

[INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA]

Título del trabajo

Autor: Acevedo, Mateo; mateo.acevedo.000@gmail.com

Co-autores: Lima, Leon; Mangiavacchi, Norberto

Orientador: Shin, Hyun Ho

Facultad de Ciencias Químicas

Abstract

Due to the widespread use of natural circulation loops in passive safety systems of nuclear reactors, there is significant interest in modeling the phenomena involved in the dynamics of two-phase flow in such systems. This work explores the performance of the one-dimensional Homogeneous Equilibrium Model (HEM) to simulate steady-state water–steam flows in the ascending section of a natural circulation loop. The modeled domain corresponds to a vertical annulus that includes a heated region followed by an adiabatic section. The studied model is based on three conservation equations, mass, momentum, and energy, formulated for the water–steam mixture. These equations were discretized using a finite difference upwind scheme and solved via the Newton-Raphson method, with numerical evaluation of the Jacobian matrix. The simulation results were compared with data from the literature, including experimental measurements and simulations performed with the RELAP5/MOD3.3 code, a widely used tool in the thermal-hydraulic analysis of nuclear reactors. The HEM showed good agreement with temperature profiles but exhibited limitations in predicting the pressure drop beyond the boiling point, as well as in accurately estimating the void fraction profile, particularly in the presence of subcooled boiling and condensation phenomena.

Keywords: Two-phase flow, One-dimensional Homogeneous Equilibrium Model (HEM), Natural circulation loop, Finite difference method, Passive cooling systems.

Resumen

Debido al uso extendido de ciclos de circulación natural en sistemas de seguridad pasivos de los reactores nucleares, existe un alto interés en modelar los fenómenos que intervienen en la dinámica del flujo bifásico en estos sistemas. En este trabajo se explora el desempeño del Modelo de Equilibrio Homogéneo (HEM, por sus siglas en inglés) unidimensional para simular flujos de agua-vapor en estado estacionario en la sección ascendente de un ciclo de circulación natural. El dominio modelado corresponde a un ánulo vertical que incluye una región de calentamiento seguida de una sección adiabática. El modelo estudiado se basa en tres ecuaciones de conservación: masa, cantidad de movimiento y energía, formuladas para la mezcla agua-vapor. Estas ecuaciones fueron discretizadas mediante un esquema upwind de diferencias finitas, y resueltas utilizando el método de Newton-Raphson, con evaluación numérica del jacobiano. Los resultados de las simulaciones con el modelo estudiado se compararon con los resultados presentados en la literatura compuestos por datos experimentales y simulaciones obtenidas con el código RELAP5/MOD3.3, ampliamente utilizado en el análisis termo-hidráulico de reactores nucleares. Se observa que el modelo estudiado reproduce con fidelidad los perfiles de temperatura, aunque presenta limitaciones al predecir la caída de presión a partir del punto de ebullición, así como en la estimación del perfil de fracción de vacío, particularmente en presencia de fenómenos como la ebullición subenfriada y la condensación.

Palabras clave: Flujo bifásico, Modelo de Equilibrio Homogéneo (HEM) unidimensional, Ciclo de circulación natural, Diferencias finitas, Sistemas de refrigeración pasivos.

1. Introducción

Los sistemas de seguridad pasivos han ganado creciente protagonismo en el diseño de reactores nucleares (*Safety of Nuclear Power Plants*, 2016), especialmente tras el accidente de Fukushima en 2011, que evidenció las limitaciones de los sistemas activos dependientes de fuentes externas de energía. A diferencia de estos últimos, los sistemas pasivos operan aprovechando fenómenos físicos naturales, como la gravedad, la convección natural o las diferencias de presión (*Safety Related Terms for Advanced Nuclear Plants*, 1991).

La ventaja de estos sistemas de seguridad pasivos yace en su robustez ante escenarios de accidentes severos (Rassame, Hibiki, & Ishii, 2017). En situaciones donde un evento de pérdida de refrigerante se ve acompañado por la interrupción del suministro eléctrico, ya sea desde la red o desde generadores de respaldo, los sistemas de refrigeración activos no pueden cumplir su función de disipar el calor residual del núcleo. Esta fue precisamente la situación ocurrida durante el accidente de Fukushima, donde la pérdida total de energía impidió

la operación de los sistemas de enfriamiento, agravando significativamente las consecuencias del evento.

En este contexto, la incorporación de sistemas de refrigeración pasivos en los reactores nucleares resulta fundamental, ya que permiten disipar el calor residual generado por la reacción nuclear durante un periodo suficientemente prolongado, brindando así el margen necesario para implementar medidas correctivas y evitar una catástrofe nuclear.

Una de las configuraciones más empleadas en estos sistemas es el Ciclo de Circulación Natural (*Natural Circulation Loop*, NCL), el cual permite remover calor sin necesidad de elementos activos. En este tipo de ciclos, el flujo del refrigerante es impulsado únicamente por el calor proveniente del núcleo, aprovechando las diferencias de densidad inducidas tanto por los gradientes de temperatura como por los cambios de fase del fluido.

En la Figura 1 puede observarse un esquema de un NCL prototípico. La energía ingresa en el sistema mediante un calentador,

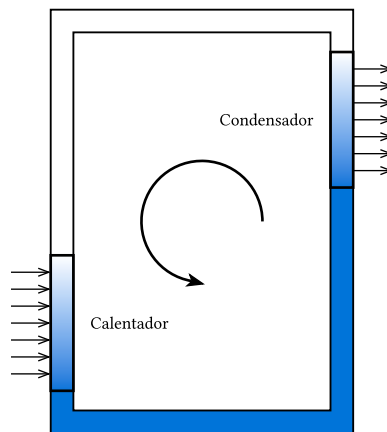


Figura 1: Esquema de un ciclo de circulación natural bifásico

que representa el sistema cuyo calor desea disiparse. Esto produce un aumento de la temperatura en el fluido refrigerante (agua), lo que a su vez produce una disminución de su densidad. Por fuerzas de flotación, el agua se eleva a través del tramo vertical de la tubería, y continúa su camino hasta llegar al condensador. En el condensador el agua vuelve a enfriarse, disminuyendo su temperatura y aumentando nuevamente su densidad. Por fuerzas de gravedad, el agua cae por la tubería vertical y se encamina al calentador, completando el ciclo.

Los NCLs pueden ser diseñados para operar tanto en régimen monofásico como bifásico. En el primer caso, el agua se mantiene en todo momento en forma líquida, y las

fuerzas de flotación se manifiestan enteramente por la expansión térmica del líquido. En el régimen bifásico se permite que el agua experimente un cambio de fase, vaporizándose parcialmente. En este caso, las fuerzas de flotación son más intensas, debido al cambio abrupto de densidad asociado a la formación de la fase vapor.

Los NCLs que operan en régimen monofásico están limitados por el umbral impuesto por la temperatura de saturación del fluido (Bhattacharyya, Basu, & Das, 2012). Por ello, existe un marcado interés en modelar los fenómenos bifásicos que emergen en estos sistemas, dado que permiten extender su capacidad de remoción de calor más allá de dicho límite.

El modelado de flujos bifásicos plantea importantes desafíos matemáticos, ya que implica rastrear múltiples interfaces deformables entre las fases y considerar las discontinuidades en las propiedades del fluido que se manifiestan en dichas interfaces (Ishii & Hibiki, 2011).

Para superar estas dificultades, una metodología comúnmente empleada en el modelado de flujos bifásicos en tuberías consiste en realizar un promediado sobre la sección transversal del conducto, lo que permite obtener modelos unidimensionales (Ishii & Hibiki, 2011).

En la actualidad, existen diversos códigos de simulación complejos y ampliamente utilizados, como RELAP5 y TRACE, que implementan modelos de flujo bifásico unidimensional para el análisis termo-hidráulico de sistemas en reactores nucleares (*RELAP5/MOD3 Code Manual*, 2025; *TRACE V5.0 Theory Manual*, 2010).

Sin embargo, el uso de estos códigos comerciales implica además de su costo monetario de la licencia, una elevada complejidad para modificar su código fuente

para análisis e investigaciones posteriores.

En este contexto, se considera fundamental el desarrollo de un código propio que no solo permita simular el comportamiento estacionario del flujo bifásico, sino que también sea lo suficientemente flexible y transparente como para ser modificado y adaptado en estudios posteriores, tales como análisis de estabilidad y sensibilidad. Esta necesidad justifica la elección de un modelo simplificado que pueda ser implementado, comprendido y extendido con facilidad.

Así, el presente trabajo se enfoca en la implementación en el lenguaje de programación Julia y validación de un modelo unidimensional de equilibrio homogéneo (*Homogeneous Equilibrium Model*, HEM) para simular el flujo bifásico agua-vapor en estado estacionario, aplicado a la sección ascendente de un ciclo de circulación natural, que es una de las secciones más crítica en el modelado debido a los efectos del cambio de fase que conlleva a discontinuidades en las propiedades y modificaciones en las pérdidas por fricción y en la transferencia de energía.

El dominio modelado corresponde a un ánulo vertical que incluye una región de calentamiento seguida de una sección adiabática, configuraciones que reflejan condiciones típicas en sistemas de refrigeración pasiva de reactores nucleares.

El modelo matemático se compone de las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía de la mezcla agua-vapor, formuladas bajo el supuesto de equilibrio térmico y mecánico entre fases. Estas ecuaciones fueron discretizadas mediante un esquema upwind de diferencias finitas y resueltas empleando el método de Newton-Raphson, con cálculo numérico del jacobiano.

Finalmente, los resultados obtenidos se comparan con datos disponibles en la literatura, que incluyen tanto mediciones experimentales como simulaciones realizadas con el código RELAP5/MOD3.3, con el objetivo de evaluar el desempeño y las limitaciones del modelo HEM en la predicción de variables como la fracción de vacío, la temperatura y la presión a lo largo del sistema.

Se encontró que el modelo HEM reproduce con fidelidad el perfil de temperaturas de tanto las mediciones experimentales de la literatura, como los resultados producidos por RELAP5/MOD3.3. Sin embargo, se observaron desviaciones en el perfil de presiones y de fracción de vacío. El modelo estudiado no reproduce cuantitativamente las fracciones de vacío experimentales, y posee dificultades en capturar fenómenos bifásicos como la ebullición subenfriada, y la condensación.

En la Sección 2, se presentan los objetivos del trabajo. Los materiales y métodos, en donde se presentan el modelo y el método numérico se exponen en la Sección 3, y en la Sección 4 se muestran los resultados obtenidos con las comparaciones y discusiones de los mismos. Finalmente, se presentan las conclusiones en la Sección 5.

2. Objetivos

Objetivo general

Explorar el desempeño del modelo HEM para modelar flujos de agua-vapor en estado estacionario en un ánulo vertical con calentamiento.

Objetivos específicos

- Derivar las ecuaciones 1D de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía para un flujo bifásico agua-vapor en un ánulo vertical.
- Elegir un esquema de discretización y un método numérico para la resolución de las ecuaciones.
- Implementar el método numérico en el lenguaje de programación Julia.
- Comparar los resultados del modelo con resultados de otros códigos de simulación y datos experimentales de la literatura.

3. Materiales y Métodos

3.1. Modelado matemático

Se estudió el flujo bifásico agua-vapor en estado estacionario en un ánulo vertical con un tramo inicial a través de la cual ingresa calor uniformemente, considerando al resto del ánulo como adiabático.

Considerando a la mezcla agua-vapor como un único pseudo-fluido, se obtuvieron las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento, y energía de la mezcla. Esta consideración de que ambas fases poseen una única presión, temperatura y

velocidad requiere un alto grado de acoplamiento térmico y mecánico para su validez (Ishii & Hibiki, 2011). Las ecuaciones unidimensionalizadas se obtienen realizando un promediado en la sección transversal.

Las ecuaciones gobernantes resultantes son las encontradas en la literatura (Ishii & Hibiki, 2011; Todreas, Kazimi, & Massoud, 2021) para el modelo HEM adaptadas para el estado estacionario:

$$\frac{d}{dz}(\rho v) = 0$$

$$v \frac{dv}{dz} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz} - \frac{f}{2D_h} v^2 - g$$

$$\frac{d}{dz}(\rho h v) = v \frac{dp}{dz} + S_h$$

Donde z es la posición axial a lo largo del sistema, y ρ , v , p y h representan la densidad, la velocidad, la presión y la entalpía de la mezcla agua-vapor, respectivamente.

S_h representa el término fuente debido a la entrada de calor al sistema. Es una función definida por tramos, tomando un valor positivo sólo en la región del calentador.

$$S_h = \begin{cases} \frac{Q}{AL_h}, & 0 \leq z \leq L_h \\ 0, & L_h < z \leq L \end{cases}$$

Donde A , L_h y Q representan el área de flujo anular, la longitud de la región calentada, y la entrada total de calor, respectivamente.

f es el factor de fricción de Darcy, que se calcula utilizando el modelo propuesto por Churchill (1977), según:

$$f = 8 \left[\left(\frac{8}{\text{Re}} + (f_1 + f_2)^{-1.5} \right) \right]^{\frac{1}{12}}$$

$$f_1 = \left\{ -2.457 \ln \left[\left(\frac{7}{\text{Re}} \right)^{0.9} + 0.27 \frac{\varepsilon}{D_h} \right] \right\}^{16}$$

$$f_2 = \left(\frac{37530}{\text{Re}} \right)^{16}$$

Donde ε representa la rugosidad de las paredes del ánulo.

Las propiedades termodinámicas fueron calculadas utilizando el paquete CoolProp de Julia.

$$\rho = \hat{f}(p, h)$$

Las condiciones de frontera del sistema son definidas a la entrada del ánulo.

$$\rho(0) = \rho_{\text{in}}, \quad v(0) = v_{\text{in}}$$

$$h(0) = h_{\text{in}}, \quad p(0) = P_{\text{in}}$$

Donde v_{in} y P_{in} son datos dados por las condiciones experimentales simuladas, y h_{in} y ρ_{in} son calculadas a partir de las condiciones mediante las propiedades termodinámicas.

3.2. Método numérico

3.2.1. Adimensionalización

Para la resolución numérica, se adimensionalizaron las ecuaciones de modo a reducir el error relativo entre las variables. Las variables adimensionalizadas se definieron de la siguiente manera:

$$z^* = \frac{z}{L} \quad \rho^* = \frac{\rho}{\rho_0}$$

$$v^* = \frac{v}{v_0} \quad h^* = \frac{h - h_0}{h_{L_h} - h_0}$$

$$p^* = \frac{p - p_0}{\rho_0 g L}$$

Las ecuaciones de conservación adimensionalizadas son las siguientes.

$$\frac{d}{dz^*}(\rho^* v^*) = 0$$

$$v^* \frac{dv^*}{dz^*} = -\frac{1}{Fr} \frac{1}{\rho^*} \frac{dp^*}{dz^*} - \frac{fL}{2D_h} (v^*)^2 - \frac{1}{Fr}$$

$$\frac{d}{dz^*}(\rho^* h^* v^*) = \frac{Ec}{Fr} v^* \frac{dp^*}{dz^*} + \frac{L}{L_h}$$

Donde los números de Froude y de Eckert se definen según:

$$Fr = \frac{v_0^2}{gL}$$

$$Ec = \frac{v_0^2}{h_{L_h} - h_0}$$

3.2.2. Discretización

La discretización de las ecuaciones adimensionalizadas se realizó empleando un esquema de diferencias finitas.

Se colocaron N nodos $[z_1^*, \dots, z_N^*]$ espaciados uniformemente a una distancia $\Delta z^* = \frac{1}{N}$ entre sí a lo largo del dominio computacional, donde todas las variables son calculadas de manera sencilla sobre los mismos. Esto es, $\psi_i^* = \psi^*(z_i^*)$ para $\psi \in \{\rho, v, h, p\}$.

Para las derivadas espaciales, se utilizó el esquema upwind, donde cada derivada se calcula en tomando una diferencia finita teniendo en cuenta el sentido del flujo.

$$\frac{d\psi^*}{dz^*} \approx \frac{\psi_i^* - \psi_{i-1}^*}{\Delta z^*} \quad (v_i^* > 0)$$

Las ecuaciones discretizadas resultan:

$$\frac{\rho_i v_i - \rho_{i-1} v_{i-1}}{\Delta z} = 0$$

$$v_i \frac{v_i - v_{i-1}}{\Delta z} = -\frac{1}{\rho_i} \frac{p_i - p_{i-1}}{\Delta z} - \frac{f}{2D_h} v_i^2 - g$$

$$\frac{\rho_i h_i v_i - \rho_{i-1} h_{i-1} v_{i-1}}{\Delta z} = v_i \frac{p_i - p_{i-1}}{\Delta z} + \frac{Q_i}{AL_h}$$

$$\rho_i = \hat{f}(p_i, h_i)$$

Donde se suprimió la notación de modo a que ρ_i represente a ρ_i^* .

3.2.3. Resolución

El sistema no lineal de $4N$ ecuaciones se puede escribir como:

$$F(Q) = 0$$

Donde $Q = [\rho \ v \ h \ p]^T$ es el vector de incógnitas con $\rho = [\rho_1, \dots, \rho_N]$ y v , h y p definidos análogamente.

Para su resolución se empleó el método de Newton-Rapshon, donde se resuelve el sistema lineal:

$$J(Q_k)(Q_{k+1} - Q_k) = -F(Q_k)$$

Donde J representa la matriz jacobiana de F , a la que le corresponden columnas dadas por $\frac{\partial F}{\partial x_j}$, que son aproximadas numéricamente según el esquema:

$$\frac{\partial F}{\partial x_j} \approx \frac{F(Q + \delta e_j) - F(Q)}{\delta}$$

Donde e_j es la j -ésima columna de la matriz identidad.

3.3. Experimentos numéricos

Se evaluó el desempeño del modelo HEM comparando sus resultados con las mediciones experimentales de Ozar (2009) y con los resultados de simulación de RELAP5/MOD3.3 producidos por Fullmer, Kumar, & Brooks (2016) en dos escenarios distintos. En ambos escenarios se simuló la entrada de agua líquida subenfriada, con distintos valores de presión de entrada P_{in} , velocidad de entrada v_{in} , subenfriamiento ΔT_{sub} en la entrada al ánulo, y con distintos valores de densidad de flujo de calor q''_w provista por el calentador. Las condiciones experimentales que se simularon se resumen en la Tabla 1.

Caso	P_{in} [kPa]	v_{in} [m/s]	ΔT_{sub} [°C]	q''_w [kW/m²]
1	498	0.24	30	156
2	181	0.24	19	56

Tabla 1: Condiciones experimentales simuladas

4. Resultados y Discusión

En la Figura 2 (a) se observa que el modelo HEM captura el fenómeno general de transición a fase vapor, pero no reproduce cuantitativamente el perfil axial de fracción de vacío.

Para estas condiciones experimentales, debería observarse una ebullición subenfriada (*subcooled boiling*). El modelo HEM, en lugar de predecir un cambio de fase gradual con generación de vapor previa a la saturación, predice un salto brusco en la fracción de vacío cuando el líquido alcanza la temperatura de saturación.

Del mismo modo, la fracción de vapor máxima alcanzada es sobrestimada debido a que el modelo HEM no considera efectos de condensación. Como la fracción de vacío es calculada exclusivamente a partir de la presión y la temperatura de la mezcla, α no

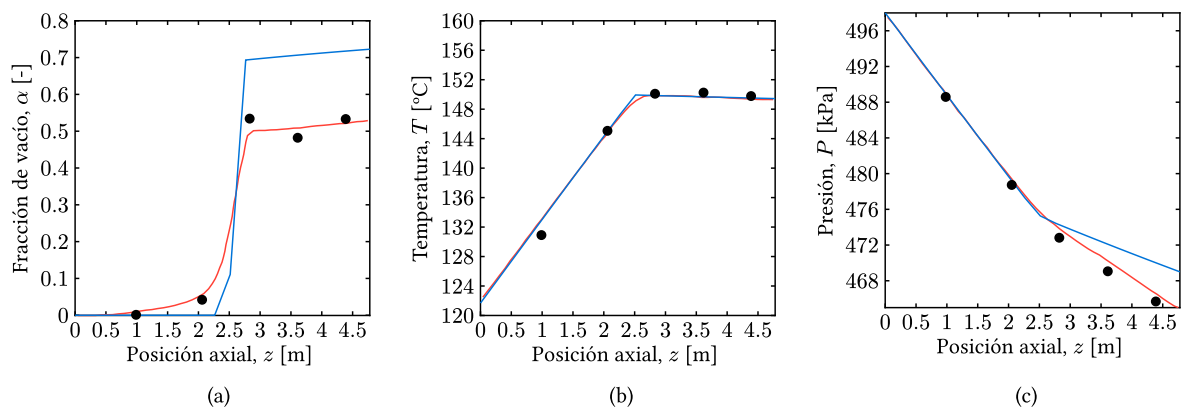


Figura 2: Comparación del modelo HEM (azul), RELAP5 (rojo) y datos experimentales (negro) para las condiciones experimentales del caso 1.

posee una ecuación de transporte asociada a ella. Debido a esto, no puede capturar fenómenos de generación (ebullición subenfriada) y consumo (condensación) mediante modelos asociados al término fuente en su ecuación de transporte.

En la Figura 2 (b) se aprecia la fidelidad con la que el modelo HEM reproduce el perfil axial de temperaturas.

En la Figura 2 (c) se visualiza que el modelo HEM predice satisfactoriamente el perfil axial de presión en un primer tramo; pero a partir del punto de cambio de pendiente, predice una caída de presión menor a la predicha por RELAP5/MOD3.3, que se condice con las mediciones experimentales. Este

cambio de pendiente ocurre en el punto donde empieza la ebullición saturada. De este modo, el modelo HEM predice correctamente la presión del sistema mientras el fluido se mantenga en estado líquido, y subestima la caída de presión en cuanto empieza la ebullición y se genera la fase vapor.

Este error en la predicción puede analizarse teniendo en cuenta las nuevas fuerzas de fricción que la fase vapor trae consigo. Estas fuerzas no son contempladas por el modelo. Las burbujas, o los *slugs* de vapor producen un impedimento al flujo debido a las fuerzas de rozamiento en la interfase líquido-vapor; lo cual trae a su vez una mayor caída de presión asociada. Esta falencia del modelo HEM podría corregirse seleccionando un

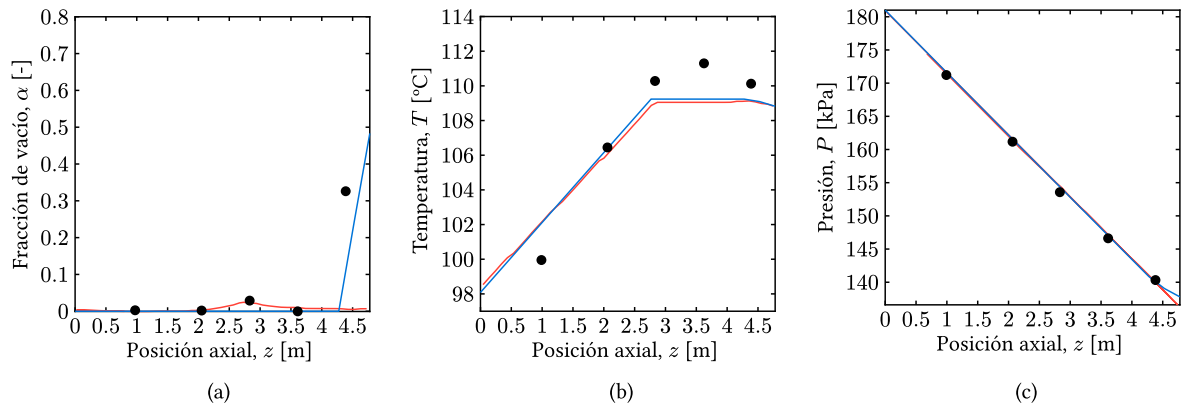


Figura 3: Comparación del modelo HEM (azul), RELAP5 (rojo) y datos experimentales (negro) para las condiciones experimentales del caso 2.

modelo para el factor de fricción que refleje esta dinámica característica del flujo bifásico.

En la Figura 3 (a) se observa que el modelo evaluado es incapaz de reproducir el pequeño pico de fracción de vacío en la sección con calefacción que se produce nuevamente debido a los efectos de ebullición subenfriada.

Sin embargo, a diferencia de los resultados de RELAP5/MOD3.3, el modelo HEM sí captura cualitativamente la vaporización instantánea (*flash*) que se produce debido a la caída de presión en la región adiabática.

Los resultados de predicción del perfil de temperatura nuevamente son satisfactorios para el caso 2, como se observa en la Figura 3 (b). Si bien no reproduce cuantitativamente las temperaturas experimentales, reproduce de manera muy próxima los resultados predichos por RELAP5/MOD3.3.

Finalmente, en la Figura 3 (c) se observa que la predicción del perfil de presión es incluso mejor en el caso 2. Esto se debe a que el fluido permanece en estado líquido durante todo su trayecto hasta que se vaporiza instantáneamente justo antes de la salida del sistema.

5. Conclusiones

La exploración de la aplicabilidad del modelo HEM realizada en este trabajo revela tanto limitaciones como fortalezas del modelo HEM para la simulación de flujos bifásicos.

En ambos casos, la predicción del perfil axial de fracción de vacío es muy limitada. Por más de que se refleje el fenómeno general del cambio de fase, el modelo no logra reproducir fenómenos clave en la hidráulica térmica del flujo bifásico, tales como la ebullición subenfriada y la condensación.

Sin embargo, las predicciones de los perfiles de temperatura y presión revelan que, incluso con un modelo simplificado, es posible capturar la evolución de estas dos variables a lo largo de un sistema de flujo estacionario con calefacción sin recurrir a modelos bifásicos complejos.

Este trabajo sienta bases para continuar explorando la viabilidad de modelos sencillos que aún así capturen los fenómenos más relevantes de los flujos bifásicos, proporcionando un punto de partida sólido para la implementación y validación de modelos

más avanzados como el modelo *drift-flux* o formulaciones transitorias.

Como trabajo futuro, se podría revisar este modelo incorporando tanto una ecuación de transporte para la fracción de vacío, como un modelo actualizado que capture la dinámica bifásica en la caída de presión.

Referencias Bibliográficas

- Bhattacharyya, S., Basu, D. N., & Das, P. K. (2012). Two-Phase Natural Circulation Loops: A Review of the Recent Advances. *Heat Transfer Engineering*, 33, 461-482.
- Churchill, S. W. (1977). *Friction-Factor Equation Spans All Fluid-Flow Regimes*.
- Fullmer, W. D., Kumar, V., & Brooks, C. S. (2016). Validation of RELAP5/MOD3.3 for Subcooled Boiling, Flashing and Condensation in a Vertical Annulus. *Progress in Nuclear Energy*, 93, 205-217.
- Ishii, M., & Hibiki, T. (2011). *Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow*. New York, NY: Springer New York.

Ozar, B. (2009). *Interfacial Area Transport of Steam-Water Two-Phase Flow in a Vertical Annulus at Elevated Pressures*.

Models. Volume 1. (2010). U.S. Nuclear Regulatory Commission.

Rassame, S., Hibiki, T., & Ishii, M. (2017). ESBWR Passive Safety System Performance under Loss of Coolant Accidents. *Progress in Nuclear Energy*, 96, 1-17.

RELAP5/MOD3 Code Manual: Code Structure, System Models, and Solution Methods. Volume 1. (2025). U.S. Nuclear Regulatory Commission.

Safety of Nuclear Power Plants: Design. (2016). Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency.

Safety Related Terms for Advanced Nuclear Plants. (1991). Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency.

Todreas, N. E., Kazimi, M. S., & Massoud, M. (2021). *Nuclear Systems Volume II: Elements of Thermal Hydraulic Design* (2.^a ed.). Boca Raton: CRC Press.

TRACE V5.0 Theory Manual: Field Equations, Solution Methods, and Physical