

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE UN CANAL REFRIGERADO POR AGUA EN ESTADO SUPERCRÍTICO

Magni, M. C.¹² Marcel, C. P.¹²³ Delmastro, D. F.¹²

¹ Instituto Balseiro, 8400 S. C de Bariloche, Argentina.

² Centro Atómico Bariloche, CNEA, 8400 S. C. de Bariloche, Argentina.

³ CONICET

Resumen

Se presenta un modelo simplificado para el estudio de la estabilidad termohidráulica de un canal uniformemente calefaccionado y refrigerado por un fluido supercrítico. Dicho modelo se utilizó para analizar la estabilidad de un canal sujeto a condiciones similares a las encontradas en el núcleo de un reactor refrigerado por agua supercrítica. La gran disminución de la densidad del fluido en el núcleo de este reactor es una fuente potencial para la aparición de oscilaciones por ondas de densidad, similares a las observadas en BWRs. Debido a la similitud en el comportamiento de ambos sistemas, es posible tratar al fluido supercrítico como un pseudo-sistema en ebullición. Este tratamiento permite extender un modelo ampliamente utilizado en el estudio de inestabilidades de sistemas en ebullición, a condiciones de operación supercríticas. El modelo desarrollado en este trabajo contempla entonces tres regiones: una región compuesta por un fluido “denso”, similar a un líquido incompresible; una zona en la que coexisten un fluido “denso” y uno “liviano”, similar a una mezcla de fases; y una región compuesta por un fluido “liviano” que se comporta como vapor sobrecalentado. Se aplicó el modelo homogéneo (HEM- Homogeneous Equilibrium Model) para la zona de pseudo-ebullición, y el modelo de gas ideal para la zona de pseudo-sobrecalentamiento. Se realizó un análisis de estabilidad lineal en el dominio de la frecuencia que permitió obtener los mapas de estabilidad del sistema. En dichos mapas se observa la posible ocurrencia de dos mecanismos de inestabilidad: oscilaciones por ondas de densidad (o DWO por sus siglas en inglés) e inestabilidades excursivas de Ledinegg. Asimismo, un análisis de sensibilidad muestra que el efecto de las fricciones en la zona de pseudo-vapor sobrecalentado, junto al efecto de la aceleración, son las contribuciones que más desestabilizan al sistema. Mientras que las fricciones en la zona de pseudo-líquido subenfriado constituyen el efecto estabilizador más importante.

STABILITY ANALYSIS OF A HEATED CHANNEL COOLED BY SUPERCRITICAL WATER

Abstract

A simple model to study thermal-hydraulic stability of a heated channel under supercritical conditions is presented. Single channel stability analysis for the SCWR (Supercritical Water Cooled Reactor) design was performed. The drastic change of fluid density in the reactor core of a SCWR may induce DWO (Density Wave Oscillations) similar to those observed in BWRs. Due to the similarities between subcritical and supercritical systems we may treat the supercritical fluid as a pseudo two-phase system. Thus, we may extend the modeling approach often used for boiling flow stability analysis to supercritical pressure operation conditions. The model developed in this work take into account three regions: a “heavy” fluid region, similar to an incompressible liquid; a zone where a “heavy” fluid and a “light” fluid coexist, similar to two-phase mixture; and a “light” fluid region which behaves like superheated steam. It was used the homogeneous equilibrium model (HEM) for the pseudo boiling zone, and the ideal gas model for the pseudo superheated steam zone. System stability maps were obtained using linear stability analysis in the frequency domain. Two possible instability mechanisms are observed: DWO and excursive Ledinegg instabilities. Also, a sensitivity analysis showed that frictions in pseudo superheated steam zone, together with acceleration effect, are the most destabilizing effects. On the other hand, frictions in pseudo liquid zone are the most important stabilizing effect.

Introducción

El reactor refrigerado por agua supercrítica es un reactor de última generación que utiliza agua en estado supercrítico como refrigerante y/o moderador. Forma parte de la cuarta generación de reactores nucleares seleccionados por el GIF IV (Generation IV International Forum) en el marco de una iniciativa internacional que reúne a las principales potencias nucleares y a otros países interesados en estas nuevas tecnologías, entre los que se encuentra la Argentina. Al utilizar agua supercrítica, este reactor es capaz de operar a altas temperaturas sin la aparición de DNB (Departure of Nucleate Boiling), fenómeno que limita la temperatura de operación de LWRs y HWRs tradicionales. Como consecuencia de las altas temperaturas alcanzadas, se mejora la eficiencia termodinámica, llegando a valores de ~ 45%. Sin embargo, debido a la falta de experiencia en el uso de fluidos supercríticos para el área nuclear, es necesario estudiar el comportamiento termohidráulico y las posibles inestabilidades que pudiesen ocurrir y que pudieran afectar la seguridad de la planta.

En un sistema que opera a presión supercrítica, la densidad del fluido disminuye considerablemente cuando su temperatura se aproxima a la del punto pseudo-crítico. Este comportamiento, semejante al observado cuando un fluido entra en ebullición, da lugar a la aparición de oscilaciones por ondas de densidad (DWO), similares a las observadas en BWRs. El fenómeno de inestabilidad por ondas de densidad (DWO – Density Wave Oscillations) se debe a la existencia de retardos en la propagación de las perturbaciones y las realimentaciones del sistema. En el área nuclear, este fenómeno ha sido extensamente estudiado en sistemas que operan con flujos de dos fases –BWRs y generadores de vapor, entre otros– no obstante, para fluidos supercríticos son pocos los estudios realizados.

Debe notarse que cuando un fluido supercrítico alcanza la temperatura pseudo-crítica no ocurre una transición de fases. Pero, dadas las similitudes mencionadas, podemos tratar al fluido supercrítico como un pseudo-flujo de dos fases. Este tratamiento permite extender un modelo ampliamente utilizado en el estudio de inestabilidades de sistemas en ebullición, a condiciones de operación supercríticas. En este contexto, se desarrolló un modelo lineal de un canal a presión supercrítica que contempla tres regiones, separadas por pseudo-transiciones de fase (Figura 1). En el modelo, se considera que el fluido ingresa al canal calefactor a una temperatura subcrítica, y que a medida que avanza eleva su temperatura hasta alcanzar la pseudo-ebullición, en las proximidades del punto pseudo-crítico. Se desarrolla entonces un pseudo-flujo de dos fases que alcanza posteriormente la pseudo-saturación, dando lugar a una región de pseudo-vapor sobrecalentado.

Como se ha mencionado anteriormente, el modelo desarrollado captura únicamente la dinámica lineal del sistema, lo cual hace posible predecir los umbrales de estabilidad para pequeñas perturbaciones en torno a la solución de estado estacionario. Este estudio simplificado permite trazar los mapas de estabilidad del sistema. En este trabajo, dichos mapas fueron expresados en función de dos parámetros adimensionales denominados *pseudo-número de subenfriamiento* y *pseudo-número de cambio de fase* (N_{psub} y N_{ppch} , respectivamente) análogos a los correspondientes N_{sub} –número de subenfriamiento– y N_{pch} – número de cambio de fase – típicamente utilizados en el análisis de estabilidad para flujos de dos fases.

Como es sabido, en un sistema subcrítico existen dos mecanismos de inestabilidad principales que determinan la condición del sistema: DWO e inestabilidades excursivas de Ledinegg (Ambrosini, 2007). En un sistema supercrítico se deduce la posible ocurrencia de inestabilidades por DWO a partir del

comportamiento de la densidad cerca del punto pseudo-crítico. A diferencia de este fenómeno, la posible ocurrencia de inestabilidades de Ledinegg en sistemas supercríticos resulta menos evidente. No obstante, en los mapas de estabilidad obtenidos en este trabajo se muestra una zona donde resulta posible la aparición de inestabilidades excursivas de Ledinegg (Ambrosini, 2007).

Los resultados presentados en este trabajo fueron obtenidos en base a los parámetros de diseño del SCWR (Supercritical Water Reactor), un reactor de agua supercrítica que se encuentra actualmente en desarrollo. Este reactor posee un espectro térmico y utiliza agua liviana como refrigerante y moderador, a una presión de 25MPa.

Modelo

Como se mencionó anteriormente, el modelo desarrollado para el análisis de estabilidad de un canal a presión supercrítica consta de tres regiones (Figura 1). En la primera región –de pseudo-subenfriamiento– se considera que el fluido supercrítico se comporta de manera similar a un líquido incompresible y se lo modela como un fluido “denso”, con densidad constante. En la segunda región –de pseudo-ebullición– se considera que existe una mezcla homogénea compuesta por un fluido “denso” y uno “liviano”, en equilibrio termodinámico. En la tercera región –de pseudo-vapor sobrecalentado– se modela al fluido supercrítico como un fluido “liviano” que se comporta de manera similar a un gas ideal. Los puntos en los cuales ocurren las transiciones se denominan frontera de pseudo-ebullición y de pseudo-secado, respectivamente. Se llama λ a la posición de la primera frontera, y γ a la posición de la segunda frontera. Si consideramos que el fluido que circula por el canal es agua a una presión de 25MPa, la frontera de pseudo-ebullición se encuentra donde la temperatura del agua es igual a $T_A = 350^\circ\text{C}$. Mientras que la frontera de pseudo-secado se encuentra donde la temperatura es igual a T_B , calculada como (Zhao *et al.*, (2005))

$$T_B = n_2 + \left(\frac{p_0 - n_3}{n_1} \right)^{0.5} \quad (1)$$

Donde p_0 es la presión absoluta del sistema en MPa, y los valores de las constantes n_1 , n_2 , y n_3 son

$$n_1 = 0.00101930$$

$$n_2 = 572.545$$

$$n_3 = 13.9189$$

Formulación matemática

El sistema en estudio (Figura 1) se compone de un canal vertical, calefaccionado, sujeto a una caída de presión constante, y por el que circula un fluido supercrítico. Por simplicidad, se asume que la potencia entregada al canal es uniforme y constante, y que la temperatura a la entrada se mantiene constante. Dada la complejidad del problema, se lo trata en forma unidimensional, con un área de pasaje uniforme. El comportamiento del sistema queda entonces descripto por las ecuaciones 1D de conservación de masa, momento y energía. Despreciando las variaciones de energía cinética y potencial, y la disipación viscosa, las ecuaciones de conservación se pueden escribir en forma adimensional como

Conservación de masa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

Conservación de momento

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial z} + \Lambda_{fr} \rho u^2 + \frac{\rho}{Fr} = -\frac{\partial p}{\partial z} \quad (3)$$

Conservación de energía

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u h)}{\partial z} = N_{psub} \quad (4)$$

Donde se definieron las siguientes variables adimensionales.

$$u = \frac{u^*}{\left(\frac{L^*}{v^*}\right)^2}; \quad z = \frac{z^*}{L^*}; \quad t = \frac{t^*}{v^*}; \quad \rho = \frac{\rho^*}{\rho_A^*}; \quad h = \frac{(h_A^* - h_i^*) v_{AB}^*}{v_A^* h_{AB}^*}; \quad p = \frac{p^*}{\rho_A^* \left(\frac{L^*}{v^*}\right)^2}$$

Notar que el superíndice * se utilizó para indicar las variables dimensionales.

El valor de referencia para el tiempo, v^* , representa el tiempo total que tarda una partícula de fluido que ingresa al canal para alcanzar la entalpía de pseudo-saturación, h_A , y se calcula a partir de la expresión

$$v^* = \frac{(h_A^* - h_i^*) \rho_A^*}{\frac{Q^*}{L^* A_{xs}^*}}$$

Se definieron además los parámetros adimensionales Fr (número de Froude), Λ_{fr} (coeficiente de fricción), y N_{psub} (pseudo-número de subenfriamiento). Los dos primeros se definen de la misma manera que para el caso subcrítico.

$$Fr = \frac{\left(\frac{L^*}{v^*}\right)^2}{g^* L^*} \quad \Lambda_{fr} = \frac{f L^*}{2 D_h^*}$$

Donde f es el coeficiente de fricción de Darcy, el cual fue calculado a partir de la correlación de Blasius.

$$f = 0.316 Re^{-0.25}, \quad Re < 20000$$

$$f = 0.184 Re^{-0.20}, \quad Re \geq 20000$$

Se calculó un f para cada región del modelo. Para la región de pseudo-subenfriamiento se utilizó el valor del número de Reynolds en la frontera de pseudo-ebullición. En la región de pseudo-ebullición se utilizó el valor promedio de los números de Reynolds calculados en las dos fronteras. Para la región de pseudo-sobrecalentamiento se utilizó el valor calculado en la frontera de pseudo-secado.

El pseudo-número de subenfriamiento que aparece en la conservación de energía se define como

$$N_{psub} = \frac{h_A^* - h_i^* v_{AB}^*}{h_{AB}^* v_A^*}$$

Notar que esta expresión es equivalente a la definición del número de subenfriamiento, N_{sub} , típicamente utilizado en el análisis de estabilidad de flujos de dos fases.

Otro número adimensional que si bien no surge a partir de las ecuaciones es de interés en el modelo es el pseudo- número de cambio de fase, N_{ppch} . Este número se define como

$$N_{ppch} = \frac{N_{psub}}{u_{i0}^*}$$

Nuevamente, la expresión de N_{ppch} es equivalente a la definición del número de cambio de fase, N_{pch} , definido para flujos de dos fases.

Ecuación de estado

El sistema de ecuaciones que describe la dinámica del canal, compuesto por las ecuaciones de conservación 2-4, se completa con la ecuación de estado. Si se considera que la caída de presión en el canal es despreciable frente a la presión absoluta del sistema, resulta posible aproximar a la densidad como una función de la entalpía a la presión de operación ($\rho = \rho_{p_0}(h)$).

Las hipótesis consideradas para cada región del modelo se resumen a continuación

Región I: Se considera que el flujo es incompresible y que la densidad del fluido en toda la región es igual al valor de la densidad en el punto de pseudo-ebullición.

Región II: Se considera que la pseudo- mezcla de dos fases (ambas incompresibles) es homogénea y se encuentra en equilibrio termodinámico. Es decir, se aplica el HEM (Homogeneous Equilibrium Model) para esta región.

Región III: Se considera que el fluido se comporta como un gas ideal a presión constante.

Dadas las hipótesis anteriores, la expresión de la densidad adimensional resulta

$$\rho = 1 \quad \text{para } h \leq 0 \quad (5.1)$$

$$\rho = \frac{1}{1+h} \quad \text{para } 0 < h \leq h_B \quad (5.2)$$

$$\rho = \left((h - h_B) \frac{N_{exp}}{N_{psub}} + \frac{v_B^*}{v_A^*} \right)^{-1} \quad \text{para } h > h_B \quad (5.3)$$

donde $h_B = \frac{v_{AB}^*}{v_A^*}$ es la entalpía de pseudo-saturación del vapor en forma adimensional.

Al considerar que el fluido en la región de pseudo-vapor sobrecalentado se comporta como un gas ideal a presión constante, aparece un nuevo número adimensional que, junto con los anteriores, determinan las condiciones del canal. Este número, denominado “de expansión”, se define como

$$N_{exp} = \frac{h_A^* - h_i^*}{v_A^*} \frac{R^*/M^*}{c_p^* p_0^*}$$

Es importante destacar que si bien se utilizó el modelo de gas ideal en la zona de pseudo-sobrecalentamiento, para efectuar los cálculos correspondientes a un canal con agua supercrítica se ajustó el valor del factor $\frac{R^*/M^*}{c_p^*}$ para que la ecuación de estado en esa zona fuera más representativa del caso real. Dicho valor es levemente superior al que se

obtiene utilizando la constante universal de los gases ($R = 8.31 \frac{J}{kmol}$) y la masa molar del vapor de agua ($M = 18.02 \text{ g/mol}$).

Funciones de transferencia

Las ecuaciones 2-5 pueden ser perturbadas entorno a la solución de estado estacionario, transformadas por Laplace, e integradas a lo largo del canal para obtener las funciones de transferencia del sistema. La estabilidad del canal se evalúa a partir de la función de transferencia correspondiente a la caída de presión total.

Separando los diferentes términos de la ecuación de momento se obtiene

Contribución del término inercial

$$\frac{\delta P_I}{U_i} = s\lambda_0 + s \left[\frac{U_Y}{U_i} I_1(-1) + u_{i0} \frac{J_1(1)}{U_i} \right] + s \left[\frac{U_e}{U_i} I_2(-1) + u_{i0} \frac{J_2(1)}{U_i} \right] \quad (6)$$

Contribución del término de aceleración

$$\frac{\delta P_a}{U_i} = u_{e0}^2 \frac{R_e}{U_i} + 2u_{i0} \frac{U_e}{U_i} - 2u_{i0} \quad (7)$$

Contribución del término de fricciones distribuidas

$$\frac{\delta P_{fr}}{U_i} = \left(\frac{\delta P_{fr}}{U_i} \right)_{r1} + \left(\frac{\delta P_{fr}}{U_i} \right)_{r2} + \left(\frac{\delta P_{fr}}{U_i} \right)_{r3}$$

donde

$$\left(\frac{\delta P_{fr}}{U_i} \right)_{r1} = N_{fr1} 2u_{i0} \lambda_0 \quad (8)$$

$$\left(\frac{\delta P_{fr}}{U_i} \right)_{r2} = N_{fr2} \left[u_{i0}^2 \frac{J_1(2)}{U_i} + 2u_{i0} \frac{U_Y}{U_i} (\gamma_0 - \lambda_0) \right] \quad (9)$$

$$\left(\frac{\delta P_{fr}}{U_i} \right)_{r3} = N_{fr3} \left[u_{i0}^2 \frac{J_2(2)}{U_i} + 2u_{i0} \frac{U_e}{U_i} (1 - \gamma_0) \right] \quad (10)$$

Contribución del término gravitatorio

$$\frac{\delta P_G}{U_i} = \frac{1}{Fr} \left(\frac{J_1(0)}{U_i} + \frac{J_2(0)}{U_i} \right) \quad (11)$$

Contribución del término de pérdidas concentradas

$$\frac{\delta P_k}{U_i} = k_i u_{i0} + \frac{k_e}{2} \left(u_{e0}^2 \frac{R_e}{U_i} + 2u_{i0} \frac{U_e}{U_i} \right) \quad (12)$$

Donde se han definido las siguientes funciones de transferencia

$$\text{Frontera de pseudo-ebullición: } \frac{\Lambda}{U_i} = \frac{1 - \exp(-s)}{s} \quad (13)$$

$$\text{Velocidad en la frontera de pseudo-secado: } \frac{U_Y}{U_i} = 1 - N_{psub} \frac{\Lambda}{U_i} \quad (14)$$

$$\text{Frontera de pseudo-secado: } \frac{\Gamma}{U_i} = \left[\frac{\Lambda}{U_i} - \frac{U_\gamma}{U_i} \frac{1}{s - N_{psub}} \right] \left(\frac{u_{\gamma 0}}{u_{i0}} \right)^{1 - \frac{s}{N_{psub}}} + \frac{U_\gamma}{U_i} \frac{1}{s - N_{psub}} \quad (15)$$

$$\text{Velocidad a la salida del canal: } \frac{U_e}{U_i} = \frac{U_\gamma}{U_i} + (N_{psub} - N_{exp}) \frac{\Gamma}{U_i} \quad (16)$$

$$\text{Densidad de salida: } \frac{R_e}{U_i} = \frac{u_{i0} N_{exp}}{u_{e0}^2} \left\{ \left(\frac{\Gamma}{U_i} - \frac{U_e}{U_i} \frac{1}{(s - N_{exp})} \right) \left(\frac{u_{e0}}{u_{\gamma 0}} \right)^{1 - \frac{s}{N_{exp}}} + \frac{U_e}{U_i} \frac{1}{(s - N_{exp})} \right\} \quad (17)$$

Asimismo, las funciones auxiliares $I(x)$ y $J(x)$ se definen como

$$I_1(x) \triangleq \int_0^\lambda \left(\frac{u_0(z)}{u_{i0}} \right)^x dz \quad J_1(x) \triangleq \int_0^\lambda \left(\frac{u_0(z)}{u_{i0}} \right)^x R(s, z) dz$$

$$I_2(x) \triangleq \int_\lambda^\gamma \left(\frac{u_0(z)}{u_{i0}} \right)^x dz \quad J_2(x) \triangleq \int_\lambda^\gamma \left(\frac{u_0(z)}{u_{i0}} \right)^x R(s, z) dz$$

La función de transferencia del sistema viene dada por la suma de todas las contribuciones

$$\frac{\delta P}{U_i} = \frac{\delta P_I + \delta P_a + \delta P_{fr} + \delta P_G + \delta P_k}{U_i}$$

Las raíces de esta ecuación determinan la condición de estabilidad del sistema para un dado punto de operación definido por un par de números $N_{psub} - N_{ppch}$. Una raíz de esta ecuación con parte real mayor a cero indica que las perturbaciones sobre el sistema crecen de manera exponencial en el tiempo generando inestabilidades. Por el contrario, si la parte real es menor a cero, las perturbaciones decrecen y el sistema permanece en su condición original. La situación límite entre las dos anteriores –cuando la parte real es igual a cero– determina la frontera de estabilidad del sistema. Para hallar las raíces se ha utilizado una función basada en el método de resolución iterativo de Newton-Raphson.

Resultados

En la Figura 2 se muestra el mapa de estabilidad para un canal uniformemente calefaccionado, sujeto a una caída de presión constante, por el que circula agua a presión supercrítica (25 MPa). Las características del canal se definieron en base a los parámetros de diseño del SCWR (Tabla 1).

Se observan dos secciones en la FE (frontera de estabilidad) de la Figura 2. Se denominó FE dinámica a la sección de la curva que se extiende desde el punto A al punto B. El fenómeno de inestabilidad por DWO es el efecto que domina el comportamiento del sistema en esta región. Este mecanismo de inestabilidad pertenece a la categoría de inestabilidades dinámicas, de aquí surge el nombre de FE dinámica para denominar a esta sección.

Por otra parte, se denominó FE estática a la sección de la curva que se extiende desde el punto B, en la dirección de N_{psub} creciente. En esta región, domina el mecanismo de inestabilidad excursiva de Ledinegg (inestabilidad estática). Este resultado se hace evidente si se analiza la Figura 3. En esta figura se observa el cociente

entre el tiempo de tránsito del fluido en el canal, T_{trans} , y el tiempo característico de las oscilaciones, T_{osc} . Se observa que a lo largo de la FE estática, el tiempo característico de las oscilaciones es infinito. Lo que equivale a decir que la frecuencia característica de las oscilaciones es cero, i.e. el comportamiento del sistema es excursivo, como se mencionó anteriormente.

En el modelo desarrollado, se consideraron las pérdidas de carga debidas a efectos inerciales, de aceleración, de fricción y gravitatorios. Para determinar cómo afectan a la estabilidad del sistema cada uno de estos términos, en la figura 4 se muestra un análisis de sensibilidad. En este análisis se modifica el peso de las funciones de transferencia asociadas a cada efecto y se observa cómo cambia la condición de estabilidad del sistema, evaluada en términos del DR (Decay Ratio). El DR se define como

$$DR = e^{\frac{2\pi\sigma}{|\omega|}},$$

donde $s = \sigma + i\omega$ es el polo menos estable (con mayor parte real). La condición de estabilidad del sistema, en cada punto del plano $N_{psub} - N_{ppch}$, queda entonces determinada por este polo. Sobre la FE la parte real de dicho polo se anula. Por este motivo, en los puntos de operación que se encuentran a lo largo de la FE el DR es igual a uno. No obstante, ante una variación en el peso correspondiente a alguna de las funciones de transferencia, el valor del DR en los mismos puntos de operación se modifica, pudiendo ser igual, menor o mayor que uno. Si el DR resulta igual a uno significa que la condición de estabilidad no se modificó. Si en cambio el DR resulta menor a uno, quiere decir que el cambio realizado en la función de transferencia tiene un efecto estabilizador, mientras que un DR mayor a uno indica lo contrario.

En la figura 4 se muestra cómo evoluciona la estabilidad del sistema ante un incremento del 5% en el peso de las funciones de transferencia individuales. Se graficó la variación relativa porcentual del DR correspondiente al polo menos estable para los puntos de operación sobre la FE de la Figura 2, recorrida desde el punto A al punto B'.

Se observa que los términos que tienen mayor influencia en la estabilidad del sistema son los correspondientes a la aceleración y las fricciones distribuidas, tanto en la región de pseudo-subenfriamiento (región 1), como en la de pseudo-sobrecalentamiento (región 3). Aunque los efectos de estos dos últimos términos son opuestos. Las fricciones en la región 3 desestabilizan al sistema, mientras que las fricciones en la región 1 lo estabilizan. Esto se debe a que el desfase que sufren las perturbaciones al propagarse por el canal es máximo en la región 3, mientras que en la región 1 es despreciable. No se observa una influencia significativa de los términos gravitatorio e inercial, así como tampoco del término correspondiente a las fricciones distribuidas en la región de pseudo-ebullición (región 2).

Un aspecto relevante de la Figura 4 es el aumento considerable de la sensibilidad del término de fricción en la región 3 a medida que crece el valor de N_{psub} . Esta característica se puede explicar a partir de las curvas de iso-título. Para un sistema supercrítico, el título se define de manera equivalente al caso subcrítico, i. e. $x = \frac{h-h_A}{h_{AB}}$.

Sea $x_e = \frac{h_e-h_A}{h_{AB}}$, el título con el que el fluido sale del canal. Las curvas de iso-título se definen como el conjunto de puntos con igual valor de x_e . En el plano $N_{psub} - N_{ppch}$, estas curvas son rectas paralelas. En particular, en la Figura 2 se muestran las curvas de iso-título correspondientes a $x_e = 0$ y $x_e = 1$. Es posible notar que al recorrer la FE desde el punto A' hasta el punto B', el valor de x_e en cada punto aumenta. Al mismo

tiempo, crecen las fricciones en la zona de pseudo-vapor sobrecalentado (región 3), haciendo que este término se vuelva más importante a medida que nos alejamos del punto A' (moviéndonos en dirección al punto B'). Este es precisamente el comportamiento que presenta la curva de sensibilidad correspondiente al término de fricción en la región 3.

En las figuras 5 y 6 se muestran los mapas de estabilidad para un canal en ebullición. Ambos mapas se obtuvieron con un modelo similar al desarrollado en este trabajo. El mapa de la Figura 5 corresponde al caso en el que el fluido sale del canal como una mezcla de fases (no existe una región de sobrecalentamiento), mientras que el mapa de la Figura 6 fue obtenido para el caso en el que el fluido alcanza la condición de sobrecalentamiento. Es importante notar que la FE obtenida para el canal supercrítico sigue la misma tendencia que las fronteras de estabilidad obtenidas típicamente para un canal en ebullición, i.e. en ambos casos existe una zona dominada por inestabilidades por DWO y otra zona dominada por inestabilidades de Ledinegg.

En las figuras 7 y 8 se observa el efecto que tienen las fricciones concentradas a la entrada y a la salida del canal, respectivamente. Se observa que el aumento de la pérdida de carga a la entrada del canal tiene un efecto estabilizador. Esto se debe a que estas fricciones localizadas se encuentran en fase con las perturbaciones en el flujo a la entrada del canal. Por el contrario, las pérdidas concentradas a la salida del canal se encuentran desfasadas con respecto a las perturbaciones en el flujo a la entrada del mismo. Por este motivo es de esperar que el aumento de la pérdida de carga localizada a la salida del canal tenga un efecto desestabilizador. Este comportamiento es precisamente el que se observa en la Figura 8. El punto de operación de las figuras 7 y 8 es el punto correspondiente al de un canal típico en el núcleo del SCWR

Conclusiones

Se desarrolló un modelo simplificado para el estudio de la estabilidad termohidráulica de un canal uniformemente calefaccionado y refrigerado por un fluido supercrítico. Dicho modelo se utilizó para analizar la estabilidad de un canal sujeto a condiciones similares a las encontradas en el núcleo del SCWR. En los mapas de estabilidad obtenidos para este sistema, se observan dos secciones en la FE (Frontera de Estabilidad). Una sección, denominada FE dinámica, en la que el fenómeno de inestabilidad por DWO es el efecto que domina el comportamiento del sistema; y otra sección, denominada FE estática, en la que domina el mecanismo de inestabilidad excursiva de Ledinegg. Asimismo, un análisis de sensibilidad muestra que el efecto de las fricciones en la zona de pseudo-vapor sobrecalentado, junto al efecto de la aceleración, son las contribuciones que más desestabilizan al sistema. Mientras que las fricciones en la zona de pseudo-liquido subenfriado constituyen el efecto estabilizador más importante. Se observó además que la FE obtenida para el caso supercrítico sigue la misma tendencia que la FE obtenida con un modelo similar, pero aplicado a un sistema subcrítico. Asimismo, se observó el efecto que tiene la pérdida de carga localizada a la entrada y a la salida del canal. Mientras que las fricciones concentradas a la entrada constituyen un efecto estabilizador, las fricciones concentradas a la salida resultan desestabilizadoras.

Nomenclatura

Letras

A_{xs} : Área transversal de pasaje

D_h : Diámetro hidráulico

c_p : Calor específico a presión constante

f : Coeficiente de fricción de Darcy

Fr : Número de Froude

g : Aceleración de la gravedad

h : Entalpía

H : Transformada de Laplace de la perturbación de la entalpía

k : Coeficiente de fricción localizada

L : Longitud del canal

M : Masa molar

N_{exp} : Número de expansión

N_{pch} : Número de cambio de fase

N_{ppch} : Pseudo-número de cambio de fase

N_{psub} : Pseudo-número de subenfriamiento

N_{sub} : Número de subenfriamiento

p : Presión

P : Transformada de Laplace de la perturbación de la presión

Q : Potencia

R : Constante universal de los gases

R : Transformada de Laplace de la perturbación de la densidad

Re : Número de Reynolds

s : Variable de Laplace

t : Tiempo

T : Temperatura

u : Velocidad

U : Transformada de Laplace de la perturbación de la velocidad

v : Volumen específico

z : Variable espacial

Letras griegas

Γ : Transformada de Laplace de la perturbación de la posición de la frontera de secado

Λ : Transformada de Laplace de la perturbación de la posición de la frontera de ebullición

Λ : Coeficiente de fricción adimensional

γ : Posición de la frontera de secado

λ : Posición de la frontera de ebullición

ν : Tiempo de tránsito de una partícula fluida en la zona de pseudo-subenfriamiento

ω : Parte imaginaria

ρ : Densidad

σ : Parte real

Subíndices

0: Estado estacionario

A: Valor de la propiedad del pseudo líquido en saturación

AB: Diferencia entre los valores de pseudo saturación del líquido y el vapor

B: Valor de la propiedad del pseudo vapor en saturación

e: Salida del canal

i: Entrada del canal

fr: Fricción

r1: Región 1

r2: Región 2

r3: Región 3

γ : Valor en la frontera de pseudo-secado

Superíndices

*: Variable dimensional

Referencias

- [1] Ambrosini, W. On the analogies in the dynamic behaviour of heated channels with boiling and supercritical fluids. *Nuclear Engineering and Design*, 237: 1164-1174, 2007.
- [2] Zhao, J., Saha, P., Kazimi, M.S. Stability of supercritical water cooled reactor during steady state and sliding pressure start up. En: *International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics* (11,2005, Avignon, Francia).
- [3] Jain, R. *Thermal-hydraulic Instabilities in Natural Circulation Flow Loop Under Supercritical Conditions*. Ph. D. Degree in Nuclear Engineering, University of Wisconsin, Madison, USA, 2005.
- [4] Jain, P. K. *Numerical analysis of supercritical flow instabilities in a natural circulation loop*. B.Tech., Indian Institute of Technology Bombay, 2004.
- [5] Oka, Y., Koshizuka, S., Ishiwatari, Y., Yamaji, A. Overview of Design Studies of High Temperature Reactor Cooled by Supercritical Light Water at the University of Tokyo. En: *GENES* (4, 2003, Kyoto, Japón).
- [6] Jain, R., Corradini, M. L. A linear stability analysis for natural circulation loops under supercritical conditions. *Nuclear Technology*, 155: 312-323, 2006.
- [7] Ortega Gómez, T., Class, A., Lahey, R.T. Jr., Schulenberg, T. Stability analysis of a uniformly heated channel with supercritical water. En: *International Conference on Nuclear Engineering* (14, Miami, Florida, USA).

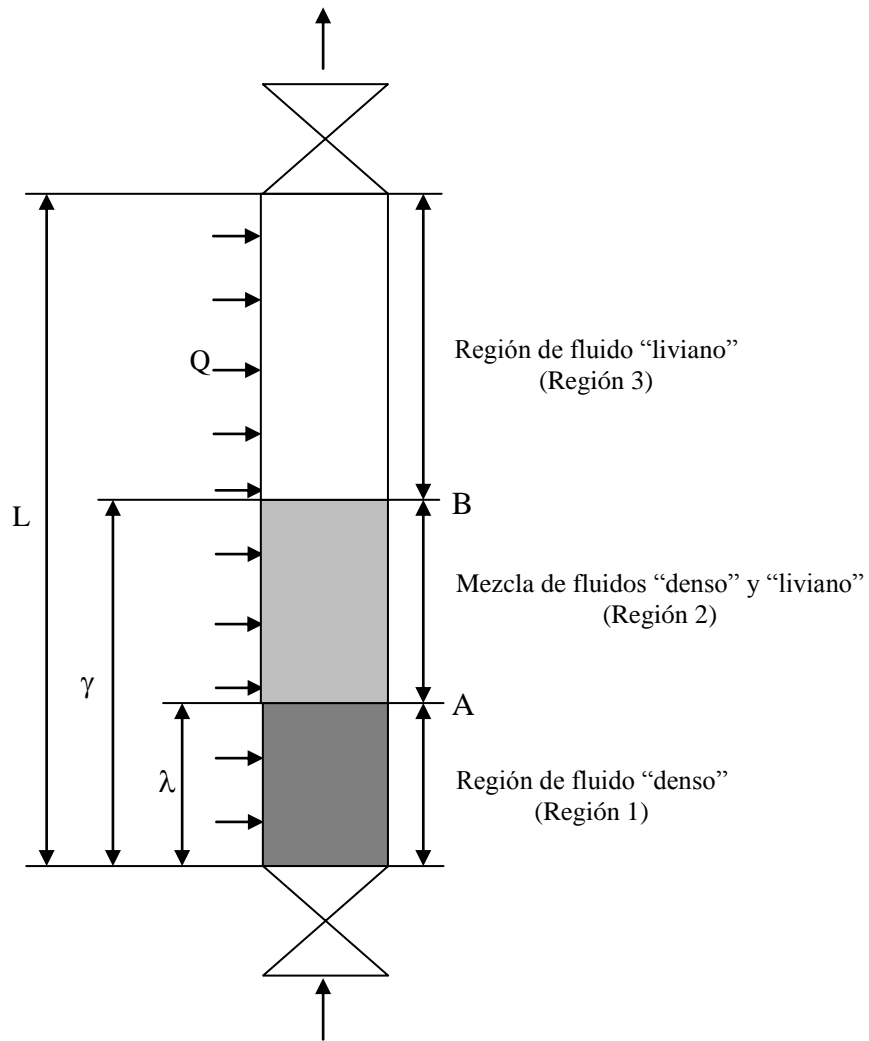


Figura 1. Modelo de tres regiones para un canal en condiciones supercríticas

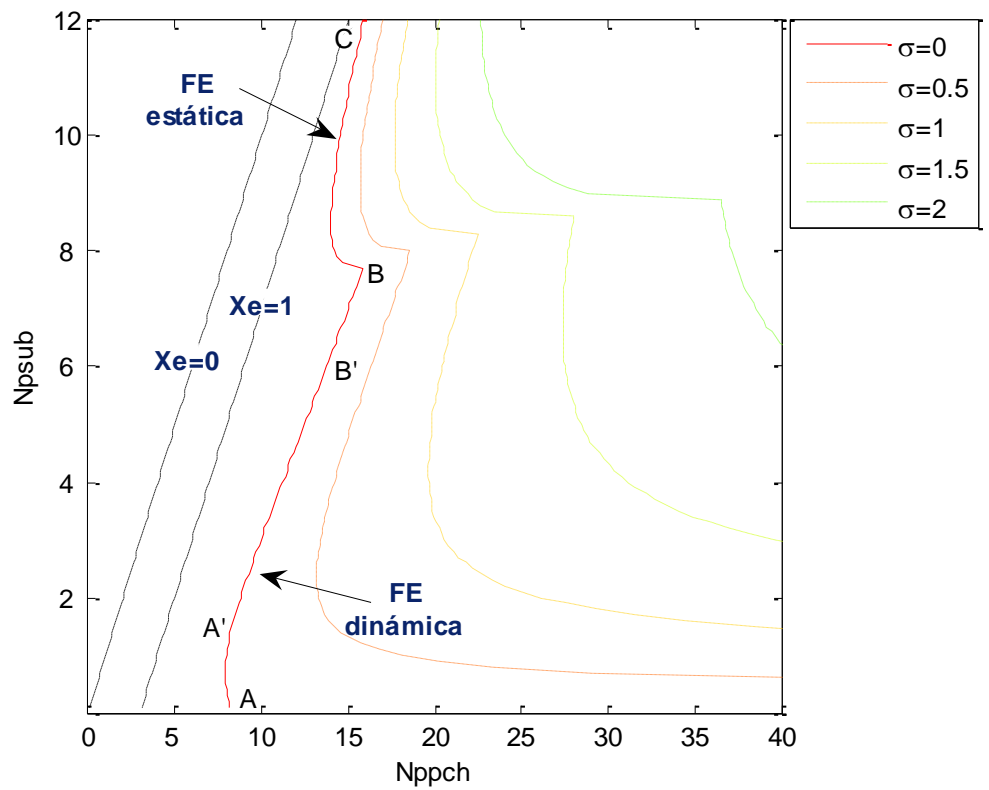


Figura 2. Mapa de estabilidad de un canal en el núcleo del SCWR correspondiente al caso con $k_i=20$ y $k_e=0$.

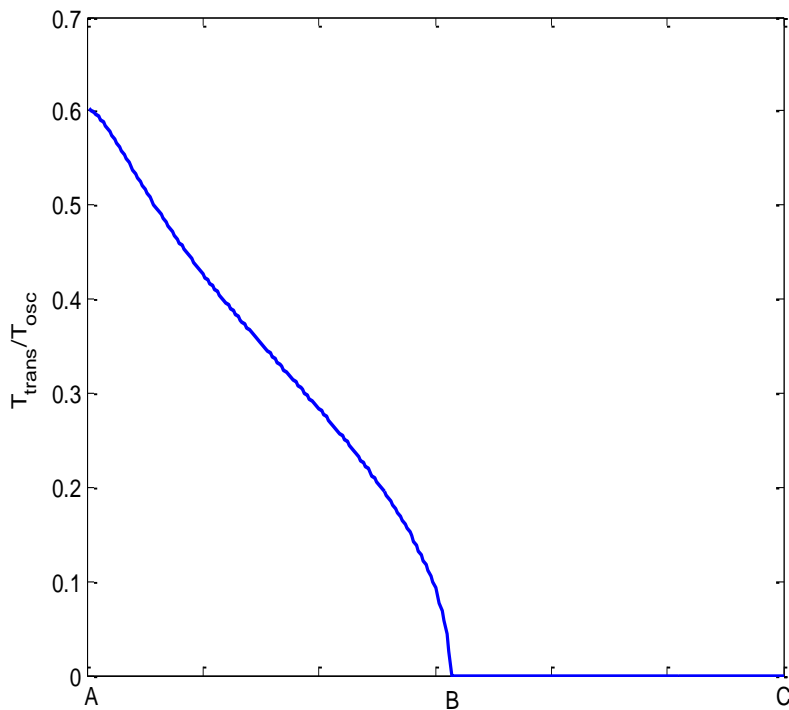


Figura 3. Cociente entre el tiempo de transito en el canal y el tiempo característico de las oscilaciones, calculado para los puntos sobre la FE de la Figura 2.

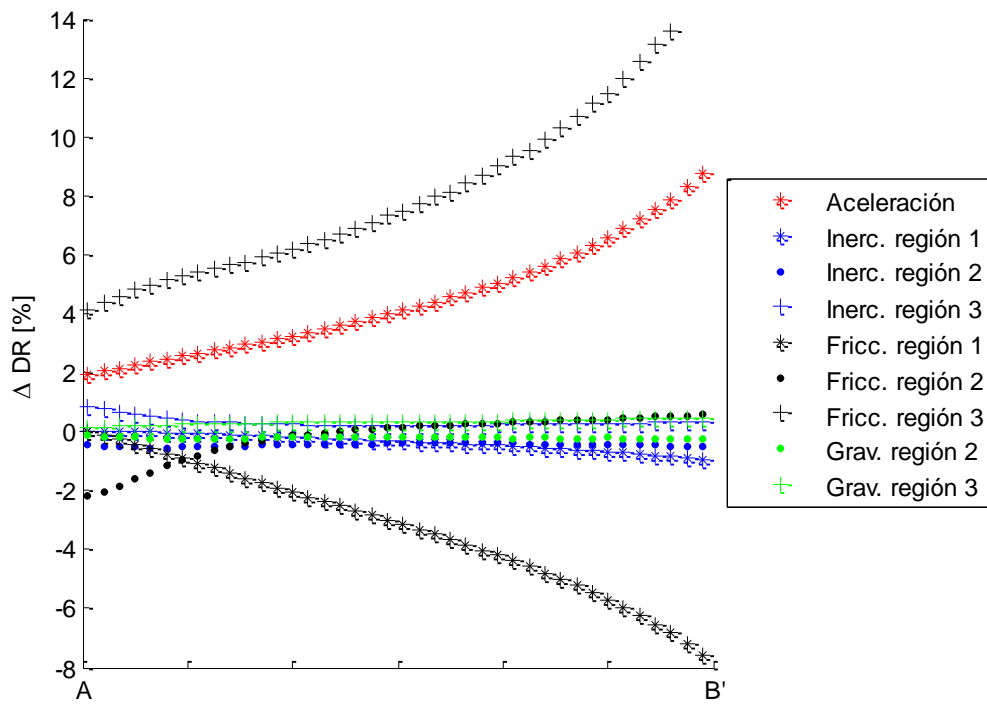


Figura 4. Variación relativa del DR para un incremento del 5% en las funciones de transferencia individuales a lo largo de la FE de la Figura 2.

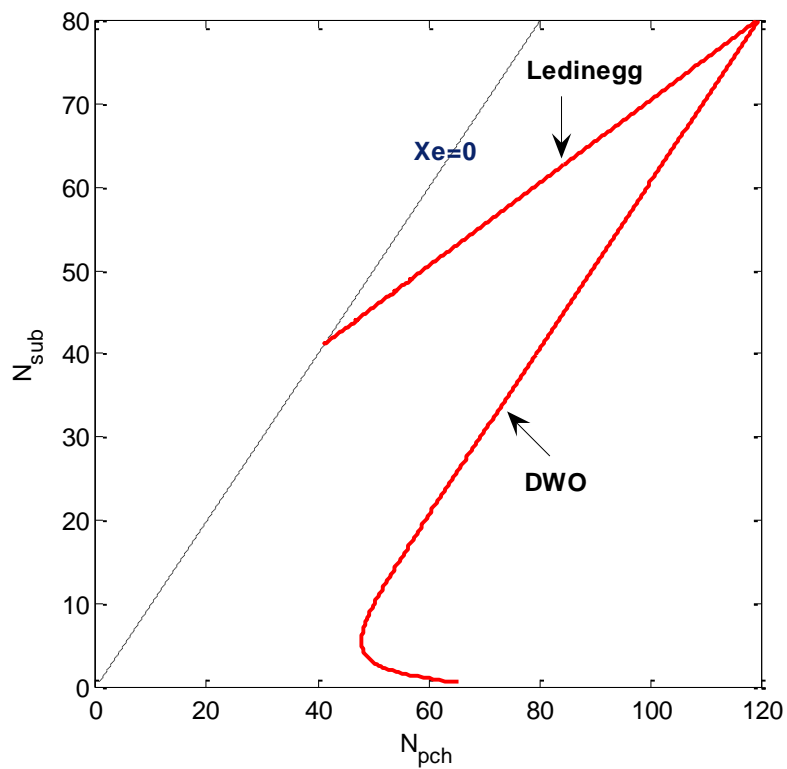


Figura 5. Mapa de estabilidad típico para un canal en ebullición.

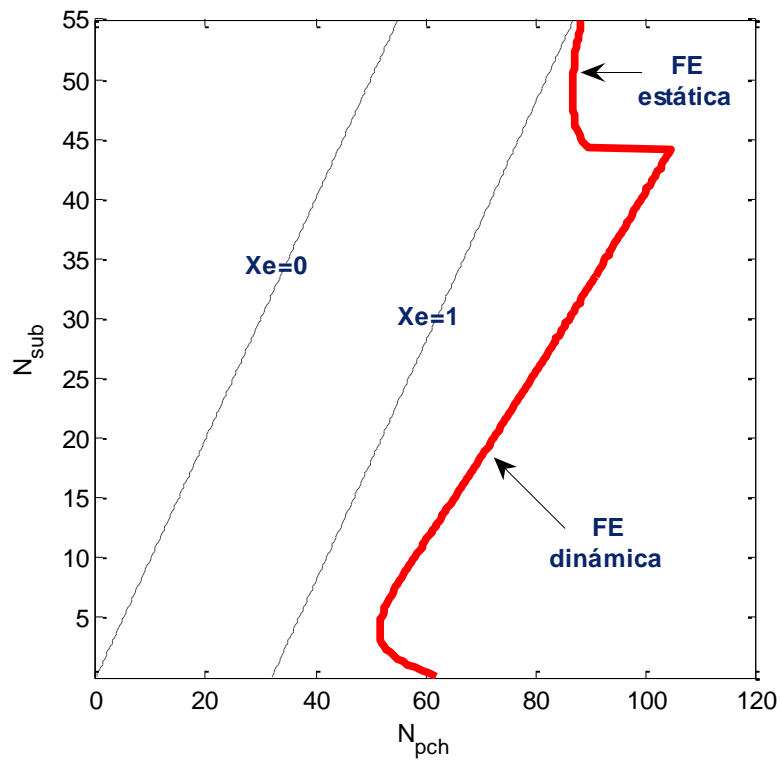


Figura 6. Mapa de estabilidad típico para un canal en ebullición y con sobrecalentamiento.

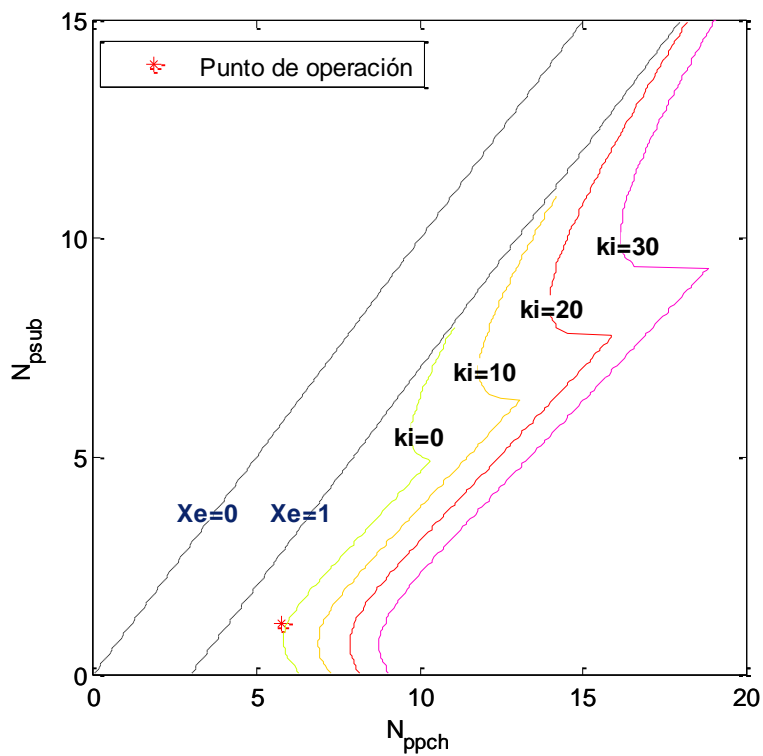


Figura 7. Mapa de estabilidad de un canal en el núcleo del SCWR para distintos valores de k_i (con $k_e=0$).

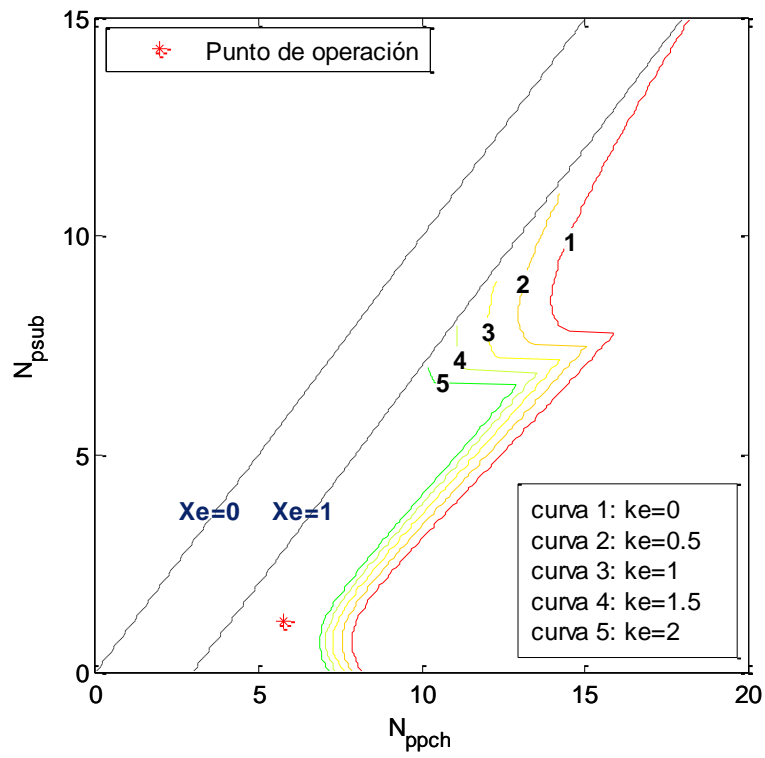


Figura 8. Mapa de estabilidad de un canal en el núcleo del SCWR para distintos valores de k_e (con $k_i=20$).

Potencia térmica	3575 MWt
Presión de operación	25 MPa
Caudal de refrigerante	1843 kg/s
Temperatura de entrada/salida	280°C/500°C
Núcleo	
Número de elementos combustibles	145
Factor de pico Axial/Radial/Local/Total	1.4/1.3/1.1/2
Densidad de potencia promedio	69.4 kW/L
Potencia lineal promedio	19.2 kW/m
Caída de presión en el núcleo	0.15 MPa
Elemento combustible	
Número de barras combustibles	300
Número de barras de agua por elemento combustible	36
Dimensión de las barras de agua (sección cuadrada)	33.6 mm
Dimensión del elemento combustible (sección cuadrada)	280 mm
Diámetro hidráulico del elemento combustible	3.4 mm
Barra combustible	
Diámetro	10.2 mm
Pitch	11.2 mm
Longitud calefaccionada	4.27 m

Tabla 1. Parámetros del diseño conceptual del SCWR (Zhao *et al.*, (2005)).