

ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD TERMO-HIDRÁULICA DE UN GENERADOR DE VAPOR CON TUBOS HELICOIDALES

María C. Magni^{a,b}, Christian P. Marcel^{a,b,c}, Darío Delmastro^{a,b}

^a*Instituto Balseiro, Centro Atómico Bariloche, Av. Bustillo 9500, 8400 S. C de Bariloche, Argentina.*

^b*Comisión Nacional de Energía Atómica, Centro Atómico Bariloche, Av. Bustillo 9500, 8400 S. C. de Bariloche, Argentina.*

^c*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).*

Palabras clave: reactor CAREM-25, generador de vapor helicoidal, ondas de densidad, análisis de estabilidad lineal.

Resumen. Se desarrolló un modelo numérico de los tubos que componen el circuito secundario de un generador de vapor helicoidal con el propósito de estudiar su estabilidad termohidráulica. Este tipo de generador de vapor es susceptible de experimentar inestabilidades originadas por ondas de densidad. El modelo se caracteriza por ser nodal, lineal y no difusivo. Asimismo, permite representar perfiles de potencia transferida (entre el lado primario y el secundario) arbitrarios. Se programó un código de cálculo basado en el modelo desarrollado, el mismo permite encontrar la condición de estabilidad marginal del generador de vapor a partir de la cual podrían presentarse inestabilidades por ondas de densidad. Asimismo, debido a la sencillez lograda en el modelo, el código puede ser fácilmente adaptado permitiendo, entre otras cosas, realizar estudios de sensibilidad para determinar cuáles son los efectos que tienen mayor influencia sobre la estabilidad del sistema en cada rango de operación.

1 INTRODUCCIÓN

Los generadores de vapor con tubos helicoidales poseen características que los hacen atractivos para ser utilizados como sistema de extracción de calor en los reactores compactos e integrados, entre los que se encuentra el reactor CAREM-25. Entre estas características se destacan su alta eficiencia en la transferencia de calor y su estructura más compacta.

El reactor CAREM-25 (Central Argentina de Elementos Modulares) es un reactor integrado, autopresurizado y refrigerado por convección natural, que incorpora avanzados sistemas de seguridad pasivos. El sistema de generación de vapor del CAREM-25 consiste en doce módulos ubicados en el recinto anular que se encuentra entre el recipiente de presión y la chimenea, ver [Figura 1\(a\)](#). Los generadores de vapor (GVs) son del tipo “onethrough” o de un solo paso, con tubos helicoidales, ver [Figura 1\(b\)](#).

El refrigerante del circuito primario ingresa al generador de vapor por la parte superior y desciende entre los tubos, transfiriendo el calor hacia el circuito secundario; luego sale por la boca inferior y se dirige hacia el núcleo por el downcomer.

El agua del sistema secundario baja por los tubos de alimentación o bajada y luego asciende a través de los helicoides, donde se produce el calentamiento, pudiendo identificarse tres zonas: una zona de precalentamiento, una zona de ebullición y otra zona de sobrecalentamiento del vapor producido.

La estabilidad termo-hidráulica de estos generadores de vapor puede verse afectada por la aparición del fenómeno de ondas de densidad o DWO por sus siglas en inglés. Las DWO son inestabilidades dinámicas que ocurren bajo ciertas condiciones de operación de sistemas en ebullición.

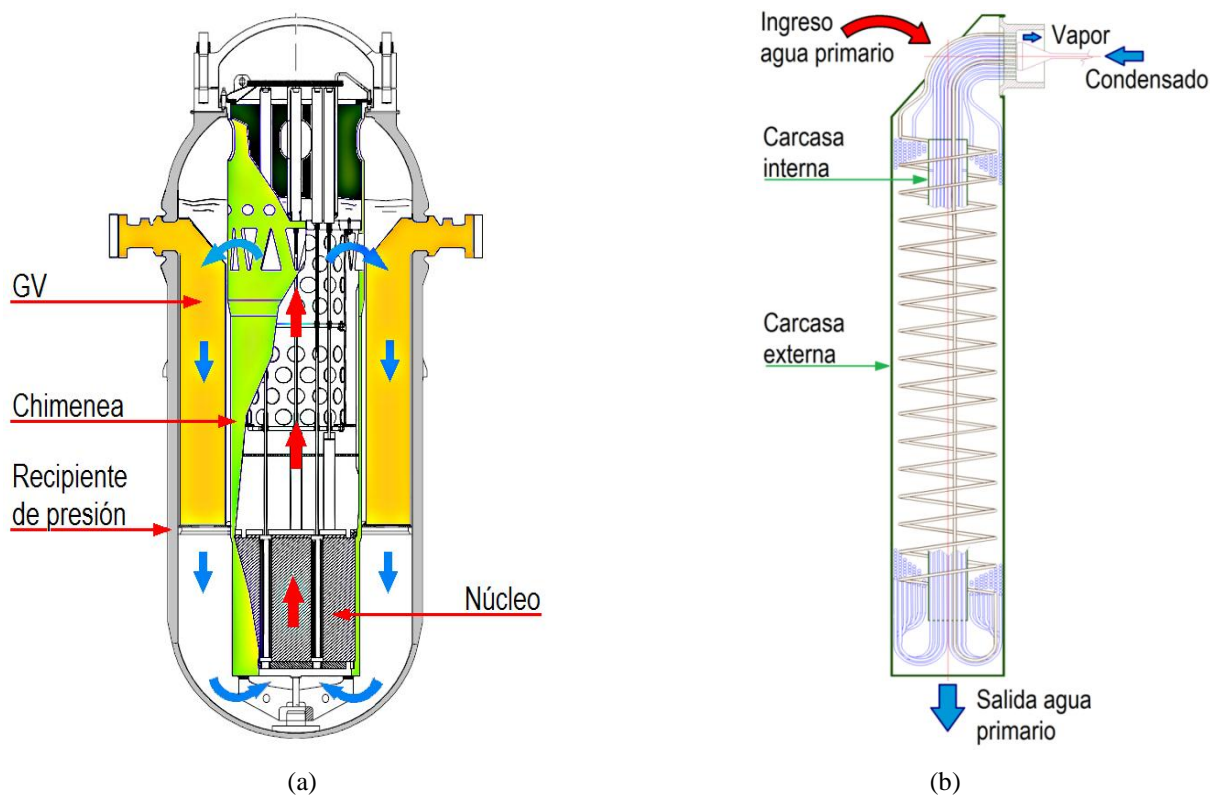


Figura 1: Reactor CAREM-25 (a) Recipiente de presión. (b) Generador de vapor.

2 ONDAS DE DENSIDAD

Para explicar el mecanismo físico de este fenómeno considérese un canal calefaccionado por el que circula un cierto caudal de fluido, el cual en algún punto de su recorrido alcanza la ebullición. Ante una perturbación en el caudal de entrada se origina un frente de entalpía que va modificando la densidad y la velocidad de propagación a lo largo del canal. Estas fluctuaciones de la velocidad y la densidad son especialmente significativas en la zona de dos fases debido al cambio brusco de densidad que se observa cuando un fluido entra en ebullición, ver [Figura2](#). Dichas perturbaciones se propagan aguas abajo hasta el final del canal. Esta propagación no se produce de forma inmediata sino que se desarrolla con cierta demora de tiempo y en modo de ondas.

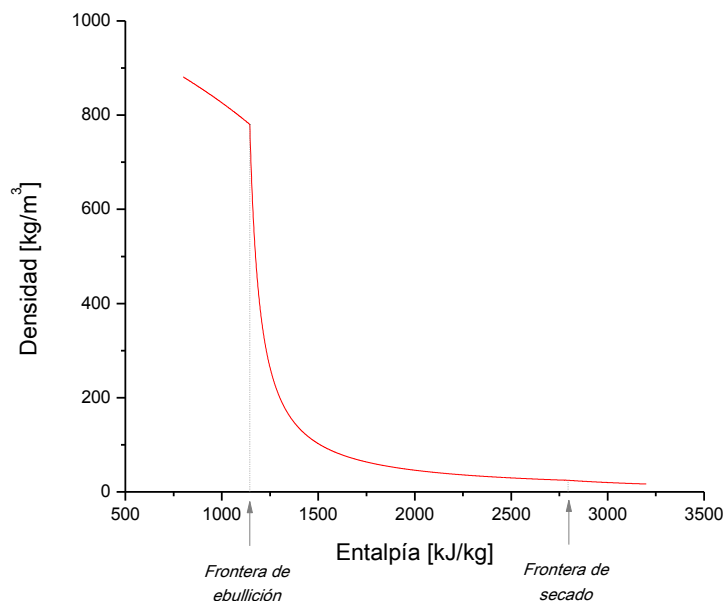


Figura2: Densidad del agua en función de la entalpía a una presión de 4,85 MPa.

Debido a las perturbaciones de caudal y densidad que se propagan en un tiempo finito, la caída de presión local (y por ende la total) fluctúa con cierto retraso con respecto a la perturbación inicial. Por consiguiente, si la caída de presión total es impuesta externamente se genera una realimentación en la perturbación del flujo a la entrada del canal. Dependiendo del desfase y la amplitud de dicha realimentación las oscilaciones pueden amplificarse generando inestabilidades.

Del mecanismo físico detrás del fenómeno de las ondas de densidad se deduce que:

- Cualquier pérdida de carga colocada en la zona de dos fases o de vapor sobrecalentado se encuentra desfasada o demorada con respecto a perturbaciones del flujo a la entrada del canal.
- Cualquier pérdida de carga colocada donde el refrigerante está en estado líquido se encuentra en fase con la perturbación del flujo a la entrada del canal. Es decir que cualquier pérdida de carga concentrada a la entrada oscila en fase con las perturbaciones.

Consecuentemente, un método efectivo para estabilizar un flujo de dos fases consiste en incrementar la pérdida de carga donde el fluido se encuentra en estado líquido, debido a que dicha pérdida de carga oscila en fase con las perturbaciones y en consecuencia no introduce demora en las realimentaciones. De esta manera, si su amplitud es suficientemente grande puede disminuir el efecto del desfase originado en las zonas en ebullición o con

sobrecalentamiento. Determinar el valor que debe tener dicha pérdida de carga es de gran importancia para asegurar la estabilidad termohidráulica en cualquier condición operativa.

En este trabajo se desarrolla un modelo numérico de los tubos que componen el circuito secundario de un generador de vapor helicoidal con el propósito de estudiar su estabilidad termohidráulica.

3 OPCIONES PARA EL MODELADO

Para el estudio de estabilidad de sistemas en simple y doble fase, como generadores de vapor o reactores nucleares, entre otros, se suelen adoptar métodos de análisis que se resuelven en el dominio de las frecuencias. Estos métodos resuelven el problema en forma analítica y se basan en la linealización de las ecuaciones que describen el comportamiento del sistema y la resolución por medio de la transformada de Laplace y métodos de control clásico. Estos modelos se emplean casi exclusivamente para determinar la condición de estabilidad del sistema ya que no pueden predecir el comportamiento temporal del mismo cuando se vuelve inestable. En esos casos en los que es importante la evolución temporal, como lo son por ejemplo los transitorios operacionales o situaciones accidentales, se emplean códigos de cálculo que se resuelven en el dominio del tiempo y que utilizan métodos numéricos como elementos finitos o diferencias finitas. Estos esquemas numéricos introducen una gran difusión numérica con el fin de evitar desbordes en el cálculo provenientes de truncamientos o redondeos. Cuando estos métodos son aplicados al análisis de estabilidad, las pequeñas perturbaciones que usualmente originan las inestabilidades con frecuencia se amortiguan como resultado de la difusión numérica, generando resultados no conservativos. Debido a esto se desaconseja el uso de dichos métodos para predecir la performance de estabilidad del sistema. Asimismo, los métodos que se resuelven en el dominio de la frecuencia permiten determinar la condición de estabilidad de manera rápida, evitando un análisis exhaustivo de todos los transitorios posibles en el dominio del tiempo. Por estas razones para realizar un análisis de estabilidad se suelen utilizar los métodos que se resuelven con técnicas de las frecuencias.

4 MODELO

Para el estudio de la estabilidad de los GVs del CAREM-25 se desarrolló un modelo numérico de los tubos que componen el sistema secundario, ver [Magni \(2009\)](#) y [Magni et al. \(2012\)](#) para más detalles. Este modelo se caracteriza por ser nodal, lineal, es decir que se resuelve en el dominio de las frecuencias, y, por lo tanto, estrictamente no difusivo. Se tienen en cuenta los efectos de fricción (en simple y dos fases), aceleración, inercia y gravedad en cada una de las regiones de los tubos: región de agua subenfriada (zona de precalentamiento), región con agua en ebullición (zona de dos fases) y región de vapor sobrecalentado (zona de sobrecalentamiento). Una de las ventajas del modelo es que permite representar perfiles de potencia transferida (entre el lado primario y el secundario) arbitrarios. Esto es muy importante pues se encontró que las predicciones de la performance de estabilidad de los tubos de los GVs, analizados asumiendo una distribución uniforme de la potencia transferida, sobrestiman la estabilidad, provocando resultados que no son conservativos.

El sistema modelado se muestra en la [Figura 3](#). Se trata de un canal calefaccionado, al cual se le entrega una potencia total Q , constante. La distribución lineal de potencia no es uniforme sino que varía con la posición a lo largo del canal como se muestra en la misma figura. Dicha distribución se calcula para cada condición operativa mediante un código independiente, teniendo en cuenta los diferentes mecanismos de transferencia térmica en cada región. La caída de presión es impuesta externamente y se mantiene constante. El líquido ingresa al canal

en condiciones de subenfriamiento y, en cierto punto, denominado frontera de ebullición, comienza el cambio de fase. Aguas abajo, comienza el sobrecalentamiento del fluido en el punto denominado frontera de secado.

Se distinguen tres zonas en el canal, cada una de las cuales se modela como un único nodo. La primera zona abarca la región de líquido subenfriado, comprendida entre la entrada del canal y la frontera de ebullición. La segunda, limitada entre ambas fronteras, coincide con la región en ebullición. Y la tercera, la de vapor sobrecalentado, se extiende desde la frontera de secado hasta el final del canal.

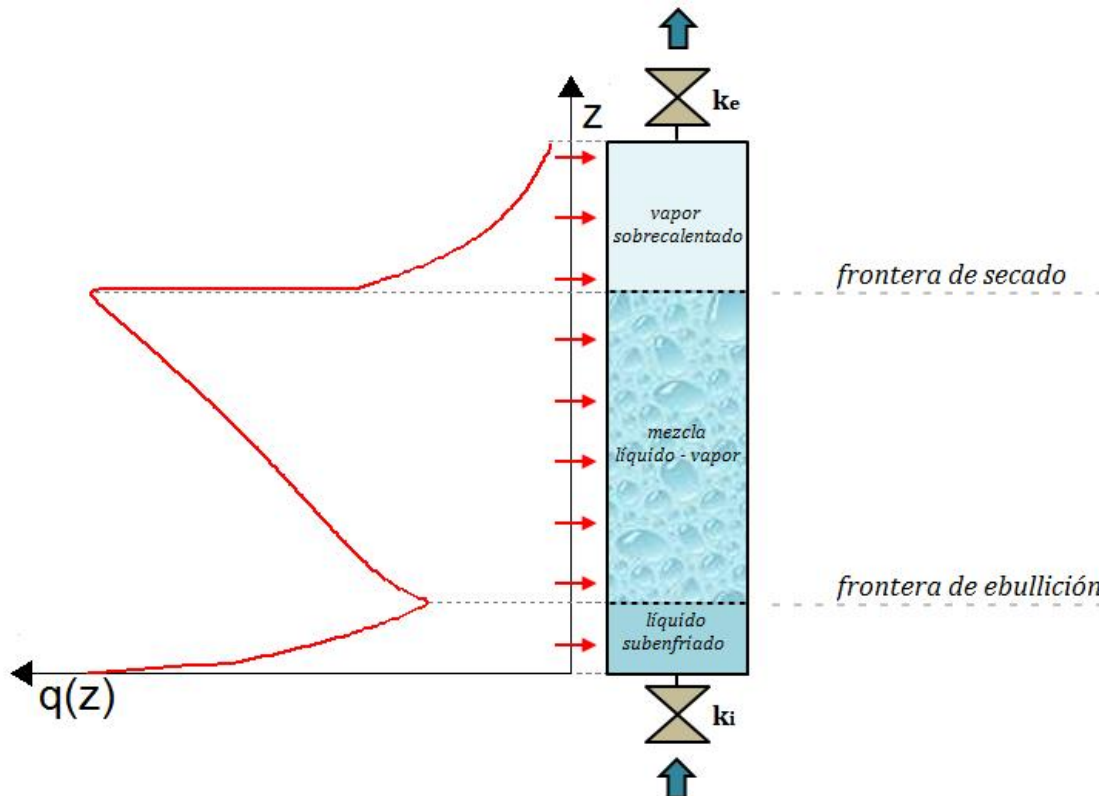


Figura3: Modelo de tres zonas para un canal calefactado, con perfil de potencia no uniforme.

En el modelado de cada una de las tres regiones se asumen las siguientes hipótesis:

- Región líquida: el fluido es incompresible y la densidad del mismo en toda la región es igual al valor de la densidad en el punto de ebullición.
- Región líquido-vapor: el fluido se comporta como mezcla homogénea de dos fases (ambas incompresibles), que se encuentran en equilibrio termodinámico. Es decir, se aplica el modelo homogéneo, HEM por sus siglas en inglés (Todreas y Kazimi, 1993).
- Región de vapor sobrecalentado: el fluido se comporta como un gas ideal a presión constante.

Con el fin de lograr una mejor representación de la transferencia de calor se utiliza una función exponencial para ajustar el perfil de potencia en cada una de las zonas. Para distintas condiciones de operación del reactor existen diferentes distribuciones de potencia y por lo tanto los ajustes exponenciales varían en cada caso.

4.1 Formulación matemática

El modelo matemático se compone de tres ecuaciones de conservación (ecuaciones diferenciales parciales de primer orden, no lineales y fuertemente acopladas entre sí), más una

ecuación de cierre, en este caso la ecuación de estado. Si se considera el problema en forma unidimensional, con un área de pasaje uniforme, las ecuaciones para el sistema representado en la [Figura 3](#) y descrito anteriormente se pueden escribir como,

Conservación de masa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Conservación de momento

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial z} + \left(\frac{f}{2D_h} + k_j\right) \rho u^2 + \rho g \sin(\theta) = -\frac{\partial p}{\partial z} \quad (2)$$

Conservación de energía

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u h)}{\partial z} = q(z) \quad (3)$$

Ecuación de estado

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_f & \text{para } h \leq h_f &= 0 \\ \rho &= \left((h - h_f) \frac{v_{fg}}{h_{fg}} + v_f \right)^{-1} & \text{para } h_f < h < h_g \\ \rho &= \left((h - h_g) \frac{R/M}{c_p p_0} + v_g \right)^{-1} & \text{para } h_g < h \end{aligned} \quad (4)$$

Donde z denota la posición axial, q la densidad lineal de potencia, t el tiempo, p la presión, u la velocidad, ρ la densidad, ρ_f la densidad del líquido saturado, h la entalpía, h_f la entalpía del líquido saturado, h_{fg} la diferencia entre la entalpía de saturación del líquido y la del vapor, v_f el volumen específico del líquido saturado, v_{fg} la diferencia entre el volumen específico del líquido saturado y el del vapor saturado, k_j el coeficiente de pérdidas concentradas, f el coeficiente de fricción de Darcy, D_h el diámetro hidráulico, g la aceleración de la gravedad, R la constante universal de los gases, M la masa molar y c_p el calor específico a presión constante. Asimismo, θ es el ángulo de inclinación del canal respecto de la horizontal, de manera que el término gravitatorio considera la inclinación que tienen los tubos del GV debido a su forma helicoidal. Sin embargo, para el fenómeno de ondas de densidad es de gran importancia el efecto de las fricciones por lo que resulta necesario modelar correctamente dicho efecto teniendo en cuenta la forma helicoidal de los tubos. Para ello se utilizan correlaciones para el coeficiente de fricción de simple fase y para el multiplicador de dos fases especialmente desarrolladas para tubos helicoidales.

En estudios previos, se analizó el efecto que tienen las fricciones sobre la estabilidad de los tubos helicoidales de los GVs del CAREM-25 y se determinó cuáles eran las correlaciones más apropiadas para utilizar en este caso ([Magni et al. 2013](#)).

En el régimen de simple fase se optó por la correlación para el coeficiente de fricción de Darcy propuesta por [Ruffell\(1974\)](#),

$$f = 4 \left(0.00375 + 0.633 \left(\frac{D}{d} \right)^{-0.275} Re^{-0.4} \right) \text{ para } Re < 600000 \quad (5)$$

donde d es el diámetro de los tubos y D es el diámetro del helicoide.

En el régimen de dos fases, por otra parte, se seleccionó la correlación de [Guo\(2001\)](#) para el multiplicador de dos fases,

$$\phi_{to}^2 = \psi\psi_1 \left[1 + x \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} - 1 \right) \right], \tag{6}$$

donde ρ_f y ρ_g son las densidades del líquido y del vapor, respectivamente, x es el título, ψ es un coeficiente que se calcula como

$$\psi = 1 + \frac{x(1-x)(1000/G-1)(\rho_f/\rho_g-1)}{1+x(\rho_f/\rho_g-1)} \quad \text{para } G \leq 1000 \frac{kg}{m^2s},$$

$$\psi = 1 + \frac{x(1-x)(1000/G-1)(\rho_f/\rho_g-1)}{1+(1-x)(\rho_f/\rho_g-1)} \quad \text{para } G \geq 1000 \frac{kg}{m^2s},$$

y

$$\psi_1 = 142.2 \left(\frac{p}{p_{cr}} \right)^{0.62} \left(\frac{D}{d} \right)^{-1.04}, \tag{8}$$

donde p es la presión y p_{cr} es la presión crítica.

4.2 Estabilidad

Como se mencionó anteriormente, el modelo desarrollado resuelve el problema en el dominio de las frecuencias. Este método de análisis se basa en la linealización de las ecuaciones que describen el comportamiento del sistema (Ec. (1) a (4)) y la resolución por medio de la transformada de Laplace y métodos de control clásico.

En teoría de control, la estabilidad de la respuesta temporal de un sistema, tal como el representado en el diagrama de bloques de la Figura4, está condicionada por los polos de su función de transferencia en lazo cerrado.

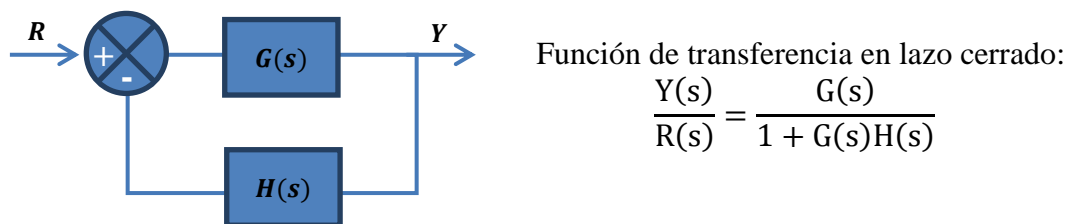


Figura4: Diagrama de bloques.

Para que el sistema sea estable los polos deben yacer en el semiplano izquierdo del plano complejo “s”, como se observa en la Figura5.

Los polos son los ceros de la ecuación característica,

$$1 + G(s)H(s) = 0. \tag{9}$$

Para que el sistema sea estable, todos los ceros de esta función tienen que tener parte real negativa.

4.2.1 Ecuación característica

Si el sistema es un canal como el modelado en este trabajo, cuyo comportamiento está condicionado por la dinámica de las ondas de densidad, la estabilidad se puede evaluar en términos de la función de transferencia que relaciona la caída de presión total con la velocidad del fluido a la entrada del canal (Ec. (10)). Dicha función de transferencia es la ecuación característica de este sistema y refleja la respuesta de la perturbación de la caída de presión total ante una perturbación en la velocidad a la entrada,

$$\frac{\Delta P}{U_i} = \frac{\Delta P_p}{U_i} + \frac{\Delta P_e}{U_i} + \frac{\Delta P_s}{U_i}, \tag{10}$$

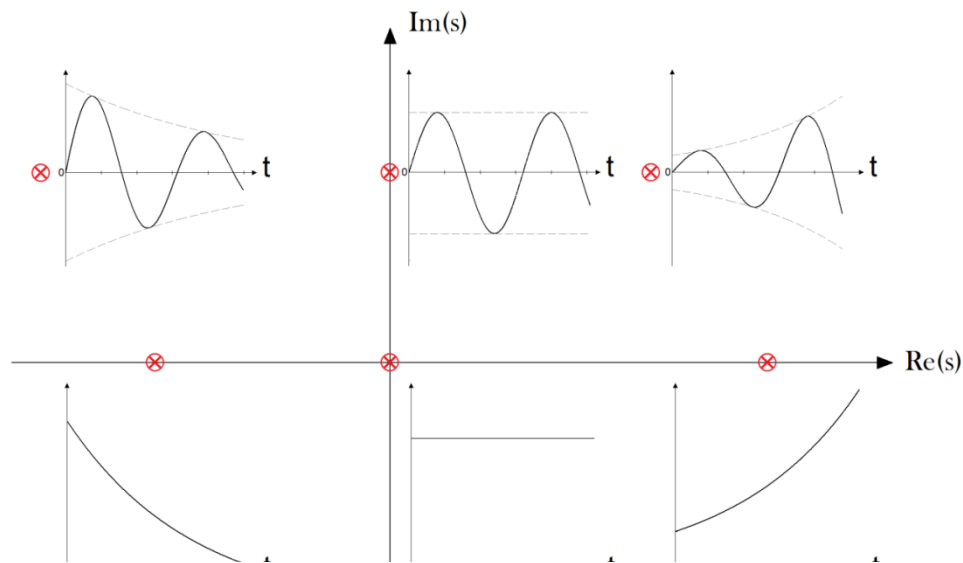


Figura5: Respuesta temporal de un sistema de acuerdo a la ubicación de sus polos en el plano complejo.

donde U es la transformada de Laplace de la perturbación de la velocidad y ΔP es la transformada de Laplace de la perturbación de la caída de presión. Los subíndices p , e y s indican la zona de precalentamiento, la de ebullición y la de sobrecalentamiento, respectivamente.

La función de transferencia correspondiente a la caída de presión total (Ec. (10)) es, a su vez, igual a la suma de todas las contribuciones a la caída de presión: aceleración, fricción, gravitatoria e inercial,

$$\frac{\Delta P}{U_i} = \frac{\Delta P_I}{U_i} + \frac{\Delta P_a}{U_i} + \frac{\Delta P_{fr}}{U_i} + \frac{\Delta P_G}{U_i}. \quad (11)$$

Los subíndices I , a , fr y G indican el término inercial, el de aceleración, el de fricción y el gravitatorio, respectivamente.

Cada término del miembro derecho de la Ec. (11) se obtiene al integrar la ecuación de conservación de momento, Ec. (2), perturbada y transformada por Laplace, en cada tramo del canal.

En general, el análisis en el dominio de las frecuencias permite resolver el problema en forma completamente analítica, pero para ello se suelen adoptar importantes simplificaciones, entre ellas, la utilización de un perfil de potencia uniforme para modelar la transferencia de calor. Como se mencionó anteriormente, en este trabajo se adopta un perfil de potencia exponencial, lo que incrementa significativamente la complejidad matemática del modelo. En particular, para obtener la función de transferencia de la Ec. (11), se integra la ecuación de conservación de momento, Ec. (2), perturbada y transformada por Laplace, en cada tramo del canal. En el caso de los términos inercial y de fricciones, la integral analítica cuando se modela el perfil de potencia con una exponencial, depende de la función hipergeométrica de Gauss. Dicha función se define como (Abramowitz y Stegun, 1972),

$${}_2F_1(a, b; c; z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(a)_n (b)_n}{(c)_n} \frac{z^n}{n!} \quad (12)$$

con $z \in \mathbb{C}$; $a, b, c \in \mathbb{C}$. Donde $(a)_n$ es el símbolo de Pochhammer (Abramowitz y Stegun, 1972),

$$(a)_0 = 1$$

$$(a)_n = a(a+1) \cdots (a+n-1) = \frac{\Gamma(a+n)}{\Gamma(a)} \quad (13)$$

La serie hipergeométrica de Gauss, Ec. (12), no está definida cuando c es un número entero negativo. El círculo de convergencia de la serie es el círculo unitario $|z| = 1$; es decir que la serie converge absolutamente cuando $|z| < 1$, mientras que si $|z| > 1$ la serie diverge.

El comportamiento cuando $|z| = 1$ es

- divergente cuando $Re(c - a - b) \leq -1$,
- absolutamente convergente cuando $Re(c - a - b) > 0$,
- condicionalmente convergente cuando $-1 < Re(c - a - b) \leq 0$, excluido el punto $z = 1$.

En el modelo desarrollado, el problema surge cuando se evalúa dicha función en la zona de ebullición. Tanto cuando se calcula el término inercial como cuando se calcula el término de fricciones, el módulo de z (argumento de la Ec. (12)) es mayor a uno; por esta razón la serie diverge, es decir que no es posible utilizar la serie hipergeométrica de Gauss para calcular analíticamente dichas integrales. Para resolver esta dificultad, estas integrales se calculan numéricamente. El valor de las mismas se obtiene por el método de los trapecios.

4.2.2 Búsqueda de los ceros de la ecuación característica

Siguiendo con la teoría de control, la estabilidad del sistema se puede determinar utilizando el criterio de Nyquist; sin embargo, para realizar el estudio de estabilidad se requiere evaluar un gran número de condiciones de operación por lo que resulta más conveniente emplear una rutina de cálculo que permita obtener el polo más inestable (el de mayor parte real) en cada situación operativa. Por esta razón, se emplea una rutina de cálculo para obtener las raíces de la ecuación característica,

$$\frac{\Delta P}{U_i} = 0. \quad (14)$$

Las raíces de la Ec. (14), se obtienen empleando una rutina de cálculo que permite resolver un sistema de ecuaciones no lineales de la forma $F(x) = 0$. Dicha rutina implementa tres algoritmos de resolución: región de confianza dogleg, región de confianza reflexiva y el algoritmo Levenberg-Marquardt. En este trabajo se utiliza el método de región de confianza dogleg.

Sea $F(x) = 0$ la función vectorial que se quiere resolver, la idea básica de los métodos de región de confianza es tomar un punto x_k en el dominio de F y moverse a otro punto x_{k+1} situado en un entorno de x_k (la región de confianza) tal que $F(x_{k+1}) < F(x_k)$. Para ello se aproxima a $F(x)$ con una función simple que refleje razonablemente el comportamiento de $F(x)$ en la región de confianza definida entorno a x_k . En particular, el método de región de confianza dogleg construye una trayectoria poligonal de dos tramos para llegar al nuevo punto x_{k+1} . Si no se satisface la condición $F(x_{k+1}) < F(x_k)$ se amplía la región de confianza y se repite la búsqueda de x_{k+1} . Si se satisface dicha condición, se busca x_{k+2} en una región de confianza centrada en x_{k+1} .

5 RESULTADOS

Como se mencionó anteriormente, el código desarrollado permite determinar cuál es la mínima pérdida de carga necesaria a la entrada de los tubos del GV para asegurar la estabilidad termo-hidráulica del mismo. Con este modelo es posible analizar fácilmente

distintas condiciones de operación pudiendo trazarse mapas, como el de la Figura6:.. Esta figura es un gráfico de contornos de colores, en escala logarítmica, en el cual se muestra la mínima pérdida de carga que es necesario colocar a la entrada del GV en cada punto de operación definido por la potencia de operación y la presión del lado primario. En dicha figura, la pérdida de carga se encuentra representada por una constante de fricción localizada, k_i , de modo que

$$\Delta P_i = \frac{k_i}{2} \frac{\dot{m}^2}{\rho_f A^2} \quad (15)$$

donde ΔP_i es la pérdida de carga a la entrada del GV, k_i es el coeficiente de pérdida de carga, \dot{m} es el caudal másico, A es el área de pasaje y ρ_f es la densidad del líquido.

El gráfico de contornos de colores de la Figura6 permite una rápida identificación de los puntos de operación más proclives a experimentar inestabilidades por ondas de densidad. Se observa que la zona más inestable se encuentra a muy baja potencia, mientras que la zona más estable se encuentra a alta potencia y alta presión.

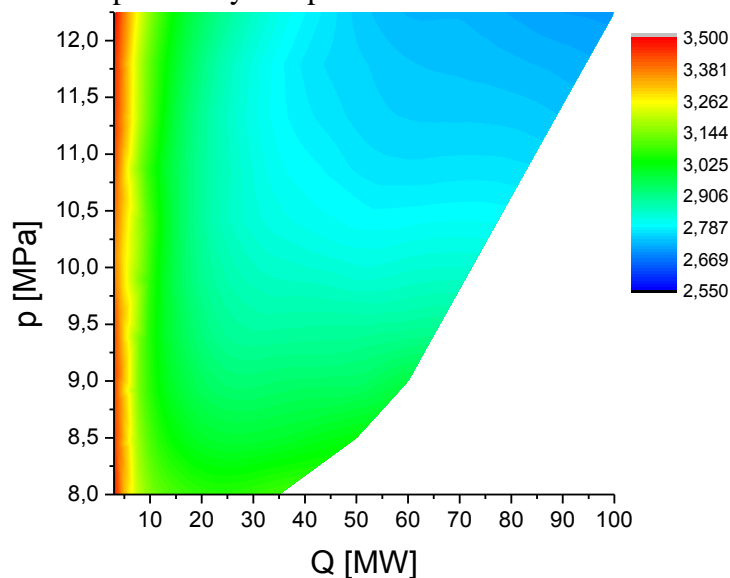


Figura6: Mapa del valor marginal de k_i en función de la potencia de operación y de la presión del primario.

Debido a las características del modelo, éste puede ser fácilmente adaptado permitiendo, entre otras cosas, realizar estudios de sensibilidad para determinar cuáles son los efectos que tienen mayor influencia sobre la estabilidad del sistema en cada rango de operación. En particular, es de gran interés analizar cómo afectan a la estabilidad del sistema las distintas contribuciones a la pérdida de carga (aceleración, inercia, gravedad y fricciones). Con el código desarrollado es posible analizar cada uno de estos términos individualmente. En estudios previos (Magni et al. 2013), se encontró que los términos que más inestabilizan son los de las fricciones en el evaporador y en el sobrecalentador; mientras que el término que más estabiliza es el de las fricciones en la zona líquida (la pérdida de carga concentrada a la entrada del canal más las fricciones distribuidas en la zona de precalentamiento). Este resultado es esperable dado que, como se mencionó anteriormente, las fricciones en las zonas de evaporación y sobrecalentamiento afectan tanto la magnitud como la fase de las perturbaciones, ver sección 2. Por otra parte, las fricciones en la zona líquida oscilan en fase con las perturbaciones que se producen a la entrada del canal.

6 CONCLUSIONES

Se desarrolló un modelo numérico diseñado para estimar la estabilidad termohidráulica de los tubos helicoidales de un generador de vapor similar al utilizado en el CAREM-25.

El modelo se caracteriza por ser nodal, lineal y no difusivo.

Se modelaron las tres zonas que se identifican en los tubos de los GVs: la de precalentamiento, la de ebullición y la de sobrecalentamiento.

Para la estimación de las pérdidas de carga en las diferentes zonas de los tubos se consideraron correlaciones especialmente desarrolladas para tubos helicoidales.

Para representar el perfil lineal de potencia se utilizó una función exponencial diferente en cada zona, lo cual incrementa notablemente la complejidad matemática del modelo. Sin embargo, éste permite analizar fácilmente distintas condiciones de operación, habiéndose estudiado un amplio rango.

Mediante la representación de los resultados en un gráfico de contorno de colores, se muestran resultados típicos que se pueden obtener a partir del modelo desarrollado. En dicho gráfico se pueden identificar rápidamente los puntos de operación más proclives a experimentar inestabilidades por ondas de densidad. Se observa que la zona más inestable se encuentra a muy baja potencia, mientras que la zona más estable se encuentra a alta potencia y alta presión.

Una de las ventajas del código es que se puede adaptar fácilmente para realizar estudios de sensibilidad, en particular, es posible analizar individualmente cómo afectan a la estabilidad del sistema las distintas contribuciones a la pérdida de carga (aceleración, inercia, gravedad y fricciones). En estudios previos, se encontró que los términos que más inestabilizan son los de las fricciones en el evaporador y en el sobrecalentador; mientras que el término que más estabiliza es el de las fricciones en la zona líquida.

REFERENCES

- Abramowitz, M., Stegun, I. A. *Handbook of mathematical functions: with formulas, graphs, and mathematical tables*. 1972.
- Guo, L., Feng, Z., Chen, X. An experimental investigation of the frictional pressure drop of steam-water two-phase flow in helical coils. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44: 2601-2610, 2001.
- Magni, M.C. Estudio de la estabilidad termo-hidráulica de reactores nucleares de agua supercrítica. Proyecto integrador de Ingeniería Nuclear, Instituto Balseiro, U.N.Cuyo, S. C. de Bariloche, Argentina, 2009.
- Magni, M.C. Estudio numérico de la estabilidad termohidráulica de sistemas refrigerados con fluidos en estado supercrítico y subcrítico con sobrecalentamiento. Tesis de Maestría en Ingeniería, Instituto Balseiro, U.N.Cuyo, S. C. de Bariloche, Argentina (en preparación).
- Magni, M. C., Marcel, C. P., Delmastro, D. Estudio de la estabilidad termohidráulica de un generador de vapor helicoidal. XXXIX Reunión Anual de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear. Buenos Aires (Argentina), 2012
- Magni, M. C., Marcel, C. P., Delmastro, D. Estudio de la estabilidad termohidráulica de un generador de vapor con tubos helicoidales. XL Reunión Anual de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear. Buenos Aires (Argentina), 2013
- Ruffell, A. E. The application of heat transfer and pressure drop data to the design of helical coil once-through boilers. Symp. Multi-Phase Flow Systems, University of Strathclyde, Inst. Chem. Eng. Symp. Ser. 38 (1974) Paper 15.
- Todreas, N.E., Kazimi, J.S. *Nuclear systems I: ThermalHydraulic Fundamentals*. 2da ed. Taylor & Francis, 1993.