



MX0500251

XVI Congreso Anual de la SNM y XXIII Reunión Anual de la SMSR
XVI SNM Annual Meeting and XXIII SMSR Annual Meeting
Oaxaca, Oaxaca, México, Julio 10-13, 2005 / Oaxaca, Oaxaca, México, July 10-13, 2005

Estudio Paramétrico de las Propiedades de Estabilidad de un Canal Termohidráulico Acoplado a Cinética Puntual

Miguel Ceceñas F. ; Rina M. Campos G.

Instituto de Investigaciones Eléctricas

Reforma 113 Col. Palmira

Temixco, Mor.

mcf@iie.org.mx; rmcampos@iie.org.mx

Resumen

La razón de decaimiento es el indicador de estabilidad usualmente empleado en la literatura para evaluar estabilidad de reactores de agua en ebullición, sin embargo, en la operación de este tipo de reactores se considera la longitud de ebullición como un parámetro auxiliar para la evaluación de estabilidad. En este trabajo se estudia la variación de estos dos indicadores al modificar un parámetro dado de operación en un modelo de un canal termohidráulico acoplado a cinética puntual, manteniendo todas las demás variables de entrada constantes. Los parámetros seleccionados para estudio son el perfil axial de potencia, el subenfriamiento, el caudal de refrigerante y la potencia térmica. El estudio se complementa mediante datos reales de planta empleando el Benchmark de Ringhals, y los resultados para el caso de la razón de decaimiento se comparan con las razones de decaimiento obtenidas mediante modelos de autoregresión de la instrumentación local de flujo neutrónico.

1. INTRODUCCIÓN

En trabajos previos se ha estudiado el comportamiento dinámico de un canal termohidráulico acoplado a cinética puntual, modal, o unidimensional. En el modelo del canal se consideran como entradas la potencia, el caudal, la entalpía de entrada, y el perfil axial, entre otras variables. En este trabajo se plantea un estudio parametrizado que permita determinar el comportamiento de la razón de decaimiento al variar una a una las variables listadas manteniendo constantes todas las demás variables de entrada del sistema.

A pesar de ciertas precauciones manifestadas por algunos autores [1], la razón de decaimiento (DR) es indudablemente el parámetro más útil para evaluar estabilidad. Si se toma en consideración que un reactor es un sistema no-lineal, y que el DR es una medida de monitoreo más que una medida predictiva, estamos en condiciones de estudiar al DR como parámetro para evaluar estabilidad bajo una gama de diferentes condiciones. Existen alternativas al DR, como el cálculo de la función de transferencia para de allí obtener el margen de ganancia, el margen de fase, o el vector β en el plano logarítmico fase-ganancia definido por Smith [2,3]. En este trabajo también se explora la longitud de ebullición (LE) como posible parámetro auxiliar a la evaluación de estabilidad.

2. MODELO DEL CANAL

Para el cálculo de la razón de decaimiento (DR) y de la longitud de ebullición, se emplea un modelo que considera tres secciones a lo largo de un canal: una fase, ebullición subenfriada y ebullición de bulto, acopladas a un modelo de cinética puntual [4]. EL DR se calcula como la respuesta a un pulso de reactividad externa de 0.1\$ con duración de 0.5 segundos, considerando el promedio de la relación de amplitudes pico a pico en la respuesta dinámica.

La longitud de ebullición, Z_{bb} , se define como la posición que corresponde a la longitud en la cual la temperatura de bulto alcanza la temperatura de saturación, y se calcula mediante un balance:

$$P_h \int_0^{Z_{bb}} q''(z) dz = GA(h_f - h_{in}) \quad (1)$$

donde P_h es el perímetro calentado, q'' es la fuente de calor por unidad de área, G es el flujo másico, A es el área de flujo, h_f es la entalpía de líquido saturado y h_{in} es la entalpía de entrada al canal. Se observa que la longitud de ebullición depende principalmente del área bajo la curva del perfil axial.

Intuitivamente, la longitud de ebullición proporciona un indicativo de la simetría axial del perfil, o en otras palabras, en qué parte se localiza el valor pico del perfil: en la parte inferior del núcleo o en la parte superior. Si el área bajo la curva del perfil se concentra en la parte inferior del núcleo, entonces ésta parte recibe mayor calor y tiende a presentar una longitud de ebullición menor. Es conocido que cuando el área del perfil se concentra marcadamente en la parte inferior con un factor pico alto, se tiene un sistema menos estable, y también se sabe por prácticas de operación que una longitud de ebullición menor a 1.2 m (4 ft) se puede considerar como un posible indicador de un sistema menos estable. Sin embargo, no existe identificada una relación clara entre la longitud de ebullición y el grado de estabilidad de un reactor.

3. RESULTADOS

Se configura un canal base para representar el caso 8 del ciclo 14 de Ringhals [5]. Este caso es seleccionado porque se tiene información detallada en el Benchmark, y presenta un DR relativamente alto que resulta de interés. La Tabla I contiene la información operativa del caso base de estudio.

El canal tiene una razón de decaimiento es de 0.74 con una frecuencia de resonancia de 0.51 Hz. Una vez obtenido este canal base, se toma como punto de partida para posteriormente reemplazar el perfil axial, variar la entalpía de entrada, modificar la potencia y finalmente modificar el caudal de refrigerante.

Tabla I. Cantidades empleadas en el modelo del canal

Variable	Valor	Unidades
Potencia térmica	1,744.77	MW _{th}
Caudal	3,884.0	Kg/s
Entalpía de entrada	1.2091×10 ⁶	J/kg
Longitud activa del núcleo	3.68	m
Area de flujo	6.3990	m ²
Diámetro de la varilla	6.125×10 ⁻³	m
Diámetro de la pastilla	5.220×10 ⁻³	m
Cantidad de uranio	185,844.33	kg
Densidad de la pastilla	95	% de teórica
Número de espaciadores	6	--
Numero de ensambles	648	--
Varillas por ensamble	64	--

3.1. Efecto del perfil axial de potencia

En este caso de estudio se varía el perfil axial de potencia para analizar el efecto de concentrar el área bajo el perfil en la parte inferior, en la parte central, o en la superior o del núcleo. El perfil para un núcleo de altura H se puede representar mediante el producto de una función senoidal por una exponencial, controlado ésta última por un parámetro c :

$$q = fe^{cz} \operatorname{sen}\left(\frac{\pi z}{H}\right) \quad (1)$$

Cuando c es cero, se cancela la contribución exponencial y se tiene un coseno, es decir, un perfil simétrico con un área centrada en la mitad del núcleo. Al variar el parámetro c , el área bajo la curva se desplaza hacia la mitad inferior o la superior del núcleo. La Figura 1 ilustra la ecuación (1) mediante un grupo de curvas para diferentes valores del parámetro c , normalizadas todas ellas a un área unitaria bajo la curva.

El perfil del canal base se reemplaza con el perfil axial de la ecuación (1), y se observa el efecto producido.

La Figura 2 muestra la variación en el DR al emplear una serie de perfiles definidos por un parámetro c que varía de -1.0 a 1.0. Como resultado, se tiene que el DR mínimo se obtiene con un perfil moderadamente picado hacia la parte inferior del núcleo, con un valor de -0.6 para el parámetro c (Figura 1). La Figura 3 muestra el efecto sobre la frecuencia de resonancia.

La longitud de ebullición (ED) se relaciona directamente a la transferencia de calor de las varillas de combustible hacia el refrigerante. La Figura 4 muestra que la longitud de ebullición crece

conforme se desplaza axialmente el valor pico desde la parte inferior del núcleo ($c=-1$) hasta la parte superior ($c=1$).

La tendencia con alti-bajo para el DR en la Figura 2 no ocurre con la gráfica de la longitud de ebullición de la Figura 4, que muestra un comportamiento muy suave de la LE con el perfil. En este caso la Figura 4 no refleja una variación en la razón de decaimiento que se sabe existe.

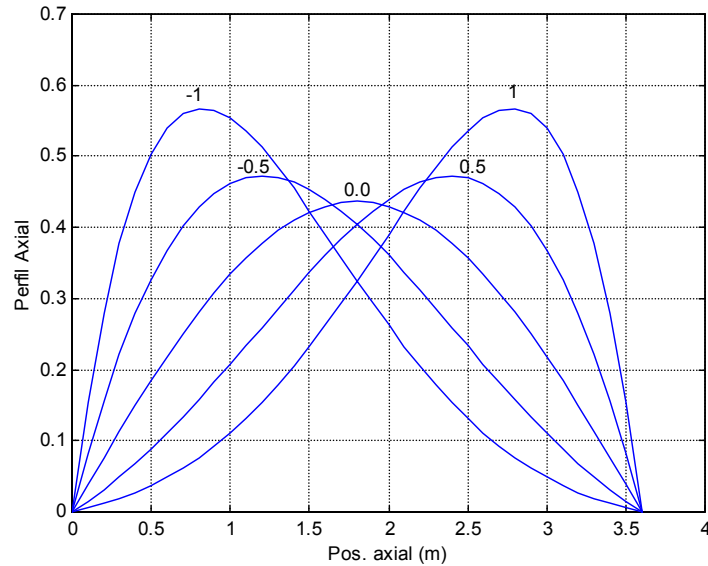


Figura 1. Perfil axial de potencia parametrizado

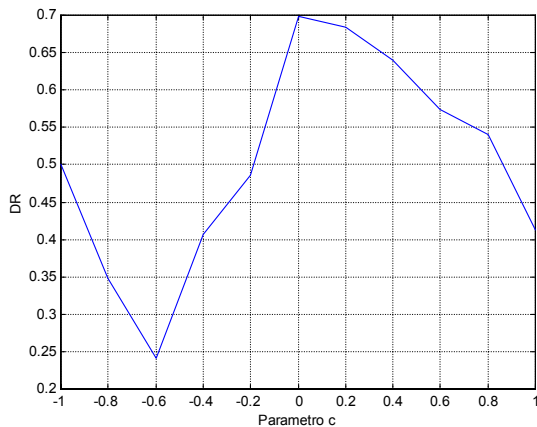


Figura 2. Efecto del parámetro c en el DR

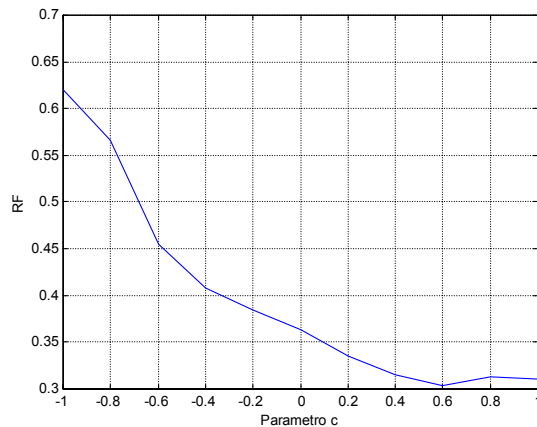


Figura 3. Efecto del parámetro c en la FR

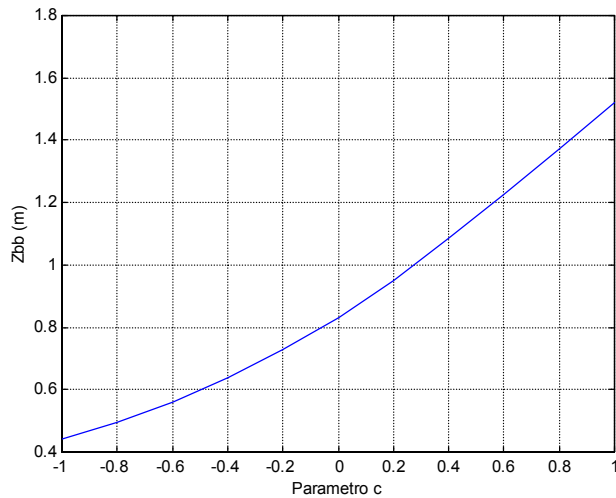


Figura 4. Efecto del parámetro c en la longitud de ebullición

3.2. Efecto de la entalpía de entrada

Algunos eventos de inestabilidad ocurridos en plantas se han debido a la pérdida de calentadores [6]. Al ocurrir una pérdida de calentadores, se alimenta agua relativamente más fría al núcleo del reactor, causando un incremento de reactividad por colapsamiento de vacíos en el refrigerante. Para estudiar este efecto se modifica la entalpía de entrada al canal y se observa el impacto sobre la razón de decaimiento y la longitud de ebullición.

La Figura 5 muestra que el incremento de entalpía produce un efecto estabilizante, o en otro enfoque, la reducción en la entalpía produce un efecto desestabilizante. El cambio de entalpía lleva a una variación en la frecuencia de resonancia del sistema, como se muestra en la Figura 6.

El incremento de entalpía produce un efecto lineal de reducción en la longitud de ebullición, como se muestra en la Figura 7.

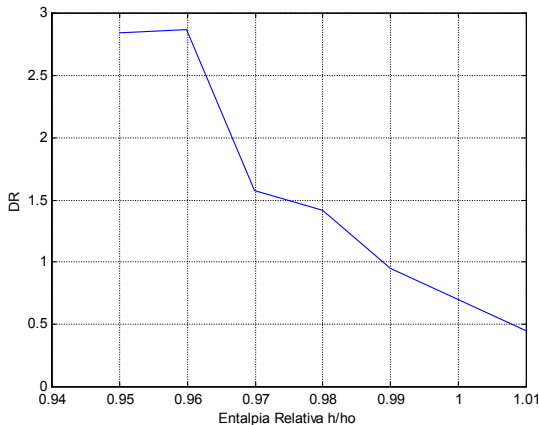


Figura 5. Variación del DR con la entalpía

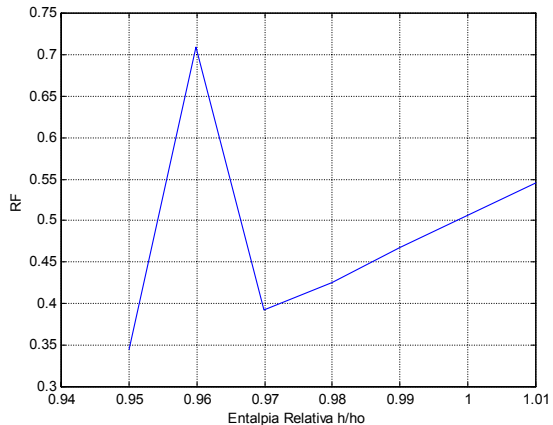


Figura 6. Variación de la RF con la entalpía

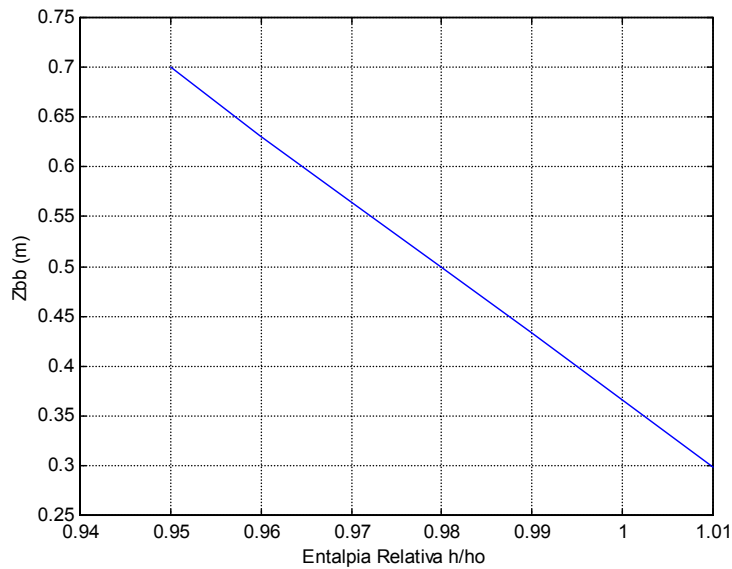


Figura 7. Variación de la longitud de ebullición con la entalpía de entrada

3.3. Efecto de la potencia térmica

Es conocido que los reactores BWR son perfectamente estables a potencia nominal, y el espectro de densidad presenta una especie de abultamiento en frecuencias cercanas a 0.9 Hz. Conforme se opera más cerca de la zona de exclusión en el mapa caudal-potencia, el abultamiento se va definiendo en una resonancia bien marcada, y la frecuencia se desplaza hacia un valor típico comprendido entre 0.4 y 0.5 Hz. Con el fin de estudiar más detalladamente el comportamiento de la razón de decaimiento, se realizaron una serie de corridas del canal con valores de potencia comprendidos entre 20 y 90 % del valor nominal. La Figura 8 muestra claramente una tendencia del DR a incrementarse conforme la potencia baja.

La Figura 9 muestra un comportamiento muy lineal de la frecuencia de resonancia con respecto a la potencia.

La Figura 10 muestra que la LE presenta un comportamiento inversamente proporcional a la potencia, donde mayor potencia conduce a una menor longitud de ebullición.

En este caso se tiene que al variar la potencia, mayores razones de decaimiento significan mayores distancias de ebullición, confirmando en este caso a la LE como indicador de estabilidad.

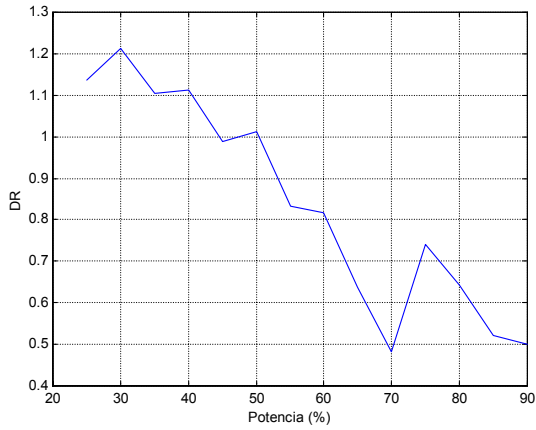


Figura 8. Variación del DR con potencia

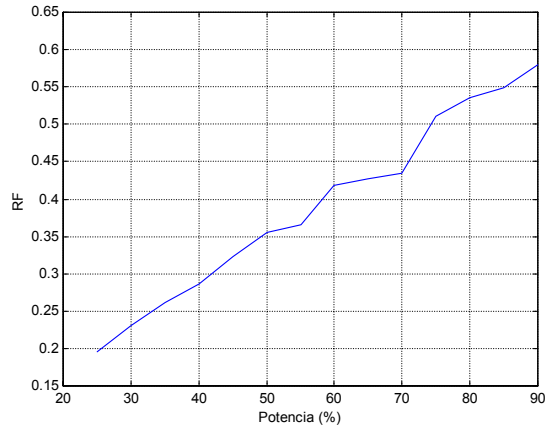


Figura 9. Variación de la FR con potencia

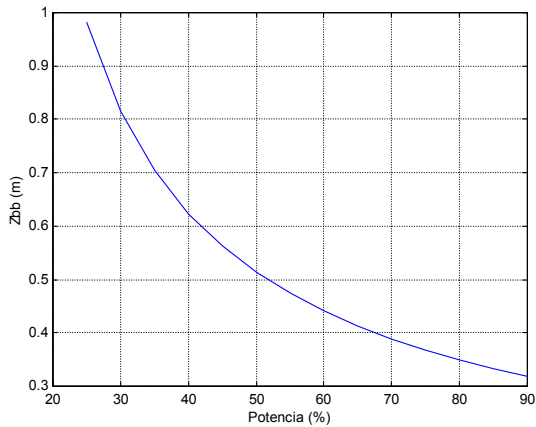


Figura 10. LE contra potencia

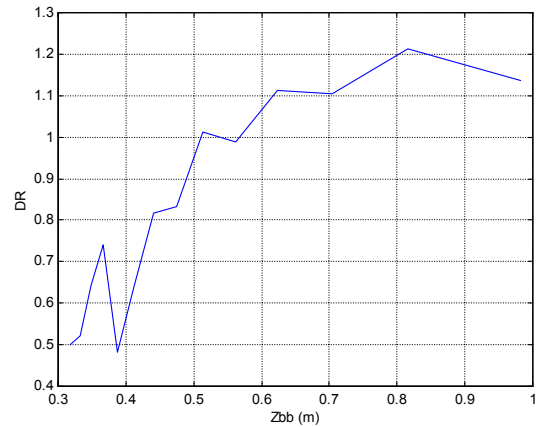


Figura 11. Relación Zbb con el DR

3.4. Efecto del caudal

Por experiencia operativa, la reducción del caudal a circulación natural puede conducir a inestabilidad. La Figura 11 muestra que se tienen valores altos en el DR para caudales menores al 35% en relación a los valores para caudales mayores a 35%. Para este caso particular de potencia no se obtiene un caudal que conduzca a un DR mayor a 0.74.

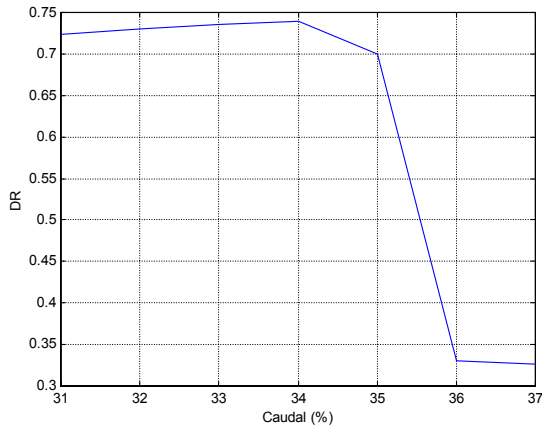


Figura 12. Efecto del caudal en el DR

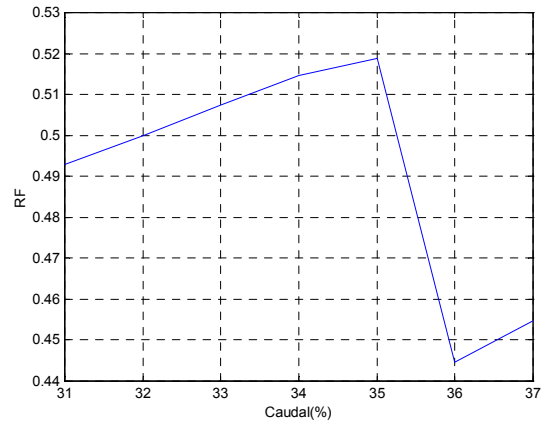


Figura 13. Efecto del caudal en la RF

3.5. Identificación de la frontera de estabilidad

El hecho de que la Figura 12 no muestre un valor de caudal que alcance la frontera de estabilidad para la potencia del caso base de 75.1%, permite plantear un conjunto de corridas del modelo del canal en las cuales se define una serie de caudales, y para cada uno de ellos se varía la potencia de manera que se alcance un DR unitario. Con caudales mayores al 41% no es posible inestabilizar al sistema, y siendo posible alcanzar DR unitario para caudales tan pequeños como 5%, caudal que en la práctica solamente es posible para potencias muy bajas. La Figura 14 muestra la curva que representa la frontera de estabilidad en la cual el DR es unitario.

Para aumentar la claridad de la Figura 13, se agregó un mapa caudal-potencia genérico en el cual se muestran las zonas restringidas definidas en el suplemento 1 del boletín 88-07 de la NRC [7]. Se observa que la zona C es perfectamente estable, así como la zona A, la cual en su punto de menor potencia llega a tocar la frontera de estabilidad. La zona B incluye parte de su área en la zona inestable. Es interesante notar que la mayor parte de la zona inestable se localiza fuera de la zona de exclusión y abarca la zona de circulación natural. La zona inestable es dinámica y no se espera que se mantenga constante durante el ciclo de operación de la planta.

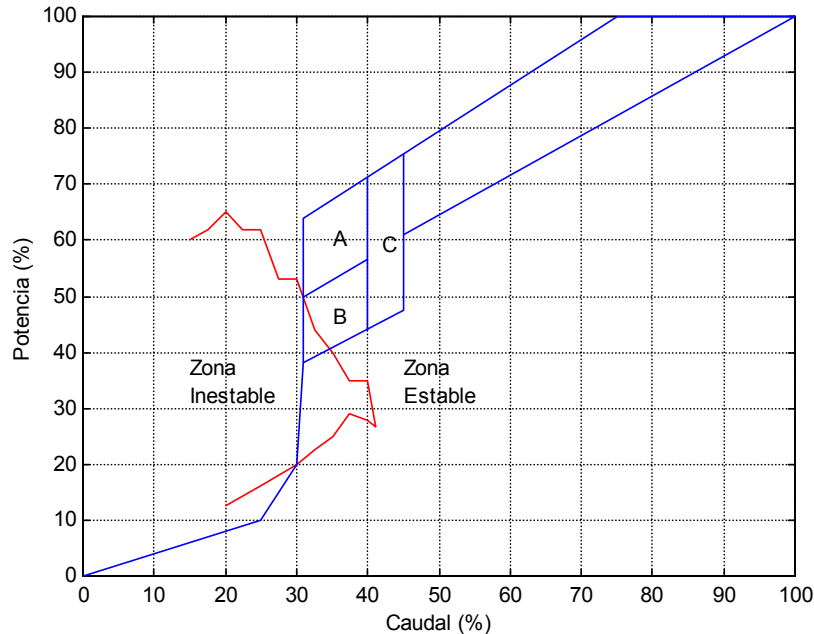


Figura 14. Frontera de estabilidad calculada para el canal

4. RESULTADOS CON DATOS DE PLANTA

En la información del Benchmark se encuentra el caudal, la potencia y el perfil de vacíos de cada ensamble. Con esta información es posible calcular la longitud de ebullición para los 648 ensambles. Adicionalmente, se puede obtener mediante interpolación no lineal del perfil de vacíos la distancia axial en la cual la fracción de vacíos se convierte en un número mayor a cero. La Figura 15 muestra la distribución de la longitud de ebullición para cada canal como función de la potencia de cada ensamble y la Figura 16 muestra la distancia en la cual la fracción de vacíos toma un valor mayor a cero. Ambas gráficas muestran un comportamiento muy similar entre sí, y la tendencia es muy similar a la calculada para el canal, la cual es mostrada en la Figura 10, con lo cual se comprueba mediante datos experimentales la relación existente entre longitud de ebullición y potencia para cada ensamble.

Ringhals cuenta con 36 cadenas de LPRMs, cada una con 4 detectores. En la información del benchmark se proporciona una serie de tiempo de 660 segundos para los detectores 2 y 4 de cada cadena. Empleando modelos de autoregresión y la respuesta al impulso del modelo [4], se calcula el DR para cada detector y se compara con la longitud de ebullición de los cuatro ensambles adyacentes de cada cadena de LPRMs. La Figura 17 muestra para cada cadena la LE de sus 4 ensambles mediante barras amarillas. Se muestra también mediante dos líneas horizontales azul y rojo los DR para los detectores 2 y 4 de la cadena, respectivamente. Se observa una amplia dispersión en la LE.

Para facilitar la inspección de las LE para cada cadena, la Figura 18 muestra para cada cadena una LE promedio y la razón de decaimiento de los dos detectores por cadena.

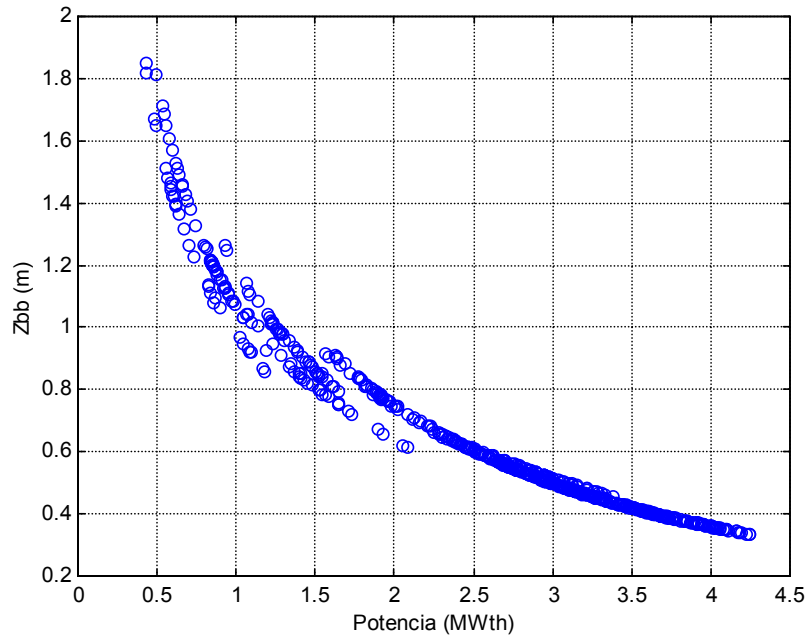


Figura 15. Longitud de ebullición calculada para los 648 ensambles

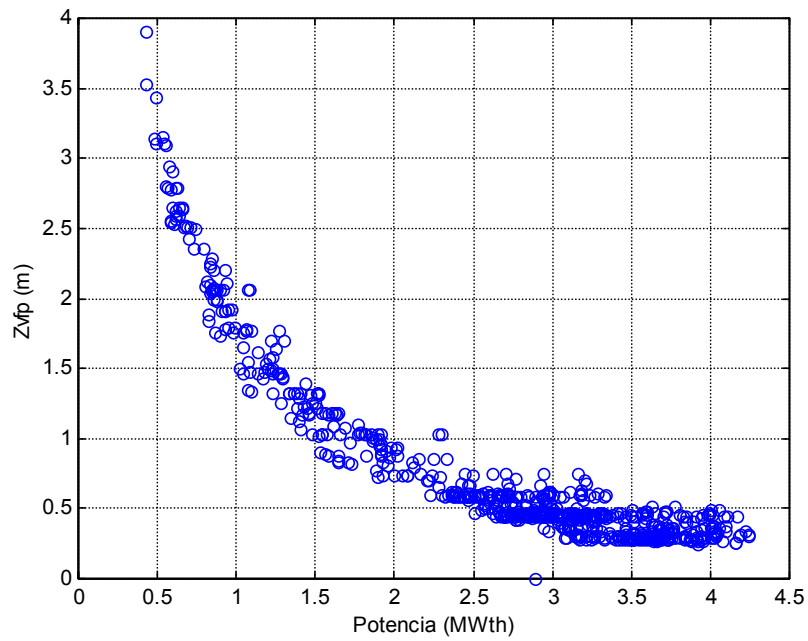


Figura 16. Posición axial para fracción de vacíos mayor a 0.0

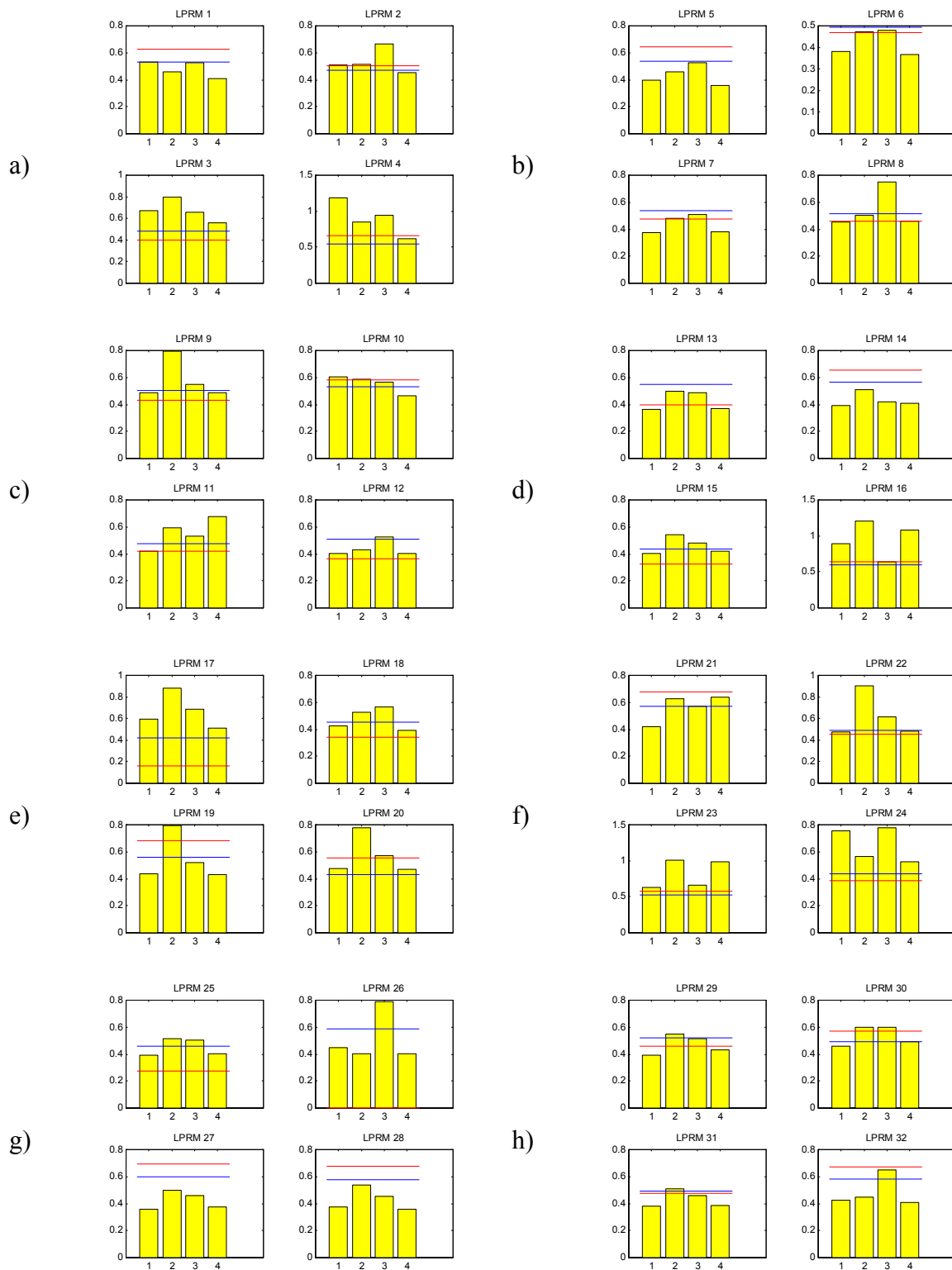


Figura 17 Longitudes de ebullición para los 4 ensambles adyacentes a cada cadena de LPRM. Para cada LPRM se muestra el DR para el detector 2 (azul) y el detector 4 (rojo).

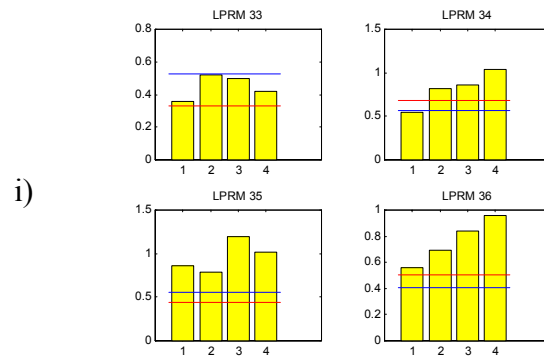


Figura 17 (cont).

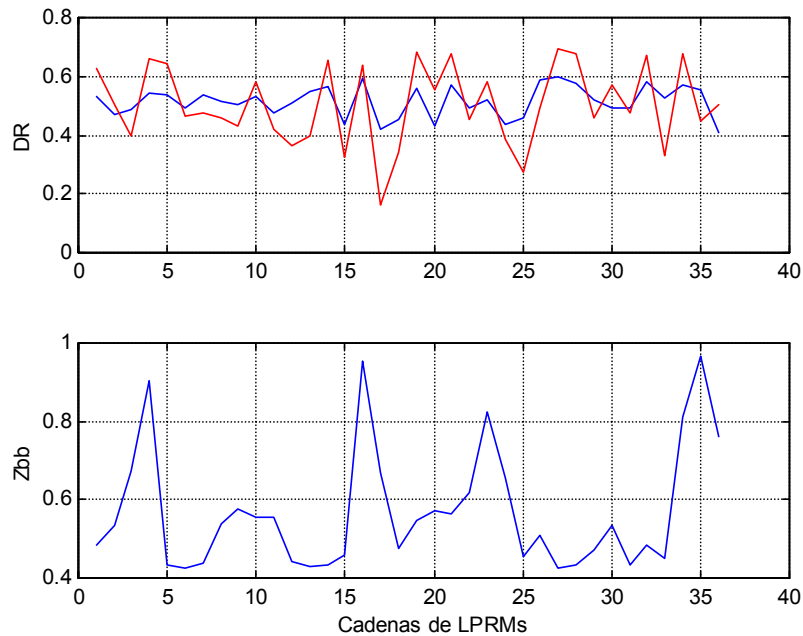


Figura 18 Comparación del DR para detectores 2 y 4 (azul y rojo, respectivamente, en fig. superior) con la longitud de ebullición promedio de los ensambles adyacentes (fig. inferior).

En la gráfica inferior de la Figura 18, se observan varias cadenas con mayor longitud de ebullición. Estas longitudes mayores corresponden a la cadenas 4,16,23,34,35 y 36, siendo todas ellas las de las localizaciones mas próximas a la periferia del núcleo, por lo que corresponden a regiones con menor potencia térmica.

5. CONCLUSIONES

Mediante un modelo de un canal termohidráulico se puede estudiar el comportamiento de las propiedades asociadas a la estabilidad de un reactor tipo BWR cuando varía un parámetro de operación. A partir de los resultados, se tiene que el perfil axial que minimiza la razón de decaimiento es un perfil moderadamente picado hacia la parte inferior del núcleo, y que la frecuencia de resonancia es considerablemente afectada por la entalpía de entrada. Otro resultado observado es que la frecuencia de resonancia es alta para sistemas estables, y se desplaza hacia valores cercanos a los 0.4 o 0.5 Hz cuando la razón de decaimiento aumenta. Se puede afirmar también que la longitud de ebullición no siempre representa un parámetro que por sí mismo permita evaluar la estabilidad del reactor.

Recordando que la base de las conclusiones es un modelo relativamente sencillo, antes de tratar de extenderlas a un reactor BWR real es conveniente emplear códigos validados tales como TRAC-BF1, RETRAN o RELAP5 para confirmar las tendencias obtenidas. Si los resultados se mantienen, entonces con mayor seguridad podrían ser planteadas como aplicables a un reactor de agua en ebullición.

REFERENCIAS

1. R. Zboray, W.J.M. de Kruijf, T.H.J.J. van der Hagen, H. van Dam, "On the Qualification of Boiling Water Reactor Stability Margin Indicators using Linear Stability Analysis," International Topical Meeting on Advances in Reactor Physics and Mathematics and Computation into the Next Millennium, PHYSOR 2000, May 7-11, 2000, Pittsburg, USA.
2. Pedro Jesús Otaduy-Bengoa, *Modeling of the Dynamic Behavior of Large Boiling Water Reactor Cores*. Tesis doctoral, Universidad de Florida, 1979.
3. Otto J. M. Smith, *Feedback Control Systems*, McGraw-Hill 1958.
4. M. Ceceñas-Falcón, R.M. Edwards, "Stability monitoring tests using a nuclear-coupled boiling channel model", *Nuclear Technology*, **131**, 2000.
5. T. Lefvert, "OECD/NEA BWR stability benchmark, final specifications," NEA/NSC/DOC(94)13, 1994.
6. CSNI Report 138. *Proceedings of the International Workshop on Boiling Water Reactor Stability*. Holtsville, New York. 17th-19th October 1990. OECD Nuclear Energy.
7. Suplemento 1 del Boletín 88-07 "Power Oscillations in Boiling Water Reactors (BWRs)," Nuclear Regulatory Commission, Diciembre 30 de 1988.