

SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE LA FACILIDAD ROCOM MEDIANTE EL CÓDIGO DE SISTEMAS TRACE5

COMPUTATIONAL SIMULATION OF THE ROCOM FACILITY USING SYSTEM CODE TRACE5

Juan P. Messiga^a, Santiago F. Corzo^b

^a *Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN), Av. Del Libertador 8250, C1429PNB CABA, Argentina,*
jmessiga@arn.gob.ar, <https://www.argentina.gob.ar/arn>

^b *Centro de Investigación de Métodos Computacionales (CIMEC-CONICET), Argentina,*
scorzo@cimec.santafe-conicet.gov.ar

Palabras clave: Reactores nucleares, Cálculo termo-hidráulico, Inyección de emergencia, TRACE5.

Resumen. TRACE5 es un código de sistemas de planta diseñado para realizar simulaciones de transitorios operacionales y accidentes en reactores nucleares. A diferencia de otros modelos similares, TRACE5 tiene la capacidad de simular ciertas zonas de la central nuclear con una discretización 3D de forma monolítica. Esta herramienta brinda una gran ventaja debido a que cierta zona de gran complejidad geométrica no puede ser representados correctamente con componentes 1D/0D. La distribución fluido-dinámica en la vasija de cualquier tipo de reactor reviste una gran importancia tanto en condiciones de operación normal como situaciones accidentales. Bajo esta última situación, pueden ocurrir elevados gradientes de temperatura debido al sobrecalentamiento o también al momento de la reinyección de agua fría. En el presente trabajo se utilizó este código para analizar la distribución de velocidades en el downcomer y lowerplenum en una facilidad experimental llamada ROCOM, la cual simula un reactor PWR KONVOI a escala 1:5. Como parte de estudio se prevé analizar la sensibilidad respecto a distintos niveles de refinamiento geométrica, esquemas numéricos y la capacidad de transportar un trazador. Los resultados obtenidos con TRACE5 muestran un buen acuerdo respecto a los valores experimentales y permiten definir buenas prácticas de modelado.

Keywords: Nuclear reactor, Thermohydraulic calculation, Safety injection, TRACE5.

Abstract. TRACE5 is a system code designed to perform simulation of operational transients and accidents in nuclear reactors. One of its main features, which differences it from other system codes, is that it is able to simulate certain zones of a nuclear power plant using a 3D discretization with a monolithic approach. This tool is a great advantage because the geometry of some of these zones might be quite irregular and difficult to be represented by 1D/0D components. The fluid-dynamic distribution of variables such as pressure or temperature in the vessel is a matter of high relevance in normal operation and accidents. When the latter takes place, huge temperature gradients may occur due to overheating or during the safety injection of cold water. In this work, TRACE5 was used to calculate the velocity and solute distribution in the downcomer and the lowerplenum in the reactor pressure vessel of the ROCOM facility, which resembles a PWR KONVOI scaled by 1:5. Also, the sensitivity of the calculation was analyzed, varying the nodalization and the numerical schemes. The results show good agreement respect to the experimental values and allowed to develop modelling good practices.

1. INTRODUCCIÓN

El programa TRACE5 es un código de sistemas utilizado para simular transitorios y accidentes en reactores nucleares ([Division of System Analysis, U.S.NRC, 2013](#)). El mismo ha sido utilizado especialmente para modelar centrales nucleares ([Allison, C. M., Hohorst, J. K., 2010](#)). Si bien este programa continúa en desarrollo, se ha comenzado a usar extensamente ya que incluye el componente tridimensional VESSEL. Este componente permite calcular los flujos dentro del mismo y capturar fenómenos 3D que otros códigos puramente unidimensionales no pueden determinar.

En este trabajo se modeló la facilidad experimental ROCOM (ver [Página web oficial de ROCOM](#)). La misma es una representación a escala 1:5 de un reactor PWR KONVOI y se la utiliza con distintos fines, como analizar fenómenos termohidráulicos dentro de vasijas de presión (estudiar la inyección de agua fría luego del apagado de la reacción nuclear o el inicio de la convección natural). Además, se puede usar para validar códigos de sistemas, como el mencionado TRACE5.

La versatilidad de esta facilidad permite realizar distintos tipos de pruebas, desde operación con las bombas a caudal nominal como simular las condiciones de convección natural. En este trabajo se evaluó uno de los tests en el que se introduce un soluto en uno de los cuatro loops. La vasija de presión fue modelada utilizando el componente VESSEL, ya que se buscaba analizar la capacidad del dicho componente para predecir la dispersión del mencionado soluto. Además, se utilizaron tres nodalizaciones distintas para calcular los resultados de las pruebas, utilizando 8, 24 y 40 niveles azimutales en dicho componente. Asimismo, se disponía de valores de velocidad a la salida del downcomer, los cuales fueron comparados con los obtenidos por medio del código TRACE5.

2. DESCRIPCIÓN DE LA FACILIDAD ROCOM

Durante años se han diseñado y construido facilidades experimentales a escala que representan reactores nucleares con el fin de proporcionar información sobre fenómenos que pueden ocurrir en estas instalaciones, especialmente enfocados en evaluar la integridad estructural y funcional del reactor. ROCOM (ver [Página web oficial de ROCOM](#)) es una facilidad experimental para realizar pruebas que modela un reactor PWR KONVOI. Debido a su versatilidad, permite realizar una amplia variedad de experimentos, muchos de los cuales se usan para validar códigos de sistemas termo-hidráulicos o modelos CFD. Este prototipo está construido en una escala lineal de 1:5 en comparación con un reactor tipo PWR. Además, el tiempo que tarda el refrigerante en recorrer el reactor y su loop es igual en ambos reactores cuando se opera en condiciones nominales.

La instalación se utiliza principalmente para la investigación de procesos físicos como la mezcla de refrigerantes y otros fenómenos relacionados, como el choque térmico presurizado (PTS por sus siglas en inglés). Permite el ingreso de diferentes caudales a distintas temperaturas o con distinta concentración de boro para analizar el mezclado de corrientes y la concentración de trazas en distintas zonas de la vasija. Además, sus bombas de caudal regulable permiten simular distintas condiciones de operación, desde la circulación natural hasta aquellas que involucran la condición de caudal nominal ([Coscarelli, E., Lutsanych, S., D'Auria, F., 2013](#)). Incluso es posible aumentar el caudal de circulación siguiendo una determinada pendiente ([Kurki, J., 2015](#)).

La instrumentación tiene como propósito medir este tipo de variables, lo que permite obtener resultados de alta resolución en cada experiencia (ver [Página web oficial de ROCOM](#)). La instalación consta de un recipiente de presión de acrílico, cuatro juegos de bombas, simuladores de generadores de vapor y las cañerías de la rama caliente y fría con sus respectivas boquillas (llamadas “nozzle”) de ingreso y egreso del mencionado recipiente. Además, hay tuberías y válvulas conectadas a estas, que permiten la inyección de agua fría en el recipiente de presión, simulando el Sistema de Refrigeración de Emergencia del Núcleo (ECCS, por sus siglas en inglés).

El recipiente de presión de la instalación cuenta con cuatro nozzles de entrada, por donde ingresa el refrigerante, y desciende por el downcomer. Las cuatro corrientes se mezclan en el plenum inferior y asciende por la placa de soporte del núcleo, atraviesa el haz de tubos y llega al plenum superior. Finalmente, sale por uno de las cuatro nozzles de salida. El plenum inferior es un toroide circunferencial que contiene un cilindro perforado, que se coloca debajo de la placa de soporte del núcleo (ambos comparten el mismo eje). En cuanto al plenum superior, este se sitúa sobre el haz de tubos y no tiene elementos internos. En la Figura 1 se presenta la disposición de los tubos en la placa soporte y en la Tabla 1 resume las principales características de la vasija del reactor ROCOM.

Parámetro	Valor
Número y diámetro de agujeros del cilindro perforado	410 / 15
Diámetro de tubos (mm)	30
Número de tubos	193
Diámetro interior del recipiente de presión (mm)	1000
Altura del recipiente de presión (mm)	~2400
Diámetro interior del nozzle de entrada / salida (mm)	150
Ancho del DC (mm)	63
Caudal en cada loop (m ³ /h)	350 (max.) 185 (nominal)
Velocidad de entrada del refrigerante (m/s)	5.5 (max.) 2.91 (nominal)
Velocidad en el DC (m/s)	2.1 (max.) 1.1 (nominal)
Número de Reynolds en el nozzle de entrada (-)	8.3·10 ⁵ (max.) 4.4·10 ⁵ (nominal)
Número de Reynolds en el DC (-)	2.6·10 ⁵ (max.) 1.4·10 ⁵ (nominal)

Tabla 1: Parámetros geométricos de la facilidad ROCOM.

La instalación cuenta con sensores de medición de conductividad eléctrica de malla de alambre, lo que permite obtener resultados de alta resolución. Estos medidores se encuentran en el downcomer, la entrada de cada tubo y los nozzle de entrada y salida. Los sensores del downcomer se colocan en 64 posiciones azimutales y 32 en posiciones axiales, dando un total de 2048 puntos de medición, distribuidos cada 5.625° y separados por una distancia vertical de 29 mm. Se encuentran en la parte superior e inferior del downcomer. Además, hay un sensor en cada tubo y 16 sensores de medición en cada nozzle.

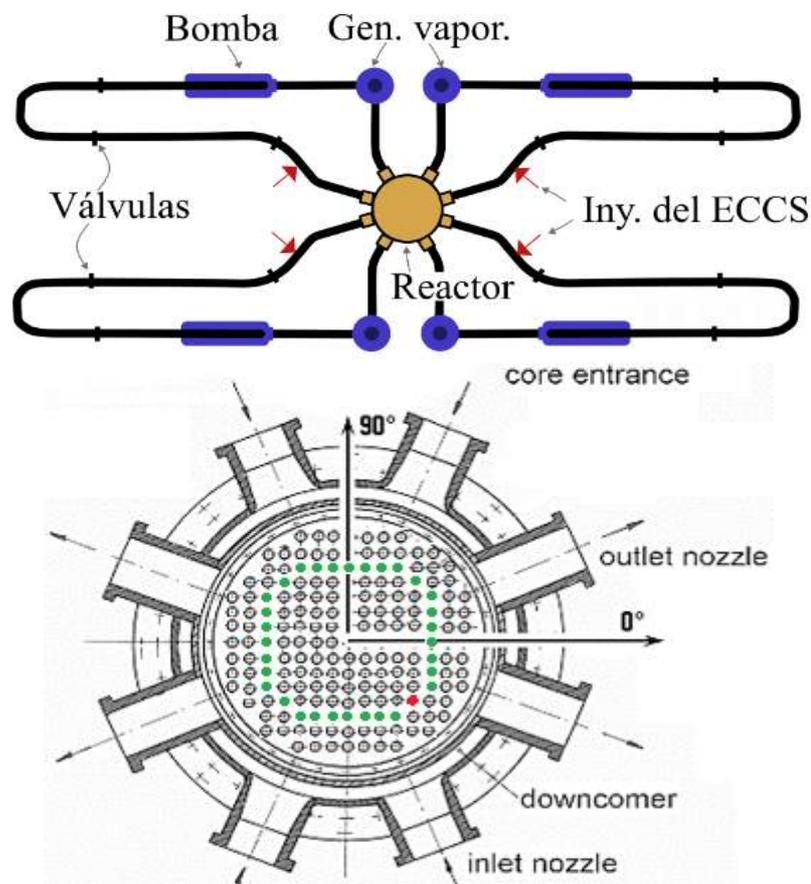


Figura 1: Esquema de la facilidad ROCOM y la placa de soporte del núcleo.

3. MÉTODOS NUMÉRICOS DE TRACE5

TRACE5 resuelve las ecuaciones de balance de masa, energía y cantidad de movimiento utilizando el método de volúmenes finitos para sistemas de una o dos fases ([Division of System Analysis, U.S.NRC, 2013](#)). Las ecuaciones de masa y energía tienen en cuenta la transferencia de estas entre dos fases, el calor generado dentro de cada una, la transferencia de calor en paredes y el calor por fricción en las bombas, entre otros fenómenos. La ecuación de cantidad de movimiento tiene en cuenta la fricción entre fases, la de cada una de ellas con las paredes, la transferencia de cantidad de movimiento asociada a la transferencia de masa entre líquido y vapor, la gravedad, etc.

Además, TRACE5 realiza una serie de aproximaciones (ver [Division of System Analysis, U.S.NRC, 2013](#)), las cuales se presentan a continuación:

1. La primera de ellas considera que el promedio volumétrico de un producto de dos magnitudes se supone igual al producto de esos dos promedios.
2. TRACE5 supone que el calor se transfiere a través de las paredes y entre fases, pero no tiene en cuenta la transferencia de calor dentro de una fase (conducción).
3. Se desprecia el esfuerzo de tensión entre dos celdas adyacentes, pero tiene en cuenta el esfuerzo entre el fluido y las paredes de metal o entre fases.
4. Se desprecia el calentamiento viscoso (a excepción de en las bombas, donde se puede incluir como opción de usuario).

En este trabajo se produce la disolución de un soluto en el refrigerante del reactor. Para modelar esto, TRACE5 adiciona la ecuación de transporte del mismo. En esta ecuación se considera que el soluto es arrastrado por la fase líquida. Además, TRACE5 permite considerar la solubilidad y la deposición de soluto en el reactor, pero en este trabajo se considera que dicho fenómeno no ocurre por lo que su término asociado no se tiene en cuenta en la ecuación.

TRACE5 calcula cuatro variables termodinámicas: presión, temperatura, energía interna y densidad. El código utiliza magnitudes escalares (densidades, temperaturas, presiones, por ejemplo) que se calculan en las celdas, y vectoriales (como velocidades), calculadas en los bordes de las mismas.

El código dispone de dos métodos semi-implícitos de cálculo numérico para discretizar las ecuaciones de balance en el tiempo. El llamado Método Semi-implícito es el esquema de cálculo más apropiado para captar fenómenos que requieren un paso de tiempo relativamente pequeño. Por otro lado, el método SETS (Stability Enhancing Two-Steps) se caracteriza por violar el límite de estabilidad de Courant material, permitiendo pasos de tiempo mayores, lo cual lo vuelve inapropiado para capturar fenómenos que requieran que dicha variable sea pequeña. SETS es el método utilizado en este trabajo.

4. MODELO DE LA FACILIDAD ROCOM EN TRACE5

La instalación ROCOM se modeló utilizando TRACE5 patch5. El modelo consta de PIPES (componente utilizado para modelar tuberías), FILLS y BREAKs (los cuales permiten introducir condiciones de contorno dependientes del tiempo en los nozzles de entrada y salida del recipiente), y un VESSEL, el cual se utiliza para modelar el recipiente de presión ([Division of System Analysis, U.S.NRC, 2008](#)). En la Figura 2 se presenta una imagen de dicho modelo. El componente VESSEL tiene dieciséis celdas axiales, nueve radiales y ocho azimutales, dando en total 1152 celdas.

De los nueve espacios radiales, los primeros siete interiores corresponden al haz de tubos y el noveno corresponde al downcomer. Por su parte, el octavo nivel corresponde a una pared de separación entre ambas zonas. La facilidad ROCOM cuenta con 193 canales, los cuales en el modelo fueron distribuidos en las primeras siete zonas radiales. En la Tabla 2 se presenta la cantidad de canales que condensa cada uno de los niveles radiales.

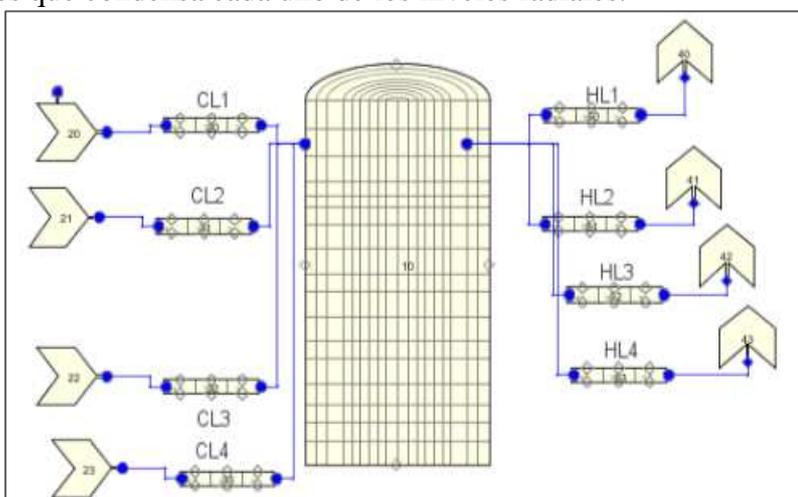


Figura 2: Modelo de la planta realizado por medio de TRACE5

Nivel radial	Cantidad de canales
1	5
2	16
3	16
4	24
5	28
6	40
7	64

Tabla 2: Cantidad de tubos por nivel radial.

En el componente VESSEL se utilizó el concepto de porosidad para modelar el volumen y las áreas de flujo por las que circula el fluido, ya que la geometría de la celda no coincide siempre con la del reactor. Este enfoque ya fue utilizado en trabajos como [Coscarelli, E., 2013](#) y permitió simular el downcomer, el plenum inferior, la placa de soporte del núcleo, el haz de tubos y el cilindro perforado, usando en este último caso la porosidad de los bordes de celda en lugar de la de los volúmenes.

La placa de soporte del núcleo y el haz de tubos abarcan siete niveles radiales interiores. Sus áreas de flujo y sus porosidades se calcularon con el número total de tubos en cada celda y con ella se determinó la porosidad de cada celda de esta zona. Además, como el refrigerante de un tubo no puede pasar a otro mientras esté en el haz de tubos, se anulaban las áreas de flujo azimutal y radial. Esto equivale a impedir que el agua de las celdas que representan un canal pase a otro.

TRACE permite al usuario colocar coeficientes de pérdida de carga en cada borde. Al modelar ROCOM, estos se colocaron en los nozzle de entrada y salida, así como en el ensanchamiento del downcomer (la zona que se encuentra por encima del haz de tubos tiene menor espesor), el cilindro perforado, la entrada a la placa de soporte del núcleo y la entrada y salida del haz de tubos. Las condiciones iniciales y de borde del transitorio se resumen en las Tabla 3 y 4.

Variable	Valor
Concentración (-)	0
Temperatura (°C)	25.0
Caudal másico (kg/s)	51.3
Densidad (kg/m ³)	997.3
Presión (bar)	1.0

Tabla 3: Condiciones iniciales del modelo.

El transitorio desarrollado en el modelo es el que se presenta en ([Boumaza, M., Moretti, F., Dizene, R., 2014](#)) y dura 80 segundos. Este tiempo es suficiente para analizar los fenómenos que intervienen en cada prueba. Dichas corridas se realizaron en un procesador Intel Core i5-7200 de 2.7 GHz de velocidad con 8 GB de memoria RAM.

En el inicio del transitorio se introduce el soluto con un salto escalón de la concentración de 0 a 1% en el loop 1, el cual dura aproximadamente 6 segundos. Esto es lo que se presenta en la Figura 3, tal como ocurre en [Boumaza, M., Moretti, F., Dizene, R., 2014](#).

Entrada		
Variable	Loop 1	Loop 2 – 4
Concentración (-)	Variable	0
Temperatura (°C)	25.0	
Caudal másico (kg/s)	51.3	
Presión (bar)	1.0	
Salida		
Variable	Loop 1– 4	
Temperatura (°C)	25	
Presión (bar)	1.0	

Tabla 4: Condiciones de contorno, nozzles de entrada y salida.

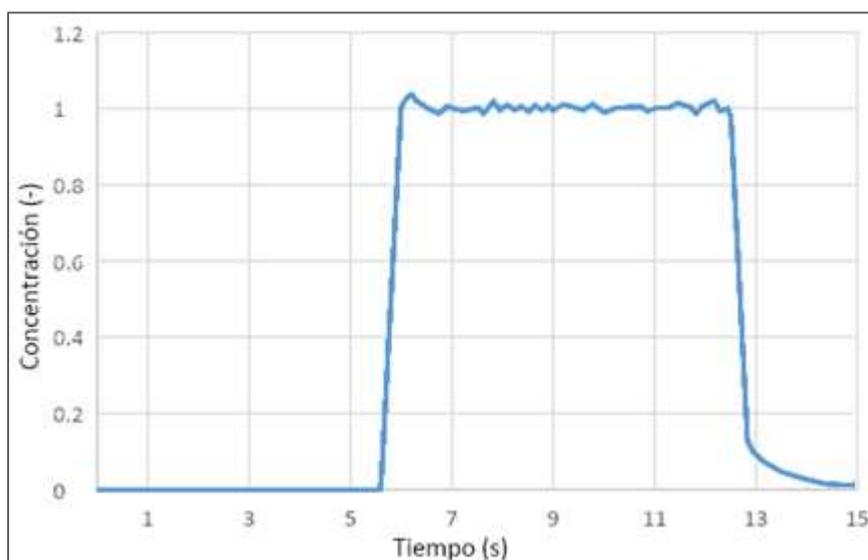


Figura 3: Concentración normalizada del soluto en el nozzle del loop 1.

Para analizar la capacidad de TRACE5 para reproducir eventos como el descrito anteriormente se corrió el modelo descrito utilizando distintas nodalizaciones azimutales, las cuales contaban con 8, 24 y 40 niveles azimutales.

5. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados del modelo de TRACE5 para las tres nodalizaciones utilizadas y se los compara con los datos experimentalmente de [Boumaza, M., Moretti, F., Dizene, R., 2014](#). Del experimento realizado se dispone de cuatro resultados distintos, los cuales se presentan a continuación:

- Concentración promedio en el haz de tubos
- Concentración en el canal D-12 (marcado en rojo en la Figura 1)
- Concentración azimutal en la placa de soporte del núcleo
- Velocidad axial en el downcomer

En la Figura 4 se presentan los resultados de la concentración promedio normalizada en el haz de tubos. Se puede observar que los resultados de TRACE5 muestran un gran acuerdo respecto a los resultados experimentales. A su vez, en la distribución temporal promedio se puede observar un gran nivel de independencia respecto a la nodalización utilizada.

La figura 5 muestra la concentración del soluto en un único canal D-12 y se la comparó con los resultados experimentales. Al igual que en el caso anterior, TRACE predice satisfactoriamente la concentración en el canal para las tres nodalizaciones utilizadas. En este sentido, no se observan variaciones en los resultados para los diferentes niveles de refinamiento.

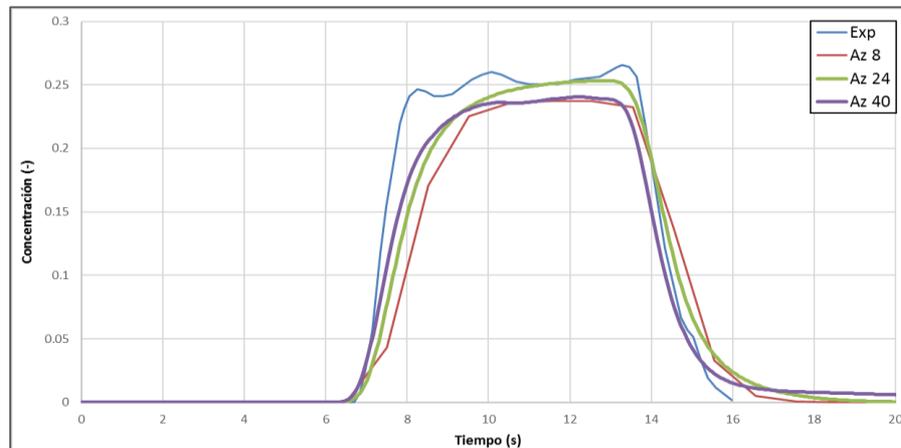


Figura 4: Concentración promedio normalizada de soluto en reactor.

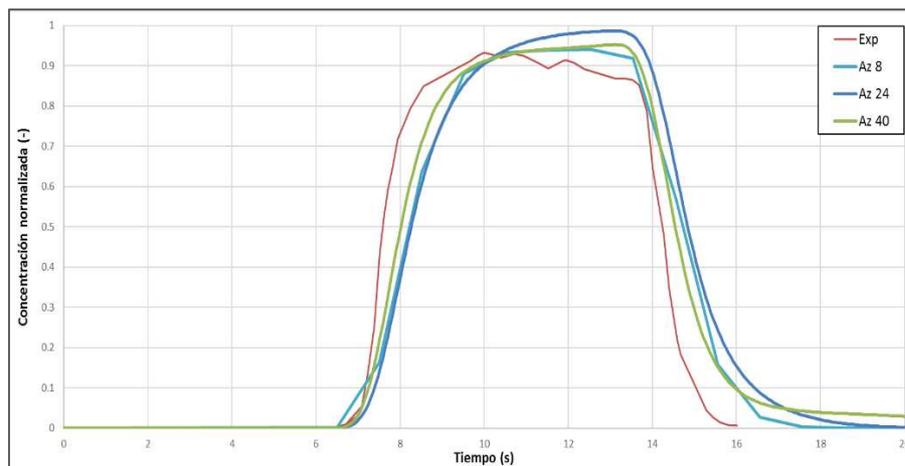


Figura 5: Concentración normalizada del soluto en el canal D-12.

Dada la capacidad del componente VESSEL de simular el transporte del fluido a lo largo de la vasija de presión, esto permite conocer como es la distribución azimutal del soluto. Para analizar la capacidad de TRACE5 para predecir la pluma de dispersión del mismo se tomaron los datos de concentración azimutal a los 9,5 segundos informados en [Boumaza, M., Moretti, F., Dizene, R., 2014](#). Esto consistió en tomar las concentraciones normalizadas para los canales indicados en verde en la Figura 1.

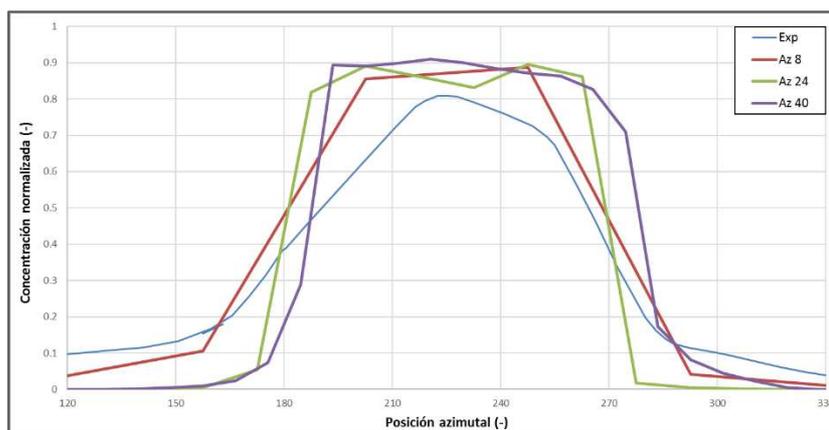


Figura 6: Concentración azimutal normalizada en la placa de soporte del núcleo.

La Figura 6 presenta la distribución del soluto para las distintas posiciones azimutales de la vasija. Se debe tener en cuenta que el pico máximo de concentración coincide con la posición azimutal de la rama fría donde ingresa el soluto. De estos resultados se puede observar que TRACE5 calcula satisfactoriamente la posición del pico máximo de concentración y el valor. Con cada nodalización se obtuvo una concentración de entre 0.8 y 0.9, mientras que el pico de los resultados experimentales es 0.8. Los diferentes niveles de refinamiento azimutal muestran un satisfactorio grado de convergencia dado que los casos con 24 y 40 celdas no muestran diferencias significativas.

En lo que respecta a la distribución espacial de la pluma existen algunas discrepancias respecto a los resultados experimentales. Para los casos de 24 y 40 celdas se observa una pluma más concentrada y con valores ligeramente mayores al experimento. Esta falta de dispersión del soluto puede explicarse desde el punto de vista que TRACE no incluye modelos de turbulencia y por lo tanto no se contempla la dispersión turbulenta del fluido como veremos a continuación para los perfiles de velocidad. Pese a las discrepancias, los resultados son ampliamente aceptables para este tipo de estudios donde se usan códigos de sistemas para evaluar eventos en centrales nucleares.

En la Figura 7 se muestra los resultados de las velocidades axiales en la zona inferior del downcomer. De los mismos se desprende que el cálculo realizado con 24 niveles azimutales presenta los resultados más cercanos a los datos experimentales. En cambio, al utilizarse una malla más refinada, con 40 niveles azimutales, se obtienen resultados más similares a los obtenidos por medio del cálculo CFD de [Boumaza, M., Moretti, F., Dizene, R., 2014](#).

En sintonía con las observaciones mencionadas anteriormente respecto a la dispersión de la pluma de soluto, el perfil de velocidad para casos con mayor refinamiento muestra plumas cada vez más concentradas. En este sentido, la falta de modelos para contemplar la viscosidad turbulenta puede explicar este fenómeno.

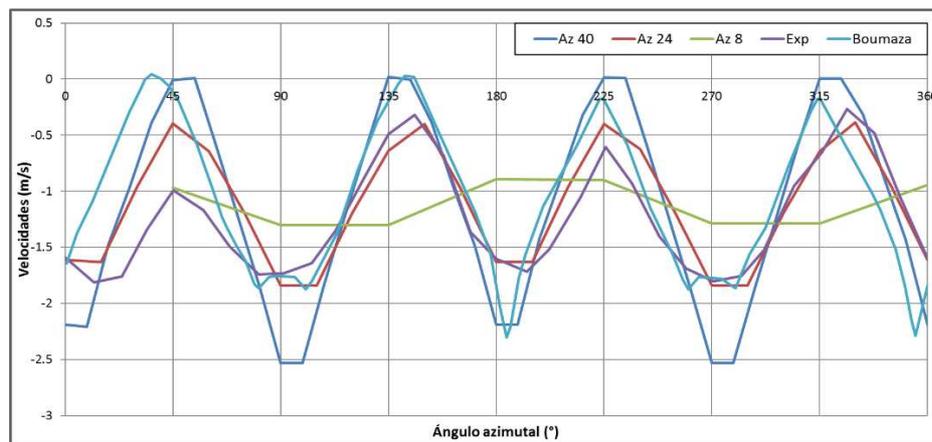


Figura 7: Velocidades en el downcomer.

6. CONCLUSIONES

- Se utilizó TRACE5 para modelar la facilidad experimental ROCOM. Se observó que en los cálculos de concentración hay muy buena correspondencia entre los datos experimentales y los resultados. En particular, en la Figura 4 se compara la concentración promedio del reactor calculada por TRACE5 para cada una de las tres mallas y se las compara con los datos experimentales, mostrando una buena correlación entre ellos.
- Algo similar se observa en el cálculo de la Figura 5, donde se presenta la concentración en el canal D-12. Los resultados obtenidos son muy similares a los valores experimentales. Esto demuestra que TRACE5 puede predecir valores promediados (en el reactor) como puntuales. Sin embargo, como se observa en la Figura 6, los resultados del código son mejores en las zonas de mayor concentración y tiene dificultades para predecir las zonas de menor concentración.
- Los valores de las velocidades en el downcomer se presentan en la Figura 7. Los resultados que más se acercan a los valores experimentales se obtuvieron con la malla de 24 niveles azimutales y la de 40 se asemeja a la obtenida por medio del cálculo CFD. Esto puede deberse a la falta de un modelo para contemplar la viscosidad turbulenta.
- Los resultados son vastamente aceptables para este tipo de códigos de sistemas y se espera que las discrepancias se deban a la falta de un modelo de dispersión turbulenta.

7. REFERENCIAS

- Division of System Analysis. U.S. NRC, *TRACE V5.840 Theory Manual*. 2013.
- Allison, C. M., Hohorst, J. K., Role of RELAP/SCDAPSIM in Nuclear Safety. 2010.
- Página web oficial de ROCOM: <https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=11974&pNid=2737>
- Coscarelli, E., Lutsanych, S., D'Auria, F., *Thermal Hydraulic System Codes Performance in Simulating Buoyancy Flow Mixing Experiment in ROCOM Test Facility*, 22nd International Conference Nuclear Energy for New Europe, 2013
- Kurki, J. *Modelling of ROCOM Mixing Test 2.2 with TRACE v5.0 Patch 3*, NUREG/IA-0454, 2015
- Division of System Analysis. U.S. NRC, *TRACE V5.0 User Manual Vol. 1: Input Specification*. 2008.
- Coscarelli, E., *An Integrated Approach to Accident Analysis in PWR*, Università di Pisa, 2013
- Boumaza, M., Moretti, F., Dizene, R., *Numerical Simulation of Flow and Mixing in ROCOM Facility Using Uniform and non-Uniform Inlet Flow Velocity Profile*, Nuclear Engineering and Design, 280: 362-371, 2014