran aumento de temperatura.

La vaina, hecha de una aleación de zirconio llamada Zircaloy, si llega a los 1204 °C se oxida liberando hidrógeno, que puede producir la degradación del material. El organismo regulador establece que la temperatura de la vaina no puede alcanzar los 980 °C en operación.

La temperatura del combustible (UO_2) no debe alcanzar el punto de fusión (2865 °C). Este criterio se estableció para garantizar que al relocalizarse axial o radialmente el combustible fundido no entrara en contacto con la vaina ni cree puntos calientes (*hot spots*).

Capítulo 4.

Descripción de los casos a analizar

El objetivo de este capítulo es dar una descripción de los casos que se analizarán en este trabajo, así como las condiciones iniciales para la realización de los mismos.

Como se ha mencionado en el apartado 3.3, la temperatura de combustible es una de las variables más importantes en el estudio de un reactor nuclear. El parámetro físico que más afecta a la variación de la temperatura del combustible es la conductividad térmica. Es por ello por lo que este análisis se centra en las diferentes variables que afectan a la conductividad y, en consecuencia, a la temperatura.

4.1 Distribución de potencia

Para cada análisis de cada parámetro físico, se utilizarán dos casos distintos de distribución axial de potencia en el elemento combustible. Para el primer caso, llamado “Caso 1”, se impone una distribución axial de potencia constante y lineal, mostrada en la siguiente tabla:

Y	AXIALZ
0	1
3.6576	1

Tabla 10. Distribución de potencia en el Caso 1

Donde:

Y representa la distancia axial del elemento combustible, empezando desde 0 hasta 3,6576 metros.

$AXIALZ$ es el coeficiente de potencia aplicado para cada punto considerado.

La distribución de potencia cosenoidal utilizada en el Caso 1 tiene la siguiente representación gráfica:

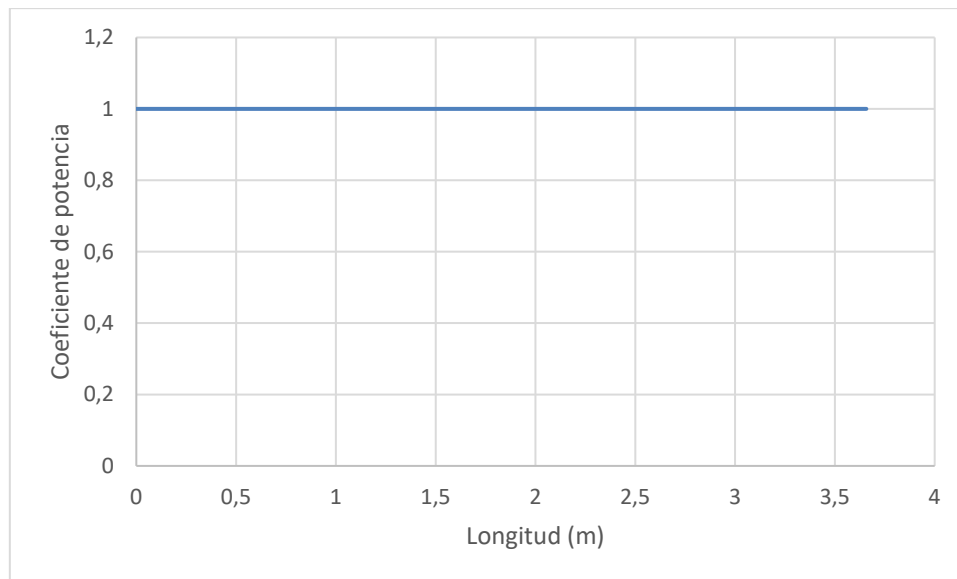


Figura 24. Representación de la distribución axial de potencia del Caso 1

Para el segundo caso, llamado “Caso 2”, se tiene en cuenta una distribución más realista, una distribución cosenoidal a lo largo de la longitud de la barra. El coeficiente de potencia se calcula con la siguiente expresión:

$$P = \cos\left(\frac{\pi x}{L}\right)$$

Donde:

P es el coeficiente de potencia

x es la distancia axial de la barra

L es la longitud total del elemento (3,65 m)

Mediante esta expresión y considerando que la longitud de la barra va de -1,8288 hasta 1,8288, tenemos los siguientes resultados:

X	P
-1.8288	0
-1.46304	0.30652744
-1.09728	0.58619649
-0.73152	0.80824731
-0.36576	0.95085417
0	1
0.36576	0.95085417
0.73152	0.80824731
1.09728	0.58619649
1.46304	0.30652744
1.8288	0

Tabla 11. Distribución de potencia sin normalizar para el Caso 2

Una vez calculada la distribución axial de potencia, ésta se debe normalizar para poder introducirla en el archivo de entrada del COBRA-TF. La siguiente tabla muestra una distribución de potencia normalizada para la longitud del elemento combustible:

Y	AXIALZ
0	0
0.36576	0.4862697
0.73152	0.92993173
1.09728	1.28218922
1.46304	1.50841821
1.8288	1.58638228
2.19456	1.50841821
2.56032	1.28218922
2.92608	0.92993173
3.29184	0.4862697
3.6576	0

Tabla 12. Distribución de potencia normalizada para el Caso 2

La distribución de potencia cosenoidal utilizada en el Caso 2 tiene la siguiente representación gráfica:

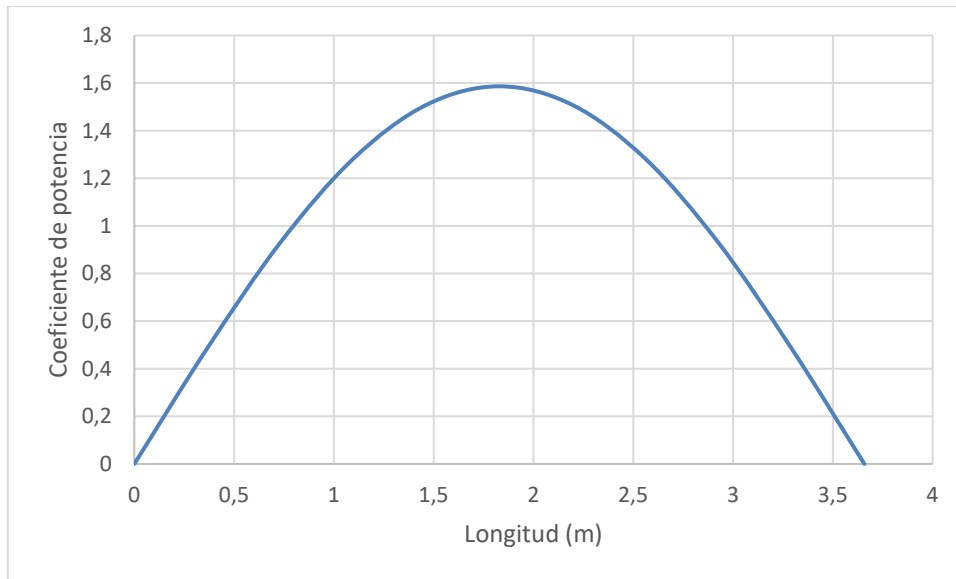


Figura 25. Representación gráfica de la distribución axial de potencia para el Caso 2

La distribución de potencia se modifica desde la tarjeta 11.4 en el input del COBRA.

4.2 Número de nodos radiales

COBRA-TF calcula la temperatura del centro del combustible extrapolando la temperatura desde el nodo más cercano al centro. Los valores obtenidos por un código de simulación se pueden ver afectados por la discretización numérica que se utiliza para la ecuación de transmisión de calor en la barra combustible, por lo tanto, la temperatura de centro de combustible será sensible al número de nodos radiales, siendo ésta más precisa cuantos más nodos se utilicen para el cálculo.

Este análisis tiene como finalidad estudiar la sensibilidad de esta discretización numérica y elegir un número de nodos donde el error sea menor de 1 % sin requerir un tiempo de cálculo muy elevado. De esta manera se puede utilizar un número de nodos optimizado para el resto de análisis.

La variable que representa el número de nodos en el input del COBRA se modifica desde la tarjeta 9.2, llamada NFUL.

4.3 Conductividad

La conductividad térmica es la propiedad física que mide la capacidad de conducción del calor, es decir, la capacidad de transferir la energía cinética de sus moléculas. Varía con la temperatura.

Basado en *Thermal Conductivity of Uranium Dioxide* de *International Atomic Energy Agency*, en este análisis se consideran cuatro medidas de conductividad para el UO_2 sinterizado y policristalino corregidas para un 95 % de densidad. Se muestran en las tablas recogidas en el Anexo 1.

Estas tablas de conductividad-temperatura se reflejan en el siguiente gráfico:

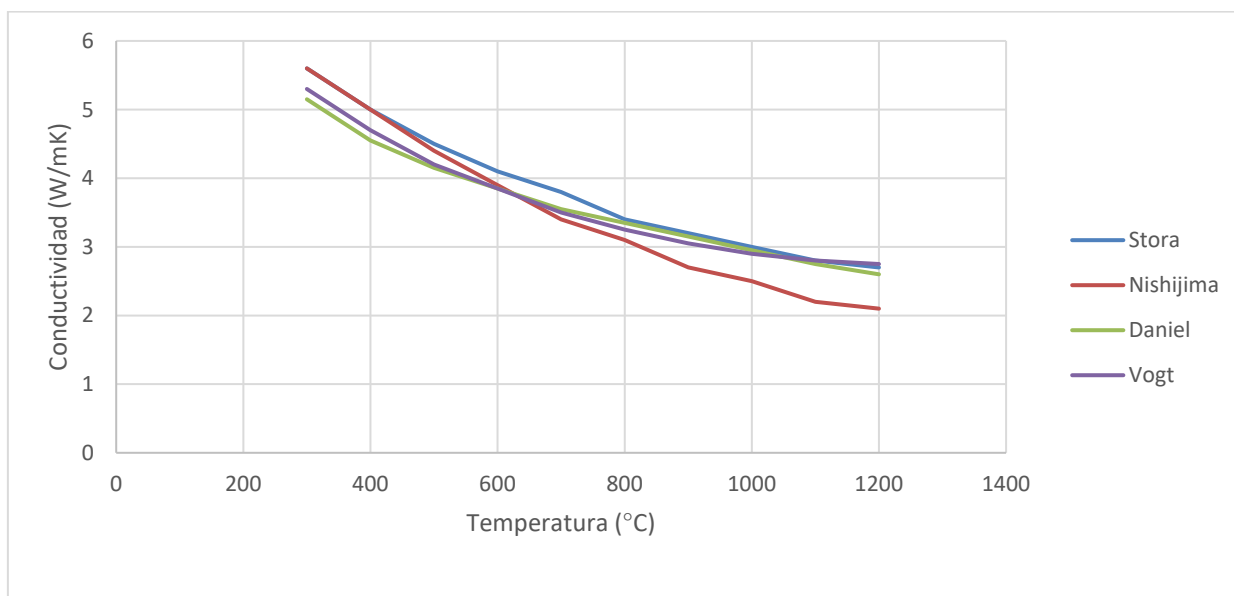


Figura 26. Gráficas conductividad-temperatura según: Stora, Nishijima, Daniel y Vogt

Como se puede observar, las mediciones están hechas hasta 1200 °C debido a la dificultad de medir a tan altas temperaturas.

COBRA-TF tiene incorporada en el código una propia tabla conductividad-temperatura para el UO_2 . El objetivo de este análisis es comprobar que la tabla implementada no tenga un error considerable respecto a otras tablas de temperatura-conductividad, y ver cómo afectan éstas a la variación de temperatura en el combustible.

La variable que representa la conductividad térmica en el input del COBRA se modifica desde la tarjeta 10.3, llamada THCF.

4.4 Quemado del combustible

El quemado del combustible mide la energía extraída de una fuente primaria de combustible nuclear. Es la relación entre la energía obtenida una vez ha finalizado la vida útil del combustible y la masa inicial. Se mide en megavatios eléctricos-día por tonelada (Mwd/tU). Por ello, económicamente, es deseable alcanzar un grado de quemado mayor.

En este análisis se estudia cómo afecta el quemado a la conductividad y a la temperatura del combustible. Con un valor máximo de grado de quemado, la energía liberada por evento de fisión sería máxima, lo que significa que se fisiona todo el contenido fisible, además de los otros radioisótopos fisionables. Esto equivaldría aproximadamente a 938 Mwd/tU. En las centrales nucleares PWR, el grado de quemado es aproximadamente del 3 %, es decir, alrededor de 28 Mwd/tU. Conociendo este dato, se analizará el grado de quemado dentro del rango entre 10 y 50 Mwd/tU.

Para ello, el presente trabajo se apoya en el artículo *Advances in Fuel Rod Modeling in Subchannel Thermal-Hydraulic Codes*, que tabula las siguientes correcciones de conductividad térmica del combustible de CTF para una densidad del 95 % según dos modelos:

Modified NFI model:

$$K_{95} = 0.5778 * (K_{\text{phonon}} + K_{\text{electronic}})$$

K_{phonon}

$$= \frac{1}{0.0452 + 0.000246Tk + 0.00187Bu + 1.1599Gad + [1 - 0.9e^{-0.04Bu}] * 0.038 * h * Bu^{0.28}}$$

$$K_{\text{electronic}} = \left(\frac{3.5 * 10^9}{Tk^2} \right) * e^{-\frac{16361}{Tk}}$$

$$h = \frac{1}{1 + 396 * \frac{-6380}{Tk}}$$

Halden Model:

$$K_{95} = 0.5778 * (K_{phonon} + K_{electronic})$$

K_{phonon}

$$= \frac{1}{(0.1148 + 0.004Bu + 1.1599Gad + 2.475 * 10^{-4} * (1 - 0.00333Bu) * \min(1650, Tc))}$$

$$K_{electronic} = 0.0132 * e^{0.00188Tc}$$

Siendo:

Tk: Temperatura del UO₂ (K)

Tc: Temperatura del UO₂ (C)

Bu: Grado de quemado del UO₂ (Mwd/tU)

K95: Conductividad térmica a una densidad del 95 % (W/mK)

Gad: Cantidad de Gadolinio en la mezcla (considerado 0 en este análisis).

Capítulo 5.

Análisis de resultados

5.1 Número de nodos radiales

En este análisis se calcula la temperatura de combustible en cada nodo axial de la barra mediante distintos números de nodos radiales utilizados en el cálculo. Se tienen en cuenta un caso lineal y otro cosenoidal. Estos son los resultados obtenidos tras la ejecución del código:

Para el caso 1:

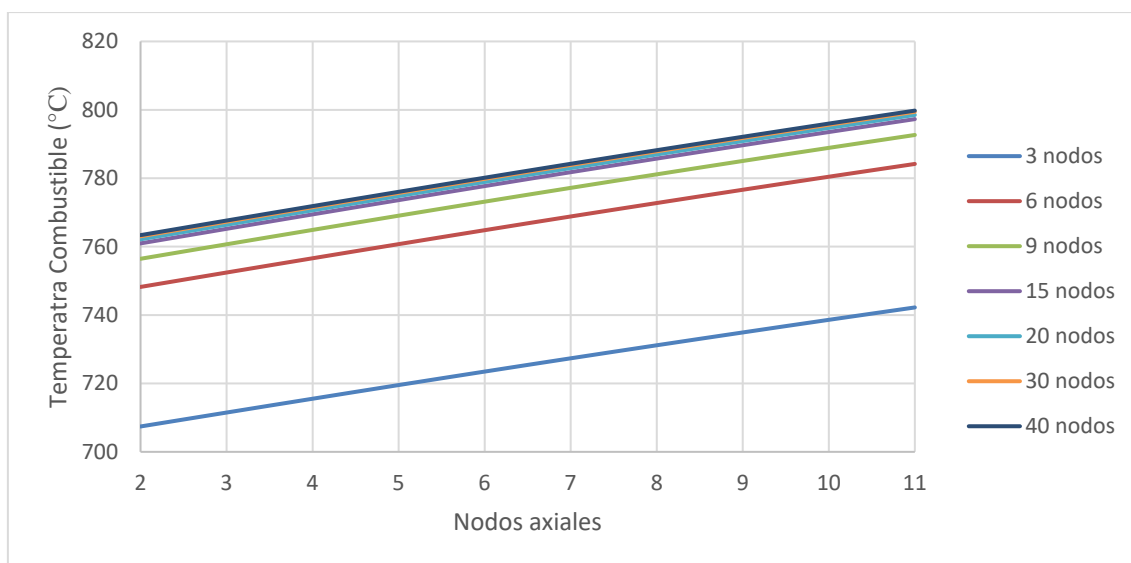


Figura 27. Representación de la temperatura del centro de combustible en cada nodo axial en el Caso 1 para diferente nodalización radial.

Para el Caso 2:

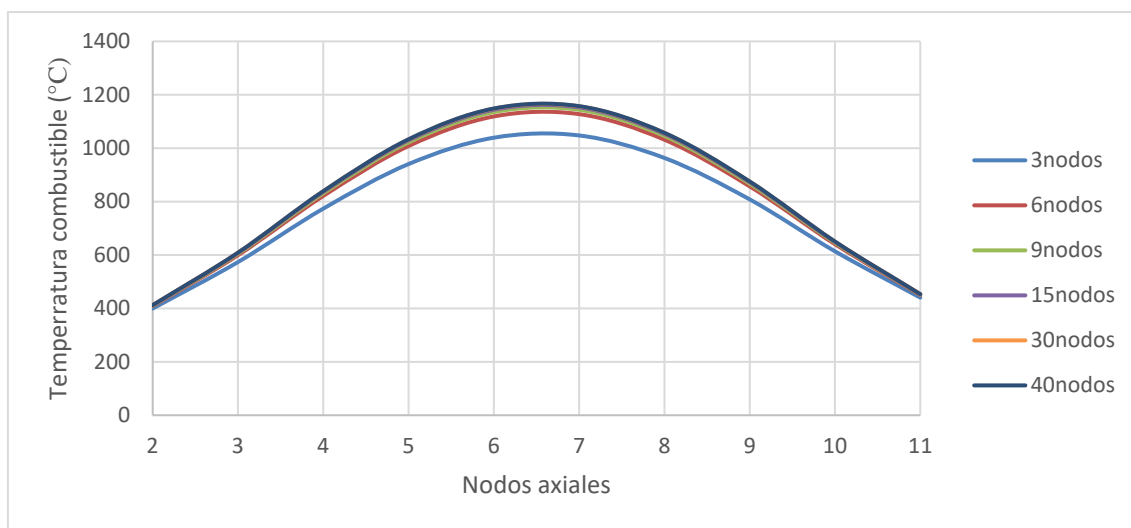


Figura 28. Representación de la temperatura del centro de combustible en cada nodo axial en el Caso 2 para diferente nodalización radial.

Como se puede observar en los gráficos, la temperatura sufre una variación considerable dependiendo del número de nodos utilizados. Hay cambios de 60 °C entre las temperaturas del Caso 1 y de 110 °C entre las temperaturas del Caso 2, por lo que es bastante sensible al número de nodos.

A bajos nodos el cambio es significativo: de 3 a 6 nodos la temperatura en el centro del combustible varía alrededor del 7 %, de 6 a 9 nodos alrededor del 2 %, y a partir de 9 nodos la temperatura de combustible no cambia más de un 1 %.

El tiempo de cálculo aumenta proporcionalmente al número de nodos, es por eso por lo que se han tenido en cuenta 9 nodos radiales para el resto de análisis, un número optimizado para encontrar un resultado muy cercano al real, sin emplear un tiempo de cálculo elevado.

5.2 Conductividad

En este análisis se ha calculado la temperatura del combustible para diferentes conductividades, para así compararla con la tabla implementada en el código de COBRA.

Como se ha mencionado en el apartado 4.3, se han considerado cuatro medidas de conductividad para el UO_2 a 95 % de densidad: Stora, Nishijima, Daniel y Vogt.

Los resultados se reflejan en los siguientes gráficos:

Para el Caso 1:

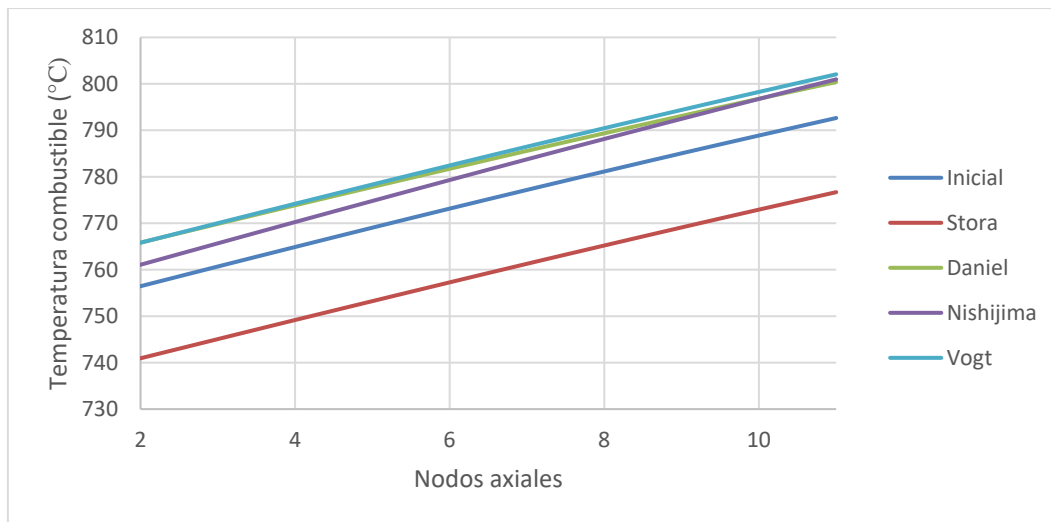


Figura 29. Representación de la temperatura del centro de combustible en cada nodo axial para el Caso 1 según las medidas de conductividad de: Stora, Daniel, Nishijima, Vogt y la tabla implementada en el código de COBRA

Y para el Caso 2:

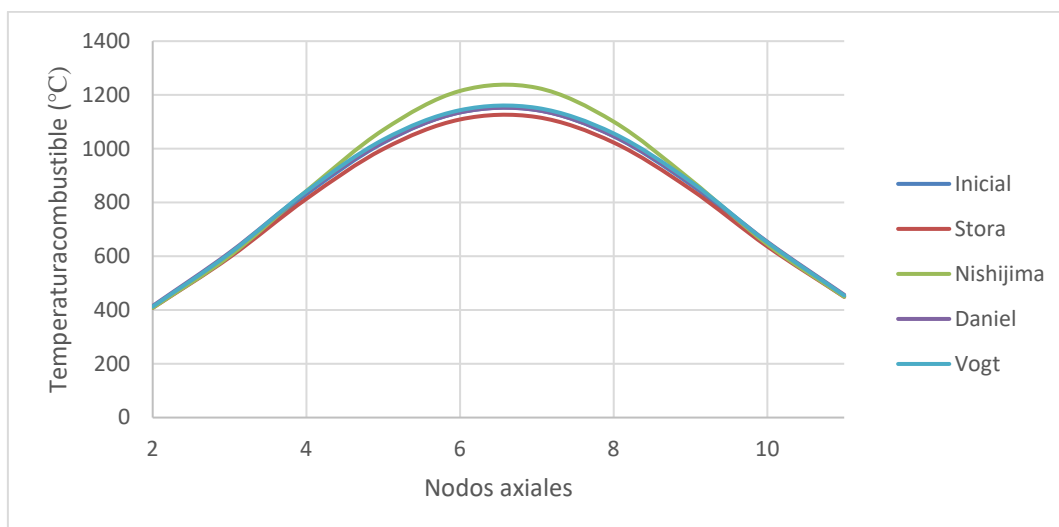


Figura 30. Representación de la temperatura del centro de combustible en cada nodo axial para el Caso 2 según las medidas de conductividad de: Stora, Daniel, Nishijima, Vogt y la tabla implementada en el código de COBRA

Como se puede observar, no existe una diferencia significativa en las temperaturas de combustible en las diferentes tablas de medidas de la *IAEA*: para el Caso 1 hay una diferencia máxima de un 3 % y para el Caso 2 del 6 %, que equivalen a una diferencia de 25 °C y 75 °C respectivamente.

También se ha calculado la temperatura para la tabla implementada en el código, llamado en las gráficas “Inicial”. Las gráficas muestran para ambos casos un resultado coherente, donde la temperatura del combustible para la tabla implementada en el código del COBRA entra dentro de los límites marcados por las medidas de la *IAEA*.

5.3 Quemado del combustible

Mediante las ecuaciones del artículo (Aysenur Toptan, 2016) *Advances in Fuel Rod Modeling in Subchannel Thermal-Hydraulic Codes* podemos hallar una tabla conductividad-temperatura para cada modelo según el grado de quemado. Estas tablas se encuentran en los Anexos 2 y 3 del Documento 3.

5.3.1 Modified NFI model

La siguiente figura recoge las tablas anteriores en una gráfica conductividad-temperatura para los diferentes grados de quemado:

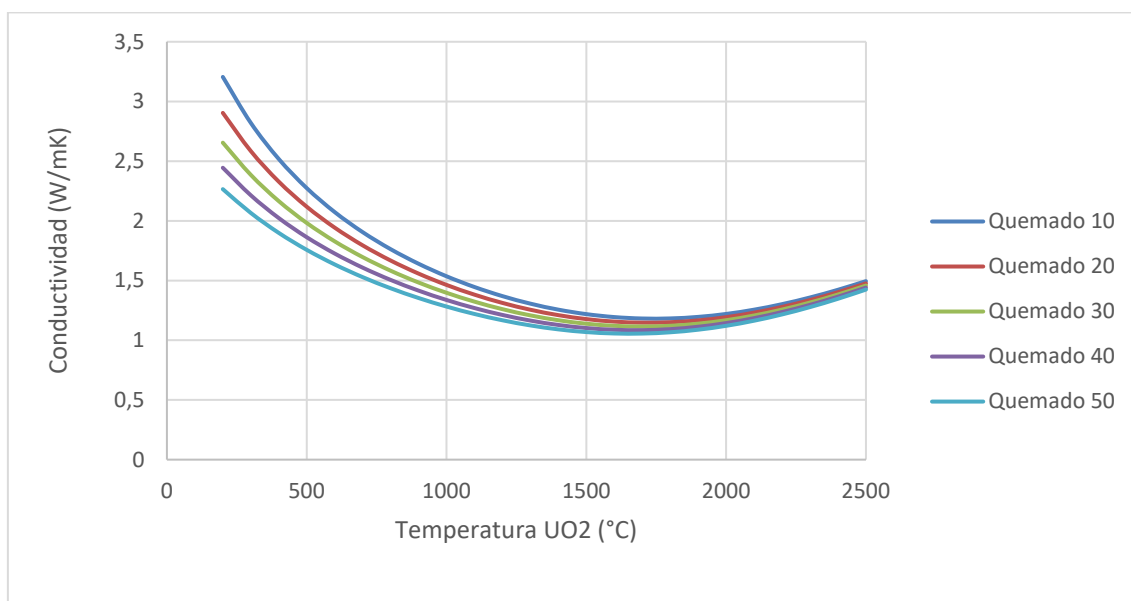


Figura 31. Representación de la conductividad-temperatura según el modelo NFI para diferentes grados de quemado

Como se puede observar, la conductividad varía con diferentes grados de quemado. Estudiamos ahora cómo varía la temperatura de centro del combustible.

Para el Caso 1:

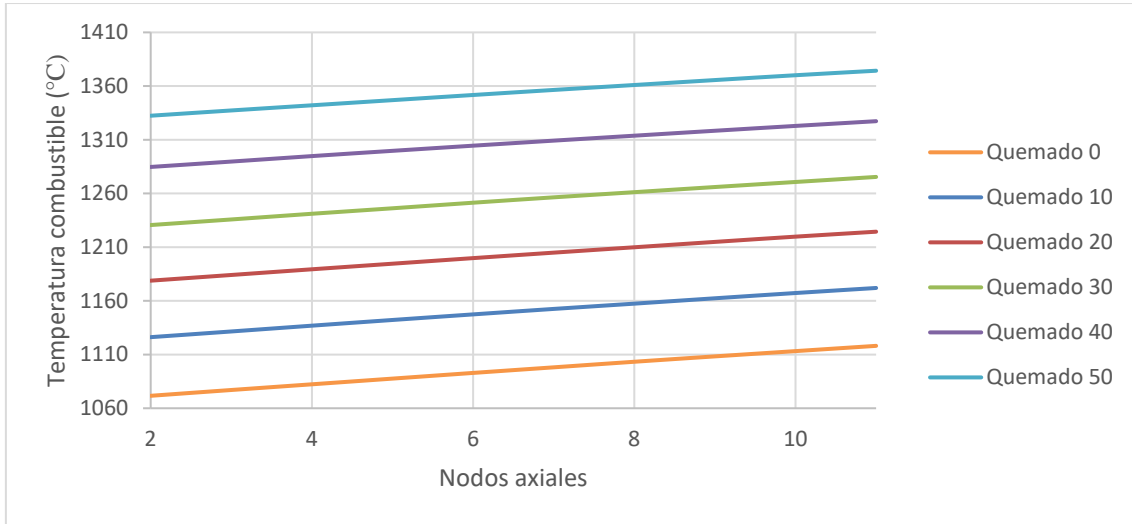


Figura 32. Representación de la temperatura del centro de combustible en cada nodo axial para el Caso 1 según el modelo NFI para diferentes grados de quemado

Y para el Caso 2:

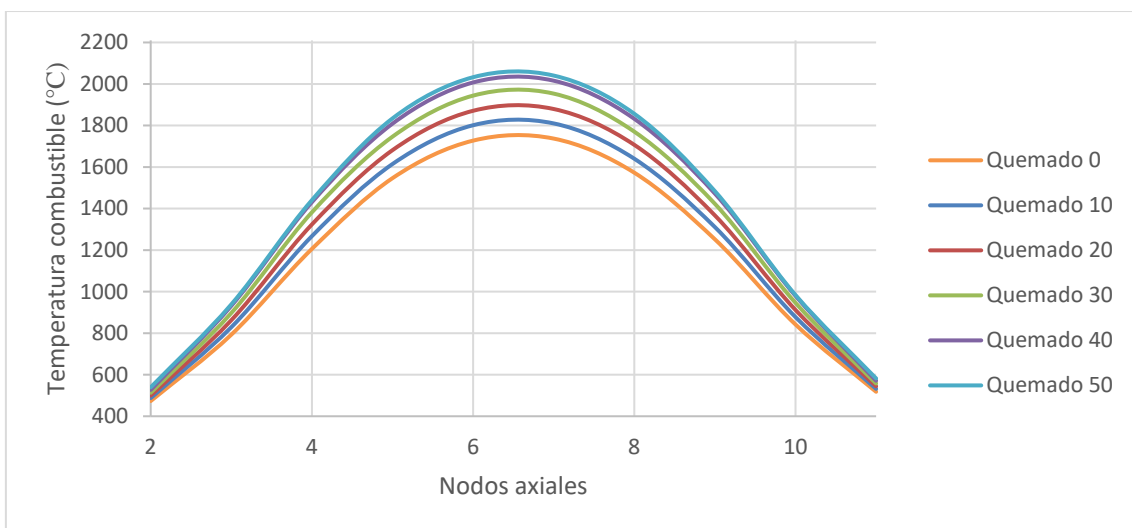


Figura 33. Representación de la temperatura del centro de combustible en cada nodo axial para el Caso 2 según el modelo NFI para diferentes grados de quemado

5.3.2 Halden model

La siguiente figura recoge las tablas anteriores en una gráfica conductividad-temperatura para los diferentes grados de quemado:

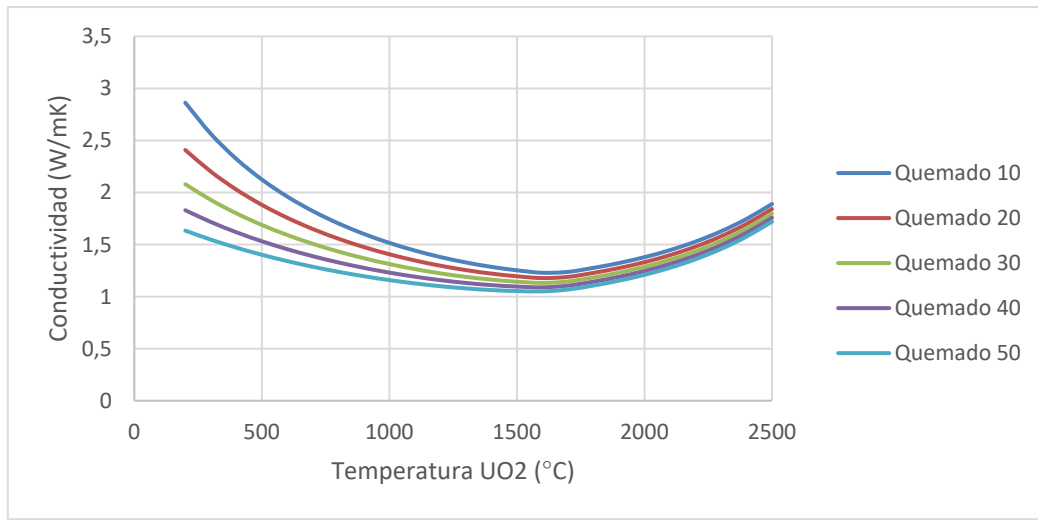


Figura 34. Representación de la conductividad-temperatura según el modelo NFI para diferentes grados de quemado

Estudiamos ahora cómo varía la temperatura de centro del combustible.

Para el Caso 1:

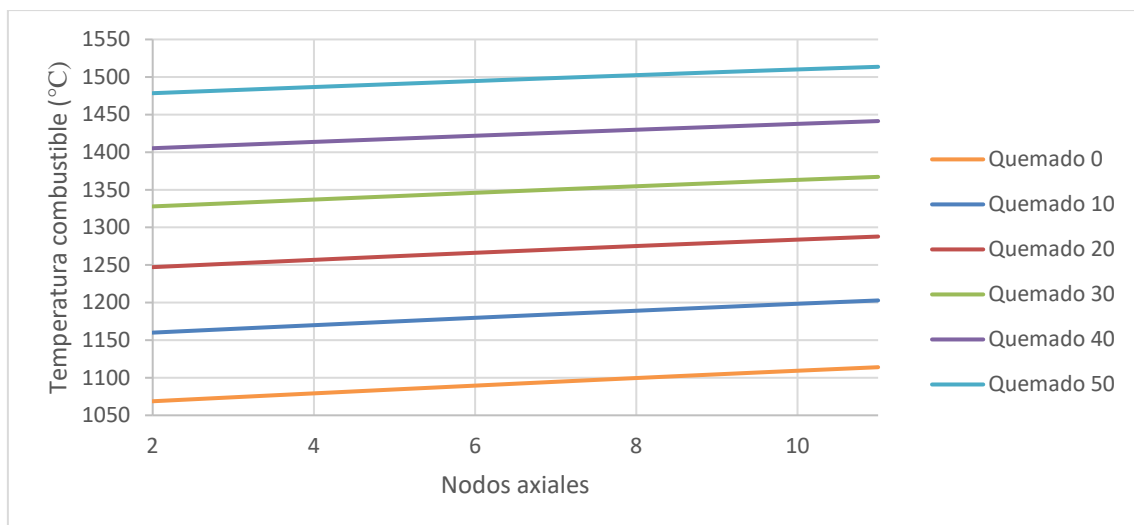


Figura 35. Representación de la temperatura del centro de combustible en cada nodo axial para el Caso 1 según el modelo Halden para diferentes grados de quemado

Para el Caso 2:

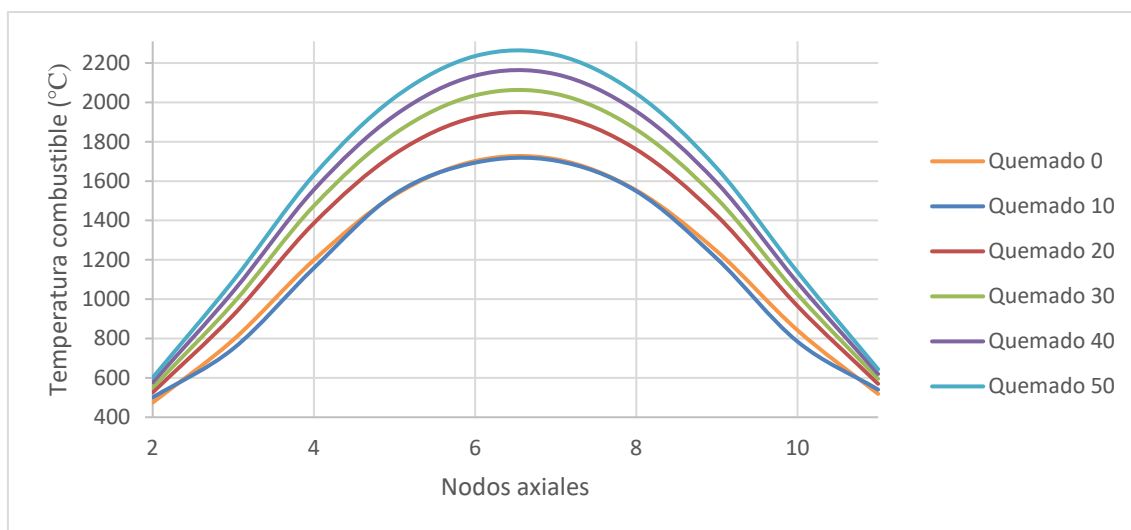


Figura 36. Representación de la temperatura del centro de combustible en cada nodo axial para el Caso2 según el modelo Halden para diferentes grados de quemado

Las correlaciones del modelo Halden, comparadas con el modelo NFI, dan como resultado una menor conductividad para temperaturas bajas, y mayor para muy altas temperaturas, lo que provoca mayores temperaturas en el centro del combustible, como se puede observar en las gráficas de ambos modelos.

Aunque la temperatura sea mayor en el modelo Halden, la diferencia de temperaturas para diferentes grados de quemado es la misma. Es importante tener en cuenta el grado de quemado en análisis termohidráulicos, ya que afecta considerablemente a los parámetros del reactor. Si se compara la temperatura de combustible en ambos modelos para 0 y 50Mwt/tU, se aprecia una diferencia de 250 °C de, que es bastante significativa.

También se puede deducir que la temperatura en el centro de la pastilla de combustible aumenta proporcionalmente al grado de quemado. Esto es debido a que el grado de quemado afecta también a la microestructura y al comportamiento de los productos volátiles de fisión: Al incrementar el grado de quemado, aumenta la energía final obtenida y, por lo tanto, la cantidad de productos de fisión. Esto conlleva a un crecimiento del grano y a una porosidad mayor, que hace que disminuya la conductividad, dejando, finalmente, una temperatura mayor en la pastilla de combustible.

Capítulo 6.

Conclusiones

En este apartado se recogen las conclusiones principales sobre los resultados obtenidos en el presente Trabajo de Fin de Grado.

Este trabajo tiene como objetivo analizar el comportamiento de la temperatura central del combustible en un reactor nuclear PWR, y para ello se ha modificado y estudiado la variación de la conductividad térmica, variable que juega un papel significativo según los resultados obtenidos.

En primer lugar, se ha estudiado el efecto que tiene la nodalización radial para el cálculo de temperaturas de combustible. Es importante elegir un número optimizado de nodos, teniendo en cuenta que un aumento calcula el resultado con mayor exactitud, pero también aumenta el tiempo de cálculo.

Al observar los resultados obtenidos, vemos que hay una gran diferencia entre la temperatura del centro de combustible de 3 y 40 nodos, sobre todo para una distribución de potencia más realista, donde hay diferencias de más de 100 °C. De esto se puede deducir que los valores obtenidos por el código de simulación se ven significativamente afectados por la discretización numérica que se utiliza para la ecuación de transmisión de calor en la barra de combustible. Además, podemos observar que a bajas temperaturas no se nota un gran cambio de temperatura, es a altas temperaturas (1000-1200 °C) cuando se los valores empiezan a diferenciarse.

Para un número bajo de nodos, como 3 o 6, la temperatura del centro del combustible dista significativamente del resto, por lo que no es una buena idea elegirlos a la hora de realizar análisis, pese a necesitar un tiempo de cálculo menor. En cambio, a partir de 9 nodos se observan temperaturas muy próximas a las calculadas con 40 nodos, por lo que podemos concluir que 9 es el número de nodos óptimo que se utilizará en el resto del análisis.

El siguiente análisis consiste en variar directamente la tabla de conductividad-temperatura en el Input del Cobra. A tan altas temperaturas no existe una tabla exacta que defina la conductividad del dióxido de uranio (UO_2), por lo que se han tomado cuatro medidas diferentes.

Los resultados obtenidos en el caso de distribución lineal de potencia muestran una diferencia de $25\text{ }^\circ\text{C}$ entre la temperatura del combustible, ya que la temperatura máxima es de $802\text{ }^\circ\text{C}$. En cambio, en una distribución más realista como es la del Caso 2, donde la temperatura supera los $1200\text{ }^\circ\text{C}$, se aprecia una diferencia de $75\text{ }^\circ\text{C}$. Este dato es de interés teniendo en cuenta la importancia que tiene el límite de la temperatura del combustible para la seguridad del reactor. Podemos concluir que es necesario contar con un cierto margen de seguridad a la hora de simular análisis, ya que un pequeño error en la conductividad puede producir grandes diferencias en la temperatura del combustible de un reactor real.

El último análisis estudia la variación de la temperatura del centro del combustible según el grado de quemado. Como se puede observar en las gráficas de ambos modelos para el Caso 1 y el Caso 2, la temperatura del combustible aumenta a medida que aumenta el grado de quemado. A un mayor quemado, existen más productos de fisión almacenados, lo que provoca un incremento del volumen de los poros. Esto se aprecia en las correlaciones de los modelos NFI y Halden, donde la conductividad disminuye con el grado de quemado. Podemos concluir, entonces, que la porosidad del combustible afecta notablemente a la temperatura central del combustible, debido a la variación de conductividad.

Además, existen diferencias de $250\text{ }^\circ\text{C}$ entre máximos y mínimos grados de quemado, por lo que es una variable importante para tener en cuenta en la realización de simulaciones termohidráulicas de un reactor nuclear.

Capítulo 7.

Referencias

- Aysenur Toptan, M. A. (2016). Advances in Fuel Rod Modeling in Subchannel Thermal-Hydraulic Codes. *Transactions of the American Nuclear Society, Vol. 115*, 1612-1613-1614-1615.
- IAEA. (1966). *Thermal Conductivity of Uranium dioxide*. Vienna: IAEA.
- IAEA. (2006). *Thermophysical properties database of materials for LWR and HWR*. Viena: IAEA.
- IAEA. (2017). *Nuclear Power Reactors in the World*. Viena: IAEA Austria.
- Robert K. Salko, M. N. (2015). *CTF Theory Manual*. Pennsylvania: CASL.
- Wiesenak, W. (2010). *Fuel temperature modeling and phenomena: pellet-clad gap heat transfer, fuel temperature distribution*. Halden, Norway: IAEA.

**ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA TEMPERATURA DE
COMBUSTIBLE NUCLEAR A LOS PARÁMETROS FÍSICOS Y
DEL MODELO EN UN ELEMENTO PWR.**

DOCUMENTO 2: ESTUDIO ECONÓMICO

Capítulo 8.

Estudio económico

El estudio económico del presente trabajo tiene en cuenta que está realizado en el departamento de Ingeniería Energética, de ETSI Industriales, por lo que el resultado será una estimación del coste que habría supuesto para una empresa de ingeniería.

El coste total del proyecto viene dado por la suma de los siguientes costes: Coste de los recursos humanos, coste de los equipos y coste del software.

8.1 Coste de los recursos humanos

Se considera que el trabajo está hecho por un becario en una empresa de ingeniería y que cobra 6,25 €/hora para un trabajo total de 300 horas. También hay que sumar las horas de consultoría al profesor tutor, considerando que es un ingeniero que cobra 35 €/hora para un trabajo total de 70 horas.

COSTE EN RECURSOS HUMANOS			
Personal	€/hora	Horas	Total (€)
Becario	6.25	300	1875
Ingeniero	35	70	2450

El coste total de los recursos humanos es de 4325 €

8.2 Coste de los equipos

En este caso se considera únicamente el ordenador personal, adquirido por 1000 €y amortizado en 5 años.

COSTE EN LOS EQUIPOS			
Equipo	€/mes	Meses	Total (€)
Ordenador personal	17	5	85

El coste total de los equipos es de 85 €

8.3 Coste del software

Dentro del coste del software se considera el Windows Office por 99 €/año, y la licencia del COBRA-TF estimado en 150 €

COSTE EN EL SOFTWARE	
Programa	Coste (€)
Windows Office	42
COBRA-TF	150

El coste total del software es de 192 €

8.3 Coste total

El coste total del proyecto viene dado por la suma de los costes anteriores:

COSTE TOTAL	
Tipo	Coste (€)
Mano de obra	4325
Equipos	85
Software	192
TOTAL	4602

El coste total del proyecto es de 4602 €

**ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA TEMPERATURA DE
COMBUSTIBLE NUCLEAR A LOS PARÁMETROS FÍSICOS Y
DEL MODELO EN UN ELEMENTO PWR.**

DOCUMENTO 3: ANEXOS

ANEXO 1. TABLAS CONDUCTIVIDAD-CALOR ESPECÍFICO-TEMPERATURA

STORA		
TEMPERATURA (°C)	CALOR ESPECÍFICO (kJ/ (kg K))	CONDUCTIVIDAD (W/mK)
300	0,000236	5.6
400	0,000266	5
500	0,000282	4.5
600	0,000292	4.1
700	0,000299	3.8
800	0,000304	3.4
900	0,000308	3.2
1000	0,000312	3
1100	0,000315	2.8
1200	0,000317	2.7

Tabla I. Medidas de temperatura, calor específico y conductividad según Stora

NISHIJIMA		
TEMPERATURA (C°)	CALOR ESPECÍFICO (kJ/ (kg K))	CONDUCTIVIDAD (W/mK)
300	0,000236	5.6
400	0,000266	5
500	0,000282	4.4
600	0,000292	3.9
700	0,000299	3.4
800	0,000304	3.1
900	0,000308	2.7
1000	0,000312	2.5
1100	0,000315	2.2
1200	0,000317	2.1

Tabla II. Medidas de temperatura, calor específico y conductividad según Nishijima

DANIEL		
TEMPERATURA (°C)	CALOR ESPECÍFICO (kJ/ (kg K))	CONDUCTIVIDAD (W/mK)
300	0,000236	5.15
400	0,000266	4.55
500	0,000282	4.15
600	0,000292	3.85
700	0,000299	3.55
800	0,000304	3.35
900	0,000308	3.15
1000	0,000312	2.95
1100	0,000315	2.75
1200	0,000317	2.6

Tabla III. Medidas de temperatura, calor específico y conductividad según Daniel

VOGT		
TEMPERATURA (°C)	CALOR ESPECÍFICO (kJ/ (kg K))	CONDUCTIVIDAD (W/mK)
300	0,000236	5.3
400	0,000266	4.7
500	0,000282	4.2
600	0,000292	3.85
700	0,000299	3.5
800	0,000304	3.25
900	0,000308	3.05
1000	0,000312	2.9
1100	0,000315	2.8
1200	0,000317	2.75

Tabla IV. Medidas de temperatura, calor específico y conductividad según Vogt

ANEXO 2. TABLAS CONDUCTIVIDAD-TEMPERATURA SEGÚN EL MODELO NFI

QUEMADO 10 (Mwd/tU)			
Temp (K)	K₉₅ (W/mK)	Temp (K)	K₉₅ (W/mK)
300	2.82	1600	1.19
400	2.51	1700	1.18
500	2.27	1800	1.18
600	2.07	1900	1.19
800	1.76	2000	1.22
900	1.64	2100	1.25
1000	1.53	2200	1.3
1200	1.37	2300	1.35
1400	1.26	2400	1.42
1500	1.22	2500	1.49

Tabla V. Conductividad-Temperatura con un grado de quemado de 10 Mwd/Tu según el modelo NFI

QUEMADO 20 (Mwd/tU)			
Temp (K)	K₉₅ (W/mK)	Temp (K)	K₉₅ (W/mK)
300	2.58	1600	1.16
400	2.32	1700	1.15
500	2.11	1800	1.15
600	1.94	1900	1.16
800	1.66	2000	1.19
900	1.55	2100	1.23
1000	1.46	2200	1.27
1200	1.31	2300	1.33

1400	1.21	2400	1.4
1500	1.18	2500	1.47

Tabla VI. Conductividad-Temperatura con un grado de quemado de 20 Mwd/Tu según el modelo NFI

QUEMADO 30 (Mwd/tU)			
Temp (K)	K₉₅ (W/mK)	Temp (K)	K₉₅ (W/mK)
300	2.38	1600	1.12
400	2.16	1700	1.11
500	1.98	1800	1.12
600	1.82	1900	1.13
800	1.58	2000	1.16
900	1.48	2100	1.21
1000	1.39	2200	1.25
1200	1.26	2300	1.32
1400	1.17	2400	1.38
1500	1.13	2500	1.45

Tabla VII. Conductividad-Temperatura con un grado de quemado de 30 Mwd/Tu según el modelo NFI

QUEMADO 40 (Mwd/tU)			
Temp (K)	K₉₅ (W/mK)	Temp (K)	K₉₅ (W/mK)
300	2.21	1600	1.08
400	2.02	1700	1.08
500	1.86	1800	1.09
600	1.72	1900	1.11
800	1.5	2000	1.14
900	1.41	2100	1.18
1000	1.33	2200	1.23
1200	1.21	2300	1.3

1400	1.13	2400	1.36
1500	1.1	2500	1.44

Tabla VIII. Conductividad-Temperatura con un grado de quemado de 40 Mwd/Tu según el modelo NFI

QUEMADO 50 (Mwd/tU)			
Temp (K)	K₉₅ (W/mK)	Temp (K)	K₉₅ (W/mK)
300	2.06	1600	1.06
400	1.89	1700	1.06
500	1.75	1800	1.07
600	1.63	1900	1.08
800	1.44	2000	1.12
900	1.35	2100	1.16
1000	1.28	2200	1.21
1200	1.17	2300	1.27
1400	1.09	2400	1.34
1500	1.07	2500	1.42

Tabla IX. Conductividad-Temperatura con un grado de quemado de 50 Mwd/Tu según el modelo NFI

ANEXO 3. TABLAS CONDUCTIVIDAD-TEMPERATURA SEGÚN EL MODELO HALDEN

QUEMADO 10 (Mwd/tU)			
Temp (K)	K₉₅ (W/mK)	Temp (K)	K₉₅ (W/mK)
300	2.56	1600	1.23
400	2.32	1700	1.24
500	2.12	1800	1.27
600	1.96	1900	1.32
800	1.7	2000	1.38
900	1.6	2100	1.44
1000	1.51	2200	1.52
1200	1.38	2300	1.63
1400	1.28	2400	1.75
1500	1.25	2500	1.88

Tabla X. Conductividad-Temperatura con un grado de quemado de 10 Mwd/Tu según el modelo Halden

QUEMADO 20 (Mwd/tU)			
Temp (K)	K₉₅ (W/mK)	Temp (K)	K₉₅ (W/mK)
300	2.2	1600	1.18
400	2.02	1700	1.19
500	1.88	1800	1.23
600	1.76	1900	1.27
800	1.56	2000	1.33
900	1.48	2100	1.39
1000	1.41	2200	1.48
1200	1.29	2300	1.58

1400	1.22	2400	1.69
1500	1.19	2500	1.84

Tabla XI. Conductividad-Temperatura con un grado de quemado de 20 Mwd/Tu según el modelo Halden

QUEMADO 30 (Mwd/tU)			
Temp (K)	K₉₅ (W/mK)	Temp (K)	K₉₅ (W/mK)
300	1.93	1600	1.13
400	1.8	1700	1.14
500	1.69	1800	1.18
600	1.59	1900	1.23
800	1.43	2000	1.29
900	1.37	2100	1.35
1000	1.31	2200	1.43
1200	1.22	2300	1.53
1400	1.16	2400	1.65
1500	1.14	2500	1.8

Tabla XII. Conductividad-Temperatura con un grado de quemado de 30 Mwd/Tu según el modelo Halden

QUEMADO 40 (Mwd/tU)			
Temp (K)	K₉₅ (W/mK)	Temp (K)	K₉₅ (W/mK)
300	1.71	1600	1.09
400	1.62	1700	1.1
500	1.53	1800	1.14
600	1.46	1900	1.19
800	1.32	2000	1.24
900	1.27	2100	1.31
1000	1.23	2200	1.4
1200	1.15	2300	1.49

1400	1.11	2400	1.61
1500	1.09	2500	1.76

Tabla XIII. Conductividad-Temperatura con un grado de quemado de 40 Mwd/Tu según el modelo Halden

QUEMADO 50 (Mwd/tU)			
Temp (K)	K₉₅ (W/mK)	Temp (K)	K₉₅ (W/mK)
300	1.54	1600	1.05
400	1.47	1700	1.07
500	1.4	1800	1.1
600	1.34	1900	1.15
800	1.24	2000	1.2
900	1.2	2100	1.27
1000	1.16	2200	1.36
1200	1.1	2300	1.46
1400	1.06	2400	1.57
1500	1.05	2500	1.72

Tabla XIV. Conductividad-Temperatura con un grado de quemado de 50 Mwd/Tu según el modelo Halden