

SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUIDO REFRIGERANTE EN UN COMUSTIBLE TIPO PLACA EN EL CÓDIGO DIONISIO

SIMULATION OF THE BEHAVIOR OF THE REFRIGERANT FLUID IN A PLATE- TYPE FUEL IN THE DIONISIO CODE

Mauricio E. Cazado^{a,b} y Alejandro Soba^{a,c}

^aCONICET

^bInstituto Sabato, UNSAM/CNEA

^bSección Códigos y Modelos, Gerencia Ciclo del Combustible Nuclear, CAC, CNEA, Av. Gral. Paz
1499, B1650KNA San Martín, Buenos Aires, Argentina. <http://www.cnea.gov.ar>

Palabras clave: mecánica de los fluidos, elementos finitos, canal refrigerante, DIONISIO, combustible tipo PLACA.

Resumen. El código de combustibles DIONISIO aproxima la termohidráulica del canal refrigerante mediante modelos simples, unidimensionales. Sin embargo, los fenómenos que ocurren en dicho entorno tienen un efecto crucial en el desempeño del combustible, pues el comportamiento del fluido refrigerante determina las condiciones térmicas de contorno de los procesos que ocurren en el combustible. Para determinar adecuadamente el comportamiento de todo un elemento combustible, es necesario simular adecuadamente el pasaje del refrigerante y su interacción con la estructura del elemento, prestando especial atención a los diferentes procesos físicos químicos que tienen lugar entre ambos materiales. En este trabajo se presenta la primera aproximación a la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes para el fluido del canal refrigerante de un elemento combustible destinado a reactores de investigación. Para ello se utiliza el método de elementos finitos incorporándolo al entorno DIONISIO.

Keywords: fluid mechanics, finite elements, cooling channel, DIONISIO, PLATE-type fuels.

Abstract. The DIONISIO fuel code approximates the thermohydraulic of the cooling channel through simple, one-dimensional models. However, the phenomena that occur in this environment have a crucial effect on the performance of the fuel, since the behavior of the coolant determines the thermal conditions around the processes that occur in the fuel. To properly determine the behavior of an entire fuel element, it is necessary to properly simulate the passage of the coolant and its interaction with the structure of the element, paying special attention to the different physical-chemical processes that take place between both materials. This paper presents the first approach to solving the Navier-Stokes equations for the cooling channel fluid of a fuel element for research reactors. For this, the finite element method is used, incorporating it into the DIONISIO environment.

1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, existen en el mundo alrededor de 250 reactores de investigación, muchos en etapa de diseño y construcción, mientras que otros están llegando al final de su vida útil. Estos reactores de baja potencia son utilizados como fuentes neutrónicas para producción de radioisótopos, estudio de comportamiento de materiales bajo irradiación e investigación en física básica y constituyen piezas fundamentales del aparato productivo, médico o científico de todo país avanzado. Se diferencian de las centrales nucleoelectricas en su diseño y en su finalidad: están hechos para producir neutrones, no 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 (Soba y Denis, 2007).

Un reactor experimental requiere de una instalación modesta en comparación con las centrales de potencia y todas las variables implicadas se ven reducidas en magnitud y exigencia. Los reactores de investigación operan con flujos neutrónicos de entre 10^{13} y 10^{15} neutrones/cm²s y potencias térmicas de entre 10 y 20 MW, lo que demanda altos niveles de enriquecimiento del combustible empleado. El núcleo del reactor, formado por placas ensambladas en estructuras de aluminio, es refrigerado por agua que circula por entre las placas mediante un sistema de bombeo. El agua ingresa a aproximadamente 40°C y debido al flujo calórico emerge a unos 65°C, dependiendo del diseño del reactor. Además, las velocidades empleadas suelen estar por encima de los valores empleados en reactores de potencia, entre 10 y 12 m/s.

Los combustibles utilizados son los denominados combustibles dispersos, los cuales consisten en partículas de un compuesto de uranio dispersas en una matriz de un metal (en general aluminio), que asegura una buena extracción de calor de la partícula combustible. Este material así conformado se envaina por colaminación entre dos placas de metal (también en general aluminio) para ser introducido en el reactor. Las dimensiones usuales de estas placas son de aproximadamente entre 60 y 70 cm de largo, entre 6 y 7 cm de ancho y entre 0.1 y 0.2 cm de espesor. El EECC se construye uniendo cierto número de placas (entre 19 y 21) separadas por distancias del orden de 0.2-0.3 cm en cavidades prismáticas que van a ocupar posiciones determinadas dentro del núcleo.

Desde el año 2005 la Sección de Códigos y Modelos de la Gerencia Ciclo del Combustible Nuclear de la CNEA se ha involucrado en el desarrollo de DIONISIO (Soba, 2007; Denis y Soba, 2003; Soba y Denis, 2008; Lemes et al., 2014), una herramienta completa para simular el comportamiento bajo irradiación de combustibles nucleares tanto para reactores de potencia como de investigación. La versión del código destinado a combustibles del tipo PLACA emplea el método de elementos finitos para discretizar el dominio y permite una simulación detallada de la evolución de los parámetros físicos más relevantes de un elemento combustible durante su permanencia dentro de un reactor (Soba, 2007). Este código contiene una gran cantidad de modelos, teóricos y empíricos, interconectados y mutuamente dependientes que simulan la difusión de calor y masa, las distribuciones de tensión-deformación en los dominios elástico y plástico, la generación de gases de fisión y su efecto sobre el cambio de volumen y la conductividad térmica del núcleo de la placa. Además, se tiene en cuenta el comportamiento termohidráulico del reactor y el crecimiento de la capa de óxido en la superficie del revestimiento para determinar la distribución de temperatura sobre la placa.

Para resolver las ecuaciones diferenciales correspondientes a los problemas térmicos y elástico-plásticos que tienen lugar en una placa de combustible nuclear, se emplea el método de elementos finitos en coordenadas cartesianas con elementos hexaédricos lineales, bilineales o cúbicos. El código admite diferentes opciones para construir el dominio de trabajo: se puede seleccionar media placa o placa completa, placas curvas o planas. En la [Figura 1](#) se puede

observar un ejemplo del mallado del combustible, en donde para una mejor visualización se discretizaron por separado la estructura del *cladding* y el *meat* del combustible. Además, en b) y c) se pueden ver ejemplos de la distribución de temperatura que se puede obtener con DIONISIO en placas planas y curvas, respectivamente. DIONISIO permite contemplar diferentes tipos de combustibles dispersos: U_3Si_2-Al , $U-Al_x$, $UMo-Al_x$ y $UMo-AlSi$; así como distintos tipos de vainas: Al, Zry-4 y aceros. También permite modelar combustibles monolíticos. (Soba y Denis, 2007). Durante la ejecución del código, sobre el dominio discretizado se calcula la distribución de temperatura y las solicitaciones mecánicas. Además, sobre cada elemento finito se calcula la evolución de las partículas de combustible, de la matriz y de los poros, obedeciendo a la temperatura local en que se encuentre. Debe tenerse en cuenta que diversos fenómenos físicos como, por ejemplo, la densificación, el hinchamiento y los gases de fisión modifican la conductividad térmica del material y por lo tanto deben actualizarse en conjunto con la distribución térmica a medida que avanza el quemado del material.

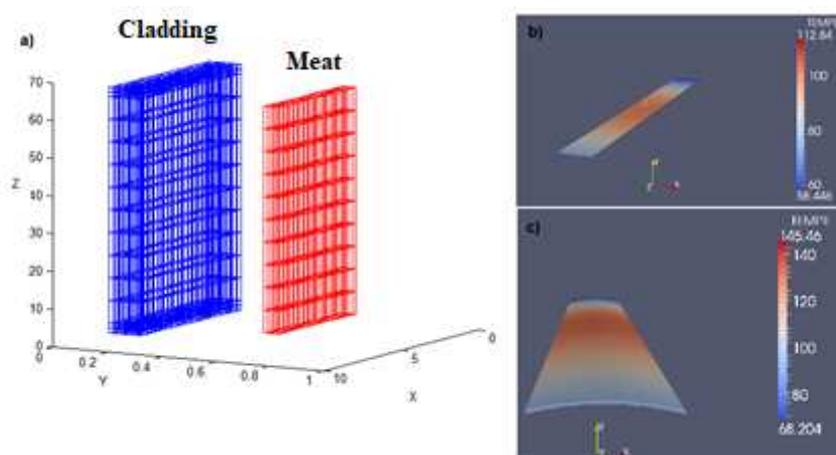


Figura 1 – a) Ejemplo de una malla de una placa en DIONISIO. El meat y el cladding se representan en mallas diferentes. Ejemplos de distribución de temperatura b) en una placa plana y c) en una placa curva.

En este trabajo se describe la forma actual en que se simula el complejo problema de la extracción del calor en EECC de reactores de investigación en el código DIONISIO y se presenta el estado de avance del nuevo modelo termohidráulico en el que se está trabajando. Este último buscará simular explícitamente el fluido, dentro de los estrechos canales entre placas por los que circula, resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes para fluidos incompresibles.

2 MODELO TERMOHIDRÁULICO INCLUIDO EN DIONISIO

Actualmente, el código aproxima la termohidráulica del canal refrigerante mediante el modelo unidimensional que se describe a continuación.

El calor producido por unidad de tiempo en un volumen elemental del combustible a una distancia z en la dirección longitudinal, está dado por (Foster y Wright, 1983):

$$H(z) = H_M \cos\left(\frac{\pi z}{l_e}\right) \quad (1)$$

donde H_M es la potencia volumétrica máxima y l_e es la longitud extrapolada cuyo valor es mayor a la longitud física de la placa y es un parámetro geométrico del reactor. Para calcular la distribución de temperatura en el combustible tipo placa se resuelve la ecuación del calor en estado estacionario en un dominio tridimensional en coordenadas cartesianas:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa_{x,n} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa_{y,n} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa_{z,n} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + H_n = 0 \quad (2)$$

donde, el subíndice n indica núcleo, gap, vaina y óxido, los subíndices x , y o z incorporan la posibilidad de anisotropía en el coeficiente de conductividad κ y T es la temperatura. Además, $H_n = 0$ en los casos de gap, vaina y óxido. Como condiciones de contorno se impone la temperatura en la superficie externa de la vaina $T_s(z)$ (condición de Dirichlet) y $\nabla T = 0$ en el resto de la frontera (condición de Neumann).

Para resolver este sistema, se supone que la extracción del calor se realiza exclusivamente a través de las caras paralelas al plano x - z . Si el espesor, ancho y longitud de la placa son q , a y L , respectivamente, y el espesor del núcleo es s , con $s < q$, la potencia lineal producida en el núcleo de la placa está dada por:

$$P(z) = asH(z) = asH_M \cos\left(\frac{\pi z}{l_e}\right) = P_M \cos\left(\frac{\pi z}{l_e}\right) \quad (3)$$

Si llamamos Q al caudal del agua, c al calor específico y ρ a la densidad, la ecuación de balance del calor es:

$$P(z)dz = c\rho QdT \quad (4)$$

La distribución de temperatura del agua del canal en función de la posición en dirección z $T_a(z)$ se puede obtener la integrar la Ec. (4):

$$T_a(z) = T_i + \frac{P_M l_e}{c\rho Q\pi} \left[\sin\left(\frac{\pi z}{l_e}\right) + \sin\left(\frac{\pi L}{2l_e}\right) \right] \quad -\frac{L}{2} \leq z \leq \frac{L}{2} \quad (5)$$

donde T_i es la temperatura del agua al ingreso del canal. De la Ec. (5), se puede observar que $T_a(z)$ crece en forma monótona en el dominio especificado.

Sobre la superficie externa de la placa, que se encuentra en contacto con el refrigerante, se produce un salto térmico cuyo valor depende del régimen del flujo de agua (laminar o turbulento) y de los materiales involucrados. Dicho salto puede calcularse a partir de:

$$J(z) = h[T_s(z) - T_a(z)] \quad (6)$$

donde h es el coeficiente de transferencia térmica de la superficie y $J(z)$ es el flujo de calor a través de cada una de las caras x - z . Además, se supone que todo el calor que se produce en el núcleo del combustible fluye a través de las dos superficies de mayor área (*área* = aL). Entonces, el flujo de calor en cada cara, con dirección y , es:

$$J(z) = \frac{P(z)}{2a} \quad (7)$$

por lo tanto, la distribución de temperatura sobre la superficie del canal es:

$$T_s(z) = T_a(z) + \frac{P(z)}{2ah} = T_i + \frac{P_M l_e}{\pi c\rho Q} \left[\sin\left(\frac{\pi z}{l_e}\right) + \sin\left(\frac{\pi L}{2l_e}\right) \right] + \frac{P_M}{2ah} \cos\left(\frac{\pi z}{l_e}\right) \quad (8)$$

Para la simulación numérica es necesario considerar todas las fases que median entre el núcleo de la placa y el agua, que dependen del diseño del combustible. Si la placa combustible contiene un gap entre el núcleo y la vaina (como es el caso de ciertos combustibles monolíticos), éste estará ocupado por una mezcla de gases (los de fabricación más los productos de fisión) que estarán en contacto con el núcleo de la placa. En ausencia de gap, (como ocurre en los combustibles dispersos o monolíticos que se fabrican por colaminación) el núcleo está en

contacto directo con la vaina. Esta puede estar cubierta o no de un óxido en la superficie de contacto con el agua, dependiendo del material en que se constituya. Si la vaina es de aluminio, es necesario tener en cuenta la existencia de una capa de óxido pues, por su baja conductividad térmica, aumenta la temperatura del dominio. Su crecimiento es función de la temperatura de trabajo y de la composición química del agua.

El cálculo térmico es altamente dependiente de los coeficientes de conductividad utilizados. Para el caso de combustible monolítico, ellos dependen, en general, sólo de la temperatura y de la porosidad, mientras que, en el caso de un combustible disperso, dependen también de la mezcla y, fundamentalmente, de los productos de reacción generados en la interfase combustible-matriz (Marelle et al., 2004).

En DIONISIO es posible elegir diferentes modelos para el crecimiento de la capa de óxido sobre la vaina de aluminio (Kim et al., 2003; Hayes et al., 2004). Para vainas de Zircaloy, no se considera crecimiento de óxido debido a que a las temperaturas de trabajo en reactores de investigación su espesor es despreciable.

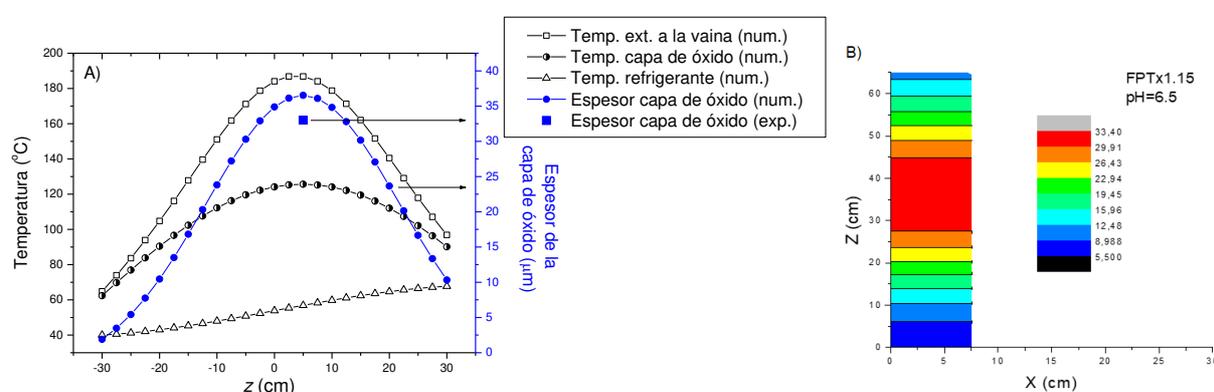


Figura 2 – A) Distribución de temperatura y espesor de óxido calculados con DIONISIO. Comparación con el valor experimental (Marelle et al., 2004). B) Mapa del espesor de óxido sobre la vaina.

En la Figura 2 se observa un ejemplo de las capacidades de cálculo del código DIONISIO con el modelo termohidráulico presente para un elemento combustible con vaina de aluminio sometido a irradiación. En A) se muestra la distribución de temperatura externa de la vaina, de la capa de óxido y del refrigerante en función de la coordenada z . Además, se encuentra la distribución de del espesor de la capa de óxido que se desarrolla sobre la vaina como consecuencia del contacto con el refrigerante a un pH igual a 6.5. Como puede observarse, a mayor temperatura de la vaina, mayor es el crecimiento del óxido. En B) se muestra el mapa de color de la distribución de la capa de óxido que se desarrolla a lo largo del elemento combustible. El resultado experimental para el máximo espesor de óxido es muy próximo al cálculo numérico realizado. A pesar de la diferencia mostrada, es importante destacar que el modelo descrito en esta sección corresponde a un modelo unidimensional.

3 NUEVO MODELO TERMOHIDRÁULICO EN DESARROLLO

A lo largo de la historia de quemado de un elemento combustible dentro de un reactor, el canal refrigerante, limitado por dos placas, sufre modificaciones que pueden afectar la estabilidad de las placas y el desempeño del elemento. Como vimos anteriormente, el crecimiento de una capa de óxido en ambas placas, limitan las dimensiones del canal. Este crecimiento depende de la temperatura, de la velocidad del fluido y del pH del mismo. Así mismo, las placas sufren cambios dimensionales asimétricos debido al proceso de hinchamiento del combustible. Por otro lado, las altas velocidades del fluido pueden generar vibraciones entre

las placas e incluso condiciones de inestabilidad que pueden llevar al pandeo de las mismas, generando así una zona de contacto y baja transferencia de calor. Finalmente, el aumento de temperatura debido a los fenómenos mencionados previamente, pueden generar burbujas en el refrigerante que dificulten la extracción de calor, produciendo un sinérgico aumento de temperatura que pueden llevar a accidentes en el núcleo.

Teniendo en cuenta todo lo mencionado anteriormente, para poder realizar un estudio más realista dentro de un código de combustibles, es necesario efectuar un enfoque más detallado de los fenómenos involucrados durante la interacción fluido-estructura. Para ello, en primer lugar, se deben resolver las ecuaciones de Navier-Stokes en el dominio del fluido. A continuación, se muestra el estado de avance de esta etapa.

3.1 Resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes

El estudio de la dinámica de fluidos se basa en tres principios (Wendt,2009; Reddy y Gartling, 2010):

- Conservación de la masa
- Conservación del momento (2ª ley de Newton)
- Conservación de la energía

En particular, el sistema de ecuaciones que resulta de resolver simultáneamente la conservación de la masa y del momento se conoce como ecuaciones de Navier-Stokes (N-S). Utilizando un enfoque Euleriano, es decir, usando un volumen de control en el cual quedan registrados los cambios del fluido cuando este lo atraviesa, para fluidos incompresibles, viscosos, Newtonianos y de densidad constante (como puede aproximarse en nuestro caso de estudio), se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones general:

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (9)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_j}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} - \rho f_i = 0 \quad (10)$$

en donde, los subíndices i, j toman valores enteros desde 1 hasta el número de dimensiones del dominio en el que se resuelve el problema, v_i es la velocidad del fluido en la dirección i , μ es la viscosidad dinámica, ρ es la densidad, P es la presión, ρf_i es la fuerza de cuerpo en la dirección i y x_i es la distancia.

El sistema (9)-(10) se complementa con las siguientes ecuaciones constitutivas:

$$\sigma_{ij} = \tau_{ij} - p\delta_{ij} \quad (11)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (12)$$

en donde, σ_{ij} es la componente ij del tensor de tensiones, τ_{ij} corresponde a la componente desviadora y δ_{ij} es la delta de Kronecker.

Existen diferentes formas de resolver el sistema (9)-(12). Uno de los más comunes es utilizar el Método Mixto de Elementos Finitos que consiste en escoger funciones de interpolación distintas para las variables de velocidad y de presión. Lamentablemente, este tipo de enfoque se traduce en la necesidad de utilizar métodos directos de resolución numérica que están condicionados por un gran costo de memoria computacional. Además, las soluciones en los entornos de grandes gradientes de velocidad y/o presión resultan en soluciones inestables con importantes oscilaciones (Reddy and Gartling, 2010; Oñate et al., 2011). Una manera de

mejorar los inconvenientes antes mencionados es aplicar términos que estabilicen las ecuaciones de N-S. En nuestro caso, siguiendo el método utilizado por [Cotela-Dalmau et al. \(2017\)](#) y [Oñate et al. \(2011\)](#) obtuvimos la estabilización del balance de masas y aplicando la forma débil del método de elementos finitos se llega al siguiente sistema matricial:

$$\begin{bmatrix} C(V) + \frac{4}{3}K_{11} + K_{22} + K_{33} & -\frac{2}{3}K_{12} + K_{21} & -\frac{2}{3}K_{13} + K_{31} & -Q_1 \\ -\frac{2}{3}K_{21} + K_{12} & C(V) + K_{11} + \frac{4}{3}K_{22} + K_{33} & -\frac{2}{3}K_{23} + K_{32} & -Q_2 \\ -\frac{2}{3}K_{31} + K_{13} & -\frac{2}{3}K_{32} + K_{23} & C(V) + K_{11} + K_{22} + \frac{4}{3}K_{33} & -Q_3 \\ -Q_1^T + C\gamma_1 & -Q_1^T + C\gamma_2 & -Q_1^T + C\gamma_3 & -L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \bar{V}_3 \\ \bar{P} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ -F_p \end{Bmatrix} \quad (13)$$

Los coeficientes de (13) son:

$$\begin{aligned} v_i &= \sum_{l=1}^{N_e} \psi_l V_i^l & p &= \sum_{l=1}^{N_e} \psi_l P^l \\ C^{lk}(V) &= \int_{\Omega^e} \rho \psi_l \left(v_j \frac{\partial \psi_k}{\partial x_j} \right) d\Omega^e & L^{lk} &= \int_{\Omega^e} \gamma_i \frac{\partial \psi_l}{\partial x_j} \frac{\partial \psi_k}{\partial x_j} d\Omega^e \\ K_{ij}^{lk} &= \int_{\Omega^e} \mu \frac{\partial \psi_l}{\partial x_i} \frac{\partial \psi_k}{\partial x_j} d\Omega^e & C_{\gamma_i} &= \int_{\Omega^e} \rho \gamma_i \frac{\partial \psi_l}{\partial x_i} \left(v_j \frac{\partial \psi_k}{\partial x_j} \right) d\Omega^e \\ Q_i^{lk} &= \int_{\Omega^e} \frac{\partial \psi_l}{\partial x_i} \psi_k d\Omega^e & F_i^l &= \int_{\Omega^e} \rho \psi_l f_i d\Omega^e + \oint_{\Gamma^e} \psi_l (\hat{n}_j \sigma_{ij}) d\Gamma^e \\ Q_i^{Tlk} &= \int_{\Omega^e} \psi_l \frac{\partial \psi_k}{\partial x_i} d\Omega^e & F_p^l &= \int_{\Omega^e} \rho \left(\gamma_j \frac{\partial \psi_l}{\partial x_j} f_j \right) d\Omega^e \end{aligned} \quad (14)$$

en donde, k, l son índices sobre la cantidad de nodos de cada elemento, ψ_l son las funciones de interpolación para las variables de velocidad y presión (v_i, p) y \bar{V}_i y \bar{P} corresponden a vectores columna cuyos elementos son los valores nodales dichas variables. Nuevamente, los índices i, j hacen referencia a las direcciones 1, 2 y/o 3 (x, y, z). Además, este sistema de ecuaciones contempla los parámetros de estabilización γ_i que pueden aproximarse con ([Oñate; 2011](#)):

$$\gamma_i \approx h_i/16\mu \quad (15)$$

en donde, h_i pueden tomarse como la máxima distancia del elemento en la dirección i .

El sistema expuesto anteriormente, que requiere el mismo grado de interpolación para la velocidad y presión, se resuelve mediante el método iterativo de los Gradientes Bi-Conjugados, cuyo algoritmo puede encontrarse en [Barret et al. \(1994\)](#).

4 RESULTADOS PRELIMINARES

Las primeras pruebas de la resolución de las ecuaciones de N-S se realizaron en un dominio bidimensional, contemplando el espesor del canal y su largo (plano $y - z$). El sistema (13) se resolvió en un dominio de 0.235 cm de espesor y 61.5 cm de largo, con una velocidad de entrada igual a 10 m/s, una densidad de 1000 kg/m³ y viscosidad igual a 0.001 Pas. Por el momento, el modelo descrito en la sección 3.1 contempla únicamente el régimen laminar, y no tiene en cuenta la evolución térmica del fluido o el combustible.

En la figura 3 se puede observar el perfil de la velocidad v_z , en función de la altura del canal, calculada en este trabajo y su comparación con el resultado obtenido por medio del software COMSOL, alcanzando un muy buen acuerdo. Además, en línea punteada se muestra el

resultado obtenido en COMSOL aplicando el modelo $\kappa - \varepsilon$ de turbulencia. Las diferencias observadas muestran claramente la necesidad de incluir modelos turbulentos. Sin embargo, el resultado aquí mostrado indica que el enfoque utilizado permite una buena descripción de la evolución de la velocidad, siendo un resultado alentador para posteriormente complejizar el problema y lograr el acople con modelos turbulentos y con la conservación de la energía, para obtener una mejor descripción de la temperatura.

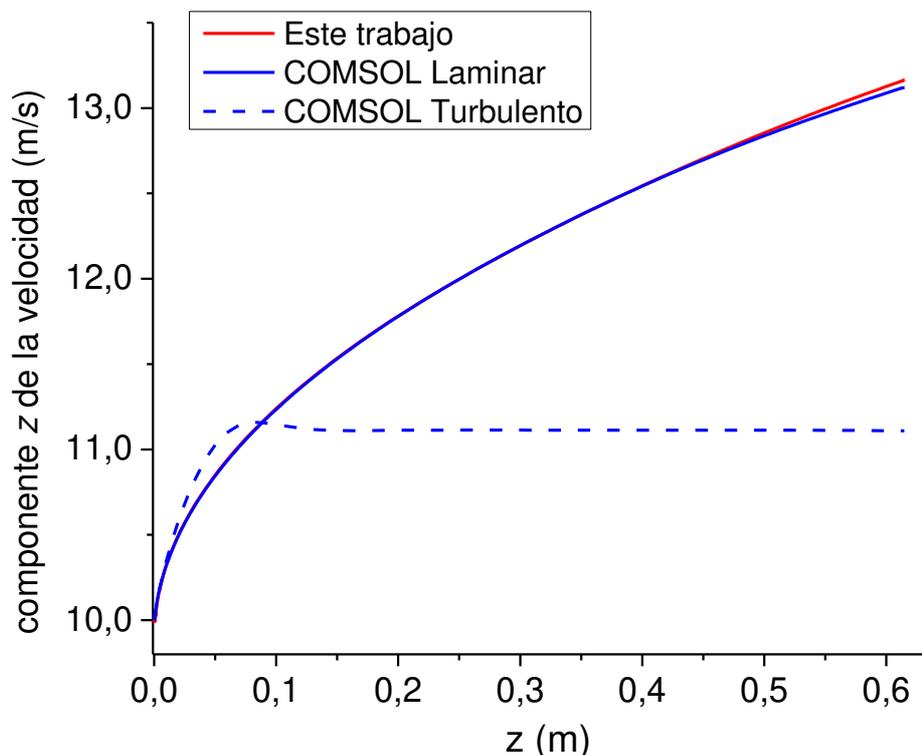


Figura 3 – Perfil de la componente z de la velocidad a lo largo del canal refrigerante calculado en este trabajo y su comparación con COMSOL para régimen laminar. Además, se incorpora el resultado para régimen turbulento.

5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO

En este trabajo se presentó la aproximación actual en que DIONISIO contempla la termohidráulica de un canal refrigerante entre combustibles tipo placa en un reactor de investigación. Esta aproximación unidimensional, si bien permite obtener buenos resultados, para lograr una descripción más realista del comportamiento del combustible es necesario incorporar con mayor detalle un modelo de dinámica de fluidos. En este sentido, se presentó el estado de avance de un modelo que permite resolver las ecuaciones de N-S en régimen laminar obteniéndose buenos resultados al comparar con un software de resolución. Además, la comparación del perfil de velocidad entre régimen laminar y turbulento, muestra la necesidad de incluir modelos de turbulencia para una mejor descripción.

A futuro, para poder resolver el problema completo que involucre la evolución del fluido y la transferencia térmica en el sistema fluido-estructura, requiere de un dominio en el fluido en donde se resuelvan las Ec. (9)-(12) más la transferencia térmica en el fluido y otro dominio en la estructura que debe ser resuelto como lo hace DIONISIO actualmente. En cada paso de tiempo, el código debe resolver la evolución del fluido, considerando como condiciones de borde el no deslizamiento del fluido sobre las paredes de la placa y la temperatura de contacto

con las superficies exteriores a la capa de óxido. Así mismo, debe calcularse la distribución térmica de todo el sistema fluido-estructura e incluir la deformación de los canales para estudiar casos de fallas o accidentes en los elementos combustibles.

REFERENCIAS

- Barret, R., Berry, M., Chan, T. F., Demmel, J., Donate, J. M., Dongarra, J., Eijkhout, V., Pozo, R., Romine, C., and Van der Vorst, H., Templates for the solution of linear systems: Building locks for iterative methods. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 1994
- Cotela-Dalmau, J., Rossi, R., and Oñate, E., A FIC-based stabilized finite element formulation for turbulent flows. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 315, 607-631, 2017.
- Denis, A., and Soba, A. Simulation of pellet-cladding thermomechanical interaction and fission gas release. *Nucl. Eng. Des.*, 223, 2, 211-229, 2003.
- Foster, A. R., and Wright, Jr, R. L. Basic nuclear engineering. 1983.
- Hayes, S. L., Meyer, M. K., Hofman, G. L., and Snelgrove, J. L., U-Mo/Al dispersion fuel modelling. *International RERTR Meeting*, 2004.
- Kim, Y. S., Hofman G. L., Hanan, N. A., and Snelgrove, J. L., Prediction model for oxide thickness on aluminum alloy cladding during irradiation. *International RERTR Meeting*, 2003.
- Lemes, M, Soba, A., and Denis, A. Modelo termoquímico de una barra combustible nuclear en condiciones normales y de accidente. *Mecánica Computacional Vol XXXIII*, 2857-2869, 2014.
- Marelle, V., Huet, F., and Lemoine, P., Thermo-mechanical modelling of U-Mo fuels with MAIA. *8th International Topical Meeting on Research Reactor Fuel Management*, München, Germany, 2004.
- Oñate, E., Idelsohn, S. R., and Felippa, C. A., Consistent pressure Laplacian stabilization for incompressible continua via higher-order finite calculus. *Int. J. Numer. Meth. Engng*, 87, 171-195, 2011.
- Reddy, J. N., and Gartling, D. K., The finite element method in heat transfer and fluid dynamics. CRC Press, 2010.
- Soba, A., and Denis, A. PLACA/DPLACA: Código para la simulación del comportamiento de un combustible tipo placa monolítico/disperso. *Rev. Int. Mét. Num. Cál. Dis. Ing.*, 23, 2, 205-224, 2007.
- Soba, A., and Denis, A., Simulation with Dionisio 1.0 of thermal and mechanical pellet-cladding interaction in nuclear fuel rods. *J. Nucl. Mater.* 374, 32-43, 2008.
- Soba, A., Simulación del comportamiento termomecánico de una barra combustible en operación, *Tesis de doctorado, FCEyN, UBA*, 2007.