



EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF SIPHON-BREAK SYSTEMS FOR NUCLEAR REACTOR SAFETY ENHANCEMENT

Natanael R. Moya¹, Santiago Corzo^{1,2}, Damian Ramajo^{1,2}, Dario M. Godino^{1,3}

¹UTN - FRP - Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Paraná, Argentina

²CIMEC Centro de Investigación de Métodos Computacionales (UNL/CONICET), Santa Fe, Argentina

³UNL - Universidad Nacional del Litoral
dmgodino@gmail.com, <http://www.cimec.org.ar>

Keywords: Siphon-Break; CFD; Nuclear Reactors; OpenFOAM.

RESUMEN

El desarrollo de sistemas rompesifones es crucial para prevenir el descubrimiento del núcleo durante accidentes de pérdida de refrigerante (LOCA) en reactores nucleares. En este trabajo, se diseñó y construyó una instalación experimental que emula un sistema rompesifón en forma de U, permitiendo la modificación de geometrías y condiciones operativas. Posteriormente, se realizaron simulaciones numéricas mediante CFD con OpenFOAM, utilizando el método de volumen de fluido (VOF) para capturar la interfaz aire-líquido en diversas configuraciones. Los resultados experimentales y numéricos mostraron buena concordancia, especialmente con mallas refinadas, lo que permitió captar mejor las dinámicas complejas de la interfaz. Este estudio valida el uso del método VOF y refuerza la confianza en las herramientas computacionales para el diseño de sistemas rompesifones.

1. INTRODUCCIÓN

La seguridad en los reactores nucleares es una prioridad en la industria, y los sistemas rompesifones son empleados como una medida pasiva para limitar el drenaje de refrigerante ante una pérdida de refrigerante (LOCA) en reactores de investigación y piscinas de almacenamiento de combustible. En los reactores de tipo piscina abierta, que se utilizan para la producción de radioisótopos, la formación de recursos humanos y otros usos, se genera potencia térmica, y si esta supera 1 kW, se requiere un sistema de refrigeración externo. Sin embargo, en caso de fallo, el núcleo debe poder disipar el calor mediante circulación natural en la piscina.

Para mantener el nivel de agua por encima del núcleo, idealmente las conexiones de tuberías se ubiquen por encima del nivel del núcleo. No obstante, cuando esto no es posible, los sistemas rompesifones pueden prevenir el drenaje sifonado, que ocurre cuando el refrigerante podría fluir desde la piscina hasta que las presiones entre la entrada y la salida se igualen. El funcionamiento del sistema se basa en principios como la introducción de aire para reducir el peso de la columna de líquido, lo que rompe el sifón.

El fenómeno de rotura del sifón es complejo debido a la naturaleza transitoria, bifásica y turbulenta del flujo, lo que dificulta su modelado y requiere estudios teóricos y numéricos. Algunos estudios, como el de Lee y Kim [1], han desarrollado modelos para predecir el nivel de



líquido posterior a un LOCA, mientras que otros, como Seo y col. [2] y Ramajo [3], han empleado dinámica de fluidos computacional (CFD) con buenos resultados, aunque aún se necesitan más investigaciones para evaluar parámetros como el mallado y la turbulencia en geometrías más complejas.

Este trabajo se enfoca en estudiar la rotura del sifón en una instalación de laboratorio, variando la geometría de la región del rompesifón y las condiciones operacionales, como el caudal de aire. Además, se reproducen los ensayos con CFD, utilizando OpenFOAM-10 y aplicando el método de volumen de fluido (VOF) para capturar la interfaz aire-líquido. El objetivo es validar el método VOF en flujos multifásicos complejos, comparando los resultados experimentales y numéricos, tanto en términos de la evolución del nivel de líquido como en los patrones de flujo observados mediante filmaciones de alta velocidad. El estudio concluye con las implicancias de este estudio para el diseño de futuros sistemas rompesifón

2. METODOLOGÍA

Esta sección describe brevemente los procedimientos adoptados en el diseño y construcción del experimento, el modelo matemático, la discretización del dominio, las propiedades del fluido, las condiciones de contorno y los modelos considerados en OpenFOAM para simular el experimento.

2.1. Diseño del experimento

Se desarrolló un banco experimental para evaluar sistemas rompesifones en diferentes geometrías y condiciones operativas. La instalación consta de dos partes principales:

1. **Módulo principal:** Incluye un tanque de almacenamiento de PVC de 103 mm de diámetro y una tee donde ocurre el rompesifón. La tee, fabricada por impresión 3D y ensamblada con policarbonato transparente, permite la observación y filmación a alta velocidad, con orificios laterales para probar configuraciones (D1, D2, D3). Está conectada a un tubo de descarga de 26.1 mm y una válvula para variar el tamaño de rotura (M0 y M1).
2. **Circuito de bomba y reservorio:** Consiste en una bomba de 12V con caudal regulable entre 0 y 1000 L/h, recirculando agua desde un reservorio de 20 litros.

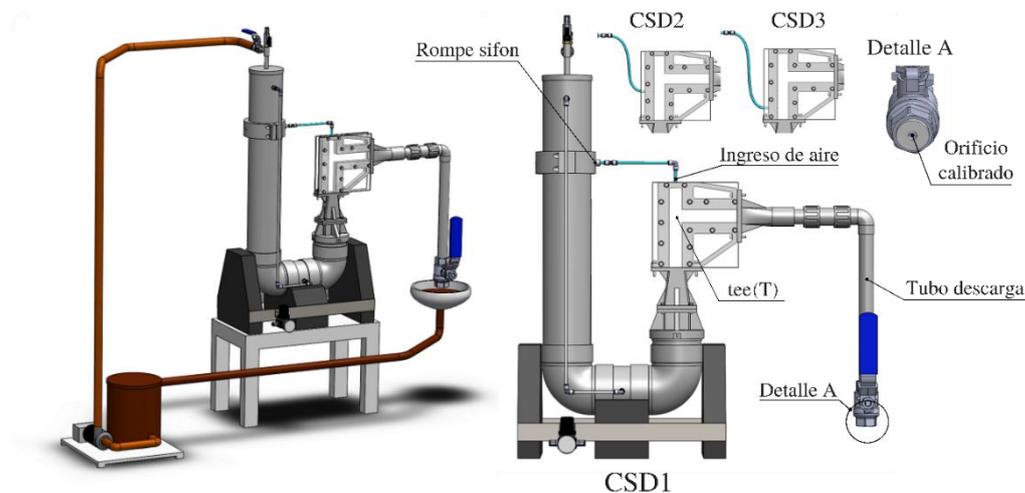


Figura 1: Modelo CAD del experimento: (a) Modelo CAD completo en el circuito de recirculación. (b) Vista frontal del dispositivo junto con los tres diseños de conexión posibles para el rompesifón (D1, D2 y D3).



Los experimentos se llevaron a cabo en un laboratorio de la UTN-FRP en condiciones normales de presión y temperatura. Se realizaron 15 repeticiones para cada condición ensayada, con el objetivo de cuantificar el error experimental. Para mejorar la visualización durante las filmaciones, se añadió colorante al agua para aumentar el contraste con el aire. Las mediciones macroscópicas consistieron en: 1- obtener el undershooting (nivel final del líquido en relación con el eje del conducto de salida de la tee) una vez que el sifonado se interrumpe, 2- obtener el nivel de líquido en el tanque en función del tiempo mediante la filmación y el posprocesamiento de un testigo de nivel (columna transparente).

Finalmente, se realizó una prueba denominada CNS-M0 (caso sin sifón), que consistió en la ejecución de los ensayos sin conectar el conducto rompesisfón a fin de evitar el ingreso de aire, con el fin de comparar el nivel final alcanzado por la columna de líquido con los otros casos.

2.2. Modelo computacional, propiedades y condiciones de contorno

Se construyó un modelo 3D de la mitad de la geometría aprovechando la simetría del problema, utilizando mallas estructuradas y no estructuradas. La Figura 2 muestra los detalles de las mallas para los casos CSD1 y CSD2. El dominio computacional tuvo en promedio 450,000 celdas, con refinamientos locales en la tee, las entradas de aire y el tubo de descarga para mejorar la precisión. En el tanque de 103 mm, el tamaño de celda fue de 5 mm, y se aplicó un mallado con capas para capturar los gradientes cercanos a las paredes. La elección de un modelo tridimensional se realizó considerando estudios previos de los autores en flujos multifásicos, donde se observó que el uso de simulaciones 2D con el modelo Euler-Euler no generaba diferencias significativas respecto a las simulaciones 3D. Sin embargo, al utilizar el modelo VOF, se detectaron variaciones en las zonas cercanas a las paredes en los casos 3D que, aunque presentes, no afectaron de manera significativa los resultados globales ni la captura de la interfaz aire-líquido mediante cámaras. Para más detalles, se puede consultar [4,5]. La Tabla 1 resume las características de las mallas usadas.

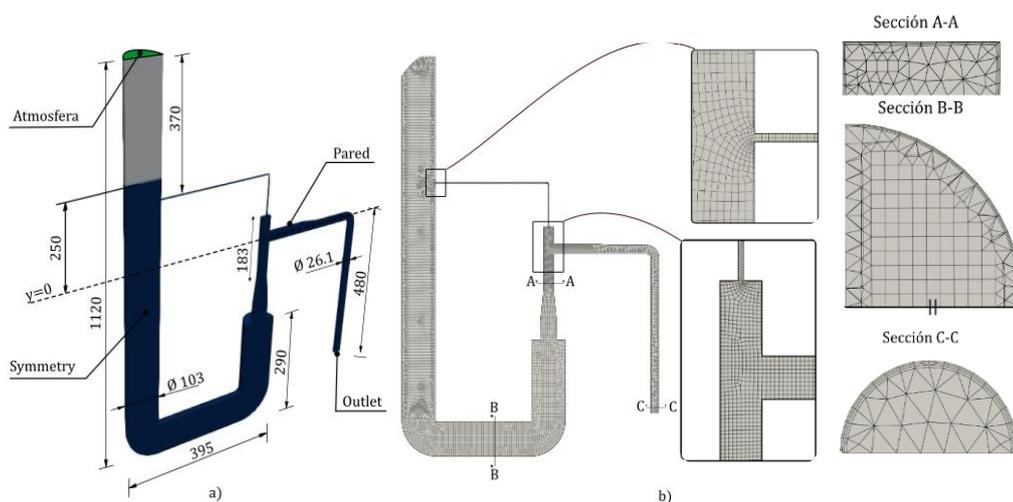


Figura 2: Caso CSD1_M1: a) Modelo computacional b) Malla y secciones de interés

Tabla 1. Parámetros de malla

Malla	Número de celdas	Skewness Máximo	Relación de aspecto máxima	No ortogonalidad promedio	No ortogonalidad máxima
CSD1-M0	431.414	2,77	47	14,8	69



CSD1-M1	432.421	2,77	38	14,9	70
CSD2-M0	419.752	2,81	37	15,0	65
CSD2-M1	397.773	2,80	44	15,9	64
CSD3-M0	457.284	2,87	37	15,0	65
CSD3-M1	464.014	2,89	37	15,2	64
CNSD1	352.746	2,84	47	14,8	60

Los experimentos y simulaciones se realizaron con agua y aire a temperatura ambiente (25 °C) y presión atmosférica (1 atm), utilizando una viscosidad cinemática de $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ y una densidad de $998 \text{ kg}/\text{m}^3$ para el agua, y una viscosidad cinemática de $1,48 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ y una densidad de $1 \text{ kg}/\text{m}^3$ para el aire. La tensión superficial entre ambas fases fue de $0,074 \text{ N}/\text{m}$. Por otro lado, las condiciones de contorno utilizadas en OpenFOAM se listan en la Tabla 3, y son las convencionales utilizadas [6]. El experimento se inició con líquido en reposo a un nivel de 150 mm por encima de la cota $y = 0$, que se localiza en la mitad de la tee.

Tabla 3. Condiciones de contorno

Variable	Atmósfera	Outlet	Simetría	Pared
α	fixedValue	inletOutlet	symmetry	zeroGradient
ε	zeroGradient	zeroGradient	symmetry	epsilonWallFunction
k	zeroGradient;	zeroGradient;	symmetry	kqRWallFunction
ν_t	calculated	calculated	symmetry	nutkWallFunction
p_rgh	totalPressure	prghPressure	symmetry	fixedFluxPressure
U	pressureInletOutletVelocity	inletOutlet	symmetry	fixedValue

2.4. Modelo matemático

En esta sección se presenta el modelo matemático basado en VOF, donde las ecuaciones de continuidad y balance de momento son similares a las de flujo monofásico, excepto en las celdas con interfase líquido-gas, donde se añade un término de fuerza interfacial y las propiedades del fluido corresponden a una mezcla. El modelo VOF incluye una corrección para la tensión superficial en la ecuación de momento. La interfase se sigue mediante la fracción de volumen α , que varía entre 0 y 1, con valores intermedios en las celdas donde hay mezcla de fases.

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho\mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{U}\mathbf{U}) - \nabla \cdot (\mu_{eff}\nabla\mathbf{U}) = -\nabla p_d - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}\nabla\rho + \nabla \cdot (\mu_{eff}(\nabla\mathbf{U})^T) + \sigma\kappa\nabla\alpha \quad (2)$$

donde \mathbf{U} es la velocidad, ρ es la densidad, \mathbf{g} es la aceleración gravitacional y p_d una presión modificada. El último término en el lado derecho de la ecuación (2) representa la fuerza de tensión superficial y es nulo fuera de la interface. Esto se calcula a partir del coeficiente de tensión superficial σ y la curvatura local k de la superficie libre:

$$\kappa = -\nabla \cdot \left(\frac{\nabla\alpha}{|\nabla\alpha|} \right) \quad (3)$$



Dentro de la interface \mathbf{U} corresponde a una velocidad de mezcla dada por:

$$\mathbf{U} = \alpha \mathbf{U}_l + \mathbf{U}_g(1 - \alpha) \quad (4)$$

Como se mencionó anteriormente, ρ y μ en la interfaz se calculan como un promedio ponderado de α ($\rho = \alpha \rho_l + \rho_g(1 - \alpha)$) y $\mu = \alpha \mu_l + \mu_g(1 - \alpha)$. La viscosidad efectiva μ_{eff} es la suma de la viscosidad molecular y la viscosidad turbulenta, que se estimada a partir del modelo de turbulencia k- ϵ realizable. El indicador α es obtenido mediante una ecuación de transporte:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{U}) + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{U}_r (1 - \alpha)) = 0 \quad (5)$$

Como se ve en (5), a la ecuación de advección pura se añade un término de compresión adicional, basado en la velocidad relativa ($\mathbf{U}_r = \mathbf{U}_l - \mathbf{U}_g$). Esto permite acotar la dispersión numérica del espesor de la interface. Esta ecuación se resuelve de forma sub cíclica, lo que significa que cada paso de tiempo Δt se divide en subpasos adaptativos Δt_{sts} . Para cada Δt_{sts} , la ecuación (5) se resuelve utilizando el solucionador Multidimensional Universal Limiter for Explicit Solution (MULES), que se basa en la técnica Flux Corrected Transport (FCT).

2.5. Configuración numérica

Las simulaciones se realizaron en un clúster con CPU Intel Xeon E5-1620 v2 a 3,70 GHz, utilizando 12 núcleos. Cada simulación duró aproximadamente 5 días. Se empleó el solver InterFoam de OpenFOAM-10, con el esquema de alta resolución Van Leer para los términos advectivos y el algoritmo PIMPLE para el acoplamiento presión-velocidad. Se aplicó el método Backward-Euler para los términos temporales, manteniendo un número de Courant menor a 4 y subciclos para resolver la interfaz, con un criterio de convergencia de 1×10^{-8} .

3. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de simulaciones CFD y mediciones experimentales, evaluando la evolución temporal del nivel de líquido en los distintos diseños propuestos. La Figura 3 compara la evolución del nivel para cada diseño, donde las líneas sólidas corresponden a las simulaciones y las líneas de puntos a los resultados experimentales.

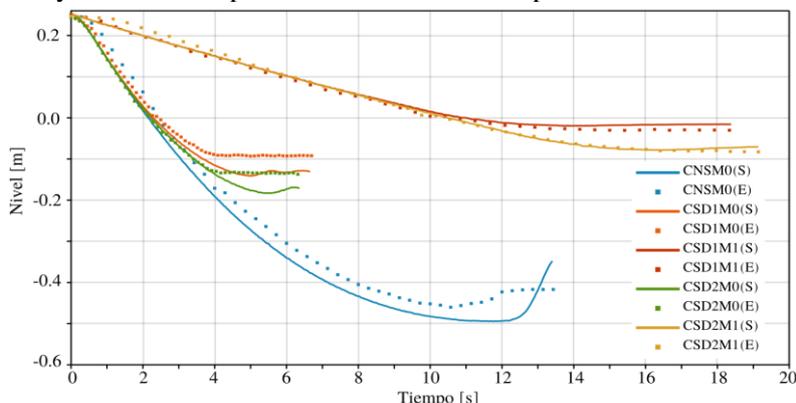


Figura 3: Comparación de la evolución temporal del nivel de líquido entre el CFD (S) y el experimento (E).

En todos los casos, se observa una primera etapa de descenso lineal, seguida por una fase de estabilización hasta la interrupción del flujo por sifonado. El diseño CNSM0, sin rompesifón, muestra un comportamiento distinto, con un undershooting de -0.5 m y una interrupción brusca del sifonado, lo que genera una mayor discrepancia con las simulaciones en la etapa final. El undershooting se refiere al descenso temporal del nivel del líquido por debajo del valor de equilibrio esperado tras la interrupción del sifón, debido a la inercia del fluido. Los diseños D1, D2 y D3 muestran diferencias significativas al modificar el orificio de descarga (M0 y M1). Para el diseño M0 (26 mm), la rotura del sifón ocurre a los 6 s, más rápidamente que en M1 (18 s), y provoca un mayor overshooting. El overshooting describe el fenómeno en el que, tras la rotura del sifón, el nivel del líquido inicialmente se estabiliza por encima del valor de equilibrio antes de descender. Las simulaciones se ajustan mejor a los resultados experimentales del diseño M1. El diseño D1, con un rompesifón en la parte superior de la tee, reduce el overshooting, un resultado esperado.

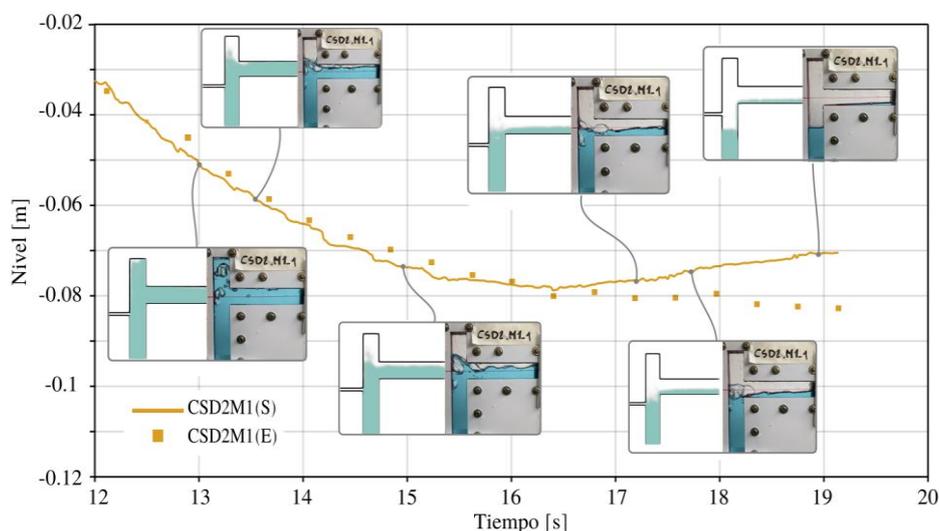


Figura 4: Nivel de líquido en el tanque y detalle en zona de la tee para caso CSD2-M1.

En la Figura 4 detalla el caso CSD2-M1 entre los 12 y 18 s, mostrando una buena concordancia entre simulación y experimento, aunque la simulación no captura completamente las perturbaciones en la interfaz agua-aire observadas experimentalmente, lo que se atribuye a la calidad de la malla. Sin embargo, el nivel de líquido en el tanque es bien predicho por CFD. Y en la Figura 5 se comparan los casos CSD1-M0 y CSD1-M1. En CSD1-M0, a los 1.66 s, el experimento muestra grandes perturbaciones del flujo que la simulación no captura. La rotura del sifón ocurre más rápido en el experimento (a los 4 s), aunque ambas simulaciones y experimentos muestran fenómenos similares. En CSD1-M1, la rotura es más lenta, comenzando a los 8 s y finalizando 10 s después, con un overshooting menor y una mejor captura de la interfaz por parte del CFD.

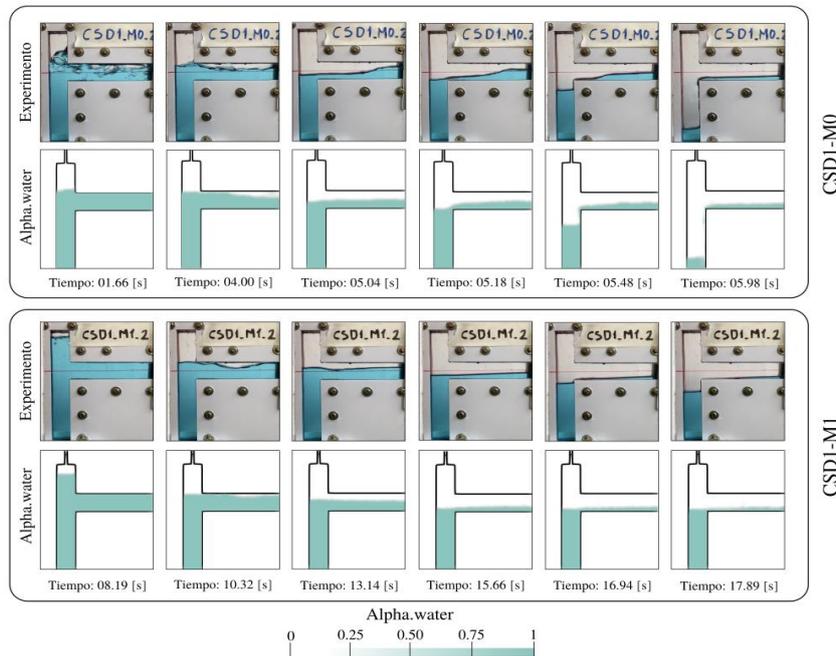


Figura 5: Evolución temporal del líquido en zona de la tee para los casos CSD1-M0 y CSD1-M1.

Finalmente, la Figura 6 presenta el diseño CNS-M1 sin rompesifón. Aquí, la rotura del sifón ocurre súbitamente, con buen acuerdo entre simulación y experimento. Sin embargo, la simulación no captura por completo el flujo de aire tipo pistón observado, debido a las limitaciones de la malla.

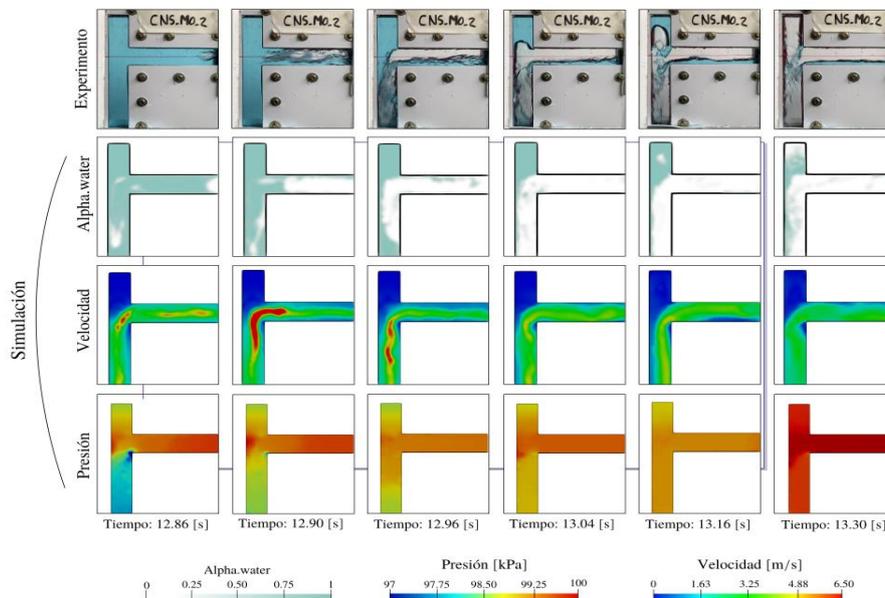


Figura 6: Caso CNS-M0. Evolución temporal de la fracción de líquido, velocidad y presión.

El campo de velocidad en la figura muestra una baja velocidad en la parte superior de la tee, incluso cuando el aire desplaza el líquido. Durante el experimento, el aire ingresa a la rama superior con un flujo tipo pistón, fenómeno que no se captura completamente en la simulación, posiblemente debido a la calidad de la malla. Este transitorio ocurre en menos de un segundo.



En todos los tiempos analizados, se observa una zona de baja velocidad en la pared interna de la tee, donde el flujo cambia de dirección, característica de este tipo de componentes. Además, el campo de presión muestra una caída en la rama inferior, succionando líquido y produciendo el sifonado hasta la rotura, momento en que las presiones se equilibran.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo desarrolló y construyó un experimento a escala para validar la capacidad del método de volumen de fluido (VOF) en OpenFOAM-10, enfocándose en la pérdida de fluido por sifonado y diversas configuraciones de rompesifón. El experimento simuló condiciones de un reactor nuclear tipo piscina, y los resultados mostraron un buen acuerdo con las simulaciones CFD, especialmente en la captura de la interfaz líquido-aire y la evolución temporal del fenómeno de rotura del sifón. Aunque se identificaron áreas de mejora en el refinamiento de la malla y los modelos de reconstrucción de interfaz, el modelo logró un satisfactorio predicción del overshooting y la forma general de la interfaz.

El análisis comparativo destacó la importancia del rompesifón en la reducción del overshooting a menos de un cuarto del valor obtenido sin él, resaltando su relevancia para la seguridad en reactores de investigación. En resumen, este trabajo demuestra la capacidad de las herramientas CFD para modelar fenómenos complejos en sistemas de seguridad nuclear y establece un marco experimental para futuras investigaciones, validando la aplicación del método VOF en el diseño y análisis de sistemas rompesifón para contribuir a soluciones más seguras y eficientes en la industria nuclear.

AGRADECIMIENTO

Los autores desean agradecer a CONICET (subvención PIP 11220210100709CO) y a la Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Paraná por las becas de investigación recibidas y por las instalaciones disponibles para construir y realizar el experimento.

REFERENCIAS

- [1] . Y. Lee and W. S. Kim, “Development of siphon breaker simulation program for investing loss of coolant accident of a research reactor,” *Annals of Nuclear Energy*, 101, 49 (2017).
- [2] K. Seo, S. H. Kang, J. M. Kim, K. Y. Lee, N. Jeong, D. Y. Ch0, J. Yoon, and M. H. Kim, “Experimental and numerical study for a siphon breaker design of a research reactor,” *Annals of Nuclear Energy*, 50, 94 (2012).
- [3] D. Ramajo, S. Corzo, N. Nigro, Numerical Simulation of Siphon Breaker Systems for Open-type Research Reactors, *J. of Nuclear Engineering and Radiation Science*, (2019).
- [4] Piña, J. S., Godino, D., Corzo, S., & Ramajo, D., Air injection in vertical water column: Experimental test and numerical simulation using volume of fluid and two-fluid methods. *Chemical Engineering Science*, 255, 117665 (2022).
- [5] Godino, D. M., Corzo, S. F., & Ramajo, D. E., Two-phase modeling of water-air flow of dispersed and segregated flows. *Annals of Nuclear Energy*, 149, 107766. (2020)
- [6] OpenFOAM Foundation. (n.d.). *Standard Boundary Conditions*. OpenFOAM User Guide. Retrieved from <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/a-reference/a.4-standard-boundary-conditions>.