

[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**

Keywords: Word 1, Word 2, Word 3, Word 4, Word 5,

## **Resumen**

Palabras clave: Palabra 1, Palabra 2, Palabra 3, Palabra 4, Palabra 5.

## 1. Introducción

Con el accidente de Fukushima en 2011, inició un proceso de transición de los sistemas de seguridad activos hacia los sistemas de seguridad pasivos en el campo de la seguridad nuclear. (IAEA, 2016) Con los sistemas de seguridad pasivos, se opta por depender de fenómenos físicos naturales como la gravedad o las diferencias de presión, en lugar de sistemas que dependen de fuentes de energía externa como bombas, ventiladores, u otros elementos activos.

La ventaja de estos sistemas de seguridad pasivos yace en su robustez ante escenarios de accidentes, como los Accidentes por Pérdida de Refrigerante (LOCAs). (Rassame et al., 2017) En el caso de que un evento como este sea acompañado por la ausencia de una fuente de energía eléctrica, sea por parte de la red o por generadores independientes, un sistema de refrigeración activo no cumpliría su función de disipar el calor residual del núcleo. Este fue el caso del accidente de Fukushima. (Ishikawa, 2015)

Dado esto, la implementación de sistemas de refrigeración pasivos en los reactores nu-

cleares es crucial, de modo a lograr disipar el calor residual de la reacción nuclear por un lapso de tiempo suficiente para dar lugar a que puedan tomarse medidas correctivas necesarias para evitar una catástrofe nuclear.

Un diseño común utilizado para refrigerar el núcleo en caso de accidentes es el Ciclo de Circulación Natural (*Natural Circulation Loop*, NCL). Los NCLs impulsan el flujo de agua refrigerante utilizando únicamente el calor del núcleo como fuente de energía. El flujo ocurre debido a diferencias de densidad causadas tanto por cambios en la temperatura, como cambios de fase.

En la puede observarse un diagrama de un NCL prototípico. La energía ingresa en el sistema mediante un calentador, que representa el sistema cuyo calor desea disiparse. Esto produce un aumento de la temperatura en el fluido refrigerante, 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 régimen monofásico, 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 producto también del cambio abrupto de densidad producido por la aparición de la fase vapor.

Los NCLs monofásicos se hallan restringidos por el criterio de la temperatura de saturación (Bhattacharyya et al., 2012). De este modo existe un gran interés en modelar los fenómenos bifásicos emergentes que tienen lugar en los NCLs bifásicos.

El modelado de flujo bifásico presenta dificultades matemáticas, en tanto es necesario rastrear las múltiples interfaces deformables

entre las fases y tomar en cuenta las discontinuidades en las propiedades del fluido que ocurren en ellas. (Ishii & Hibiki, 2011)

Debido a esto, la metodología comúnmente utilizada en el modelado de flujos bifásicos en tuberías es el de promediar las cantidades en la sección transversal, obteniéndose un modelo unidimensional. Este es el caso del modelo *two-fluid* y el modelo *drift-flux*.

Existen ya una diversidad de resolvers complejos de uso comercial como RELAP5, TRACE y CATHARE, que modelan el flujo bifásico 1D en los sistemas térmico-hidráulicos de un reactor nuclear.

En este trabajo, se presenta la implementación numérica de un modelo simplificado, el modelo HEM (*Homogeneous Equilibrium Model*) en el lenguaje de programación Julia.

El trabajo presenta un modelo de flujo en estado estacionario. Esta decisión se fundamenta tanto en que las mediciones disponibles en la literatura analizan al sistema cuando ya alcanzó el estado estacionario, como en el hecho de que las condiciones de

frontera elegidas producen un estado estacionario natural. Las inestabilidades transitorias emergen de analizar el sistema completo.

El dominio computacional consiste de una subsección de un NCL, la tubería vertical a través de la cual el fluido recibe la energía del calentador y asciende. La elección de este dominio restringido se justifica en la disponibilidad de mediciones experimentales para esta subsección del NCL que se utilizaron para validar el modelo y su implementación.

## 2. Objetivos

### Objetivo general

Implementar y validar un resolutor de flujo agua-vapor en estado estacionario en una tubería vertical utilizando el modelo HEM 1D.

### Objetivos específicos

- Derivar las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía para un flujo bifásico agua-vapor en una tubería 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.
- Validar el modelo y la implementación empleando datos experimentales de la literatura.

## 3. Materiales y Métodos

### 3.1. Modelado matemático

#### 3.1.1. *Homogeneous Equilibrium Model*

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

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

$$\frac{d}{dz}(\rho h v) = v \frac{dp}{dz} + \frac{Q}{A L_h}$$

Donde  $\rho$ ,  $v$ ,  $p$  y  $h$  representan la densidad, la velocidad, la presión y la entalpía de la mezcla agua-vapor, respectivamente.

#### 3.1.2. Propiedades termodinámicas

Se calcularon las propiedades termodinámicas utilizando el paquete *Coolprop* de Julia.

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

### 3.2. Método numérico

#### 3.2.1. Adimensionalización

Se eligieron las siguientes variables adimensionales.

$$\begin{aligned} z^* &= \frac{z}{L} \\ \rho^* &= \frac{\rho}{\rho_0} \\ v^* &= \frac{v}{v_0} \\ h^* &= \frac{h - h_0}{h_{L_h} - h_0} \\ p^* &= \frac{p - p_0}{\rho_0 g L} \end{aligned}$$

Las ecuaciones de conservación adimensionalizadas son las siguientes.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz^*}(\rho^* v^*) &= 0 \\ v^* \frac{dv^*}{dz^*} &= -\frac{1}{Fr} \frac{1}{\rho^*} \frac{dp^*}{dz^*} - \frac{fL}{2D_h} (v^*)^2 - \frac{1}{Fr} \\ \frac{d}{dz^*}(\rho^* h^* v^*) &= \frac{Ec}{Fr} v^* \frac{dp^*}{dz^*} + \frac{L}{L_h} \end{aligned}$$

Donde los números de Froude y de Eckert se definen de la siguiente manera.

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

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

#### 3.2.2. Discretización

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

$$\begin{aligned} \frac{\rho_i v_i - \rho_{i-1} v_{i-1}}{\Delta z} &= 0 \\ v_i \frac{v_i - v_{i-1}}{\Delta z} &= -\frac{1}{\rho_i} \frac{p_i - p_{i-1}}{\Delta z} - \frac{f}{2D_h} v_i^2 - g \\ \frac{\rho_i h_i v_i - \rho_{i-1} h_{i-1} v_{i-1}}{\Delta z} &= v_i \frac{p_i - p_{i-1}}{\Delta z} + \frac{Q_i}{AL_h} \end{aligned}$$

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

#### 3.2.3. Resolución

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

$$F(Q) = 0$$

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

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

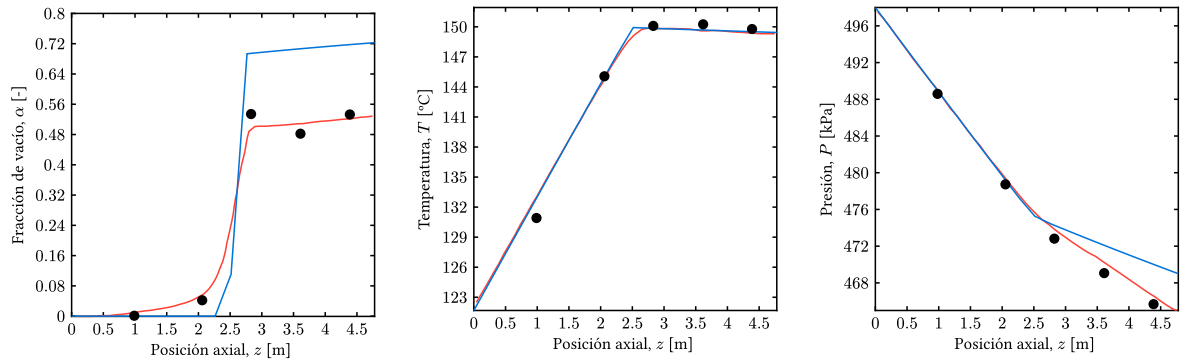


Figura 1:

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.

## 4. Resultados y Discusión

## 5. Conclusiones

## 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(4–5), 461-482. <https://doi.org/10.1080/01457632.2012.614155>

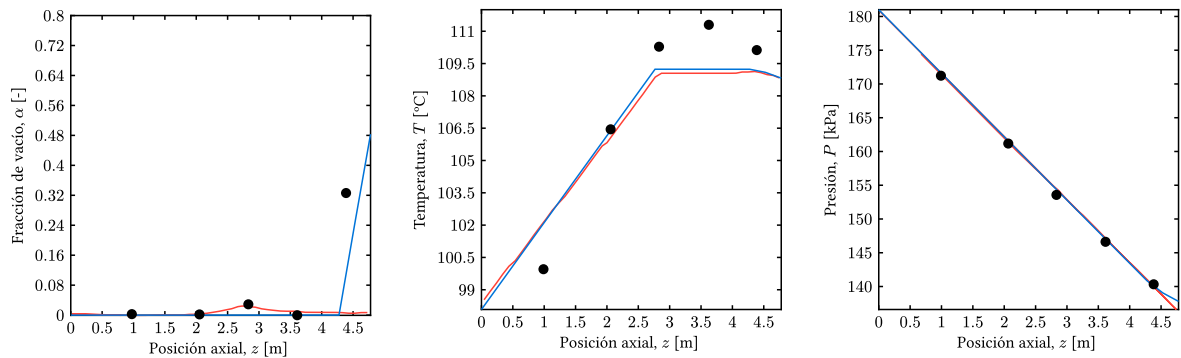


Figura 2:

IAEA. (2016). *Safety of Nuclear Power Plants: Design* (Número v.SSR-2/1 (Rev. 1). International Atomic Energy Agency.

Ishii, M., & Hibiki, T. (2011). *Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7985-8>

Ishikawa, M. (2015). *A Study of the Fukushima Daiichi Nuclear Accident Process: What Caused the Core Melt and Hydrogen Explosion?*. Springer Japan. <https://doi.org/10.1007/978-4-431-55543-8>

Rassame, S., Hibiki, T., & Ishii, M. (2017). ESBWR Passive Safety System Performance under Loss of Coolant Accidents. *Progress in Nuclear Energy*, 96, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2016.12.005>