

EVALUACIÓN DEL CALENTAMIENTO DE LOS HACES DE NEUTRONES DEL REACTOR DE INVESTIGACIÓN RA10 ANTE LA PÉRDIDA DE REFRIGERACIÓN POR VACIADO DEL TANQUE REFLECTOR

Ezequiel O. Fogliatto^a y Federico E. Teruel^{a,b}

^a*Departamento de Mecánica Computacional, Centro Atómico Bariloche, Av. Ezequiel Bustillo 9500, 8400 San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina, fogliatto@cab.cnea.gov.ar*

^b*CONICET, Centro Atómico Bariloche, Av. Ezequiel Bustillo 9500, 8400 San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina*

Palabras Clave: OpenFOAM, Transferencia de calor conjugada, Radiación, Reactor de investigación

Resumen. La actuación del Segundo Sistema de Parada (SSP) del reactor RA10 involucra el vaciado parcial del fluido contenido en el tanque del reflector (TQREF), lo que origina una degradación de las condiciones de refrigeración de numerosos internos. Entre ellos, los conductos de extracción de neutrones térmicos (HAZT) se encuentran entre los más exigidos desde el punto de vista térmico. Debido a la importancia de estos dispositivos, es necesario realizar un análisis detallado de la evolución del campo de temperatura en los conductos de extracción luego de la actuación del SSP, de modo que pueda verificarse si se superan los límites de diseño establecidos. Con este objetivo, la finalidad del presente trabajo consiste en mostrar los resultados del análisis del comportamiento térmico del conducto de extracción derecho (HAZT-D), el cual fue llevado a cabo a través de simulaciones numéricas de problemas de mecánica de fluidos con transferencia de calor conjugada y transporte por radiación, utilizando la herramienta computacional OpenFOAM. En primer lugar, se abordó el problema empleando modelos bidimensionales de bajo costo computacional, con dominios representativos que permiten evaluar la sensibilidad de los resultados frente a las principales hipótesis de modelado. Por otra parte, se desarrolló un modelo computacional representativo en tres dimensiones, con la inclusión del extremo del HAZT-D y una fracción de las regiones de D₂O y He que lo rodean. La resolución del problema de transferencia de calor conjugada en este dominio permitió obtener una representación adecuada de los fenómenos de interés, y en los casos estudiados con este modelo, se observó que los valores de temperatura se encuentran por debajo de los límites de diseño.

1. INTRODUCCIÓN

En el reactor RA10, los principales componentes neutrónicos como núcleo, guías de extracción de neutrones o posiciones de irradiación, se encuentran dentro de una estructura cilíndrica de Zry-4 denominada tanque del reflector (TQREF). Como se puede distinguir en la Fig. 1, el TQREF se encuentra atravesado verticalmente por tubos de diferentes diámetros para alojar los distintos dispositivos de irradiación. Además, incluye un contenedor para la fuente fría de neutrones, y en un plano medio horizontal se ubican dos conductos de extracción de neutrones fríos (HAZF-I, HAZF-D) y dos conductos de extracción de neutrones térmicos (HAZT-I, HAZT-D).

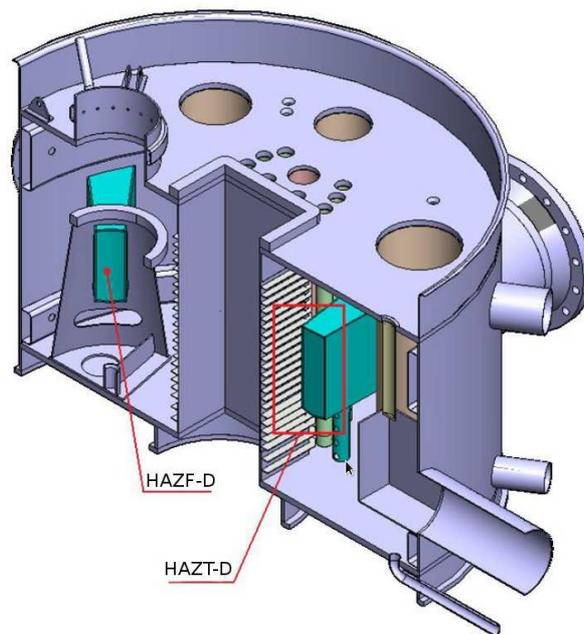


Figura 1: Esquema del TQREF y principales internos.

En condiciones normales de operación, el TQREF permanece lleno de agua pesada (D_2O), de forma que este líquido actúa como medio moderador de los neutrones provenientes del núcleo. Como la disminución del nivel de D_2O introduce reactividad negativa que puede apagar el reactor, se constituye el segundo sistema de parada (SSP) mediante la remoción del reflector por acción de la gravedad, reemplazando al D_2O por He. Si bien la actuación del SSP conduce al apagado del reactor, los internos del TQREF continúan recibiendo energía a través de radiación, ya sea desde el núcleo o de otros internos. Este hecho, sumado a la degradación de las condiciones de refrigeración por ausencia parcial de fluido reflector, conduce a una situación de gran exigencia desde un punto de vista térmico. En este caso, resultan afectados significativamente aquellos internos más cercanos al núcleo, como los conductos de extracción de neutrones.

El objetivo del presente trabajo consiste en analizar el comportamiento térmico del HAZT-D ante la actuación del SSP, mediante la resolución de problemas con transferencia de calor conjugada. Esta metodología involucra el estudio de dominios con múltiples regiones acopladas (sólidos y fluidos), resolviendo el transporte de energía a través de todos los medios en forma conjunta con las ecuaciones de Navier-Stokes para las zonas de fluido. De esta forma, la resolución del problema acoplado permite determinar la evolución de la temperatura en el HAZT-D, sin necesidad de emplear aproximaciones analíticas para representar el comportamiento hidrodinámico del D_2O y He.

2. MODELOS COMPUTACIONALES

Para llevar a cabo un análisis preciso del comportamiento térmico del HAZT-D, es en principio necesario resolver un problema de transferencia de calor conjugada que involucra distintos mecanismos de transporte. En primer lugar, la transferencia por conducción a lo largo de las placas que conforman la estructura del HAZT-D hacia la pared del TQREF, hacia la región de fluido en la que se encuentran sumergidas, o bien entre las mismas placas. En segundo lugar, el transporte de calor por parte del fluido que rodea al HAZT-D (fase líquida y gaseosa), cuyo calentamiento origina un régimen de convección natural. Además, debido a los valores de temperatura involucrados, es imprescindible incorporar el transporte de calor por radiación en la zona descubierta de las placas.

Como puede observarse en la Fig. 1, el HAZT-D se encuentra en una posición cercana al núcleo, y rodeado por múltiples posiciones de irradiación. La complejidad geométrica de la región de fluido se suma a la diversidad de escalas que es necesario abarcar para resolver el problema de transferencia de calor conjugada con radiación, hecho que imposibilita la incorporación de la totalidad del TQREF en los modelos computacionales. Por lo tanto, es necesario construir modelos simplificados desde el punto de vista geométrico y desde la representación de los fenómenos físicos, en donde las características dimensionales y las condiciones de borde permitan representar satisfactoriamente el fenómeno que se desea analizar en tiempos de cálculo prácticos y adecuados para los recursos computacionales existentes.

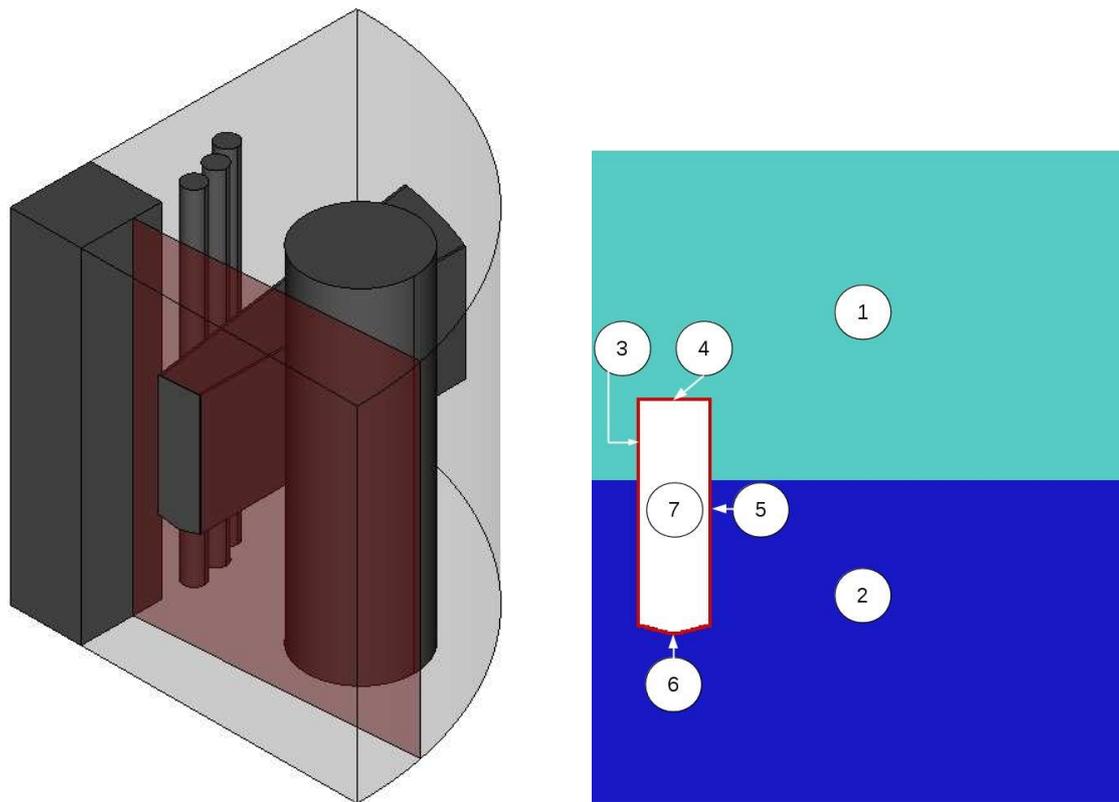
2.1. Modelos bidimensionales representativos

La imposibilidad de realizar un modelo computacional completo del TQREF o de hacer estudios paramétricos de modelos tridimensionales simplificados introduce la necesidad de utilizar modelos representativos. La construcción de modelos representativos económicos puede, por ejemplo, realizarse a través del uso de secciones bidimensionales (planos) de regiones en las que tengan lugar los fenómenos de interés. Estos modelos, si bien no pueden representar la tridimensionalidad del fenómeno físico, resultan útiles para evaluar la sensibilidad de los resultados a parámetros geométricos y condiciones de contorno. Esta información es necesaria para desarrollar un modelo tridimensional accesible computacionalmente pero robusto en cuanto a su dependencia del modelado. Si se analiza la Fig. 2a, en la que se muestra un esquema de un cuarto del TQREF con el HAZT-D, núcleo e internos de mayor proximidad al haz, puede observarse que es posible utilizar planos perpendiculares a la dirección axial del HAZT-D como sección representativa. En particular, el plano mostrado en la Fig. 2a interseca al HAZT-D en la región de mayor densidad de potencia, y dónde se alcanza la temperatura máxima según lo indicado por Palióff y García (2014). Además, el empleo de la mencionada sección permite incorporar a las paredes del núcleo y del TQREF en la frontera, hecho que facilita la imposición de condiciones de borde ya que es posible utilizar resultados de otras etapas de diseño.

La elección de la sección mostrada en la Fig. 2a conduce a la construcción de un modelo computacional como el que se presenta en la Fig. 2b. En el mismo, se incorporan 2 regiones de fluido en el exterior del HAZT-D (D_2O y He), 1 en el interior, y 4 regiones sólidas que corresponden a las diferentes placas de Zry-4 del HAZT-D (Fogliatto y Teruel, 2015b).

2.2. Modelo tridimensional representativo

Si se desea resolver un problema en el que se consideren efectos tridimensionales, es posible construir dominios de cálculo como el de la Fig. 3. Empleando el mismo modelo de TQREF como base, se extrae una región prismática de dimensiones $L_x \times L_y \times L_z$, con una de sus



(a) Esquema de un cuarto del TQREF, en el que se destaca el HAZT-D, el núcleo, los internos de mayor proximidad, y la sección representativa elegida en el modelado.

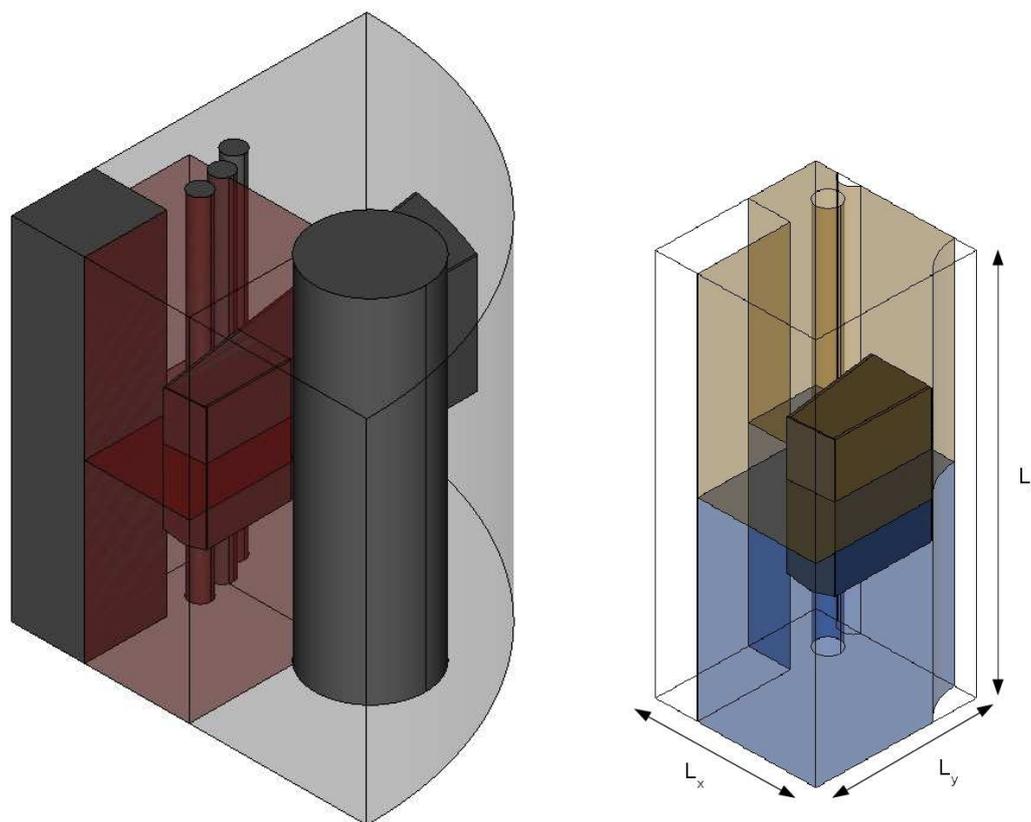
(b) Regiones del modelo bidimensional. 1: D_2O , 2: He, 3-6: HAZT-D, 7: He interno. El HAZT-D se divide en 4 subregiones, denominadas Placa Izquierda (PIz,3), Placa Superior (PS,4), Placa Derecha (PD,5) y Placa Inferior (PI,6).

Figura 2: Modelo bidimensional representativo.

caras ubicada sobre uno de los planos de corte del TQREF. De esta manera, se construye un dominio computacional como el mostrado en la Fig. 3b, en el que sólo se incluyen las secciones del HAZT-D y fluidos del TQREF, mientras que los internos son removidos y pueden ser representados por condiciones de contorno adecuadas (Fogliatto y Teruel, 2015a).

3. ASPECTOS COMPUTACIONALES DEL MODELO REPRESENTATIVO EN OPEN-FOAM

El empleo de los modelos computacionales descritos en la sección 2, permiten llevar a cabo un análisis simplificado del comportamiento térmico del HAZT-D a través de la resolución de un problema de transferencia de calor conjugada. En estos casos, el dominio de cálculo está compuesto por múltiples regiones con características diferentes (fluidos y sólidos), de modo que es necesario resolver las ecuaciones relevantes para cada medio con un correcto mecanismo de acople en las interfases. Para este problema en particular se requiere conocer la evolución temporal de la temperatura del material del HAZT-D, por lo que se necesita representar el transporte de energía desde y hacia el HAZT-D, teniendo en cuenta la remoción de calor hacia zonas de fluido que naturalmente están bajo un régimen de convección natural. Por lo tanto, es preciso resolver las ecuaciones de transporte de energía relevantes para cada región, acoplando las ecuaciones de Navier-Stokes para las zonas de fluido. Dentro del conjunto de resolutores



(a) Esquema del TQREF, en donde se aprecia la posición de la sección tomada para el modelado.

(b) Dominio computacional originado por la extracción de una región prismática de dimensiones $L_x \times L_y \times L_z$.

Figura 3: Modelo tridimensional representativo.

disponibles en la versión 2.3.x de OpenFOAM (CFDDirect, 2014), el denominado chtMultiRegionFoam (cMRF) es el que se ajusta a los requerimientos del problema, ya que permite abordar casos con transferencia de calor conjugada en estado transitorio mediante la implementación del algoritmo PIMPLE.

3.1. Modelos termodinámicos

Las diferentes zonas materiales del dominio computacional son representadas mediante regiones con distintos comportamientos en el resolutor chtMultiRegionFoam (cMRF) de OpenFOAM. De esta forma, es posible resolver las ecuaciones de Navier - Stokes en las zonas identificadas como fluido, junto con las ecuaciones asociadas al transporte de energía en la totalidad de las regiones. La definición del tipo de material se realiza a través de la elección de un modelo termodinámico adecuado (flujos compresibles o incompresibles, sólidos, etc.), de modo que para este problema se emplearon los modelos **perfectGas** para las zonas de He (en el interior y exterior del HAZT-D), **icoPolynomials** para el D_2O , y **heSolidThermo** para las placas de Zry-4 que forman el HAZT-D. En las placas de Zry-4 y en el D_2O se incorporó una fuente de potencia volumétrica con la dependencia temporal calculada por Ferraro (2012), usando un factor de potencia. Debido al valor de L_y empleado, fue necesario tomar zonas con distinta densidad de potencia en cada placa (Paliouff y García, 2014; Márquez, 2014). Los valores de potencia empleados (q''') se resumen en la Tabla 1, en donde la distancia indicada es medida desde el

extremo del HAZT-D.

Región	q''' (W/m ³)	
	[0 - 16,6 cm]	[16,6 - 33,2 cm]
PIz	$8,32 \cdot 10^6$	$5,69 \cdot 10^6$
PI	$5,74 \cdot 10^6$	$3,37 \cdot 10^6$
PD	$5,39 \cdot 10^6$	$3,64 \cdot 10^6$
PS	$4,97 \cdot 10^6$	$3,22 \cdot 10^6$
Tapa	$8,73 \cdot 10^6$	-
D ₂ O	$6,00 \cdot 10^5$	

Tabla 1: Densidad de potencia empleada en las diferentes regiones del modelo.

3.2. Modelos de radiación

Los resultados de [Paliouff y García \(2014\)](#) muestran que la transferencia de calor por radiación influye significativamente en la remoción de la potencia depositada sobre el HAZT-D. La versión de OpenFOAM utilizada cuenta con diferentes modelos para calcular la transferencia de calor por radiación, los cuales implementan distintas metodologías para resolver la RTE. Como de destaca en el trabajo de [Mangani \(2008\)](#), los efectos del intercambio de calor por radiación en el balance de energía del sistema son considerados en la ecuación de entalpía, donde aparece la divergencia del vector de flujo de calor radiativo. En particular, resulta de interés la expresión integral de esta magnitud (sobre todas las longitudes de onda del espectro)

$$\nabla \cdot \vec{q}_r = \kappa(4\pi I_b - G) \quad (1)$$

donde \vec{q}_r es el flujo de calor radiativo, κ el coeficiente de absorción del medio, I_b la intensidad total de radiación para un cuerpo negro y G la radiosidad total, siendo esta última la que se obtiene de la solución de la RTE.

En los casos analizados en este trabajo, se utilizaron los modelos de ordenadas discretas (**fv-DOM**) y factores de vista (**viewFactor**) para representar el transporte de calor a través de la región de He en dos y tres dimensiones respectivamente, y no se consideraron efectos de absorción, emisión y dispersión en su interior. De esta manera, sólo se cuantifica el intercambio de calor entre las superficies que delimitan la mencionada región. Para las regiones sólidas, es decir las placas de Zry-4 del HAZT-D, se empleó la aproximación de `opaqueSolid` con una emisividad superficial $\epsilon = 0,7$, siguiendo las suposiciones adoptadas por [Paliouff y García \(2014\)](#). No se incluyeron efectos de radiación en la región de D₂O. Detalles sobre la validación y el uso de estos modelos en problemas de transferencia con calor conjugada pueden encontrarse en [Fogliatto y Teruel \(2015b\)](#).

3.3. Esquemas de discretización y algoritmos de resolución

OpenFOAM requiere la indicación de los esquemas de discretización asociados a los diferentes operadores diferenciales. En la Tabla 2 se resumen los métodos utilizados en la totalidad de las simulaciones, empleando la notación de OpenFOAM.

La resolución de ecuaciones a través de cMRF puede llevarse a cabo mediante el algoritmo PIMPLE, el cual permite aplicar factores de relajación dentro de un paso de tiempo de PISO [Issa et al. \(1986\)](#), en forma similar a lo implementado en el algoritmo SIMPLE [Patankar \(1980\)](#). Esta

Operador	Esquema
ddtSchemes	CrankNicolson 0.5
gradSchemes	cellLimited leastSquares 1
divSchemes	Gauss linearUpwind
laplacianSchemes	Gauss linear corrected
snGradSchemes	corrected

Tabla 2: Esquemas de discretización utilizados en la totalidad de las simulaciones.

metodología es útil para problemas transitorios en los cuales es necesario alcanzar un estado estacionario.

3.4. Condiciones de contorno del modelo representativo

El mecanismo implementado en cMRF para abordar problemas de transferencia de calor conjugada obliga a generar una descomposición por bloques del dominio. De esta forma, para cada región (en este caso, para cada zona material) es necesario especificar el comportamiento de las variables asociadas en la totalidad de la frontera, ya sea externa, interna (separación entre dos medios), o una combinación de ambas.

3.4.1. Fronteras externas

Las fronteras externas del problema representan la pared de la chimenea del núcleo y del TQREF. En este modelo bidimensional no se tiene en cuenta el espesor de dichas paredes, de modo que las superficies corresponden directamente a los límites de las regiones de fluido.

3.4.2. Fronteras internas. Interfase fluido-sólido

La representación de superficies que separan regiones sólidas de fluidas requiere el uso de condiciones de contorno especiales: si bien es posible emplear las condiciones usuales de no-deslizamiento y derivada normal nula para los campos de velocidad y presión respectivamente, aquellas variables involucradas en la transferencia de energía entre medios necesitan condiciones de borde derivadas de la base *coupledPatch*. En la Tabla 3 se resumen las condiciones utilizadas para las variables de las regiones de fluido en las interfaces fluido-sólido, empleando la notación de OpenFOAM.

Variable	Condición de contorno
U	uniform (0 0 0)
p_{rgh}	zeroGradient
T	compressible::turbulentTemperatureRadCoupledMixed
$IDefault$	greyDiffusiveRadiation
G	MarshakRadiation

Tabla 3: Condiciones de contorno para las regiones de fluido en las interfaces sólido-fluido, indicadas mediante la notación de OpenFOAM.

La condición de contorno para T permite establecer continuidad de temperatura y flujo de calor en la interfase. En particular, la especificación de *turbulentTemperatureRadCoupledMixed* incorpora el flujo de calor originado por radiación en el balance de energía. Por otro lado, las

regiones sólidas son consideradas como medios opacos a la radiación. De esta forma, como la única variable necesaria en estos medios es T , se aplica el mismo tipo de condición de contorno que en el lado del fluido.

3.4.3. Fronteras internas. Interfase fluido-fluido

El problema bajo análisis requiere especial atención, ya que durante la actuación del SSP, la cavidad del TQREF queda llena de D_2O y He. En el trabajo de Rechiman et al. (2015) se muestra que durante la fase final del vaciado del TQREF la superficie de separación entre ambos fluidos se encuentra bien definida, y el tiempo de vaciado es significativamente menor que los tiempos característicos del problema de refrigeración del HAZT-D. Tomando como base los mencionados resultados, se considerará que el análisis desarrollado en este trabajo comienza una vez que termina el vaciado parcial del TQREF, de modo que la posición de la superficie de separación entre He y D_2O permanecerá fija en el tiempo.

La resolución de un problema con cMRF que involucre esta aproximación, implica la necesidad de crear una nueva condición de borde para OpenFOAM, la cual sería responsable de preservar continuidad de los campos de velocidad y tensiones de dos fluidos adyacentes. La distribución de OpenFOAM utilizada cuenta con clases como *mixedFvPatchField* que permiten abordar este tipo de casos ya que es utilizada, por ejemplo, para construir la condición de continuidad de temperatura y flujo de calor en interfases sólido-fluido. Si se considera una interfase fija como la de la Fig 2 entonces el problema numérico se reduce a lo ejemplificado en la Fig 4, donde para dos celdas adyacentes correspondientes a fluidos de velocidad v_i y viscosidad dinámica μ_i , es necesario calcular la velocidad de interfase ϕ .

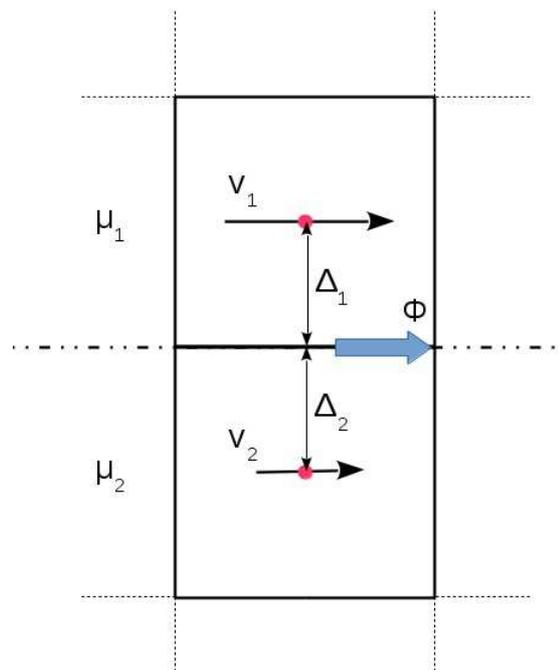


Figura 4: Condición de contorno en la interfase fluido-fluido.

Si se consideran despreciables los efectos de tensión superficial, entonces la continuidad de tensiones se reduce a

$$\mu_1 \frac{\partial v_1}{\partial x_2} \Big|_{int} = \mu_2 \frac{\partial v_2}{\partial x_2} \Big|_{int} \quad (2)$$

$$\mu_1 \frac{v_1 - v_1^{int}}{\Delta_1} = \mu_2 \frac{v_2^{int} - v_2}{\Delta_2} \quad (3)$$

donde v_i^{int} son las velocidades de cada medio en la interfase y $v_i^{int} = \phi$. Usando la continuidad de los campos de velocidad, entonces la Ec. 3 puede emplearse para escribir una expresión para la velocidad en la interfase

$$\phi = \frac{\mu_1 \Delta_2 v_1 + \mu_2 \Delta_1 v_2}{\mu_1 \Delta_2 + \mu_2 \Delta_1} \quad (4)$$

Si $\Delta_1 \sim \Delta_2$, entonces la Ec. 4 puede reducirse a

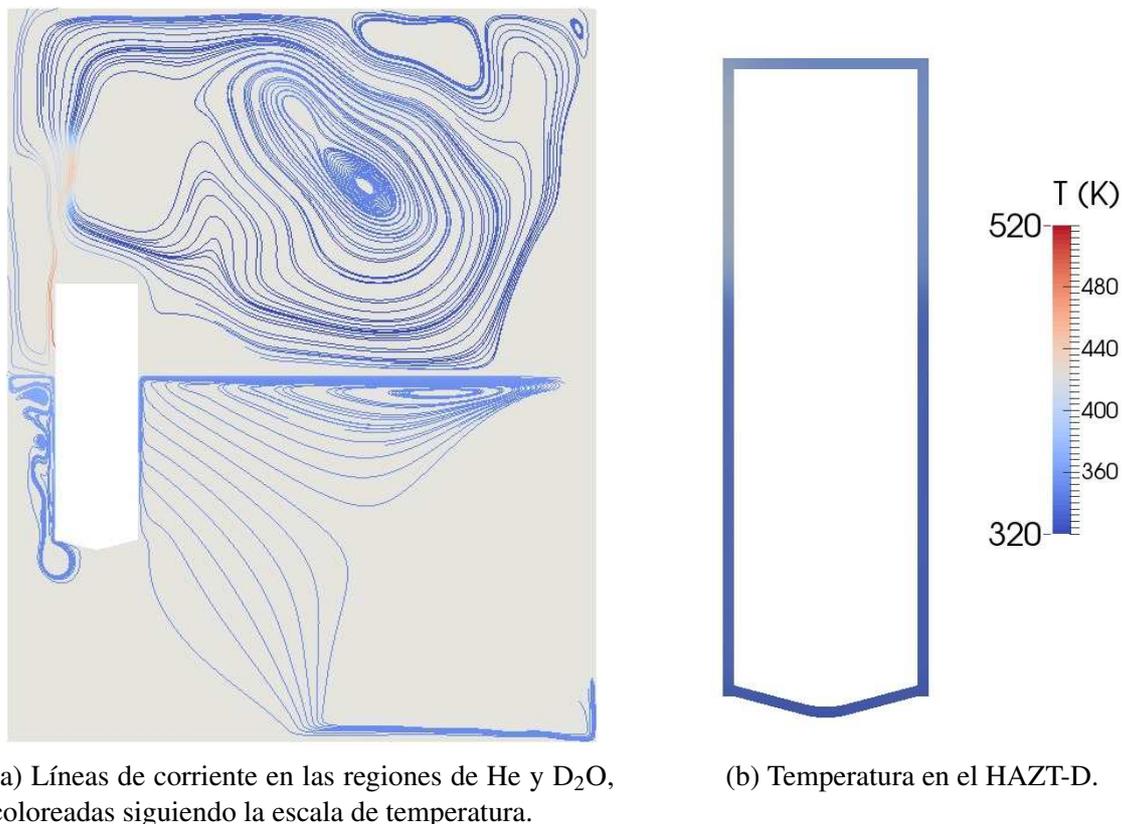
$$\phi = \frac{\mu_1 v_1 + \mu_2 v_2}{\mu_1 + \mu_2} = (1 - f)v_1 + f v_2 \quad (5)$$

con $f = \mu_2 / (\mu_1 + \mu_2)$. En este problema, donde $\mu_1 = \mu_{He} = 2,07 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s$ y $\mu_2 = \mu_{D_2O} = 7,13 \cdot 10^{-4} Pa \cdot s$, se obtiene $f \sim 0,97$. Por lo tanto, la Ec. 5 puede simplificarse y escribirse como $\phi \sim v_{D_2O}$ para una primera aproximación. De esta forma, no sería necesario implementar la nueva condición de contorno para la interfase fluido-fluido, ya que sería suficiente con emplear una condición de libre deslizamiento para el D_2O , e igualar la velocidad de la interfase para la región de He. La influencia de las aproximaciones empleadas para esta interfase es analizada en Fogliatto y Teruel (2015b).

4. RESULTADOS

4.1. Comportamiento térmico del HAZT-D mediante el uso del modelo bidimensional representativo

Si bien el problema en estudio es de naturaleza tridimensional, el uso de modelos bidimensionales simplificados y el estudio paramétrico de los mismos permite diferenciar los fenómenos relevantes para el cálculo de interés, permitiendo la simplificación de un modelo tridimensional con alto costo computacional. Con el fin de estimar la sensibilidad del valor de temperatura máxima alcanzada en las placas del HAZT-D durante la actuación del SSP ante variaciones del modelo computacional, se realizaron simulaciones de transferencia de calor conjugada para estudiar los efectos sobre la figura de mérito asociados a variaciones en las condiciones de contorno, y en los modelos utilizados para representar la transferencia de calor. A modo de ejemplo, en la Fig. 5 se muestran líneas de corriente en las regiones de fluido junto con la distribución de temperatura en el HAZT-D, ambas a 60 s después de la finalización del vaciado parcial del TQREF. Como puede observarse en la Fig. 5a, el calentamiento producido en la zona cercana al HAZT-D conduce a un movimiento de los fluidos en dirección vertical ascendente, y a la formación de zonas de recirculación en el centro y vértices del TQREF. Por otro lado, en la Fig. 5b puede observarse que la distribución de temperatura en las placas se encuentra afectada principalmente por la posición de la interfase fluido-fluido y la densidad de potencia existente en el HAZT-D. En particular, la zona superior de la Piz es donde tiene lugar la presencia de la temperatura máxima en el HAZT-D.



(a) Líneas de corriente en las regiones de He y D₂O, coloreadas siguiendo la escala de temperatura.

(b) Temperatura en el HAZT-D.

Figura 5: Líneas de corriente y temperatura para $t = 60$ s.

4.1.1. Importancia de los distintos mecanismos de transporte de calor

Con el fin de determinar la importancia de la radiación como mecanismo de transferencia de calor, se resolvió el problema empleando los modelos de radiación fvDOM (CR-CC1) y noRadiation (NR-CC1), considerando casos en los que se incluye la transferencia de calor por radiación en el interior del HAZT-D (CRi-CC1). En la Fig. 6 se muestra la evolución de la temperatura máxima calculada en el HAZT-D durante los primeros 12 minutos.

En todos los casos mostrados en la Fig. 6 se ha observado que el valor de temperatura máxima del HAZT-D tiene lugar en la PIz, y el cálculo de esta magnitud se encuentra afectado principalmente por el modelo de transporte de calor involucrado. En particular, en aquellas simulaciones en las que no se incorpora el transporte por radiación, la temperatura máxima del HAZT-D supera el valor de 563 K impuesto como criterio de diseño (Paliouff y García, 2014) después de aproximadamente 5 minutos, y muestra un crecimiento monótono en todo el intervalo de tiempo simulado. Sin embargo, si se acopla el modelo de radiación térmica como en el caso CR-CC1, considerando al He como un gas transparente no difusivo y una emisividad $\epsilon = 0.7$ para las superficies de Zry-4, se observa que la temperatura alcanza un valor máximo de 564.55 K a los 11 minutos (superando por 1,5 K el criterio de diseño). Por otro lado, el transporte de calor por radiación en el interior del HAZT-D contribuye a uniformizar la distribución de temperatura en las placas, como se observa para el caso CRi-CC1, logrando disminuir en 30 K el valor máximo y manteniendo los valores por debajo del límite buscado.

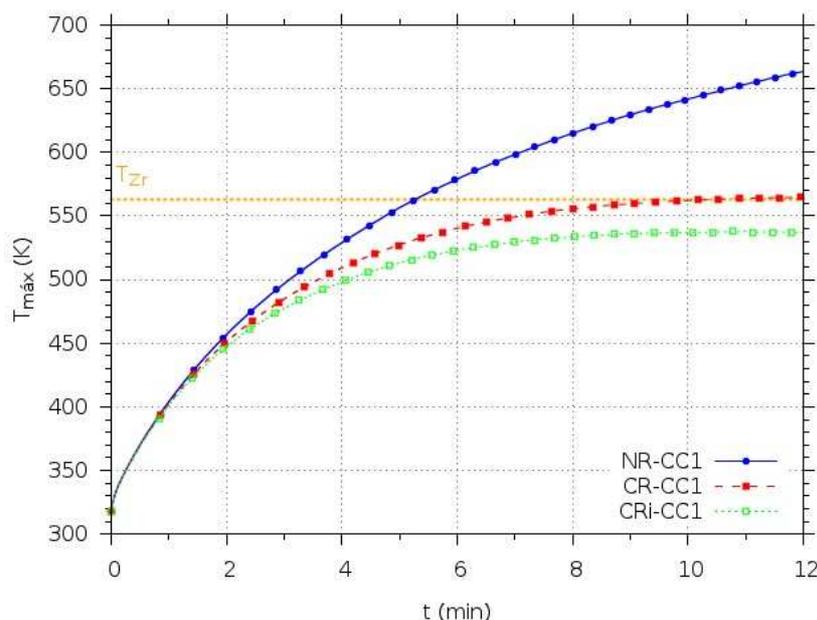


Figura 6: Evolución de la temperatura máxima para dominios con CC1, empleando los modelos noRadiation (NR-CC1), fvDOM (CR-CC1), e incluyendo transferencia de calor por radiación en el interior del HAZT-D (CRi-CC1).

4.2. Comportamiento térmico del HAZT-D mediante el uso del modelo tridimensional

En forma similar a lo que ocurre con el modelo bidimensional, la potencia térmica depositada sobre las placas de Zry-4 origina un incremento de la temperatura del material del HAZT-D. De esta forma, se produce una transferencia de energía hacia los fluidos que rodean el conducto, ocasionando un aumento localizado de la temperatura de los mismos, y estableciendo un régimen de flujo en convección natural.

El patrón de flujo formado en las regiones de fluido exteriores puede apreciarse en la Fig. 7, en donde se observa la evolución temporal de las estructuras del flujo para $t = 10, 20, 30$ y 40 s. La Fig. 7 muestra, por un lado, la distribución de partículas sin masa inyectadas desde la superficie del HAZT-D. Como estas partículas siguen instantáneamente a las partículas de fluido donde se originaron, esta técnica de visualización permite observar el movimiento del fluido calentado por el HAZT-D.

En la Fig. 8 se muestra la distribución de temperatura sobre la superficie exterior del HAZT-D para $t = 100, 200, 300$ y 400 s. Puede observarse que, en forma similar a lo calculado con el modelo bidimensional, el campo de temperatura presenta su rango máximo en la parte superior del HAZT-D, en la región de la P1z que se encuentra dentro de la atmósfera de He. Además, la zona donde se presentan los valores más altos de temperatura se encuentra desplazada respecto del extremo del conducto, ya que la presencia de la Tapa introduce una superficie de refrigeración adicional. Se observa también que la posición de la interfase $D_2O - He$ influye significativamente en la distribución de temperatura, ya que no se observan gradientes marcados de temperatura en las zonas que se encuentran en contacto con el D_2O , a pesar de que están caracterizadas por deposiciones de energía similares a las zonas expuestas al He.

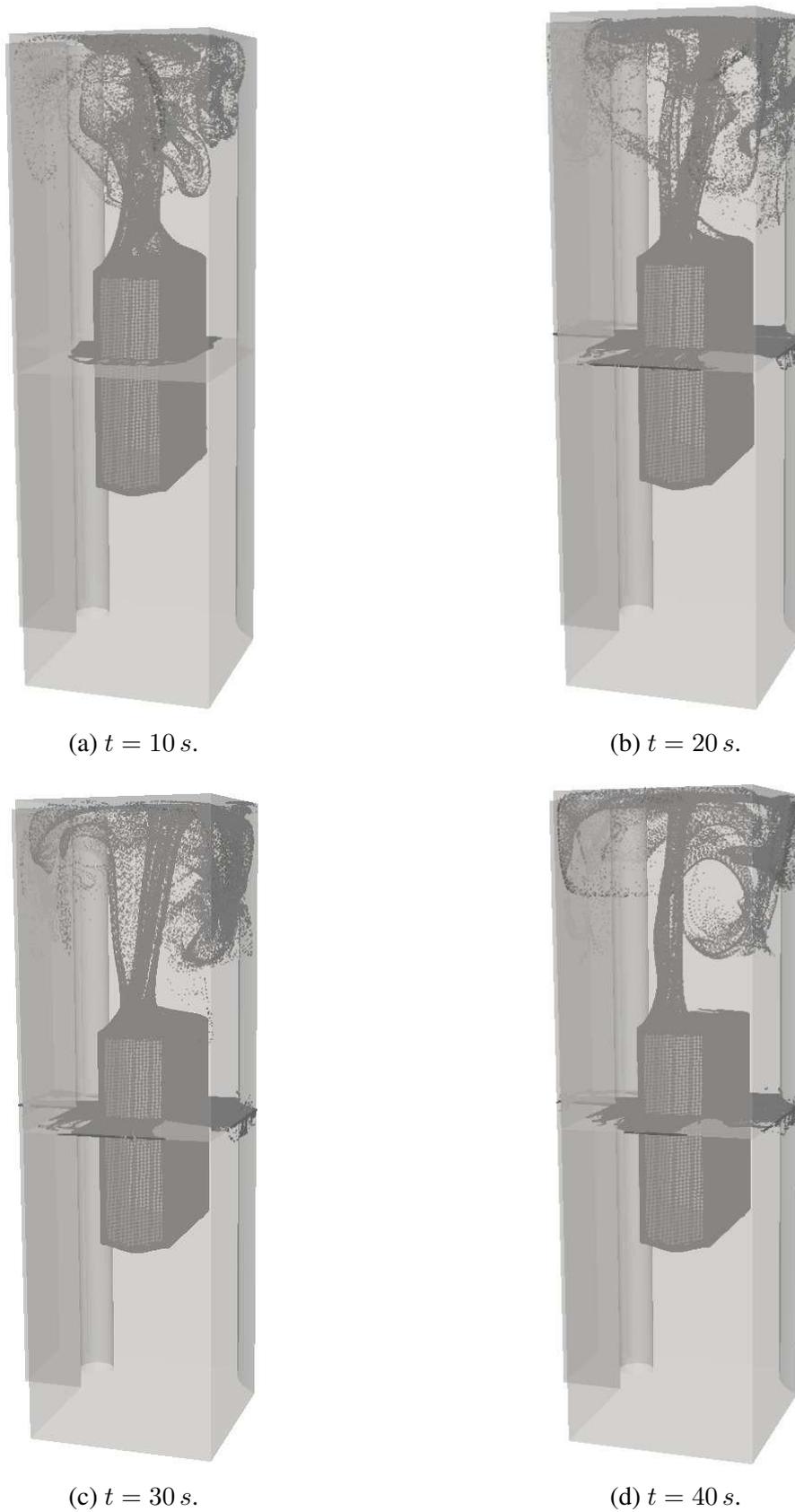


Figura 7: Representación del flujo por convección natural en la región de He, mediante el uso de partículas virtuales.

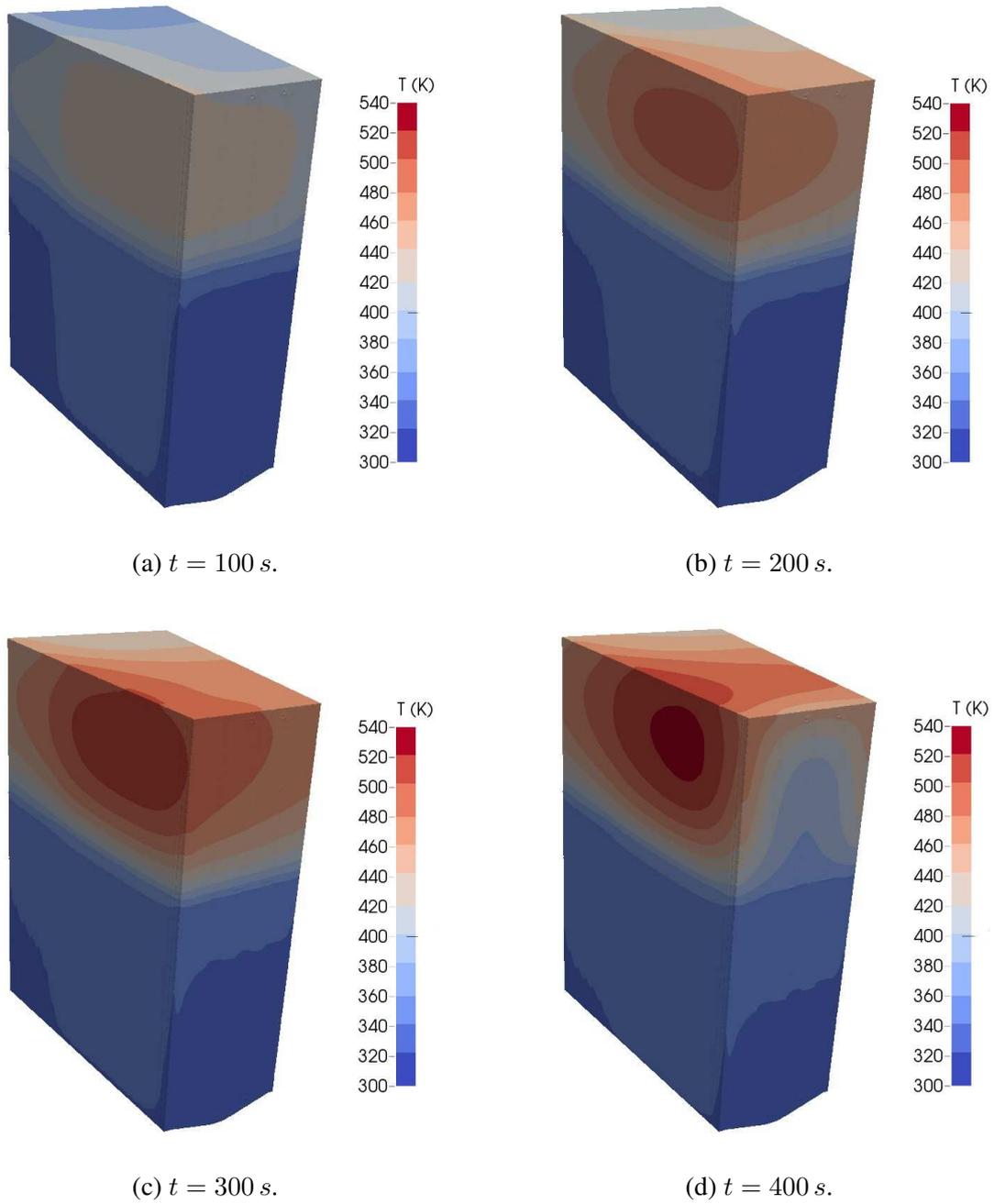


Figura 8: Temperatura en la superficie externa del HAZT-D para diferentes instantes de tiempo.

Como se mencionó anteriormente, el objetivo principal de este análisis consiste en estudiar la evolución temporal de la temperatura máxima en el HAZT-D, de manera que sea posible determinar si se supera el valor establecido como límite de diseño (563 K). En la Fig. 9 se muestra la evolución temporal de la temperatura máxima en cada una de las placas de Zry-4, calculadas fijando el valor exterior de temperatura en $T_e = 323$ K (Fig. 9a) y $T_e = 353$ K (Fig. 9b). Es importante destacar que la ubicación geométrica de la zona más caliente en la superficie del haz no varía en el tiempo de simulación.

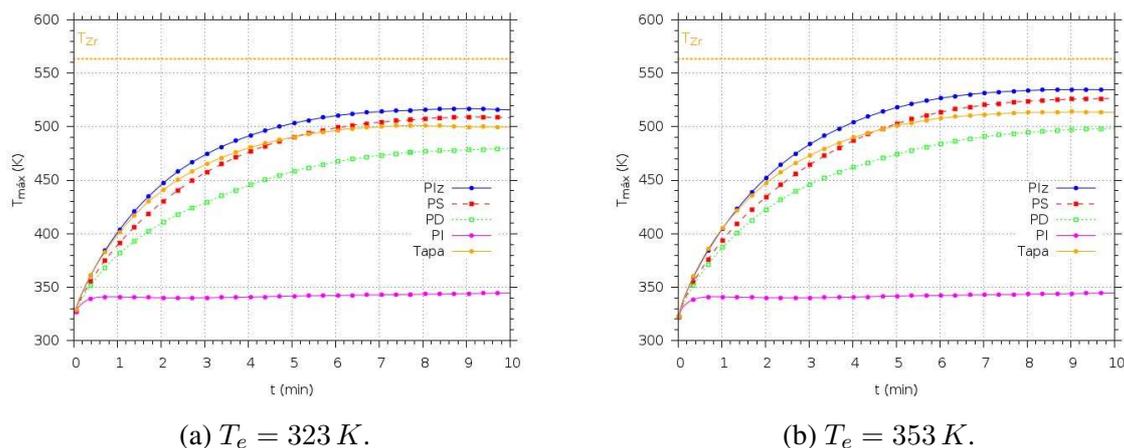


Figura 9: Evolución temporal de la temperatura máxima en las placas del HAZT-D.

Las temperaturas mostradas en la Fig. 9 indican que el valor máximo tiene lugar en la Plz para ambas T_e , aproximadamente 8 minutos después de la actuación del SSP. Se observa que en los casos analizados, aún en aquel con T_e elevada, el valor de temperatura máxima se encuentra por debajo del límite de diseño. En particular, para el primer caso mostrado, la temperatura máxima se encuentra aproximadamente 50 K por debajo del límite fijado por diseño. Adicionalmente, el incremento en 30 K en la temperatura impuesta en el borde se traduce en un incremento del valor máximo en 20 K.

La resolución del problema utilizando un modelo tridimensional otorga una evolución temporal de la temperatura máxima en el HAZT-D similar a lo observado en los casos bidimensionales. En la Fig. 10 se muestran los valores de temperatura máxima en la Plz calculadas para $T_e = 323$ K y $T_e = 353$ K, junto con los resultados obtenidos a partir del modelo bidimensional con las mismas condiciones de contorno (Fogliatto y Teruel, 2015b). En este caso, puede observarse que el modelo bidimensional produce una sobreestimación del valor máximo de temperatura (aproximadamente 15 K), mientras que este valor límite se presenta a los 10 minutos. Estas diferencias pueden asociarse, principalmente, a un aumento de la zona efectiva de refrigeración ocasionado por la presencia de la Tapa, y a la posibilidad de conducción de calor en la dirección paralela al eje del HAZT-D. En la Fig. 10 se muestran además los resultados obtenidos en Palioff y García (2014) utilizando un modelo tridimensional del HAZT-D que simula explícitamente los fenómenos de radiación y conducción, y utiliza coeficientes de convección para la parte hidrodinámica.

4.3. Análisis de sensibilidad de los resultados ante cambios en el diseño

La evaluación de los resultados obtenidos para los modelos representativos en dos y tres dimensiones muestra que existe similitud en el cálculo de la temperatura máxima en el HAZT-

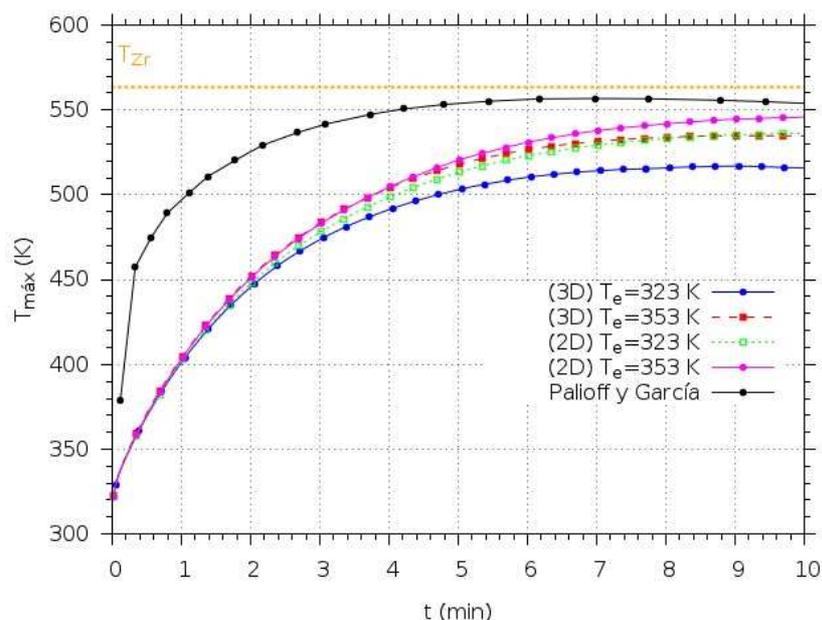


Figura 10: Evolución de la temperatura máxima en el HAZT-D para $T_e = 323$ K y $T_e = 353$ K. Se muestran además los valores correspondientes al caso bidimensional asociado y los resultados de [Palioff y García \(2014\)](#).

D, ya sea en la evolución temporal o bien en los valores extremos alcanzados. Este hecho aporta solidez al modelo bidimensional, de modo que gracias a su bajo costo computacional, puede ser empleado en un estudio paramétrico del problema bajo análisis. En particular, resulta de interés evaluar el valor máximo de temperatura en el HAZT-D ante cambios en las condiciones de diseño del reactor, como la altura de la columna de D_2O después de la actuación del SSP, o distintas características superficiales de las placas de los conductos de extracción.

En la Fig. 11 se muestra la evolución de la temperatura máxima en el HAZT-D, obtenida para modelos con diferentes alturas de la columna de D_2O , empleando $T_e = 323$ K (Fig. 11a) y $T_e = 353$ K (Fig. 11b). Como puede observarse, la posición de la interfase He- D_2O presenta una influencia significativa en la remoción de calor desde las placas. En particular, como se muestra en la Fig. 12, modificaciones de 50 mm respecto a la posición original produce cambios de más de 20 K en el valor máximo de temperatura calculado.

Además del nivel de refrigerante después de la actuación del SSP, resulta de interés evaluar la sensibilidad de los resultados frente a cambios en las características constructivas del HAZT-D. En este caso, como la transferencia de calor por radiación es importante, se optó por resolver el problema empleando distintos valores de emisividad superficial para las placas de Zry-4, manteniendo la columna de D_2O en su altura original. Como puede apreciarse en las Figs. 13 y 14, el empleo de placas sin tratamiento superficial adicional ($\epsilon \sim 0,3$), conduce a temperaturas máximas que superan el límite de diseño.

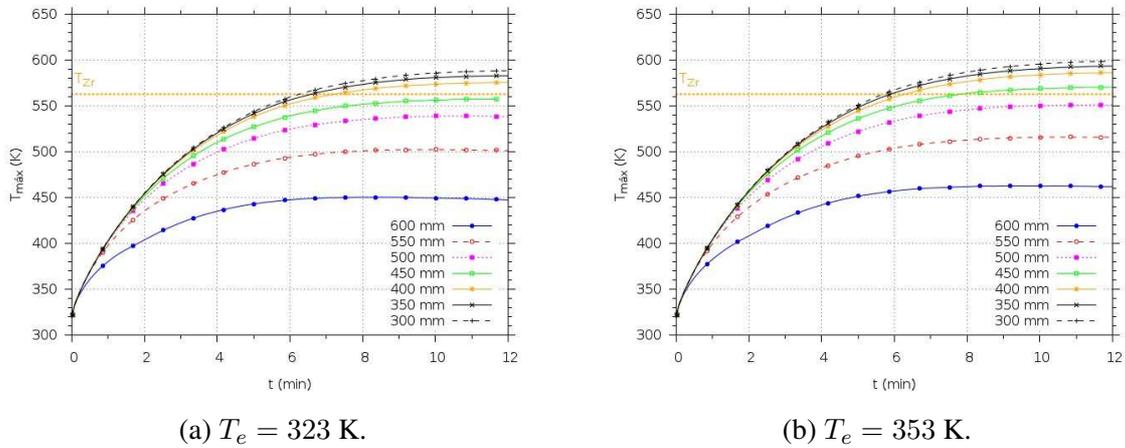


Figura 11: Evolución de la temperatura máxima para diferentes alturas de columna de D₂O.

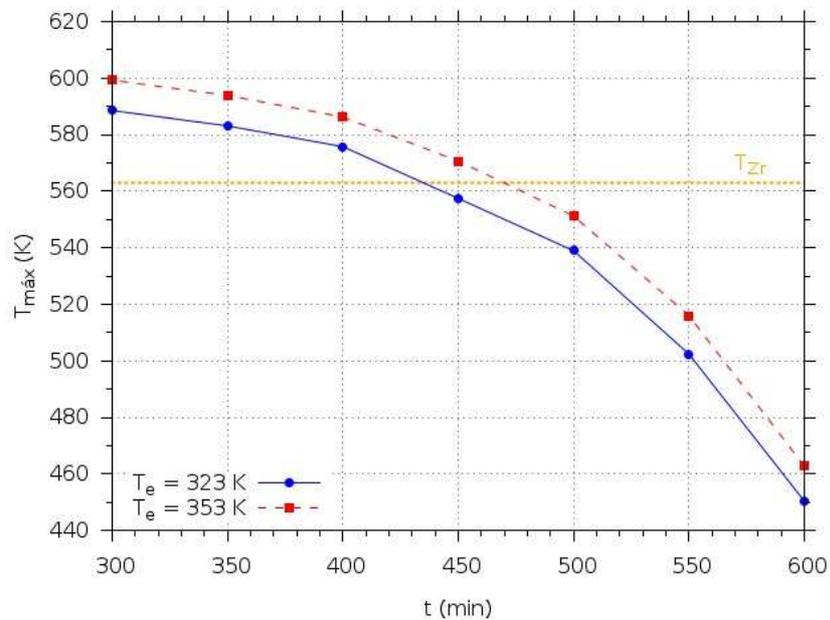


Figura 12: Temperatura máxima alcanzada en el HAZT-D en función de la altura de la columna de D₂O, para $T_e = 323$ K y $T_e = 353$ K.

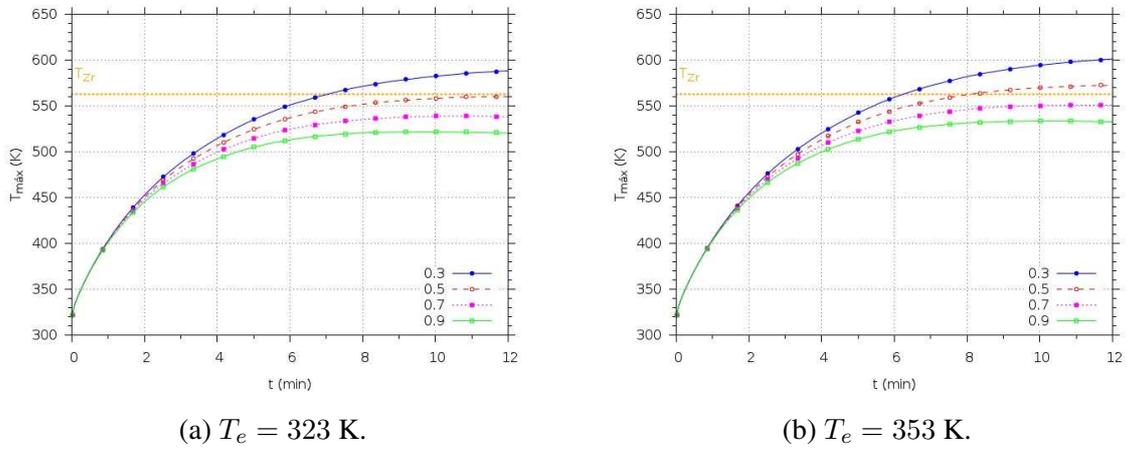


Figura 13: Evolución de la temperatura máxima para diferentes valores de emisividad superficial del HAZT-D.

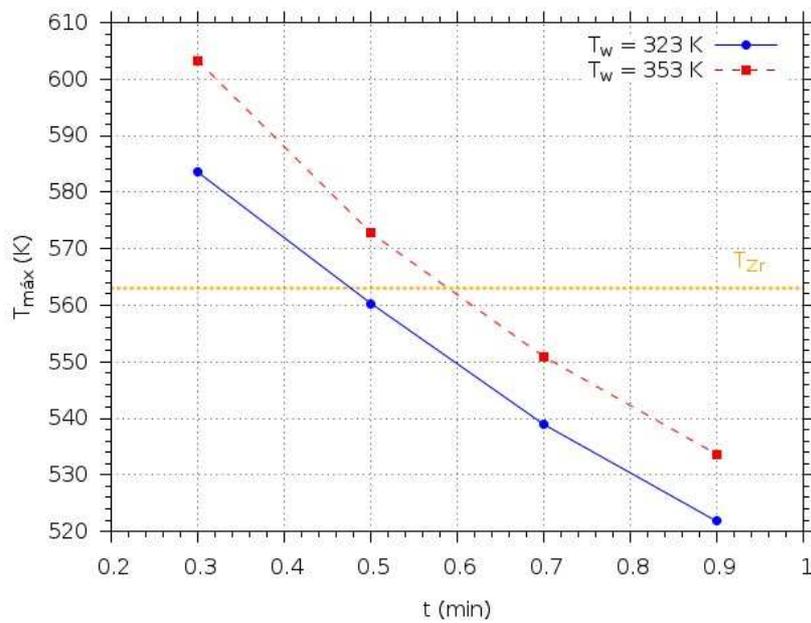


Figura 14: Temperatura máxima alcanzada en el HAZT-D en función de la emisividad superficial, para $T_e = 323$ K y $T_e = 353$ K.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se llevó a cabo un análisis del comportamiento térmico del HAZT-D ante la actuación del SSP, resolviendo un problema de transferencia de calor conjugada para dominios con múltiples regiones acopladas. En particular, se consideró un modelo en el que el HAZT-D se encuentra parcialmente sumergido en una región de D_2O y cubierto por una atmósfera de He, de modo que fue necesario resolver el transporte de energía desde y hacia el HAZT-D, teniendo en cuenta la remoción de calor hacia zonas de fluido que naturalmente se encuentran bajo un régimen de convección natural. Esto implicó la resolución de las ecuaciones de transporte de energía relevantes para los distintos medios con interfases debidamente acopladas, transporte de calor por radiación y resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes para las regiones de fluido empleando la herramienta computacional OpenFOAM.

La complejidad geométrica del TQREF y la diversidad de escalas necesarias para representar adecuadamente el problema acoplado motivaron el uso de modelos computacionales representativos. En este informe se analizó un modelo bidimensional, de bajo costo computacional, cuya solución permitió estudiar la sensibilidad del problema frente a las principales hipótesis de modelado. Los casos analizados con este modelo muestran que la temperatura máxima tiene lugar en la superficie del HAZT-D que enfrenta al núcleo, y los valores límites alcanzados dependen fuertemente de la densidad de potencia local y la posición de la interfase D_2O -He. Además, se observó que la transferencia de calor por radiación contribuye significativamente en la remoción de calor del HAZT-D, ya que si no se consideran estos efectos en el modelado, la temperatura máxima supera rápidamente el límite impuesto por diseño (aproximadamente a los 5 minutos), y su evolución temporal muestra una tendencia creciente en los intervalos de tiempo simulados. Por otro lado, el costo computacional asociado a la resolución de este modelo permitió llevar a cabo un análisis paramétrico del problema, mostrando una influencia significativa de la posición de la interfase y la emisividad superficial del HAZT-D en la temperatura máxima alcanzada.

Los resultados obtenidos con el modelo bidimensional permitieron analizar la influencia de las principales hipótesis de modelado en la evolución de la temperatura máxima, hecho que posibilitó la elección de condiciones de contorno adecuadas para el análisis de un modelo tridimensional. Para este caso, el cual fue resuelto empleando valores de temperatura fija en las superficies exteriores del dominio, se observó que el valor de temperatura máxima en el HAZT-D se encuentra por debajo de 563 K, valor impuesto como límite de diseño.

REFERENCIAS

- CFDDirect. OpenFOAM - The Open Source Computational Fluid Dynamics (CFD) Toolbox. OpenFOAM 2.3.1 User's Guide, 2014.
- Ferraro D. Potencia nuclear depositada en haces y contenedor de vacío de la FTEFRI luego de la actuación del SSP. Informe Técnico IT-INV/RA-10/0120-2-018-0, INVAP, 2012.
- Fogliatto E.O. y Teruel F.E. Análisis del comportamiento térmico del HAZT-D ante la actuación del SSP. Informe Técnico IN-ATN40MC-05/2015, CNEA, Departamento de Mecánica Computacional, 2015a.
- Fogliatto E.O. y Teruel F.E. Desarrollo de modelos computacionales para evaluación del comportamiento térmico del HAZT-D ante la actuación del SSP. Informe Técnico IN-ATN40MC-03/2015, CNEA, Departamento de Mecánica Computacional, 2015b.
- Issa R.I., Gosman A.D., y Watkins A.P. The computation of compressible and incompressible recirculating flows by a non-iterative implicit scheme. *Journal of Computational Physics*, 62(1):66–82, 1986. ISSN 0021-9991. doi:10.1016/0021-9991(86)90100-2.

- Mangani L. *Development and Validation of an Object Oriented CFD Solver for Heat Transfer and Combustion Modeling in Turbomachinery Applications*. PhD Thesis, Università degli Studi di Firenze, Firenze, Italy, 2008.
- Márquez A. Potencias Depositadas en Haces y Fuente Fría. Informe Técnico IT-47-RA-10-0430-3-001-1, CNEA, 2014.
- Palioff F. y García J.C. Verificación de la refrigeración de los conductos de extracción de neutrones ante la actuación del SSP. Informe Técnico IT-44-RA10-0452-3-003-0 -, CNEA, 2014.
- Patankar S.V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. Series in computational and physical processes in mechanics and thermal sciences. Hemisphere Publishing Corporation, 1980. ISBN 0-89116-522-3.
- Rechiman L.M., Cantero M.I., y Dari E.A. Modelado del Segundo Sistema de Parada del Reactor RA-10 para Análisis Hidrodinámico Computacional. Informe Técnico IN-ATN40MC-01/2015, CNEA, Departamento de Mecánica Computacional, 2015.