

**“ESTUDIO TÉRMICO DE UNA CÁPSULA PARA
ENSAYO DE IRRADIACIÓN DE BARRAS
COMBUSTIBLES EN REACTORES
EXPERIMENTALES”**

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

Alumno: Julieta Ortiz
Director: Alejandro Soba
Co-Director: Adolfo Marajofsky

Marzo 2017.



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio numérico del comportamiento térmico de una cápsula que tendrá como fin la emulación de las condiciones de operación de un elemento combustible de potencia dentro de un reactor de tipo experimental. Se propone crear alrededor de una barra combustible tipo PWR usual una barrera térmica para obtener una temperatura exterior de la vaina de dicha barra dentro del rango de operación de un reactor de potencia [200.0-300.0] °C. Con este fin se propuso como barrera una cubierta externa de Zircaloy con un gap de aproximadamente 800.0 micrones. Para graduar la temperatura sobre la vaina interna se analizan diversos materiales para rellenar ese gap con la premisa de no modificar la distancia predefinida. Los materiales estudiados fueron: Helio, Zircaloy-4, Dióxido de Titanio, Alúmina, Inconel X-750 y distintas mezclas de los mismos.

El código utilizado para realizar este análisis es una modificación de DIONISIO v2.0. Se ha validado dicha aplicación con resultados analíticos obtenidos de soluciones bajo hipótesis de linealidad de las constantes involucradas y diferentes potencias internas y gaps entre vainas.

De entre todos los materiales estudiados se concluyó que la opción de una mezcla de Al_2O_3 con 30% de TiO_2 es la más adecuada para utilizar como aislante. Se espera poder testear esta predicción con experimentos en un futuro próximo.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN GENERAL	4
Antecedentes.	4
Justificación.....	5
Objetivo.....	5
1 MARCO TEÓRICO	6
1.1 Reactores de investigación.....	6
1.2 Reactores de Potencia.	7
1.3 Central Argentina de Elementos Modulares (CAREM).	8
1.4 Descripción de la cápsula de irradiación.	10
1.5 Estudios previos (antecedentes).....	10
1.6 Código de cálculo.	11
1.7 Descripción del Modelo.	12
2 RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	15
2.1 Validación: comparación de resultados analíticos con el código de cálculo.....	15
2.2 Helio. Cálculo de gap adecuado.....	17
2.3 Determinación de conductividad térmica para un gap de 800 micrones.....	19
2.4 Selección de materiales sólidos candidatos.	20
2.5 Materiales sólidos estudiados.....	20
2.5.1 Zircaloy-4.....	20
2.5.2 Alúmina (Al_2O_3)	21
2.5.3 Dióxido de Titanio (TiO_2)	23
2.5.4 Inconel X-750	24
2.5.5 Mezclas Al_2O_3 y TiO_2	25
2.5.6 Resumen de resultados.....	26
3 CONCLUSIONES	28
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29
ANEXO 1: Cálculos auxiliares	30
A. Obtención de correlación para la conductividad térmica en función de la temperatura.	30
B. Comparación de leyes de conductividad en función de la porosidad.	30

INTRODUCCIÓN GENERAL

Antecedentes.

Diseñar y construir un dispositivo experimental que permita realizar irradiaciones en combustibles de potencia constituye una herramienta fundamental para el diseño y desarrollo de nuevos combustibles, así como por la valiosa cantidad de datos que proporciona para la simulación y estudio teórico de los materiales.

A mediados de los años 60 la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) adquirió un dispositivo de irradiación que dio lugar a la realización de un Seminario en los 70 que actualmente se halla discontinuado. En esa misma década se inició la construcción de celdas calientes que dieron lugar en CNEA a fines de los años 90 al estudio y calificación de placas para combustibles de reactores de investigación. A su vez, a fines de la década de 1990 se inició la formulación de un proyecto para la construcción de un dispositivo de irradiación, puesto que una facilidad de irradiación era el eslabón que faltaba para cerrar el conjunto de facilidades necesarias para realizar la ingeniería del Combustible Nuclear. Dicho dispositivo estaba destinado a ser instalado en el reactor de investigación RA-3 y permitiría simular el perfil térmico y la densidad de fisiones de un reactor de potencia y así poder analizar los cambios microestructurales de una pastilla, además de simular las condiciones mecánicas de la barra combustible con flujos másicos similares del refrigerante sobre cada barra de tal modo que permita validar su ingeniería.

Dada la falta de recursos, en el año 2001 se presentó este proyecto a la Organización Nacional de Energía Atómica (OIEA) y fue aprobado, iniciándose a mediados del año 2003 en medio de una crisis económica nacional que debilitó el aporte necesario para su construcción de las instituciones locales. Sin embargo en los últimos años tomó un fuerte impulso, y en este momento se ha finalizado la construcción del sistema principal de presurización y bomba de recirculación.

En el marco del proyecto CAREM y ante la necesidad de pensar una ingeniería para un combustible del orden de quemado de 30000 MWd/TnU para el cual el Departamento de Combustibles de CNEA no tiene experiencias previas, se contrató una irradiación en el Reactor Halden. Cabe recalcar que obtener los resultados de esta irradiación lleva años. Esta necesidad que produce el diseño de un nuevo combustible reactualiza la urgencia de contar dentro de la institución con facilidades de irradiación propias a fin de contar con todas las instalaciones experimentales necesarias para realizar una ingeniería del combustible propia^[1].

Por todo esto, en 2011 se inicia el estudio de fabricación de una cápsula de irradiación adaptable a cualquier reactor de investigación, la cual contendrá una barra combustible y un espacio de separación que servirá como aislante para producir una caída térmica entre la temperatura superficial de la vaina del combustible (aproximadamente 300°C) y la temperatura de piletta (80-110°C).

Actualmente, se encuentra en construcción el RA-10 cuyo diseño contempla la posibilidad de irradiar muestras y dispositivos dentro del mismo. Este nuevo reactor multipropósito contará con seis posiciones fijas donde se ubican los dispositivos experimentales internos al núcleo (dos posiciones poseen espectro rápido y las cuatro restantes un espectro térmico), además de los dispositivos experimentales externos al núcleo ubicados en el tanque del

reflector. En cualquiera de estas posiciones puede ubicarse un dispositivo como el analizado en la tesina.

Justificación

En base a estos antecedentes se propuso el desarrollo de una cápsula de irradiación a ser instalada en el RA-3, que permitiría acelerar los tiempos de obtención de resultados, en particular aplicables a la ingeniería de un combustible tipo PWR/BWR. Una cápsula de irradiación es un elemento mucho más simple que un dispositivo de irradiación y puede arrojar resultados útiles especialmente con respecto a la pastilla combustible, permite conocer el comportamiento térmico de una barra combustible y realizar observaciones micro estructurales post irradiación. A diferencia de un dispositivo de irradiación no está presurizada, por lo que los alcances de los experimentos que podrían llevarse a cabo son limitados. No obstante, su costo disminuye drásticamente mientras que además posee una facilidad de manipulación que la convierte en un instrumento sumamente versátil. La base de este simulador de perfil térmico consiste en crear una barrera térmica entre las paredes de la cápsula propiamente dichas y las barras combustible que contenga, de modo que la temperatura en su superficie se encuentre entre los 200 y 300°C para asegurar un perfil térmico similar al obtenido en reactores de potencia, pero en reactores de tipo experimental.

Objetivo

En el marco de esta tesis se propone como objetivo principal un estudio analítico y numérico testeando diversos materiales conductores candidatos a rellenar el espacio comprendido entre las barras combustibles y el contenedor exterior, para el diseño de una cápsula de irradiación para el ensayo de combustibles tipo PWR en reactores experimentales (RA-3/RA-10).

Con el fin de encontrar una barrera térmica adecuada que permita emular en el reactor de investigación el perfil térmico que se obtendría en los combustibles de potencia, se estudiaran distintos materiales, desde helio al polvo de alúmina, incluyendo la posibilidad de utilizar una mezcla de polvos. Para esto se cuenta con un código unidimensional que permite calcular el perfil de temperatura de un sistema conformado por una pastilla combustible, el gap, la vaina de Zircaloy-4, y la cápsula que se construye de otro gap y el material de la vaina exterior. Es sobre este segundo gap donde se deberá testear la inclusión de diferentes materiales.

1 MARCO TEÓRICO

1.1 Reactores de investigación.

Los reactores de investigación son reactores de baja potencia utilizados como fuentes neutrónicas para producción de radioisótopos, estudio de comportamiento de materiales bajo irradiación e investigación en física y constituyen piezas fundamentales del sistema productivo, científico y médico de un país. Se diferencian de las centrales nucleares por su diseño y en su finalidad, ya que están hechos para producir neutrones en lugar de electricidad, por lo que el combustible se diseña, en general en forma de placas de pequeño espesor, para favorecer la extracción del calor generado por las reacciones nucleares.

Un reactor experimental requiere de una instalación modesta en comparación a las centrales de potencia y todas las variables implicadas se ven reducidas en magnitud y exigencia. En el núcleo del reactor, formado por placas que contienen mayor porcentaje de U^{235} que los reactores de potencia, se produce la reacción nuclear que origina el producto principal de este tipo de instalación: los neutrones. El calor generado en la reacción es evacuado del núcleo por el refrigerante (agua) que circula por el circuito primario. Esta masa de agua cede su calor, a través de intercambiadores, al circuito secundario. Para enfriarse parte del agua del circuito secundario se evapora fuera del edificio en torres de refrigeración, de este modo se logra que el calor fluya desde núcleo del reactor hacia la atmósfera en forma eficiente y segura.

Los reactores de investigación operan, en general, con flujos neutrónicos de entre 10^{13} - 10^{15} neutrones/cm²s y potencias térmicas de entre 10 MW y 20 MW. Mediante un sistema de bombas el agua circula a través del núcleo de elementos combustibles. Ingresa a una temperatura de aproximadamente 40°C y debido al flujo calórico emerge a unos 65°C, dependiendo del diseño del reactor [3].

Argentina tiene una vasta experiencia en la construcción y operación de reactores de producción e investigación, llegando incluso a exportar su tecnología a Australia, Argelia, Egipto y Perú. Actualmente, cuenta con seis reactores de investigación en operación. El Reactor RA-1, primer reactor nuclear argentino y primero en operar en Latinoamérica, marcó un hito fundamental en la historia de la energía nuclear en nuestro país. Es un reactor tipo pileta de muy baja potencia instalado en el Centro Atómico Constituyentes en CNEA. Los reactores RA-0 (ubicado en la Universidad Nacional de Córdoba) y RA-4 (ubicado en la Universidad Nacional de Rosario), son dos instalaciones que fueron cedidas en calidad de préstamo por la CNEA mediante convenios para que esas instituciones los operen con la finalidad de formar profesionales en el campo nuclear. El RA-3 instalado en Ezeiza es utilizado para la producción industrial de radioisótopos. El RA-6, ubicado en Bariloche, es utilizado para investigación e irradiación experimental en terapia de captura de boro (BNCT). Por último el RA-8, ubicado en la provincia de Río Negro, es un reactor experimental denominado facilidad crítica, diseñado para realizar ensayos del núcleo del reactor CAREM. A estos, se suma un séptimo reactor, que se encuentra hoy en etapa de construcción, el reactor nuclear multipropósito RA-10 [4].

Reactor RA-3

Las dos actividades principales del reactor RA-3 son la experimentación y la producción de radioisótopos. Su flujo neutrónico es de 10^{14} n/cm² s y su potencia térmica es de 10 MW. El reactor está constituido por un recipiente de acero inoxidable dentro del cual se encuentra el núcleo formado por 21 elementos combustibles de aproximadamente 7x8 cm con 19 placas cada uno y 4 elementos de control con 14 placas dejando el espacio para que se inserten las 4 barras de control tipo horquilla de Ag-In-Cd. El combustible es U₃O₈ enriquecido al 20% en U²³⁵ [4]. Esta instalación utiliza agua liviana como moderador y refrigerante, y grafito como reflector. El caudal de refrigeración es de 1500 m³/h en convección forzada descendente. El tanque del reactor de 80 m³ cuenta con una columna térmica y canales de irradiación donde podría ubicarse el dispositivo estudiado en este trabajo.

Reactor RA-10

La CNEA inició la ejecución del proyecto de diseño, construcción y puesta en marcha del reactor de investigación multipropósito RA-10, fundamentalmente, para aumentar la producción de radioisótopos destinados al diagnóstico de enfermedades. Este proyecto además de ampliar las capacidades actuales de producción de radioisótopos sumará desarrollo tecnológico en el campo de los combustibles y materiales nucleares, mediante instalaciones de irradiación adecuadas que permitan incrementar la experiencia que el país tiene en el área y expandirá la oferta de servicios al mercado mundial [4].

El reactor cuyo emplazamiento se encuentra en el Centro Atómico Ezeiza generará una potencia nominal de 30 MW y contará con un núcleo con 25 posiciones distribuidas en un arreglo de 5x5. El núcleo estará compuesto por 19 elementos combustibles del tipo MTR, de 21 placas cada uno conteniendo polvo de siliciuro de uranio con un enriquecimiento de 19.70% de U²³⁵. Las 6 posiciones restantes (4 con espectro térmico y 2 posiciones centrales con espectro rápido) que completan el arreglo de 25 posiciones se utilizarán como dispositivos experimentales. El núcleo se encuentra reflejado radialmente por agua pesada la cual se encuentra contenida y estanca dentro del tanque del reflector. El tanque del reflector cuenta además con posiciones para alojar dispositivos experimentales. El refrigerante es agua liviana y la circulación será forzada en dirección ascendente.

El reactor tendrá 6 barras de control que se insertan verticalmente desde el fondo de la pileta del reactor para la regulación de la reactividad. La inserción rápida de las 6 barras de control por gravedad e inyección de aire comprimido constituirá el primer sistema de parada y contará con un segundo sistema de parada por vaciado del reflector.

1.2 Reactores de Potencia.

Un reactor nuclear de potencia es un sistema de producción de energía que utiliza reacciones nucleares involucradas en la fisión controlada de átomos de Uranio para obtener energía nuclear.

De acuerdo al tipo de moderador, del refrigerante o del rango de energía de los neutrones utilizados para la fisión, se pueden clasificar los diferentes

tipos de reactores nucleares para producción de energía. Las principales líneas actuales son las moderadas y refrigeradas por agua liviana (LWR, Light Water Reactor), las que utilizan agua pesada como moderador (HWR, Heavy Water Reactor), las moderadas a grafito y refrigeradas con gas (GGR, Graphite Gas Reactor), y las que utilizan neutrones rápidos (FBR Fast Breeder Reactor).

Argentina cuenta actualmente con tres centrales nucleares del tipo HWR, dos de ellas (CNA I y CNA II) conocidas como PV-HWR (Pressure Vessel HWR) ya que su núcleo se encuentra en un recipiente de presión donde se ubica el agua pesada que actúa como moderador y refrigerante. Y una tercera (CNE) conocida como CANDU ya que su tecnología es canadiense, en la cual, el refrigerante circula por tubos de presión.

CNA I: la Central Nuclear Juan Perón (ex Atucha I) se ubica en la ciudad de Lima, provincia de Buenos Aires, y genera 357 MW de potencia eléctrica empleando 250 elementos combustibles formados por 37 barras cada uno con pastillas de UO_2 levemente enriquecido (ULE, 0.85% de U^{235}) envainadas en Zircaloy ^[5].

CNE: la Central Nuclear Embalse está ubicada en la provincia de Córdoba, emplea como combustible en sus 380 canales, uranio natural (0,7% de U^{235}), y genera 648 MWe de potencia bruta ^[6].

CNA II: la Central Nuclear Nestor Kirchner (ex Atucha II) está ubicada en forma contigua a CNA I y genera 745 MW de potencia eléctrica empleando 451 elementos combustibles formados por 37 barras cada uno con pastillas de UO_2 natural envainadas en Zircaloy ^[7].

Además, el país cuenta con distintos acuerdos con China para trabajar en la cuarta central, la cual utilizará un reactor tipo CANDU de uranio natural y agua pesada similar a CNE y tendrá una potencia de aproximadamente 800 MW ^[8].

A su vez, se prevé la instalación de una quinta central nuclear, pero en este caso del tipo PWR, tecnología que no existe hoy en Argentina por lo que en ese caso resurgiría la importancia de contar con dispositivos para ensayo y desarrollo de nuevos combustibles.

1.3 Central Argentina de Elementos Modulares (CAREM).

El CAREM es la primera central nuclear de potencia íntegramente diseñada y construida en Argentina, lo cual marca un hito para la industria nuclear nacional, que ha demostrado una constante evolución desde la creación de CNEA. Prevé que al menos el 70% de sus insumos, componentes y servicios vinculados sean provistos por empresas nacionales.

Ese tipo de reactores tiene una gran proyección para el abastecimiento eléctrico de zonas alejadas de los grandes centros urbanos o polos fabriles con alto consumo de energía. Ofrecen también otras prestaciones, como desalinización o provisión de vapor para diversos usos industriales.

La obra civil del CAREM comenzó el 8 de febrero de 2014 en la localidad de Lima, Provincia de Buenos Aires. Es un reactor tipo PWR integrado que generará una potencia térmica de 100 MWt y una potencia eléctrica de 27 MWe. Tendrá un riguroso estándar de seguridad, obtenido mediante soluciones de alta ingeniería que simplifican su construcción, operación y mantenimiento.

Por su concepción, diseño e ingeniería aplicada, el CAREM presenta dos aspectos esenciales que simplifican su construcción, operación y mantenimiento.

En primer lugar, los sistemas pasivos de seguridad, que para accionarse dependen de leyes básicas de la física y no de sistemas activos que requieren alimentación eléctrica y mantenimiento adicionales. En la central CAREM, los mecanismos de control se accionan en forma hidráulica y administran el funcionamiento de dos conjuntos de barras. Uno actúa durante la operación, insertando o retirando el material absorbente según se requiera. Y otro, el sistema de extinción rápida, que actúa sólo en caso de ser necesario “apagar” el reactor en el que las barras caen por gravedad, insertándose en los elementos combustibles y deteniendo por completo la reacción nuclear en sólo un par de segundos.

Segundo, la integración de todo el circuito primario, parte del circuito secundario (los generadores de vapor) y los mecanismos de control en un solo recipiente de presión autopresurizado (RP). Dentro del RP el agua del circuito primario circula por convección natural producida por las diferentes temperaturas que ocurren dentro del recipiente y la ubicación de sus fuentes a distintas alturas. La “fuente caliente” (el núcleo) y “fuente fría” (los generadores de vapor) están ubicadas con una diferencia de altura tal que garantiza que el agua suba por el centro del RP al calentarse cuando toma contacto con el núcleo, y descienda luego por las paredes del recipiente, enfriándose al “bañar” y entregar parte de su temperatura a los generadores de vapor. Al llegar a la base del RP, el agua se calentará al atravesar los elementos combustibles y comenzará nuevamente el proceso. Otra de las ventajas que genera la integración es la reducción significativa de caños y otras conexiones hacia el exterior del RP, lo cual prácticamente elimina la posibilidad de la pérdida de líquido refrigerante, asociado habitualmente a las roturas de cañerías. La integración en el RP también incluye a los mecanismos que accionan las barras de control, compuestas por elementos capaces de absorber los neutrones que se liberan durante el proceso de fisión nuclear.

El RP es una vasija de gran tamaño (11 metros de altura por 3.4 metros de diámetro, aproximadamente) diseñada para operar a elevadas temperaturas y en condiciones de alta presión. Sus paredes tienen un espesor de entre 13 y 20 cm de acero con un revestimiento interior de acero inoxidable y se encuentran rodeadas por una gruesa estructura de hormigón y acero que actúa como contención y blindaje. El refrigerante es agua liviana, que actúa además como moderador y transfiere el calor del núcleo al sistema secundario a través de 12 generadores de vapor. El vapor generado provoca el movimiento de una turbina conectada a un generador eléctrico que transforma esa energía en energía eléctrica.

El núcleo del CAREM contiene 61 elementos combustibles (EC) y 25 elementos absorbentes. Cada EC, de sección hexagonal, está compuesto por 108 barras combustibles, 18 tubos guía para barras absorbentes y 1 tubo guía para instrumentación. El combustible es Uranio de bajo enriquecimiento (entre 1.8 y 3.1%) y algunas pastillas contienen venenos quemables (Gd_2O_3) que ayudan a mantener controlado el proceso de fisión ^[4][9].

1.4 Descripción de la cápsula de irradiación.

Una cápsula de irradiación es un elemento simple que, en forma limitada, permite conocer el comportamiento térmico de una barra combustible y realizar observaciones micro estructurales post irradiación. Consiste en un contenedor que permite generar una barrera térmica adecuada para emular el perfil térmico de un reactor de potencia en un reactor experimental.

En particular, para el diseño de la cápsula para ensayo del combustible tipo CAREM en el reactor RA-3, el sistema está conformado por una pastilla de combustible (UO_2) de 0.76 cm de diámetro, un gap interno (Gap1) de 0.005 cm relleno de Helio, una vaina de Zircaloy-4 de 0.08 cm de espesor, y la cápsula propiamente dicha que se construye con otro gap (Gap2) de espesor a determinar y 0.08 cm de una vaina exterior de Zircaloy-4. El tamaño de la caja de irradiación es de aproximadamente 7x8 cm (mismas dimensiones de un elemento combustible del RA-3) y se quieren colocar varias cápsulas dentro. La figura 1 muestra un modelo de dicho sistema.

En un reactor de potencia la temperatura en la superficie exterior de la vaina de la barra combustible se encuentra aproximadamente entre 200-300°C. La barrera térmica generada por la cápsula debe ser tal que permita obtener valores dentro de este rango de temperatura siendo que en un reactor experimental ésta no supera los 100°C.

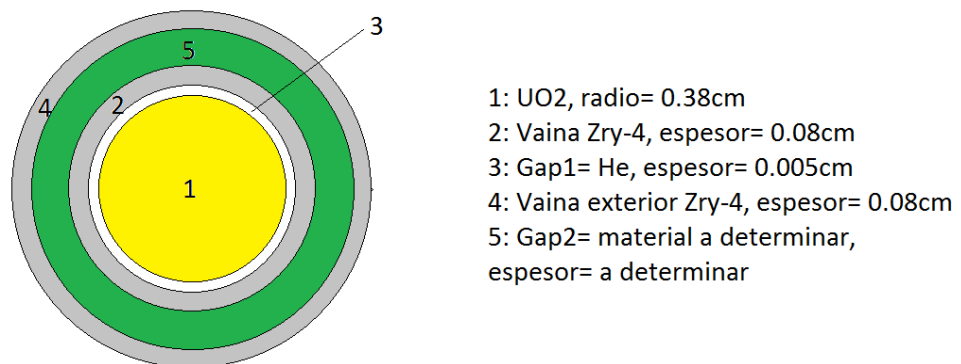


Figura 1: Modelo de una cápsula de irradiación

1.5 Estudios previos (antecedentes)

La Gerencia de Combustible Nuclear del Centro Atómico Constituyentes, CNEA ha realizado varios estudios y actividades previas relacionadas con el tema del presente trabajo, entre ellas:

- inició el diseño de una cápsula de irradiación de fácil adaptabilidad a un reactor experimental.
- Diseñó un código de cálculo para describir el comportamiento de una barra combustible dentro de una cápsula de irradiación obteniendo resultados satisfactorios. El código es una modificación al programa de cálculo DIONISIO y permite obtener la distribución de temperatura para un esquema como el de la figura 1.

- Diseñó una caja con varias cápsulas para ser ubicada en la periferia del reactor RA-3. El número de cápsulas fue elegido mediante cálculos termohidráulicos conservando las velocidades superficiales de la cápsula adecuadas (aproximadamente 4 m/s). La figura 2 muestra imágenes de dicha caja. Las cápsulas fueron construidas a partir de las vainas de la central CNA I.

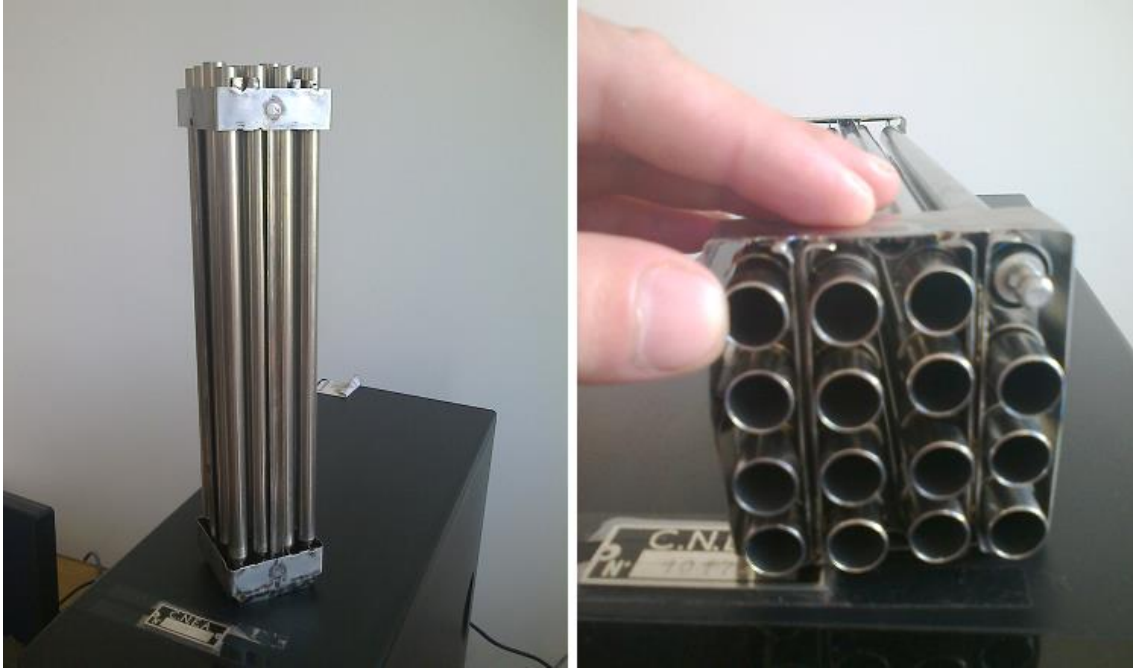


Figura 2: Caja de cápsulas de irradiación.

1.6 Código de cálculo.

Los cálculos para la obtención del tamaño de gap adecuado para cada uno de los materiales estudiados en este informe se realizaron con el código de cálculo mencionado anteriormente, desarrollado por la Sección Códigos y Modelos de la Gerencia Combustible Nuclear del Centro Atómico Constituyentes, CNEA. Dicho código, estima numéricamente la distribución térmica dentro de la cápsula, incluyendo la barra en su interior mediante una modificación al programa DIONISIO desarrollado por el mismo sector para la simulación del comportamiento del combustible bajo irradiación.

DIONISIO analiza las principales situaciones termohidráulicas, termomecánicas y termoquímicas a las que el combustible nuclear, sea para reactores de potencia como de investigación, se ve sometido durante su permanencia en el reactor. Está basado en la metodología de elementos finitos para discretizar los dominios involucrados y resolver numéricamente las ecuaciones diferenciales relacionadas con cada problema, y contiene más de 60 modelos interconectados. En un comienzo se abocó a combustibles de reactores en condiciones de operación normal pero luego se han introducido numerosas modificaciones en el código extendiendo su versatilidad y sus capacidades, permitiendo modelar condiciones de alto quemado y de accidentes severos. A su vez, actualmente incluye la opción de simular una barra completa, dividiéndola en segmentos en la dirección axial, a elección del

usuario, permitiendo tener en cuenta la variación axial de la potencia lineal en el reactor.

El código DIONISIO se empleó para simular una extensa serie de experimentos, en particular ha participado en el experimento internacional FUMEX III (FUEL Modelling EXperiment) organizado por el OIEA entre 2008 y 2011^[10]. Los resultados de las simulaciones realizadas en el marco de ese proyecto fueron contrastados con más de 30 experimentos que involucran mediciones de diferentes parámetros efectuadas en más de 150 barras irradiadas. El alto número de casos testeados y la buena calidad de las predicciones obtenidas autorizan a considerar a DIONISIO como una herramienta confiable de simulación ^{[2][11][12][13]}.

En particular el Código utilizado para este trabajo resuelve una geometría unidimensional que permite calcular el perfil de temperatura de un sistema conformado por una pastilla combustible, el gap, la vaina de Zircaloy-4, y la cápsula que se construye de otro gap y el material de la vaina exterior. La entrada del programa, contiene además de parámetros relativos al diseño y condiciones de operación, la historia de potencia a la que será sometida la cápsula.

1.7 Descripción del Modelo.

El código construido para la simulación del comportamiento térmico de la cápsula de irradiación que se estudia en el presente informe trabaja sobre un dominio que representa a una pastilla, el gap interno, la vaina, un gap externo y una segunda vaina, y posee simetrías de revolución sobre el eje z, y axial sobre un plano que corta en dos la pastilla (Figura 3). Los materiales involucrados en el cálculo además del que se quiere seleccionar como relleno para generar la barrera térmica, son: el combustible, el helio que rellena el gap de la barra combustible y el Zircaloy de las vainas.

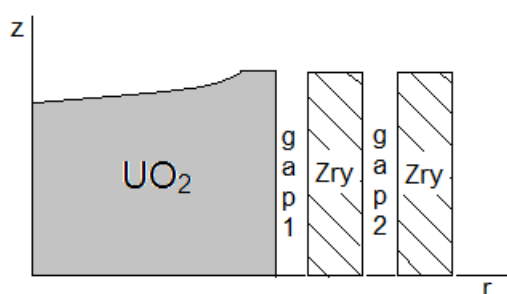


Figura 3: Esquema bidimensional de una sección longitudinal correspondiente a media pastilla dentro de la cápsula.

Las ecuaciones que describen la generación y transferencia del calor en el sistema pastilla-gap1-vaina1-gap2-vaina2 son:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\kappa_r^h(T) r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa_z^h(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -Q^h(r)$$

donde κ^h es la conductividad térmica para $h =$ pastilla, gap1, vaina1, gap2 o vaina 2, y el valor para el término independiente Q^h es:

$$Q^h = \begin{cases} Q^{UO_2} & \text{potencia generada por la pastilla} \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

Se emplearon para las conductividades térmicas κ^h las ecuaciones empíricas:

$$\kappa^{UO_2}(T) = \frac{1}{0.034944 + 2.2430 \times 10^{-4} T} + \frac{6.157 \times 10^9}{T^2} \exp\left[-\frac{1.41 \times 1.6 \times 10^{-19}}{kT}\right]$$

$$\kappa^{V1}(T) = \kappa^{V2}(T) = 7.51 + 2.09 \times 10^{-2} T - 1.45 \times 10^{-5} T^2 + 7.67 \times 10^{-9} T^3$$

$$\kappa^{Gap1} = 2.639 \times 10^{-3} \cdot T^{0.7085}$$

$\kappa^{Gap2}(T)$ = Modelos analizados más adelante para el caso de cada material.

con T en K y κ en W/mK [3][14].

Las condiciones de contorno utilizadas en el sistema serán: nulas en la dirección z , mientras que en la dirección radial:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{R=0} &= 0 \\ h_{UO_2-V1}(T(R_{UO_2}) - T(R_{intV1})) &= \frac{P_1}{2\pi R_{UO_2}} \\ \left(\kappa_{V1}(T) \frac{\partial T}{\partial r}\right) &= -\frac{P_1}{2\pi R_{intV1}} \\ T(R_{extV2}) &= T_{ext} \end{aligned}$$

donde P_1 es la potencia lineal generada, R_{UO_2} , R_{intV1} y R_{extV2} son los radios exterior del combustible e interior y exterior de la vaina interna y externa respectivamente, y h_{UO_2-V1} es la conductancia entre la superficies del combustible y la vaina. T_{ext} es la temperatura de la cara externa de la vaina 2 que se elige constante para la porción de resolución. La conductancia total del gap corresponde a la suma de tres términos $h_{tot} = h_s + h_{rad} + h_{gasmix}$ uno de contacto (diferente de cero si el gap está parcial o totalmente cerrado), un término de radiación y uno de conductividad gaseoso que dependerá de la composición de la atmósfera. En el caso analizado en esta tesina, no se espera alcanzar punto de contacto entre las pastillas y la vaina por lo que el término de

conductancia referirá solamente al conformado por la suma del gaseoso y del de radiación.

2 RESULTADOS Y DISCUSIONES

2.1 Validación: comparación de resultados analíticos con el código de cálculo.

En primer lugar se realizó un cálculo analítico en base a la geometría de trabajo que arroja una predicción para el perfil de temperaturas de la forma [15][16]:

$$T_{cent} = T_{ext} + \frac{1}{4\pi k_{UO2}} + \frac{P_l}{2\pi} \left(\frac{1}{k_{Gap1}} \ln \left(\frac{R_{intV1}}{R_{UO2}} \right) + \frac{1}{k_{V1}} \ln \left(\frac{R_{extV1}}{R_{intV1}} \right) + \frac{1}{k_{Gap2}} \ln \left(\frac{R_{intV2}}{R_{extV1}} \right) + \frac{1}{k_{V2}} \ln \left(\frac{R_{extV2}}{R_{intV2}} \right) \right)$$

Donde,

T_{cent} : Temperatura en el centro de la pastilla [°C].

T_{ext} : Temperatura en la pared externa de la vaina externa (vainas 2) [°C].

P_l : Potencia lineal [W/cm].

k_{UO2} : Conductividad térmica de la pastilla combustible [W/cm °C].

k_{Gap1} : Conductividad térmica del gap interno (gap1) [W/cm °C].

k_{V1} : Conductividad térmica de la vaina interna (vainas 1) de Zircaloy [W/cm °C].

k_{Gap2} : Conductividad térmica del gap externo (gap2) [W/cm °C].

k_{V2} : Conductividad térmica de la vaina externa de Zircaloy [W/cm °C].

R_{UO2} : Radio de la pastilla combustible [cm].

R_{intV1} : Radio interior de la vaina 1 [cm].

R_{extV1} : Radio exterior de la vaina 1 [cm].

R_{intV2} : Radio interior de la vaina 2 [cm].

R_{extV2} : Radio exterior de la vaina 2 [cm].

Para la comparación se consideraron las siguientes condiciones:

- Conductividades térmicas constantes: $k_{UO2} = 0.027$ W/cm °C, $k_{Gap1} = k_{Gap2} = 0.0022$ W/cm °C, $k_{V1} = k_{V2} = 0.38$ W/cm °C.
- $T_{ext} = 100$ °C
- Distintas potencias lineales: $P_{l1} = 200$ W/cm, $P_{l2} = 300$ W/cm, $P_{l3} = 400$ W/cm.
- Una barra combustible tipo CAREM, un gap2 de helio de 80 micrones y una vaina externa de Zircaloy del mismo espesor que la interna definiendo los radios requeridos de la siguiente manera:

$$R_{UO2} = 0.38 \text{ cm,}$$

$$R_{intV1} = R_{UO2} + 0.005 \text{ cm} = 0.385 \text{ cm,}$$

$$R_{extV1} = R_{intV1} + 0.08 \text{ cm} = 0.465 \text{ cm,}$$

$$R_{intV2} = R_{extV1} + 0.008 \text{ cm} = 0.473 \text{ cm,}$$

$$R_{extV2} = R_{intV2} + 0.08 \text{ cm} = 0.553 \text{ cm.}$$

Para comparar con este resultado analítico se configuró el código considerando transferencia de calor por conductividad en todo el dominio. Los resultados obtenidos en forma analítica como en forma numérica se resumen en la figura 5.

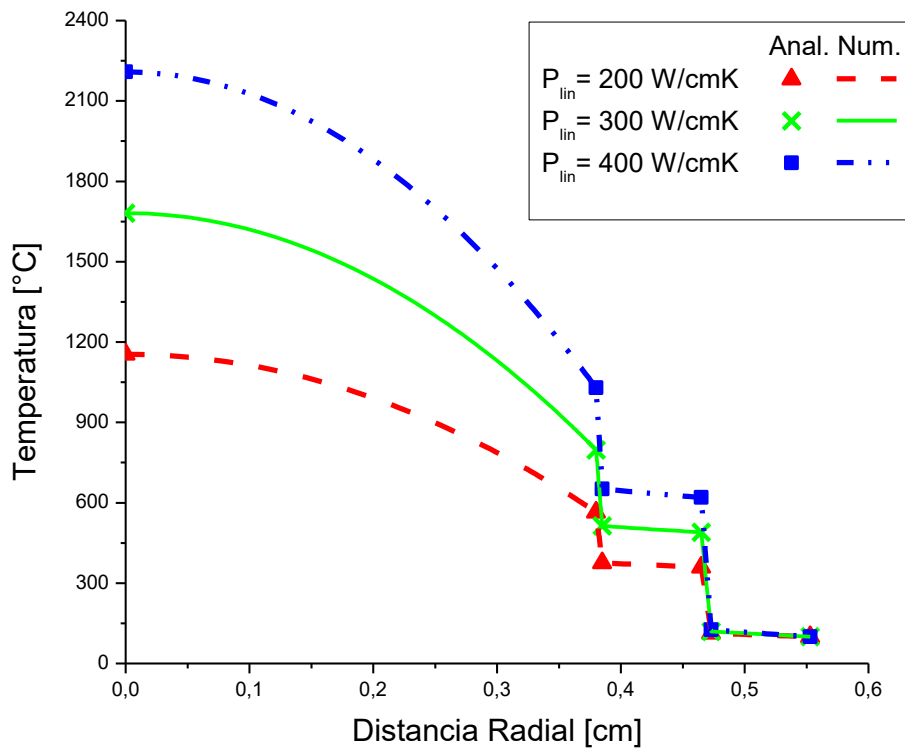


Figura 5: Distribución de temperaturas en todo el dominio de la cápsula para distintas potencias lineales, $T_{ext}=100^{\circ}\text{C}$, $gap_2= 80\text{micrones}$.

De igual manera se realizó una variación en el tamaño de gap externo para una potencia lineal de 300 W/cm. En la figura 6 se comparan todos los resultados analíticos y numéricos. En esta figura, se observa una adecuada predicción del código de cálculo con respecto a los resultados obtenidos en forma analítica con cada una de las potencias lineales estudiadas y con los distintos tamaños de gap analizados [10, 20, 40, 80] micrones.

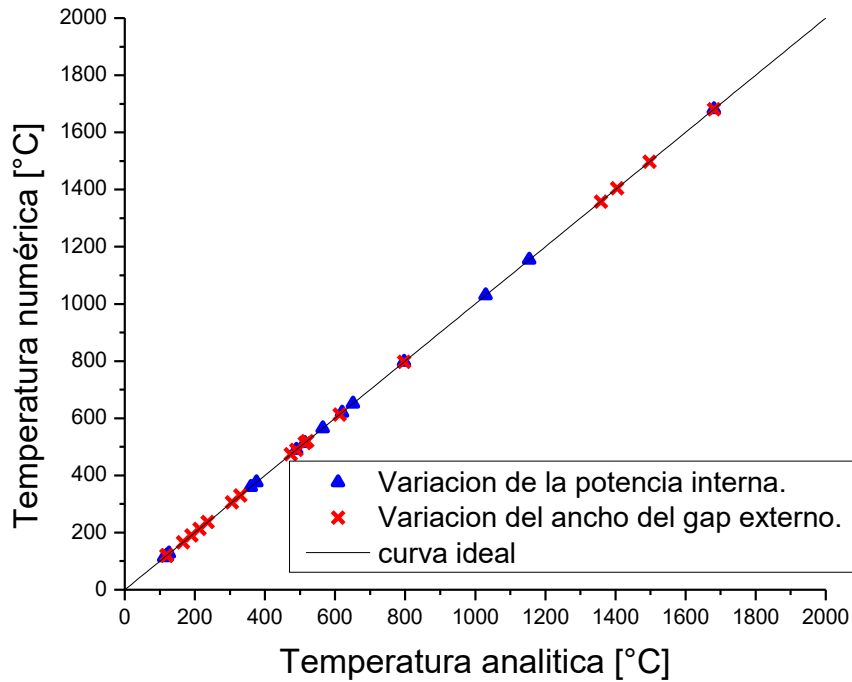


Figura 6. Comparación entre resultados analíticos y numéricos para distintas potencias lineales y anchos de gap

2.2 Helio. Cálculo de gap adecuado.

El helio por sus características inertes suele utilizarse en la industria nuclear para rellenar el gap que queda entre las pastillas y las vainas de las barras combustibles. Por esta razón, se propuso utilizar este gas para generar la barrera térmica necesaria para el diseño de la cápsula.

A continuación se presenta el cálculo del espesor de gap externo adecuado para obtener el perfil térmico deseado, considerando una potencia lineal de 300 W/cm y las conductividades térmicas dependientes de la temperatura. Para la zona de interés, se utilizó la siguiente correlación utilizada también en el gap1.

$$\kappa^{Gap2} = 2.639 \times 10^{-3} \cdot T^{0.7085} \frac{W}{m \cdot K}$$

Se realizaron distintas corridas del código para distintos espesores obteniéndose los perfiles mostrados en la figura 7.

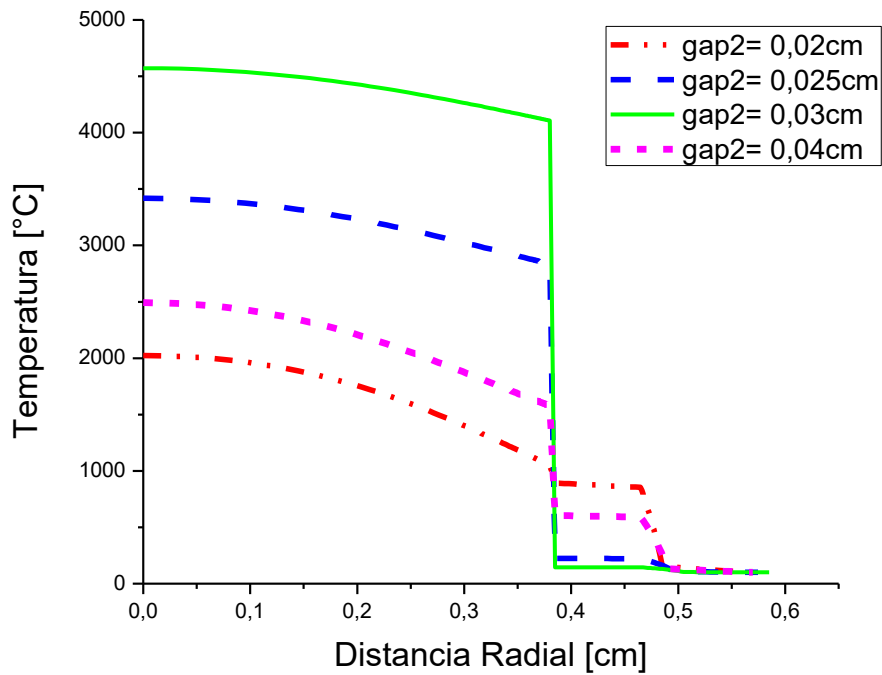


Figura 7: Distribución de temperaturas en todo el dominio, $T_{ext}=100^{\circ}\text{C}$, $P_i=300\text{W/cm}$, gap2 de He, k dependiente de T.

En la figura 8 se muestran la variación de la temperatura de la pared externa de la barra combustible (T_{extV1}) y de la temperatura en el centro de la pastilla (T_{cent}) en función del espesor del gap2.

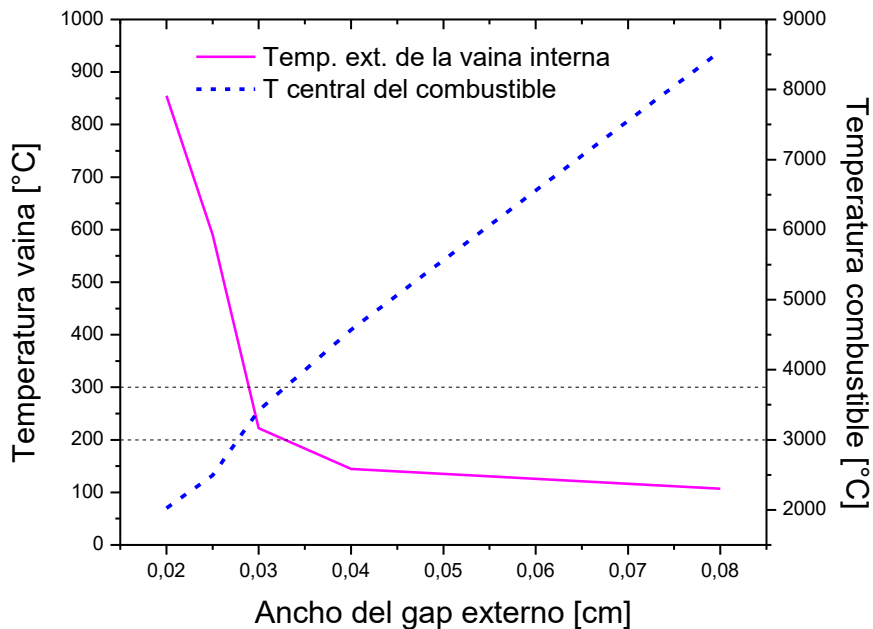


Figura 8: Temperaturas central y externa de la barra combustible. $T_{ext}=100^{\circ}\text{C}$, $P_i=300\text{W/cm}$, gap2 de He.

De los resultados mostrados en la figura 8 puede concluirse que para obtener en la pared de la barra combustible una temperatura que se encuentre

entre los 200 y 300°C, el gap2 debe tener un espesor de aproximadamente 0.03 cm (300 micrones). A su vez, esta distancia, repercute de manera significativa en la temperatura externa de la vaina 1, viéndose importantes variaciones de T_{extV1} para pequeños cambios de gap2.

2.3 Determinación de conductividad térmica para un gap de 800 micrones.

Como se mencionó anteriormente, el grupo que se encuentra diseñando la cápsula armó una caja de irradiación con 16 dispositivos contruidos a partir de las vainas de barras combustibles de CNA I (figura 2).

Si se quisiera respetar este diseño y construir la cápsula de irradiación a partir de la vaina de las barras combustibles de la Central Nuclear Atucha I (CNA I) como contenedor externo se obtendría un espacio de aproximadamente 0.08 cm entre la pared externa de la barra combustible a irradiar y la pared interna del contenedor.

Para comenzar se consideró, entonces, un gap externo de 0.08 cm y se buscó un rango de conductividades térmicas adecuadas para obtener el perfil térmico deseado realizando distintas corridas en el código de cálculo.

Para ello se consideró una potencia lineal de 300 W/cm y correlaciones para las conductividades térmicas de las zonas ya definidas anteriormente dependientes de la temperatura.

En la figura 9 se muestran los resultados obtenidos para la temperatura de la cara externa de la vaina 1 y la temperatura central de la pastilla combustible.

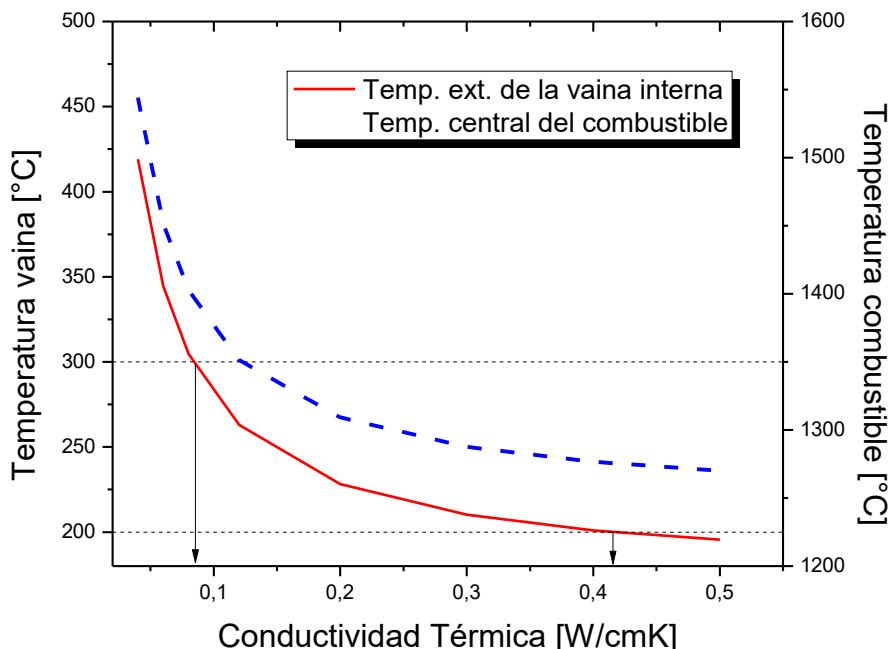


Figura 9: Temperaturas central y externa de la barra combustible. $T_{ext}=100^{\circ}\text{C}$, $P_1=300\text{W/cm}$, k variable.

Puede observarse que considerando aceptable una temperatura entre 200 y 300°C, el rango adecuado de conductividad térmica para rellenar un gap de 0.08 cm estaría entre [0.08 – 0.4] W/(cm K). A su vez, para estos valores de

conductividad, se puede ver que la temperatura en el centro de la pastilla se encontraría en el rango [1400-1270] °C.

2.4 Selección de materiales sólidos candidatos.

A partir de los resultados obtenidos en el punto anterior se realizó una revisión bibliográfica para seleccionar materiales que resulten posibles candidatos a rellenar el gap externo de la cápsula.

De los materiales para los que se encontró información de medidas de conductividad térmica para distintas temperaturas, los que se muestran en la tabla 1 son los seleccionados como posibles candidatos a rellenar el gap2.

Material	Conductividad térmica a 300K [W/cm K]
Zircaloy-4	0.38
Al2O3 98% densa	0.36
TiO2 98%denso	0.084
Inconel X-750	0.117

Tabla 1. Materiales seleccionados para su estudio como relleno del gap2 ^{[18][19]}.

Debido a la falta de datos de conductividad térmica sobre materiales porosos se utilizarán modelos para la determinación de dicha propiedad de estos materiales.

2.5 Materiales sólidos estudiados.

2.5.1 Zircaloy-4

El Zircaloy es una aleación de circonio que posee muy baja sección eficaz de absorción de neutrones térmicos, buenas propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión por lo que es utilizada en la industria nuclear como material de las vainas de combustibles en reactores nucleares. Una de estas aleaciones es el Zry-4, material seleccionado para la construcción de las vainas combustibles del reactor CAREM y tiene una conductividad teórica de 0.38 W/(cm K) a 300K por lo que se encuentra dentro del rango obtenido para un gap de 800 micrones.

Por estos motivos, se consideró la posibilidad de incluirlo como candidato de relleno del gap externo y se procedió a realizar un cálculo con la conductividad dependiente de la temperatura para determinar el tamaño de gap adecuado.

La ley de conductividad térmica del Zircaloy en función de la temperatura es la utilizada para simular las vainas:

$$\kappa^{Gap2}(T) = \kappa^{Zry}(T) = 7.51 + 2.09 \times 10^{-2} T - 1.45 \times 10^{-5} T^2 + 7.67 \times 10^{-9} T^3$$

En la figura 10 puede observarse la variación de la temperatura de superficie externa de la vaina de la barra combustible en función del espesor de aleación utilizada como relleno.

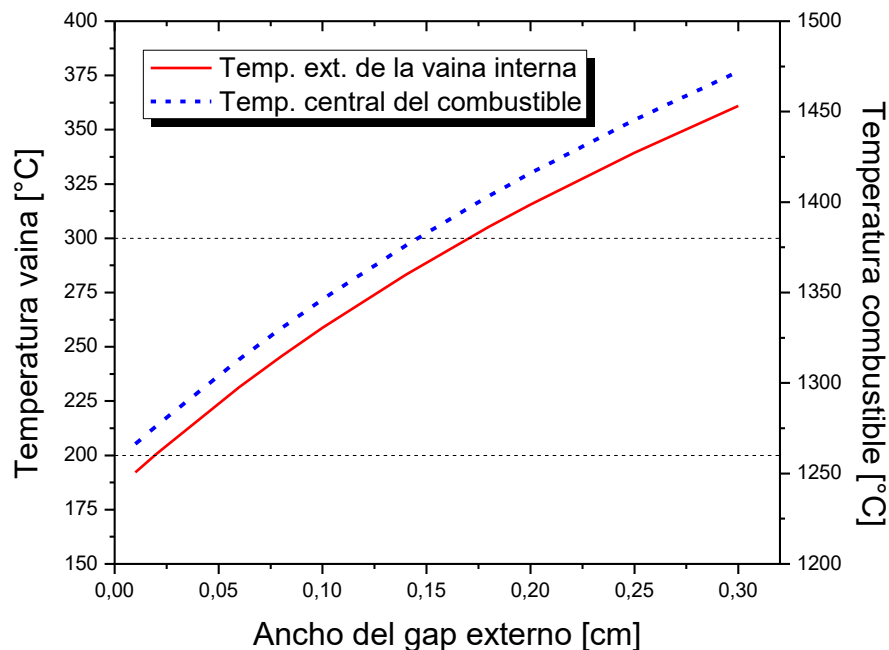


Figura 10: Temperaturas central y externa de la barra combustible. $T_{ext}=100^{\circ}\text{C}$, $P_i=300\text{W/cm}$, gap2 de Zry-4.

Se concluye que, como resultado de un relleno de Zry-4 de entre 0.02 y 0.2 cm de espesor, se obtendría una temperatura en la cara externa de la barra combustible dentro del rango solicitado.

Para una separación de 0.18 cm entre la barra y el cilindro contenedor, la temperatura externa de la barra sería de 305.3°C y la temperatura en el centro de la pastilla de 1403.3°C .

2.5.2 Alúmina (Al_2O_3)

Considerando un relleno de alúmina policristalina de 99.5% de pureza y 98% densa, se realizó un cálculo para determinar el tamaño adecuado del gap.

La siguiente ecuación corresponde a la correlación utilizada para la conductividad térmica (en W/cm K) de dicha especie en función de la temperatura y fue obtenida a partir de datos experimentales ^[18].

$$k = 191.66T^{-1.105}$$

En el anexo 1 se encuentran los cálculos para la obtención de esta correlación.

En la figura 11 puede observarse que para un gap de alrededor de 0.25 cm se obtendría la temperatura deseada en la pared externa de la vaina de la barra combustible. Las temperaturas calculadas para 0.25 cm de gap son 300.82°C para la cara externa de la vaina de Zry y 1397.79°C para la temperatura máxima en el centro de la pastilla.

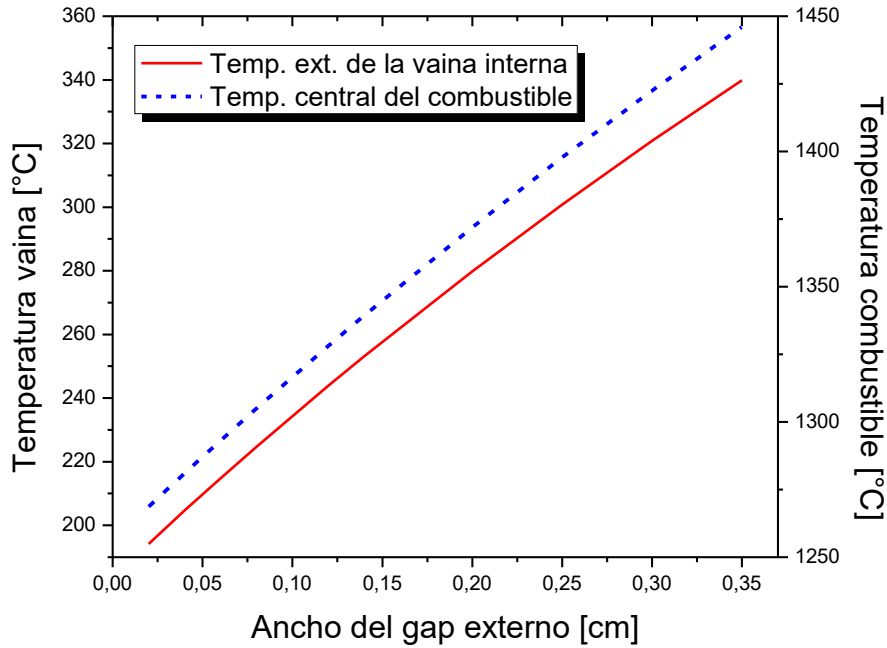


Figura 11: Temperaturas central y externa de la barra combustible. $T_{ext}=100^{\circ}\text{C}$, $P_1=300\text{W/cm}$, gap2 de Al_2O_3 99.5% pura y 98% densa.

Alúminas porosas

Generalmente la conductividad de un sólido disminuye con el aumento de espacios (poros) en la estructura. Por lo tanto se procede al análisis de alúminas más porosas de forma de disminuir la conductividad térmica del material y poder usar menos gap para generar la misma barrera térmica.

Para ello se buscaron leyes que relacionen la conductividad de los materiales con su porosidad seleccionándose la siguiente:

$$k_{ef} = k_0 \left(1 - \frac{3p}{2+p} \right)$$

donde k_{ef} y k_0 son las conductividades térmicas del material poroso y de la fase sólida respectivamente y p es la porosidad ^[17].

En el anexo 1 se puede ver una comparación de los resultados obtenidos con esta ley y otras 2 encontrándose resultados similares.

En la figura 12 se muestra la variación de la temperatura de pared externa de la barra combustible en función del gap externo para Al_2O_3 con porosidades de 0.02, 0.1 y 0.3 utilizando en el código de cálculo la ley antes mencionada

Como se vio anteriormente, para Al_2O_3 policristalina 98% densa el gap externo adecuado es de aproximadamente 0.25 cm. En cambio, para especies más porosas ese gap disminuye obteniéndose que para una porosidad del 10%, el espacio adecuado entre la pared externa de la barra y la interna del contenedor es aproximadamente 0.21 cm; mientras que para un relleno con alúmina con una porosidad del 30% el gap adecuado se encuentra alrededor de 0.13 cm.

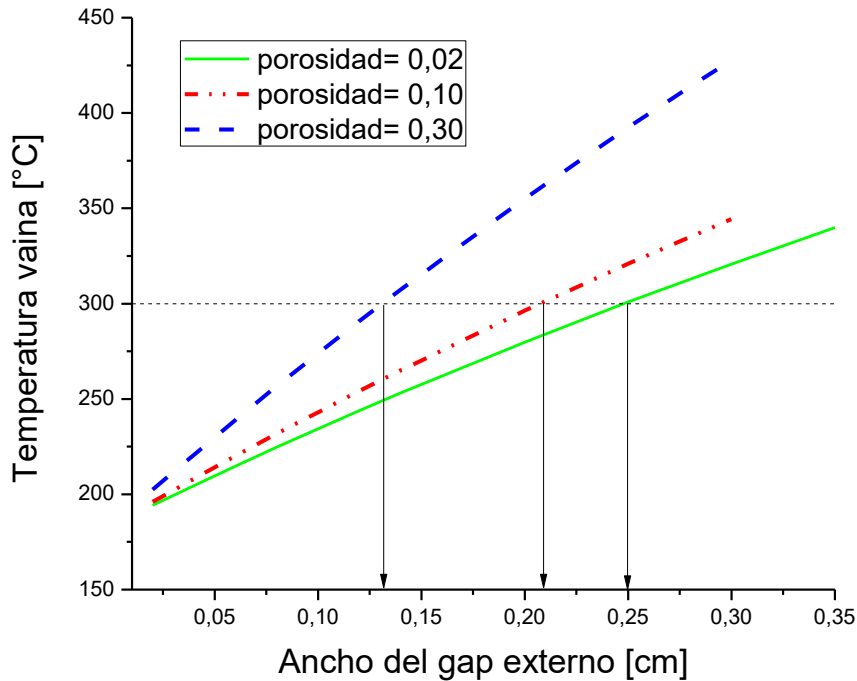


Figura 12: Temperatura externa de la barra combustible. $T_{ext}=100^{\circ}\text{C}$, $P_1=300\text{W/cm}$, gap2 de Al_2O_3 con distinta porosidad.

2.5.3 Dióxido de Titanio (TiO_2)

Considerando un relleno de TiO_2 policristalino de 99.5% de pureza y 98% densa, se realizó el cálculo para determinar el tamaño adecuado del gap por medio del código de cálculo.

La correlación para la conductividad térmica en $\text{W}/(\text{cm K})$ de dicha especie en función de la temperatura fue obtenida a partir de datos experimentales^[18].

$$k = -6 \times 10^{-11}T^3 + 2 \times 10^{-7}T^2 - 0.0003T + 0.1485$$

En el anexo 1 se encuentran los cálculos para la obtención de esta correlación.

En la figura 13 puede observarse que el espesor de TiO_2 para generar una barrera térmica adecuada se encuentra entre $[0.02 - 0.04]$ cm.

Obteniéndose para un gap de 0.035 cm una temperatura de 298.96°C en la cara externa de la vaina de la barra combustible y 1395.61°C de temperatura en el centro de la pastilla.

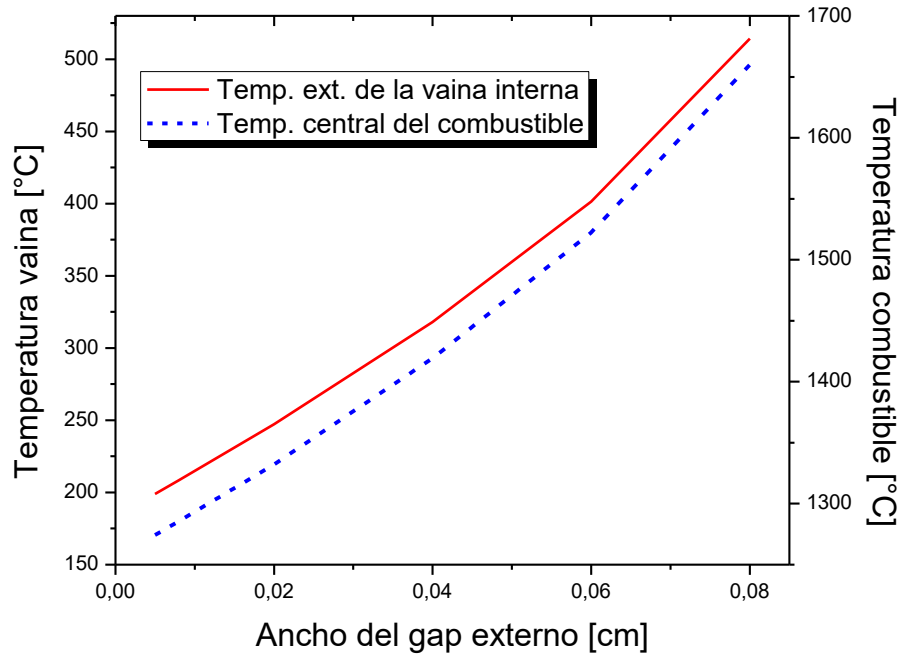


Figura 13: Temperaturas central y externa de la barra combustible. $T_{ext}=100^{\circ}\text{C}$, $P_1=300\text{W/cm}$, gap2 de TiO_2 99.5% puro y 98% denso.

2.5.4 Inconel X-750

El Inconel, es una familia de aleaciones en base a níquel y cromo, utilizado en centrales nucleares por su resistencia a altas temperaturas, buenas propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión. En este caso se seleccionó el Inconel X-750 (Ni 73%, Cr 15%, Fe 6.7%) y se procedió al cálculo del gap2 adecuado suponiendo un relleno de dicha aleación. Para ello, se utilizó en el código de cálculo la siguiente correlación para la dependencia de la conductividad con la temperatura encontrada en base a datos bibliográficos ^[19].

$$k = 1 \times 10^{-13}T^4 - 3 \times 10^{-10}T^3 + 3 \times 10^{-7}T^2 + 8 \times 10^{-5}T + 0.0778$$

con T en K y k en $\text{W}/(\text{cm K})$.

Los resultados obtenidos se resumen en la figura 14.

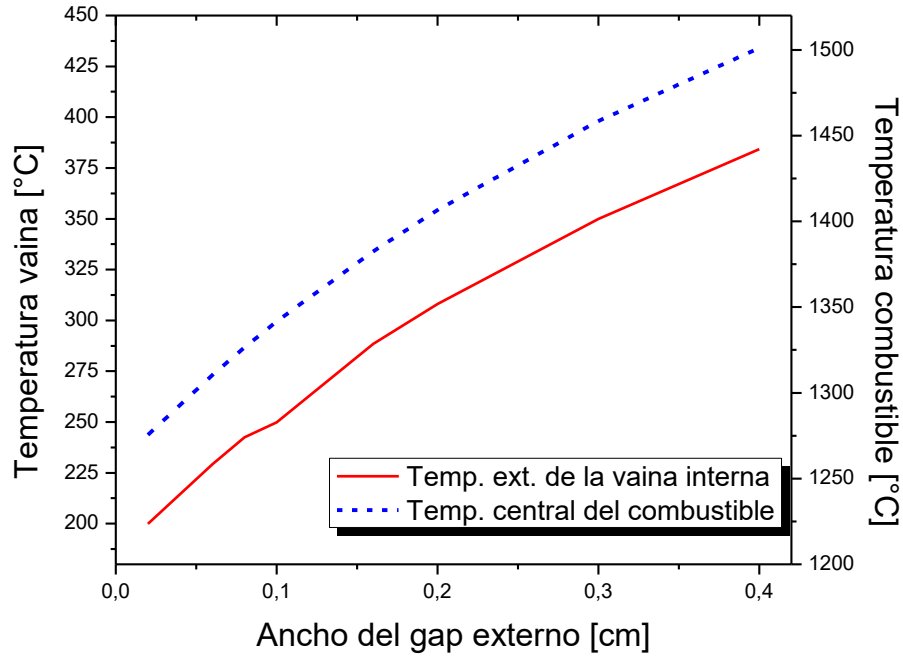


Figura 14: Temperaturas central y externa de la barra combustible. $T_{ext}=100^{\circ}\text{C}$, $P_1=300\text{W/cm}$, gap2 de Inconel X-750.

En la figura, puede observarse que para un gap de entre 0,04 y 0,2 cm, la temperatura de la pared externa de la vaina 1 se encuentra dentro del rango [200-300] °C. En particular, para un gap2 de 0,16 cm se obtienen: $T_{extV1}=288,47^{\circ}\text{C}$ y $T_{cent}=1382,58^{\circ}\text{C}$.

2.5.5 Mezclas Al_2O_3 y TiO_2

Se procedió a realizar el cálculo de gap adecuado para la obtención del perfil térmico requerido realizando una mezcla de alúmina y dióxido de titanio que se utilizó como relleno. Para determinar la conductividad térmica de la mezcla se utilizó la siguiente relación:

$$k_m = k_c \frac{1 + \frac{2V_d \left[1 - \left(\frac{k_c}{k_d} \right) \right]}{1 + 2 \left(\frac{k_c}{k_d} \right)}}{1 - \frac{V_d \left[1 - \left(\frac{k_c}{k_d} \right) \right]}{1 + \left(\frac{k_c}{k_d} \right)}}$$

donde k_m , k_c y k_d son las conductividades térmicas de la mezcla resultante, de la fase continua y de la fase dispersa respectivamente, y V_d es la fracción en volumen de la fase dispersa.

Se consideró como fase continua alúmina (98% densa) y como fase dispersa dióxido de titanio (98% denso), y como k_c y k_d se utilizaron las correlaciones explicadas anteriormente para Al_2O_3 y TiO_2 respectivamente.

En la figura 15 se muestran los resultados para mezclas de alúmina con 30% y 50% de dióxido de titanio y se comparan con los obtenidos para las sustancias puras.

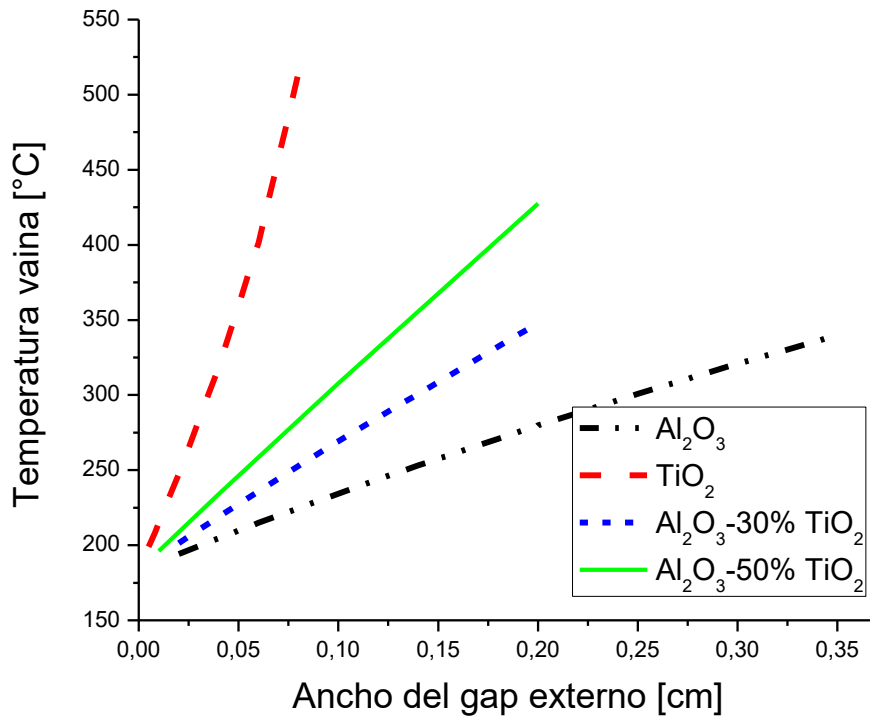


Figura 15: Temperatura de la pared externa de la vaina para distintos espesores de gap2 para Al_2O_3 , TiO_2 y mezclas de Al_2O_3 con 30 y 50% de TiO_2 .

Para ambas mezclas puede observarse que, como se esperaría, la temperatura muestra un comportamiento intermedio entre las sustancias puras con la variación del gap. En particular, para la mezcla Al_2O_3 -30% TiO_2 se obtuvo una temperatura externa de vaina1 de 308.65°C para un gap de 0.15 cm, mientras que para la mezcla Al_2O_3 -50% TiO_2 el gap debe ser de 0.10 cm aproximadamente para que dicha temperatura sea de 307.66 °C.

2.5.6 Resumen de resultados

En la tabla 2 se resumen las temperaturas centrales y externas de la barra combustible obtenidas para un gap2 de 800 micrones con cada uno de los rellenos analizados.

Material	TextV1 [°C]	Tcent [°C]
He	107.20	8544.14
Zry-4	245.50	1330.11
Al2O3 98% densa	224.72	1305.04
Al2O3 90% densa	231.75	1313.48
Al2O3 70% densa	256.63	1343.63
TiO2 98%	514.29	1660.02
Inconel X-750	242.53	1326.50
Al2O3-50%TiO2	283.23	1376.14
Al2O3-30%TiO2	252.80	1338.96

Tabla 2. Temperaturas central y externa de la barra combustible. Gap2=800 micrones.

En la tabla 3 se muestran los gaps requeridos para obtener, con dichos materiales, una temperatura externa de barra combustible dentro del rango de operación de los reactores potencia. En las últimas dos columnas se agregan el diámetro total que tendría la cápsula (D total) y la separación mínima que quedaría entre ellas considerando un arreglo de 4x4 en la caja de irradiación (pitch min 4x4).

Material	Gap2 [cm]	TextV1 [°C]	Tcent [°C]	D total [cm]	Pitch min 4X4 [cm]
He	0.028	300.00	3080.00	1.156	0.594
Zry-4	0.180	305.30	1403.32	1.460	0.290
Al2O3 98% densa	0.250	300.82	1397.79	1.600	0.150
Al2O3 90% densa	0.200	296.32	1392.24	1.500	0.250
Al2O3 70% densa	0.140	307.50	1406.02	1.380	0.370
TiO2 98%	0.035	298.96	1395.61	1.170	0.580
Inconel X-750	0.160	288.47	1382.58	1.420	0.330
Al2O3-50%TiO2	0.100	307.66	1406.23	1.300	0.450
Al2O3-30%TiO2	0.150	308.65	1407.63	1.400	0.350

Tabla 3. Gaps para una temperatura externa de barra combustible de aprox. 300°C.

Para la determinación del pitch mínimo entre barras en un arreglo 4x4 se consideró una caja de irradiación de 7x8cm.

3 CONCLUSIONES

De acuerdo al análisis realizado en el presente informe, el código de cálculo utilizado para el estudio del comportamiento térmico de una cápsula de irradiación, resultante de una modificación de DIONISIO v2.0, ha demostrado una adecuada predicción respecto de los resultados analíticos obtenidos para distintas potencias internas y gaps entre vainas bajo hipótesis de linealidad de las constantes involucradas.

Los resultados obtenidos utilizando este código muestran que si se quiere mantener un gap de aproximadamente 800 micrones entre la vaina de la barra combustible y la cápsula propiamente dicha, la conductividad térmica del material seleccionado debe encontrarse entre 0.08 y 0.4 W/(cm K) para que la temperatura externa de la barra se encuentre dentro del rango de operación de un reactor de potencia.

De entre todos los materiales estudiados se concluyó que la mezcla de alúmina con un 50% de dióxido de titanio es la más adecuada para utilizar como aislante, obteniéndose que para un gap de 0.08 cm la temperatura de la pared externa de la barra combustible es de 283.23°C.

Por otra parte, tanto el Zry-4 como las alúminas con 10 y 30% de porosidad, el Inconel X-750 o la mezcla Al_2O_3 -30% TiO_2 resultan buenos candidatos para gaps de entre 0.10 y 0.20 cm. Estos valores de gap serían viables y permitirían mantener un diseño de 4 x 4 cápsulas en la caja de irradiación aunque deberían realizarse los cálculos termohidráulicos pertinentes.

Aun, la alúmina 98% densa podría utilizarse como aislante obteniéndose una temperatura de aproximadamente 300°C en el exterior de la vaina para un gap de 0.25 cm.

En cambio, para el caso de TiO_2 y He el gap para generar la barrera térmica adecuada es del orden de los 300 micrones lo cual complicaría su construcción. Además, para el caso del helio se requeriría buena precisión ya que una variación pequeña en el tamaño del gap repercute de manera significativa en la temperatura externa de la vaina.

Se espera poder testear esta predicción por medio de experiencias en un futuro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

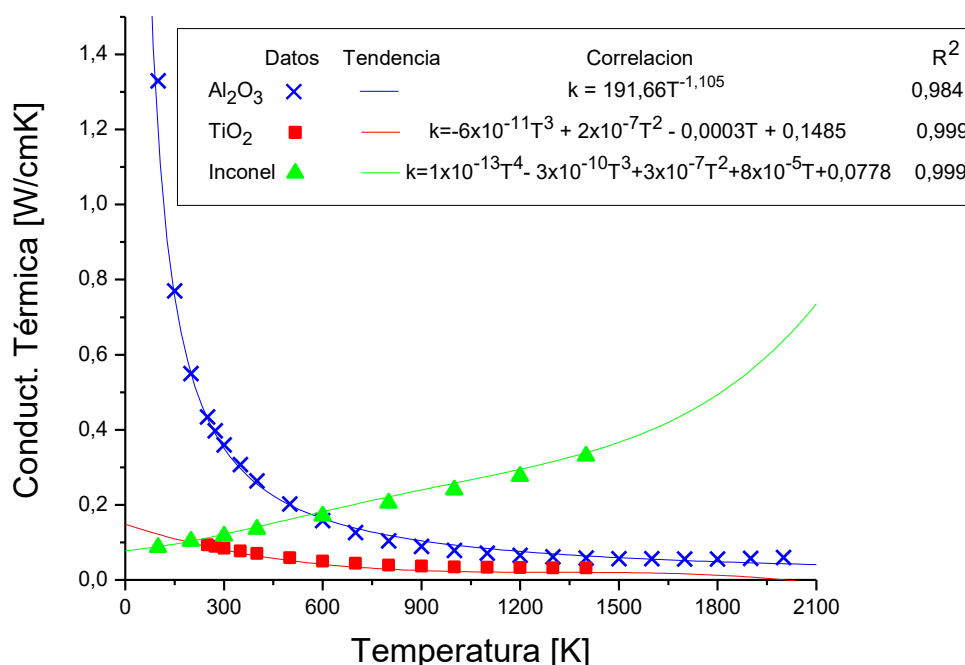
- [1] Marajofsky A., Soba A., Bianchi D., Vazquez L., Marconi J. Estado de avance de los proyectos de dispositivos experimentales para irradiación y de innovación en elementos combustibles. Reunión Anual Ciclo de combustibles, 2015.
- [2] Marajofsky, A. Soba, L. Vazquez. DISEÑO DE UNA CÁPSULA PARA ENSAYO DE IRRADIACIÓN DE BARRAS COMBUSTIBLES". Informe técnico interno. CNEA, 2012
- [3] A. Soba, Simulación del comportamiento termomecánico de una barra combustible en operación. Tesis de doctorado, FCEyN, UBA. 2007
- [4] <http://www.cnea.gov.ar/>
- [5] Centrales Nucleares. Central nuclear Atucha I. Material didáctico, Especialización en reactores nucleares y su ciclo de combustible. 2016. Osvaldo Azpitarte.
- [6] Centrales Nucleares. Central Nuclear Embalse. Material didáctico, Especialización en reactores nucleares y su ciclo de combustible. 2016. Osvaldo Azpitarte.
- [7] Centrales Nucleares. Central Nuclear Atucha II. Material didáctico, Especialización en reactores nucleares y su ciclo de combustible. 2016. Osvaldo Azpitarte.
- [8] <http://www.na-sa.com.ar/>
- [9] Centrales Nucleares. CAREM: un reactor avanzado argentino. Material didáctico, Especialización en reactores nucleares y su ciclo de combustible. 2016. Osvaldo Azpitarte.
- [10] <https://www.iaea.org/>
- [11] Soba, A., Denis, A., Lemes, M., González, DIONISIO 2.0: NUEVA VERSION DEL CODIGO DE SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO DEL COMBUSTIBLE DE POTENCIA BAJO IRRADIACION. AATN 2012.
- [12] Alejandro Soba, Alicia Denis, Martín Lemes, Martín Emilio González, Modelado del comportamiento del combustible nuclear bajo irradiación mediante DIONISIO 2.0. Revista de la CNEA. Año XIV, Número 53/54, Enero/Junio 2014, p. 5-6.
- [13] Lemes, A, Soba, A, H. Daverio, A. Denis. Inclusion of models to describe severe accident conditions in the fuel simulation code DIONISIO. Nuclear Engineering and Design. Volume 315, (2017).
- [14] Handbook of materials properties for use in the analysis of light water reactor fuel behavior, MATPRO version 14.
- [15] F. P. Incropera, D. P. De Witt, Fundamentos de transferencia de calor, cuarta edición, p. 90-106.
- [16] Termohidráulica, capítulo 2: "Mecanismos de transferencia de calor. Aire húmedo y Mecánica de fluidos". Especialización en reactores nucleares y su ciclo de combustible. 2016. Parra S., Parkansky D.
- [17] Perry (2004). "Manual del Ingeniero Químico". 7ª edición, McGraw-Hill.
- [18] R.W.Powell, C.Y.Ho and P.E.Liley, Thermal Conductivity of Selected Materials, NSRDS-NBS 8, Issued November 25, 1966, pages 73-83.
- [19] F. P. Incropera, D. P. De Witt, Fundamentos de transferencia de calor, cuarta edición, Apéndice A: propiedades termofísicas de la materia, p.829.

ANEXO 1: Cálculos auxiliares

A. Obtención de correlación para la conductividad térmica en función de la temperatura.

La conductividad térmica es una propiedad de los materiales que depende, entre otras cosas, de la temperatura. Con el objetivo de poder representar esta dependencia en el código de cálculo utilizado en este trabajo, se procedió a la obtención de correlaciones para los materiales estudiados para rellenar el gap externo de la cápsula. Para ello, se utilizaron datos experimentales de conductividad térmica para distintas temperaturas obtenidos de bibliografía [18][19].

En el siguiente gráfico se muestran las correlaciones obtenidas de conductividad en función de la temperatura para Al₂O₃ 98% densa, TiO₂ 98% denso e Inconel X-750.



B. Comparación de leyes de conductividad en función de la porosidad.

La conductividad térmica de un sólido, en general disminuye con el aumento de poros en la estructura. La falta de datos de esta propiedad para materiales porosos exige la necesidad de recurrir a modelos que relacionen la conductividad térmica de un compuesto con su porosidad.

Entre los modelos existentes se analizaron los siguientes:

$$1) k_m = k_c \frac{1-p}{1+p}$$

$$2) k_d = 1.0789k_{95} \frac{1-p}{1.00+0.5p}$$

$$3) k_{ef} = k_0 \left(1 - \frac{3p}{2+p}\right)$$

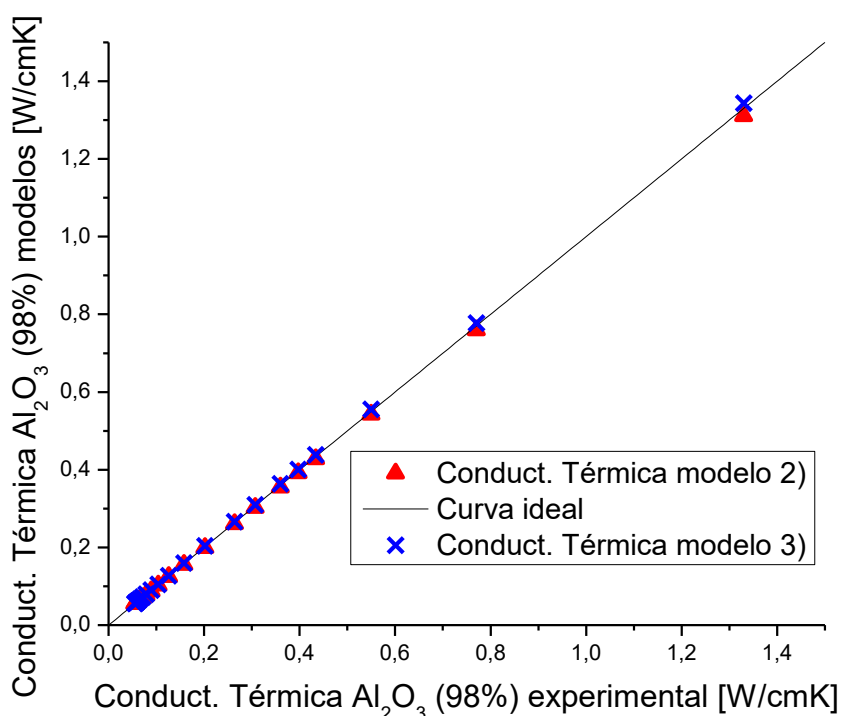
Donde k_m , k_d y k_{ef} se refieren a la conductividad térmica del material poroso obtenida por cada modelo, k_c , k_{95} , k_0 son las conductividades térmicas fase continua, del material 95% denso y de la fase sólida respectivamente, y p es la porosidad.

Para la comparación se utilizaron los valores de conductividad de Al_2O_3 99.5% pura y 98% densa [18].

Debido a que los parámetros utilizados dentro de los modelos se refieren a materiales sin poros o con un 5% de estos, lo primero que se hizo fue determinar la conductividad del material 100% denso a partir de la ecuación 1). Para ello se consideraron los datos obtenidos de bibliografía como k_m con $p=0.02$ y se obtuvieron valores para k_c . A partir de la misma ecuación y k_c para $p=0.05$ se calculó k_{95} .

Por último, para poder realizar la comparación, se determinó la conductividad térmica del material 98% denso por medio de las ecuaciones 2) y 3) utilizando los parámetros antes obtenidos y considerando $k_0 = k_c$.

En la figura siguiente se muestra una comparación de los resultados obtenidos por los modelos 2) y 3) de la conductividad para Al_2O_3 98% densa con los resultados experimentales obtenidos de bibliografía considerados en este caso como k_m de la relación 1).



Se puede observar que la predicción que los modelos hacen de la conductividad térmica para el material con un 2% de porosidad es similar.