



MX0500023

Congreso Internacional Conjunto Cancún 2004 LAS/ANS-SNM-SMSR/International Joint Meeting Cancun 2004 LAS/ANS-SNM-SMSR
XV Congreso Anual de la SNM y XXII Reunión Anual de la SMSR/XV SNM Annual Meeting and XXII SMSR Annual Meeting
Cancún, Q.R., México, 11-14 de Julio, 2004/Cancún, Q.R., México, July 11-14, 2004

Predicción de la Estabilidad de Reactores BWR durante el Proceso de Arranque

Jorge A. Ruiz Enciso y Rogelio Castillo Durán

*Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares
Carr. México-Toluca Km. 36.5, Ocoyoacac, Estado de México
jare@nuclear.inin.mx; rcd@nuclear.inin.mx*

Juan B. Blázquez Martínez

*Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
Av. Complutense 22, 28040 Madrid, España
Juan.Blázquez@ciemat.es*

Resumen

Los reactores de agua en ebullición (BWR) son susceptibles de inestabilidades de potencia cuando son operados a bajos caudales de refrigerante (W) y altas potencias (P), presentándose esta situación principalmente en el proceso de arranque. El proceso de arranque podría hacerse más seguro si el operador conociera el valor del índice de estabilidad Razón de Decaimiento (DR) antes de subir potencia y por tanto garantizar la estabilidad. La potencia y el caudal son constantemente medidas, el índice DR también se podría estimar su valor en tiempo real. El índice DR depende de la potencia, caudal y muchos otros valores, tales como, la distribución del flujo neutrónico axial y radial, la temperatura del agua de alimentación, la fracción de vacíos y otros parámetros termohidráulicos y nucleares. Una simple relación de DR se deriva partiendo del modelo reducido de March-Leuba, donde se tienen tres variables independientes que son la potencia, el caudal y un parámetro que contiene el resto de la fenomenología, o sea todas las demás cantidades que afectan el valor de DR. Esta relación desarrollada en el presente trabajo y verificada su predicción con datos de arranques de reactores comerciales podría utilizarse para el diseño de un procedimiento práctico de arranque, lo que apoyaría al operador a prevenir este tipo de eventos de inestabilidad.

1. INTRODUCCIÓN

Durante el arranque de un reactor de agua en ebullición comercial, se supervisan la potencia y el caudal del refrigerante continuamente. Para prevenir eventos de inestabilidad de la potencia, podría vigilarse también la Razón de Decaimiento (DR). El proceso puede hacerse más seguro si el operador puede además anticipar el posible valor de la razón de decaimiento. La razón de decaimiento depende de la potencia, el caudal y muchas otras magnitudes como la distribución axial y radial de flujo neutrónico, la temperatura del agua de alimentación, la fracción de vacíos, y otros parámetros termohidráulicos y nucleares. Se puede derivar una relación simple para la razón de decaimiento, a partir de tres variables independientes: la potencia, el caudal refrigerante y un único parámetro que simboliza conjuntamente a las restantes cantidades que afectan la razón de decaimiento. Esta relación se valida con datos de los procesos de arranque de reactores BWR comerciales. Se puede diseñar, sobre la base de esta metodología, un procedimiento práctico para el arranque de un BWR a fin de poder prevenir eventos de inestabilidad.

La estabilidad de un reactor de agua en ebullición es usualmente caracterizada con el parámetro DR, que cuantifica el grado de amortiguamiento o amplificación que se presenta en el sistema cuando una perturbación dada se experimenta. Cuando se presenta un impulso de reactividad (provocado por una pequeña perturbación de un parámetro relacionado con la dinámica), se obtiene la condición $DR < 1$, la cual indica que las oscilaciones resultantes se amortiguan. Se aclara que el DR es permanentemente < 1 , salvo en los muy infrecuentes casos de inestabilidad.

Existe una gran variedad de modelos y códigos que proporcionan el cálculo de dicho parámetro (DR), que van desde el punto de vista del comportamiento completo de la planta, hasta la utilización de modelos reducidos. Con los valores obtenidos de DR se diseña un mapa de operación (MO) con el fin de fijar las condiciones de operación; los ejes son caudal (W) y potencia (P) medidos en por ciento de las condiciones nominales de operación, así dado un punto (W,P,DR) sobre el mapa, representaría un estado de operación. En el arranque el proceso es moverse desde un punto (W_1, P_1, DR_1) a un nuevo punto (W_2, P_2, DR_2) sobre el MO, tal que $W_2 > W_1, P_2 > P_1$; pero $DR_2 < 1$. Actualmente estas tres cantidades pueden estimarse su valor en tiempo real. En este trabajo se deriva una relación simple partiendo del modelo reducido de March-Leuba [1] con la finalidad de predecir el valor de DR que se tendría al moverse dentro del mapa de operación.

2. MAPA DE OPERACIÓN

Las condiciones de operación de un núcleo BWR son comúnmente representadas en el mapa caudal-potencia, este mapa relaciona el por ciento de potencia térmica del núcleo con el por ciento de caudal en el núcleo. El caudal mínimo es determinado tanto por las condiciones de circulación natural como por la rapidez mínima de las bombas de recirculación (interna y externa).

Los procedimientos de operación nominal para el control del por ciento de potencia se basan esencialmente en los cambios de caudal por medio de variar la velocidad de las bombas, manteniendo constante la configuración de barras de control. Aunque las estrategias de operación para optimización del núcleo, cambios de potencia rápidos y forma de seguimiento de carga, tiene en cuenta ajuste del movimiento de barras de control dentro del control de la potencia.

El boletín 88-07 del organismo regulador de estados unidos (NRC) "interim corrective actions" [2], que define mediante un mapa de caudal-potencia, tres regiones de operación con la finalidad de restringir, que en operación el operador se sitúe en la zona de mayor riesgo, para evitar introducirse a una de esas zonas, se desarrollan acciones inmediatas según el caso, en la figura 1 se muestran las regiones donde las acciones principales a tomar son: Región C. Sólo es permitida durante el proceso de arranque del reactor. Región A y B. Requiere de acciones inmediatas para salir de estas zonas, excluyendo la de rearmar las bombas de recirculación.

La propia industria también ha respondido definiendo regiones de exclusión para prever que en el mapa de operación caudal-potencia se alcancen las zonas susceptibles a oscilaciones [3, 4]. En la figura 2 se muestran las zonas correspondientes a la central nuclear de Cofrentes, España y en la tabla I, las acciones a ejecutar.

En este trabajo se presenta una metodología para la predicción de las DRs que se tendrían en las zonas de riesgo o cercanas a la zona de oscilación, con la finalidad de ofrecer un apoyo al operador que le permita situarse mas flexiblemente dentro del mapa disminuyendo riesgo.

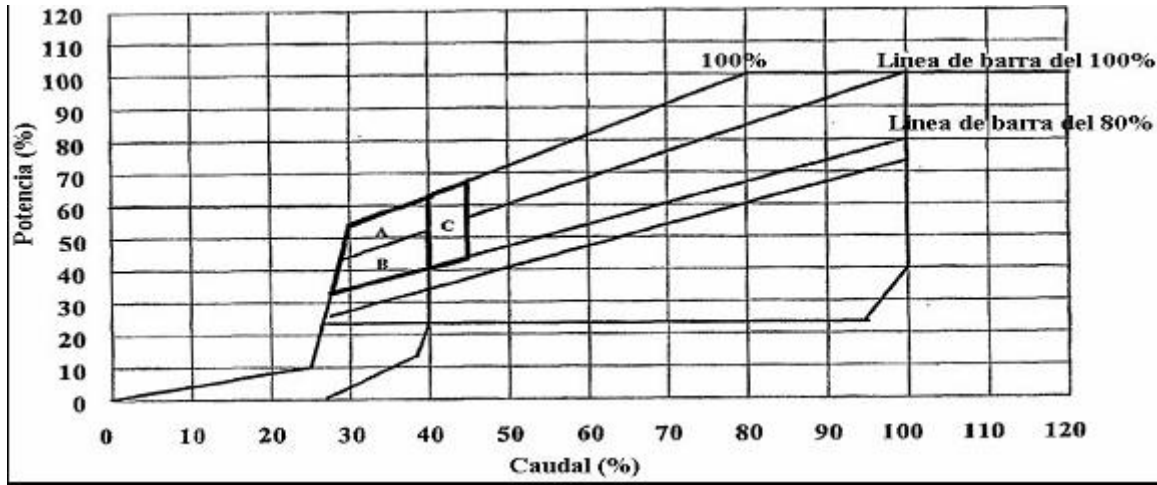


Figura 1. Regiones de Operación definidas por el boletín NRC-88

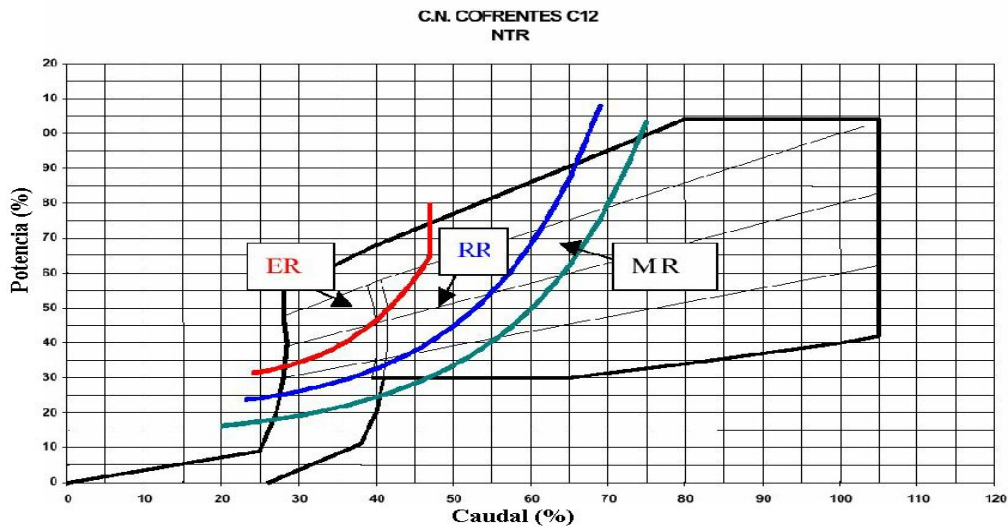


Figura 2. Regiones de Operación restringidas del Reactor BWR de Cofrentes (Tomada de la referencia [2])

Tabla I. Regiones de inestabilidad en el mapa de operación

| REGION | DEFINICION | ACCIONES |
|---------------------------|--|---|
| Región de Exclusión (ER) | Un evento de inestabilidad es muy probable. | Parada del reactor automática. ('SCRAM') |
| Región Restringida (RR) | Un evento de inestabilidad puede ser probable si no se actúa sobre el sistema | Elevar la cota de inicio de las burbujas en el elemento combustible, por medio del movimiento de las barras de control. |
| Región de Vigilancia (MR) | Posibilidad de inestabilidad solamente si se presentan otras condiciones anormales | Vigilancia de la Estabilidad. |

El método se basa esencialmente en dado un punto de operación inicial seguro (bajo caudal y baja potencia), estimar el valor de la DR por técnicas de análisis de ruido, y a partir de ahí bajo un simple algoritmo, tener la predicción de la posible DR que se tendría si el operador desea situarse en un nuevo punto de caudal-potencia, y así sucesivamente, permitiéndole así escoger el camino óptimo de acuerdo a sus intereses y evitando la zona de riesgo.

3. ESTIMACIÓN DEL VALOR DE LA “DR” EN TIEMPO REAL

Como el propósito en este trabajo es predecir la DR en el Mapa, es necesario conocer como se mide ó cuantifica su valor en tiempo real. El concepto del DR viene de los experimentos iniciales de control de los reactores BWR. Después de un impulso de reactividad, a baja potencia, el flujo neutrónico oscila como es mostrado en la figura 3. La DR se obtiene como la proporción de las amplitudes de dos máximos sucesivos de la oscilación [5].

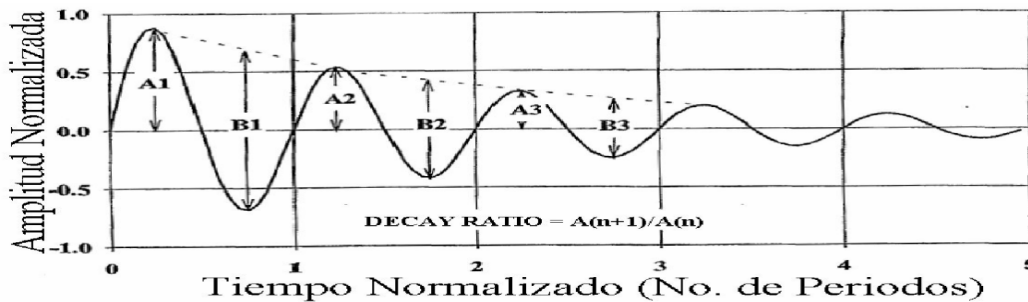


Figura 3 Respuesta al Impulso de un Sistema BWR

Para conseguir una exactitud adecuada, la entrada de reactividad debe ser considerable, por lo que este procedimiento no se recomienda para un reactor comercial. En cambio, si se tiene un registro del ruido neutrónico, calculando su función de autocorrelación, se puede obtener el índice DR. La exactitud será mayor si el ruido puede grabarse durante mucho tiempo, por lo que si el proceso se lleva paulatinamente afectará la duración del arranque. Por esta razón, se han aplicado técnicas de análisis del ruido más rápidas. Estas técnicas están basadas en la relación causa-efecto entre la reactividad (entrada) y la potencia (salida). Cuando la reactividad es una señal fluctuante, la potencia también será fluctuante ("ruido"). Un modelo autoregresivo (AR) puede ajustarse al registro del ruido:

$$P_j = \sum_{k=1}^n a_k P_{j-k} + \varepsilon_j \quad (1)$$

Con ε_j , el ruido blanco propulsor que corresponde a las fluctuaciones aleatorias de reactividad; P_j el ruido correspondiente de la potencia en el instante t_j ; a_k los coeficientes AR, que se obtuvieron del ajuste, y n el orden del ajuste. Los coeficientes de AR son encontrados por el método estándar que resuelve la ecuación de Yule Walter [6]. Los coeficientes de AR juegan el papel de los coeficientes en la ecuación diferencial causal que relaciona reactividad y potencia. Así, la expresión 1 puede considerarse como "la versión del ruido para la función de transferencia". Reemplazando $\varepsilon(t)$ por una función de impulso y conservando los coeficientes de AR, se obtiene la respuesta al impulso [7]. Debe destacarse que el funcionamiento del reactor no se ha perturbado, porque la respuesta al impulso se obtuvo aplicando técnicas de análisis del ruido registrado y no como consecuencia de un movimiento de las barras de control.

Además, los coeficientes AR permiten estimar los polos de la función de transferencia. Se sabe que las oscilaciones ocurren a causa de un par de polos complejos conjugados debidos a la reactividad de las burbujas; si los polos son representados por $\sigma \pm j\omega$, entonces $DR = \exp(2\pi\sigma/\omega)$, siendo la parte real negativa por razones de estabilidad. El procedimiento es más preciso que la respuesta al impulso para valores de DR bajos. Afortunadamente, la identificación del polo es sencilla desde la resonancia de alrededor de 0.5 Hz en la Densidad Espectral de Potencia (PSD) a baja potencia, y alrededor de 0.7 Hz a plena potencia, de la señal de ruido neutrónica; en la figura 4 se observa la PSD típica de un BWR [8].

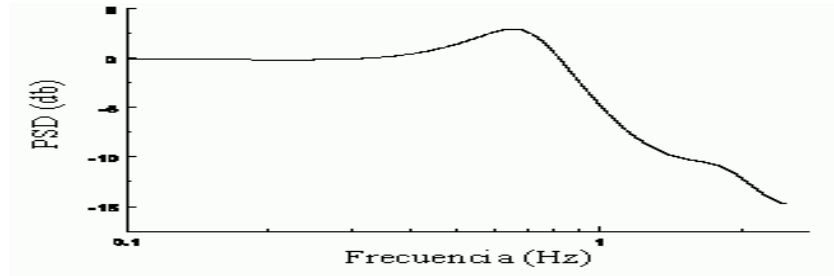


Figura 4. Espectro Típico PSD de la Señal de Ruido

La señal de ruido neutrónico para la estimación del valor del índice DR proviene de los medidores de potencia promedio (APRM). La señal debe ser preacondicionada antes de empezar el análisis del ruido; o sea, es necesario: a). Substraer el valor medio, b).- Realizar un filtraje (paso banda), c).- Amplificar en un factor 50 al menos. El período de tiempo durante el cual se necesita registrar la señal debe ser considerable. Existen monitores de DR comerciales instalados en algunos reactores utilizando la mayoría de ellos, modelos autorregresivos. Se concluye pues, que siendo W, P y DR magnitudes que se pueden estimar su valor en tiempo real, es interesante encontrar una relación que las ligue.

4. DERIVACIÓN HEURÍSTICA DE LA RELACIÓN

4.1 Modelo de March-Leuba

La dinámica de un BWR, a pesar de ser compleja, puede ser descrita por modelos reducidos. El modelo de March-Leuba [9], agrupa cuatro ecuaciones diferenciales y una algebraica para la descripción del comportamiento de un reactor BWR:

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= \frac{\rho_0 - \beta}{\Lambda} n + \lambda C + \frac{\Delta\rho}{\Lambda} \\ \frac{dC}{dt} &= \frac{\beta}{\Lambda} n - \lambda C \\ \frac{dT}{dt} &= a'_1 n - a'_2 T \\ \frac{d^2\rho_\alpha}{dt^2} + \frac{6}{\tau} \frac{d\rho_\alpha}{dt} + \frac{12}{\tau^2} \rho_\alpha &= C' \left(\frac{dT}{dt} + \frac{6T}{\tau} \right) \\ \Delta\rho &= \rho_\alpha + DT \end{aligned} \tag{2}$$

Donde, ρ es la reactividad, β es la fracción de neutrones retardados, λ es la constante de decaimiento de precursores y, Λ es tiempo de generación neutrónica. Con el significado usual en cinética puntual de reactores; n es la fluctuación de potencia; C la fluctuación de los precursores retardados; T la fluctuación de la temperatura del combustible; ρ_α la reactividad por vacíos; D el coeficiente Doppler; τ el tiempo de residencia de las burbujas; Y finalmente, a'_1 , a'_2 y C' son parámetros del modelo. En la referencia [1] puede encontrarse mayores detalles del modelo.

4.1 Ecuaciones de la Neutrónica

Dado que las fluctuaciones del flujo neutrónico son de pequeña amplitud -el sistema de protección del reactor impide oscilaciones grandes-, se puede linealizar la ecuación para la población neutrónica y por lo tanto para la potencia.

Sean:

$$\Delta N = N - N_0 \quad y \quad \Delta c = c - c_0 \quad y \quad \Delta \rho = \rho - \rho_0 \quad (3)$$

Sustituyendo y reordenando las primeras dos ecuaciones de (2) tenemos:

$$\frac{d\Delta N}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} \Delta N + \lambda \Delta c + \frac{N_0}{\Lambda} \Delta \rho + \frac{\Delta \rho \Delta N}{\Lambda} \quad (4)$$

La linealización consiste en suponer que ΔN es pequeña - oscilaciones de amplitud limitada - y que $\frac{\Delta \rho \Delta N}{\Lambda}$ es un termino despreciable frente a los otros. Esto no se cumpliría para oscilaciones grandes (> 15 por ciento). Pero en este caso se habla de oscilaciones no lineales [10].

Interesa medir $n = \frac{\Delta N}{N_0} = \frac{\Delta P}{P_0}$, siendo P la potencia, ya que en general no se mide, haciendo $c = \frac{\Delta c}{c_0}$

resulta:

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= \frac{\rho_0 - \beta}{\Lambda} n + \lambda c + \frac{\Delta \rho}{\Lambda} \\ \frac{dc}{dt} &= \frac{\beta}{\Lambda} n - \lambda c \end{aligned} \quad (5)$$

Tomando la transformada de Laplace, con condiciones iniciales nulas, y eliminando c, que no es observable, resulta la función de transferencia:

$$\frac{n(s)}{\Delta \rho(s)} = G(s), \text{ para un reactor crítico } \Delta \rho = 0:$$

$$G(s) = \frac{1}{s\Lambda + \beta - \frac{\lambda\beta}{s + \lambda}} = \frac{1}{\Lambda} \frac{s + \lambda}{s \left(s + \lambda + \frac{\beta}{\Lambda} \right)} \quad (6)$$

Teniéndose un cero en $-\lambda$ y dos polos: uno en $s=0$ (correspondiente al reactor crítico), y otro en:

$$s = - \left(\lambda + \frac{\beta}{\Lambda} \right) \approx - \frac{\beta}{\Lambda} \quad (7)$$

Si $g(t)$ es la transformada inversa de Laplace para $G(s)$, entonces:

$$n(t) = \int_0^t \rho(\tau) g(t - \tau) d\tau \quad (8)$$

La realimentación de reactividad a causa de las oscilaciones de α , permite calcular como debe ser $\rho(\tau)$. Un esquema general del sistema basado en este modelo se muestra en la figura 5, donde permite calcular la función de transferencia potencia/reactividad.

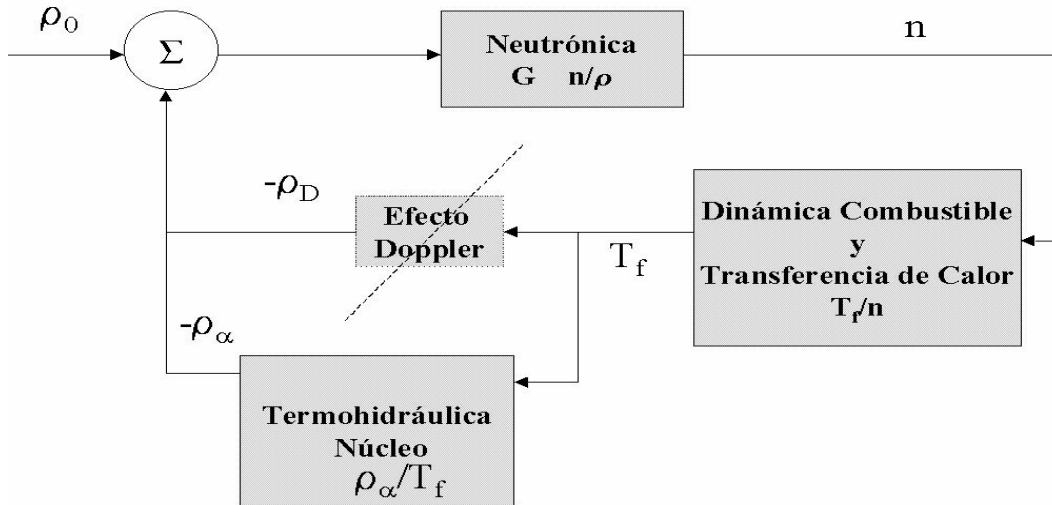


Figura 5. Diagrama de la Dinámica de un Reactor de Agua en Ebullición

4.2 Dinámica de la Temperatura del Combustible

La función de transferencia del combustible $\frac{T(s)}{n(s)}$, la T no se mide. Interesan las fluctuaciones $T = T_f - T_0$,

donde T_f es la temperatura del combustible.

La ecuación del modelo para un combustible cilíndrico, rodeado de refrigerante es:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_{f0}^m}{\rho_f c_f} n - \frac{2h}{\rho_f c_f r_f} (T - \Delta T_c) \quad (9)$$

donde

ΔT_c es la variación de la temperatura del refrigerante, que en el caso de la ebullición es nula.

Q_{f0}^m es la potencia por unidad de volumen del combustible. (Wcm^{-3})

ρ_f es la densidad del combustible ($kg\ cm^{-3}$)

c_f es la capacidad calorífica del combustible por unidad de masa ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)

r_f es el radio de la pastilla de combustible (cm)

h es el coeficiente de transmisión de calor del combustible-refrigerante. (engloba combustible, huelgo y vaina) ($W\ cm^{-2}\ K^{-1}$)

definiendo:

$$a_1 = \frac{Q_{f0}'''}{\rho_f c_f} \quad \text{y} \quad a_2 = \frac{2h}{\rho_f c_f r_f} \quad (10)$$

obtenemos:

$$\frac{dT}{dt} = a_1 n - a_2 T, \quad (11)$$

donde

a_1 = Coeficiente proporcional a la potencia térmica del combustible ($K s^{-1}$)

a_2 = Coeficiente proporcional al coeficiente global de transferencia de calor combustible-refrigerante (s^{-1}).

La función de transferencia que relaciona los cambios de los neutrones con la temperatura del combustible será:

$$\frac{T(s)}{n(s)} = \frac{a_1}{a_2 + s} \quad (12)$$

donde existe un polo en $s=-a_2$. La potencia del reactor es proporcional al parámetro a_1 . medida de que el combustible sea quemado cambia c_f y sobre todo h . De manera que este polo sufre una variación lenta con el quemado.

4.3 Ecuación para la Fracción de Vacíos

La reactividad por vacíos puede ser expresada como $\rho_\alpha = C_v \Delta\alpha$. Del balance de calor en el canal, si el refrigerante estuviera en reposo:

$$\alpha = \frac{Q}{\bar{d} h_{gl}} \quad (13)$$

donde Q es el calor recibido por unidad de volumen, h_{gl} el calor de vaporización a la presión del refrigerante y \bar{d} un valor promedio de la densidad del refrigerante, teniendo en cuenta que se trata de un caudal bifásico.

Derivando miembro a miembro respecto del tiempo, y haciendo $Q''' = \frac{dQ}{dt}$, resulta:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{Q'''}{\langle d \rangle h_{gl}} \quad (14)$$

pero el refrigerante no esta en reposo, sino en movimiento. El transporte aumentara las burbujas, de manera que la derivada anterior es una derivada convectiva:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{\partial \alpha}{\partial t} + V_0 \frac{\partial \alpha}{\partial Z} = \frac{Q'''}{\langle d \rangle h_{gl}} \quad (15)$$

donde V_0 es la velocidad de las burbujas. Como $V_0 = \frac{H}{\tau}$, con H como altura del canal y τ el tiempo de residencia de las burbujas, resulta:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = \frac{Q'''}{\langle d \rangle h_{gl}} - \frac{H}{\tau} \frac{\partial \alpha}{\partial Z} \quad (16)$$

el término $\frac{H}{\tau} \frac{\partial \alpha}{\partial Z}$ es un sumidero de burbujas dependiente del caudal. Si por alguna circunstancia aumenta τ , el sumidero disminuye y crece α , generando oscilaciones de potencia más notorias.

La ecuación 14 ha de modificarse para poder relacionar α con la temperatura del combustible. En general depende de la altura del canal y del tiempo. Si suponemos que las perturbaciones del flujo de calor son separables en tiempo y espacio, tenemos:

$$\Delta Q'''(Z, t) = \phi_0(Z) \Delta q'''(t) \quad (17)$$

donde $\phi_0(Z)$ es la forma del flujo neutrónico. Cuantas más fisiones hay en un cierto punto, más calor se emite y más burbujas se generan.

Para simplificar el modelo se elimina la dependencia espacial. Hay que tener en cuenta que:

$$\int_0^H \phi_0^+(Z) \phi_0(Z) dZ = 1 \quad (18)$$

donde $\phi_0^+(Z)$ es le flujo adjunto de neutrones. Para flujos monoenergéticos, como en este caso, $\phi_0^+(Z) = \phi_0$, de manera que la forma del flujo se normaliza con la condición:

$$\langle \phi^2 \rangle \equiv \int_0^H \phi^2(Z) dZ = 1 \quad (19)$$

Como el coeficiente de vacíos C_v depende de α y a su vez, α depende de Z , la variación de reactividad por vacíos ρ_α será:

$$\rho_\alpha = \langle \phi_0^+ C_v \Delta \alpha \Phi \rangle \equiv \int_0^H \phi_0^+ C_v \Delta \alpha \Phi dZ \quad (20)$$

Esta ecuación permite pasar de Δ_α a ρ_α que es una variable más conveniente para el modelo.

Por último la relación buscada entre la variación de potencia y la variación de temperatura del combustible es:

$$V_B \Delta q''' = h(2\pi r_f H) \Delta T \quad (21)$$

donde V_B es el volumen del refrigerante.

En estas condiciones se obtiene:

$$\frac{d^2 \rho_\alpha}{dt^2} + \frac{6}{\tau} \frac{d\rho_\alpha}{dt} + \frac{12}{\tau^2} \rho_\alpha = \frac{C_1 H^2}{\tau} \left[\frac{d\Delta T}{dt} + \frac{6}{\tau} \Delta T \right] \quad (22)$$

o bien:

$$\frac{\rho_\alpha(s)}{T_f(s)} = \frac{C_1 H^2}{\tau} \frac{s + \frac{6}{\tau}}{s^2 + \frac{6}{\tau}s + \frac{12}{\tau^2}} \quad (23)$$

en donde

$$C_1 = \left\langle \frac{\phi_0^3}{H/\tau} \frac{C_V}{d h_{gl}} \frac{h 2\pi r_f H}{V_B} \right\rangle \quad (24)$$

observar que $\frac{C_1 H^2}{\tau}$ es una constante, ya que C_1 es proporcional a τ . La ecuación 23 corresponde a una oscilación forzada por el miembro de la derecha. La intensidad de la 'fuerza' depende de $\frac{C_1 H^2}{\tau}$, un parámetro que depende de:

$$\frac{C_1}{\tau} = f\left(\phi_0, C_V, h_{gl}, \bar{d}_1, r_f, h\right) \quad (25)$$

La ventaja de este modelo consiste en que solo un parámetro condensa las magnitudes más influyentes en la estabilidad.

4.4 Función de Transferencia del Lazo Cerrado del Modelo Reducido

En la figura 5 se muestra el diagrama de bloques del modelo reducido de March-Leuba. En la ecuación 6 obtuvimos la correspondiente función de transferencia $G(s) = \frac{n(s)}{\Delta\rho(s)}$ debida a la neutróica. La correspondiente a la dinámica del combustible y la transferencia de calor es la ecuación 12, como $\frac{T(s)}{n(s)} = \frac{a_1}{a_2 + s}$. La que incluye las ecuaciones termohidráulicas del canal es la ecuación 23

$$\frac{\rho_\alpha(s)}{T_f(s)} = \frac{C_1 H^2}{\tau} \frac{s + \frac{6}{\tau}}{s^2 + \frac{6}{\tau}s + \frac{12}{\tau^2}}, \text{ el acoplamiento entre estas ecuaciones se puede llevar a cabo mediante la}$$

expresión: $\rho = \rho_\alpha + DT_f$, siendo D el coeficiente Doppler.

Finalmente, reduciendo el esquema, se puede obtener la función de transferencia del modelo reducido correspondiente a las cinco ecuaciones diferenciales (linealizadas) que describen la dinámica de un BWR [11].

$$H(s) = \frac{(s + \lambda)(s + a_2)\left(s^2 + \frac{6s}{\tau} + \frac{12}{\tau^2}\right)}{s\Lambda\left(s + \lambda + \frac{\beta}{\Lambda}\right)(s + a_2)\left(s^2 + \frac{6s}{\tau} + \frac{12}{\tau^2}\right) - (s + \lambda)a_1\left[D\left(s^2 + \frac{6s}{\tau} + \frac{12}{\tau^2}\right) + \frac{CH^2}{\tau}\left(\frac{s+6}{\tau}\right)\right]} \quad (26)$$

en esta ecuación se tienen cuatro ceros y cinco polos. O bien expresada como

$$H(s) = \frac{(s + \lambda)(s + a'_2)Q(s)}{s\Lambda(s + \lambda + \beta/\Lambda)(s + a'_2)Q(s) - (s + \lambda)a'_1[Q(s)D + C'(s + 6/\tau)]} \quad (27)$$

donde $Q(s) = s^2 + (6/\tau)s + 12/\tau^2$.

4.5 Derivación de la Relación Predictiva

La oscilación de potencia proviene principalmente de la realimentación negativa de reactividad por vacíos. Sí bien esta oscilación no es tan simple como un proceso de segundo orden, sí puede ser representada por un tercer orden, de hecho, el modelo de March-Leuba concluye que la función de transferencia potencia/reactividad puede explicarse con sólo dos ceros y tres polos, a condición de que el intervalo de frecuencias de interés se restrinja entre (0.0 y 1.2) Hz.

Esta ecuación 27 se puede ajustar a un espectro PSD empírico y obtener los parámetros del modelo y verificar su validez, lo que realizó March-Leuba [10]. El modelo de un grupo de cinco ecuaciones diferenciales puede simplificarse a un modelo de tercer orden para la fluctuación de la potencia [12]. La señal de ruido neutrónico registrada del evento de Laguna Verde, muestra fluctuaciones y oscilaciones, pero cuando el BWR está cerca de inestabilidad, las fluctuaciones tienden a desaparecer y las oscilaciones son las dominantes [13], por consiguiente, el modelo puede simplificarse un paso adicional más, a una ecuación diferencial lineal de segundo orden [14].

$$\frac{d^2n}{dt^2} + \frac{2}{\tau} \frac{dn}{dt} - \frac{C'}{\beta} n = \frac{2}{1+n} \left(\frac{dn}{dt} \right)^2 \quad (28)$$

Donde: C' = es un parámetro del modelo y es proporcional al coeficiente de reactividad por vacíos. Las hipótesis implícitas en la ecuación 28 son que el tiempo de residencia de las burbujas es grande y la frecuencia está restringida a la región de 0.01 a 2 Hz.

C' es el parámetro más importante. Su estructura matemática en detalle puede encontrarse en la ecuación 24 y 25. Ahora bien para nuestro propósito, C' = f (densidad neutrónica, geometría, combustible, refrigerante, potencia, etc.), explícitamente en la tabla II se muestran algunos rasgos característicos de estas cantidades:

Tabla II. Principales magnitudes que afectan el índice DR

| | |
|--------------|---|
| Potencia | Coeficiente de reactividad por vacíos Forma del flujo neutrónico |
| Geometría | Altura del canal |
| Combustible | Diámetro Capacidad calorífica Coeficiente de transferencia de calor del combustible al refrigerante |
| Refrigerante | Densidad promedio Calor de vaporización |

Hay que destacar que C' es proporcional a $c_v P$, siendo c_v el coeficiente de reactividad por vacíos y P la potencia. Hay que poner cuidado en no confundir con $n(t)$, fluctuaciones de potencia, con la potencia P alrededor de la cual fluctúan. Debido al signo del coeficiente de reactividad por vacíos, C es negativo.

La ecuación diferencial de segundo orden es análoga a un proceso de oscilación amortiguado estándar:

$$\frac{d^2n}{dt^2} + 2\sigma \frac{dn}{dt} + \omega^2 n = F(t) \quad (29)$$

donde F (t) es la fuerza impulsora, que sería la parte de la derecha de la ecuación 28 . La parte $2/\tau$ juega el rol del amortiguamiento y $-C''/\beta$, de la pulsación. La frecuencia de oscilación esta definida como:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\omega^2 - \sigma^2} \quad (30)$$

Cuando el amortiguamiento es pequeño - en las proximidades de inestabilidad -, $\sigma \ll \omega$; y entonces la DR puede calcularse como:

$$DR = \exp(-2\pi\sigma / \omega) \quad (31)$$

Si siguiendo esta analogía, para amortiguamiento bajo -alto τ -, la DR será en términos de los parámetros del modelo:

$$DR = \exp \left(-2\pi \frac{\tau^{-1}}{\sqrt{-\frac{C''}{\beta}}} \right) \quad (32)$$

Si regresamos al MO, y tenemos en cuenta que τ^{-1} es proporcional a W, resultara:

$$DR = \exp \left(-b \frac{W}{\sqrt{P}} \right) \quad (33)$$

donde b es proporcional a $c_v^{-1/2}$, por tanto es de esperar que b decrezca con $\alpha^{1/2}$.

La expresión anterior es una derivación heurística desde un modelo simplificado. Se trata de la relación semiempírica buscada entre DR, W y P. El parámetro b viene de C'' y contiene el resto de las cantidades que actúan sobre la DR. El próximo paso es verificar la relación, no usando un modelo simplificado, sino ejecutando el código LAPUR5 para la dinámica compleja de un BWR en el caso del reactor de Laguna Verde.

4. LA PREDICCIÓN DE DR

La forma más fácil para la predicción de DR es moverse en el mapa de operación, a lo largo de una línea de DR constante [13]. A simple vista, las líneas de DR constantes aparecen como una parábola en el MO; la curvatura aumenta para valores de DR más altos. Esto es confirmado por la ecuación 33; resolviendo para P:

$$P = \left(\frac{b}{-\ln DR} \right)^2 W^2 \quad (34)$$

Advirtiendo que b permanece constante a lo largo de esas líneas. También se puede observar que cuando la fracción de vacíos baja, b se incrementa, pero $-\ln (DR)$ se incrementara más rápido, por lo que su relación tiende a decrecer-. Esta es la razón por la cual la curvatura de las parábolas es menor en las regiones donde las DR son muy pequeñas sobre el mapa de operación MO.

Una vez probado que b no cambia a lo largo de las líneas de DR constante, el código LAPUR5 puede ser reemplazado por técnicas de análisis de ruido, con el objeto de obtener los valores de DR. Como consecuencia de este análisis, podemos tomar, durante un proceso de arranque de un BWR, incrementos de la potencia (P) y el caudal (W) del refrigerante a lo largo de líneas de DR constante. Estando seguros del valor final y con posibilidad de ajuste fino del valor. Los operadores podrían colocarse sobre líneas de DR en el mapa, incluso en puntos que bordeen la zona de inestabilidad.

Para otros desplazamientos en el MO fuera de las líneas de DR constantes, se consideran varios modos:

- Desplazamiento Horizontal: la potencia permanece constante y el caudal aumenta. El DR siempre disminuye, así que su predicción correcta no afecta a la Seguridad.
- Desplazamiento Vertical: el caudal permanece constante y la potencia se aumenta. El DR siempre aumenta por lo que, para su predicción correcta, debe usarse un valor bajo del parámetro b . La razón principal por la que b no permanece constante es porque en este tipo de desplazamientos es esperado el incremento del coeficiente de reactividad por vacíos.

Para corregir el parámetro b , se utiliza la expansión de Taylor para dos variables:

$$b(W, P) = b_0 + \left(\frac{\partial b}{\partial W}\right)_0 (W - W_0) + \left(\frac{\partial b}{\partial P}\right)_0 (P - P_0) + \dots \quad (35)$$

Los coeficientes de la expansión pueden ser encontrados si se hace una malla regular sobre el MO para los valores W y P involucrados en el proceso de arranque. Para cada punto en la malla, la DR se calcula usando el código LAPUR5, y se asigna un valor para b a través de la expresión de la ecuación 33. Por medio de una técnica de interpolación de dos dimensiones se encuentran los coeficientes de Taylor. Los coeficientes son específicos para un núcleo y ciclo de un BWR dado. La corrección de b es necesaria para un pronóstico mejor dentro de cierto desplazamiento; afortunadamente, b no cambia mucho en la región del arranque.

6. VERIFICACIÓN DE LA PREDICCIÓN

Para probar la habilidad para la predicción de DR con la ecuación 33, se han utilizado datos de reactores BWR comerciales durante un proceso de arranque; en este trabajo utilizaremos los de reactores BWR LaSalle 2 y Laguna Verde 1. El procedimiento es como sigue: empezando en un punto (W_0, P_0) el DR_0 es calculado por el código; usando 34 se ajusta después el parámetro b . Partiendo de un punto inicial (W_0, P_0, DR_0) y eligiendo una trayectoria dada a lo largo del MO, los valores de DR se pueden predecir para los puntos sucesivos. El parámetro b resulta ser bastante constante al seguir las líneas DR constantes. Para los desplazamientos verticales y horizontales, la ecuación 33 es necesaria para corregir el valor inicial del parámetro b . Los datos se han tomado de dos reactores BWR que han reportado eventos de inestabilidad. En la sección 6.1 se mostrará el caso de Laguna Verde 1 para el cuarto ciclo de operación; en la sección 6.2 se presenta el caso de LaSalle 2. Cabe hacer notar que las rutas seleccionadas, algunas no son reales, ya que fueron tomadas arbitrariamente y por ejemplo la ruta 2 no podría aplicarse porque violaría las especificaciones técnicas de operación (ETOS). En el código LAPUR se obtienen las curvas de DR incluso fuera de las zonas de operación.

6.1. Laguna Verde

En el figura 6 se muestra el mapa de operación MO de Laguna Verde 1 correspondiente al cuarto ciclo. Se ha seleccionado dos rutas en el MO con el objetivo de verificar expresión (33). Las trayectorias están trazadas en la figura 6.

Para obtener el parámetro b, se utiliza una correlación de segundo orden:

$$b = a_{00} + a_{10}W + a_{01}P + a_{11}WP + a_{20}W^2 + a_{02}P^2 + a_{22}W^2P^2 \quad (36)$$

cuyos coeficientes se han ajustado y aparecen en la tabla III, donde P y W están en unidades de porcentaje de los valores nominales de potencia y caudal del reactor. Por tanto los coeficientes a_{ij} y b son adimensionales, aunque las unidades físicas de b son $(MW)^{1/2}(kg)^{-1}h$.

Tabla III. Coeficientes para b (Laguna Verde)

| a_{00} | A_{10} | a_{01} | a_{11} | a_{20} | a_{02} | a_{22} |
|----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|
| 2.89E-01 | -8.63E-04 | -4.68E-03 | -6.88E-06 | 3.23E-05 | 3.09E-05 | -1.81E-09 |

En términos del estado de (W, P) la trayectoria del arranque ruta 1 es:

1. Partiendo del punto (38, 40) ascendiendo con caudal constante hasta el 60 % de potencia.
2. A partir de ese punto se seleccionan puntos que se encuentren dentro del mapa de operación hasta llegar al 100% potencia.

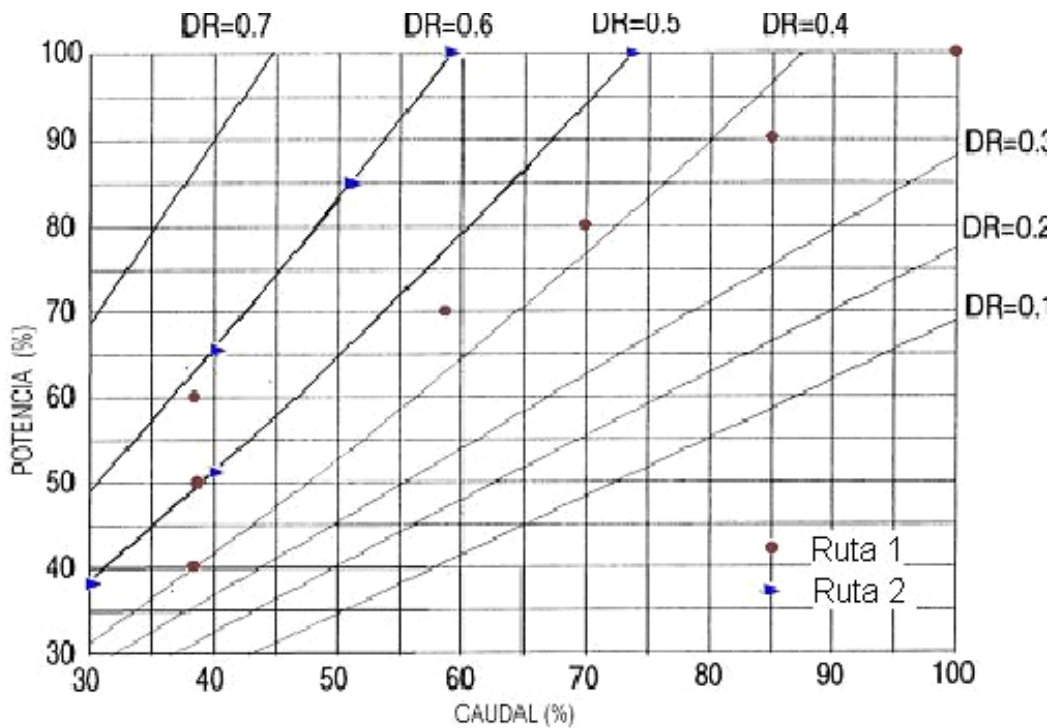


Figura 6. Mapa de Operación para Laguna Verde 1 correspondiente al Cuarto Ciclo de Operación

La tabla IV muestra los resultados obtenidos en la predicción de los índices de estabilidad DR. Las diferencias son justamente pequeñas entre los valores de DR pronosticados y los correspondientes a los obtenidos por el código LAPUR5 para el MO.

Tabla IV. Predicciones de DR a lo largo de la Ruta 1, Laguna Verde

| Caudal (%) | Potencia (%) | DR (MO) | DR (Pronosticado) | b |
|------------|--------------|---------|-------------------|-------|
| 38 | 40 | 0.405 | 0.405 | 0.15 |
| 38 | 50 | 0.503 | 0.5067 | 0.126 |
| 38 | 60 | 0.586 | 0.588 | 0.108 |
| 58 | 70 | 0.447 | 0.455 | 0.113 |
| 70 | 80 | 0.382 | 0.407 | 0.115 |
| 85 | 90 | 0.369 | 0.343 | 0.119 |
| 100 | 100 | 0.345 | 0.311 | 0.117 |

El camino de la ruta 2 es:

1. Empezando en (30, 38.7) y subiendo la línea DR = 0.5, correspondiendo a 51.1% de la potencia.
 2. Subiendo la potencia con caudal constante (40%) hasta alcanzar la línea de DR = 0.6.
 3. Siguiendo a lo largo de la línea de DR = 0.6 hasta alcanzar una potencia del 100%. El flujo es 74%.
- En el caso de la ruta 2, los valores del parámetro b son también tomados de la ecuación (36).

Tabla V. Predicciones de DR a lo largo de la Ruta 1, Laguna Verde

| Caudal (%) | Potencia (%) | DR (MO) | DR (Pronosticado) | B |
|------------|--------------|---------|-------------------|------|
| 30 | 38.7 | 0.50 | 0.49 | 0.15 |
| 40 | 51.5 | 0.50 | 0.50 | 0.13 |
| 40 | 65.6 | 0.60 | 0.60 | 0.11 |
| 50.8 | 85 | 0.60 | 0.60 | 0.09 |
| 59.5 | 100 | 0.60 | 0.59 | 0.08 |
| 74 | 100 | 0.50 | 0.50 | 0.10 |

Se puede observar (tabla IV) que cuando se toman valores de DR < 0.5, los valores pronosticados se encuentran más alejados del valor correcto. Esto es concordante con la teoría, ya que para valores más bajos de DR, la oscilación de potencia se aleja de un segundo orden y se manifiesta el polo real [14].

6.2 LaSalle2

Para el reactor BWR de LaSalle2 se realizó el mapa de operación MO con el código LAPUR5, el cual se muestra en la figura 7. Para la obtención del parámetro b, se tiene, que de acuerdo a la experiencia de la sección anterior de Laguna Verde, no es necesario usar tantos parámetros, así que desarrollando una expresión más reducida se propone:

$$b = a_{00} + a_{10}W + a_{01}P + a_{11}WP \quad (37)$$

Los resultados están listados en la tabla VI.

Tabla VI. Coeficientes para b (LaSalle2)

| a ₀₀ | A ₁₀ | a ₀₁ | A ₁₁ |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| -1.35E-01 | 1.06E-02 | -4.15E-03 | 3.54E-05 |

La ruta elegida para el parámetro b es la mostrada en la figura 7. Una ruta de arranque del reactor fue diseñada para el reactor de LaSalle2 con la finalidad de verificar la expresión 33. La ruta es:

1. Partiendo del punto (35, 30) y siguiendo la línea vertical W=35%, hasta cortar la línea correspondiente a DR=0.83.
2. Siguiendo a lo largo de los puntos que corresponden a DR=0.83 Hasta alcanzar la línea del P=80%. El caudal es W=38.25%.
3. Siguiendo ahora la línea de P=80% hasta alcanzar la línea correspondiente a la línea de DR=0.5. El caudal es W=45 %.

La ruta está graficada en la figura 7. Se puede observar que pese a la baja parametrización de b, los valores de las DRs pronosticados por esta metodología, están muy de acuerdo con los calculados por el código LAPUR.

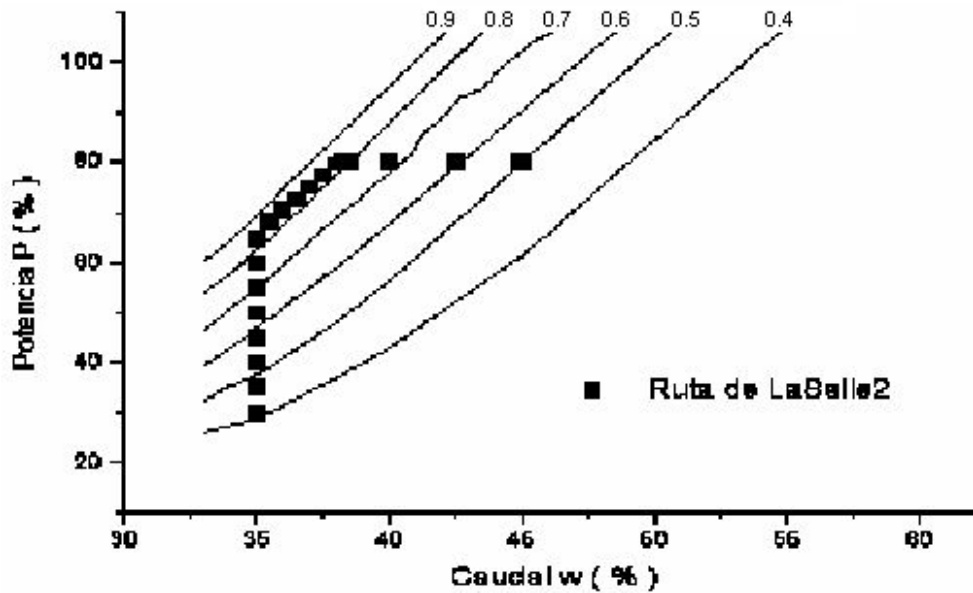


Figura 7. Mapa de Operación para LaSalle2

La ruta está graficada en la figura 7 y los resultados se muestran en la tabla VII. Se puede observar que pese a la baja parametrización de b, los valores de las DRs pronosticados por esta metodología, están muy de acuerdo con los calculados por el código LAPUR.

7. CONCLUSIONES

Se derivó la expresión semiempírica (Ec. 33)

$$DR = \exp\left(-\frac{bW}{\sqrt{P}}\right)$$

En la cual se tienen relacionados la potencia, el caudal y el índice de estabilidad DR. Las curvas de DR constantes obtenidas por medio del código LAPUR5 para el reactor de LaSalle2 y LV permiten verificar que b permanece constante a lo largo de las líneas de DR.

Tabla VII. Predicción de los Valores de DR, para LaSalle2

| Caudal (%) | Potencia (%) | DR (Predicción) | DR (LAPUR5) |
|------------|--------------|-----------------|-------------|
| 35 | 30 | 0.39 | 0.41 |
| 35 | 35 | 0.46 | 0.47 |
| 35 | 40 | 0.52 | 0.53 |
| 35 | 45 | 0.58 | 0.58 |
| 35 | 50 | 0.64 | 0.64 |
| 35 | 55 | 0.70 | 0.70 |
| 35 | 60 | 0.76 | 0.77 |
| 35 | 65 | 0.82 | 0.83 |
| 35.5 | 68.25 | 0.83 | 0.83 |
| 36 | 70.5 | 0.83 | 0.83 |
| 36.5 | 72.8 | 0.83 | 0.83 |
| 37 | 75.1 | 0.83 | 0.82 |
| 37.5 | 77.45 | 0.83 | 0.81 |
| 38 | 79.8 | 0.83 | 0.83 |
| 38.25 | 80 | 0.82 | 0.79 |
| 38.5 | 80 | 0.81 | 0.80 |
| 40 | 80 | 0.73 | 0.72 |
| 42.5 | 80 | 0.61 | 0.60 |
| 45 | 80 | 0.50 | 0.50 |

En estas condiciones, se puede diseñar un procedimiento para la subida de potencia que permita predecir la DR en el mapa de operación en tiempo real con la utilización de la ecuación (34) . Sólo se necesitaría calcular b en el punto inicial, lo cual es inmediato a partir de la estimación o medición del índice de estabilidad DR por medio de técnicas de análisis de ruido en línea. Se dispone así de una herramienta que mejoraría significativamente la seguridad del proceso de arranque aplicando esta en el diseño de un procedimiento de arranque.

REFERENCIAS

1. March-Leuba, J.. “Dynamic Behavior of Boiling Water Reactor”. Thesis Ph. D. University of Tennessee, Knoxville, USA, 1984.
2. NRC. (1988). “Power Oscillation in Boiling Water Reactors (BWRS)”. Bulletin No. 88-07. NRC, Washington, USA, June, 1988.
3. Castrillo F. et al. , “Transitorio de oscilaciones neutrónicas en la C.N. Cofrentes”. *XVII Reunión Anual de SNE*, Palma de Mallorca, 1991.
4. Raush TJ., Pfeffelern H.C. “Overview of Current BWR Owners’ Group Stability Programs” Proceedings of the OECD/CSNI International Workshop on boiling water reactor stability, Brookhaven, Holtsville NY, October 17-1 *CSNI Report 178*, 1990.
5. Anegawa T., Ishikawa M., Oguma R. “Study of BWR Stability at Kashiwazaki BWR Unit 4 Using the on-line Stability Monitor SIMON-64.” *SMORN-VII proceedings*, Avignon, France, 1995
6. Box G., Jenkins G. “*Time Series Analysis Forecasting and Control*” (ed. Holden-Day.). San Francisco, USA, 1970.
7. Rotander, C. “*Methods to identify stability properties for a thermo hydraulic channel and from reactor noise measurements*”, University Degree Thesis. Royal Institute of Technology (KTH), 1999.

8. Ruiz J.A. “*Metodología de Análisis de Inestabilidades de Potencia en BWR. Aplicación Laguna Verde México*”. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. España, 2002.
9. March-Leuba, J. “A Reduced Order Model BWR Linear Dynamics”. *Nucl. Tech.* **75**, 15, 1986
10. Ballestrín J., Blázquez J. “Estabilidad de un BWR con un Modelo Reducido”. Junio, 1990. Reporte interno 668. CIEMAT, Madrid. España, 1990.
11. Blázquez J., Ruiz J. “Neutron signal characterization of the power instability event at Laguna Verde BWR”. *Nucl. Eng. and Design* 196, 327-336. March, 2000.
12. Ruiz J., Blázquez J., “Métodos para la Identificación del Régimen de Estabilidad de un Reactor Tipo BWR”. *XIII Congreso Anual de la Sociedad Nuclear Mexicana*, Ixtapa Zihuatanejo México. 2002.
13. Blázquez J., Ballestrín J. “The Noise Analysis and The Operation Map”. In *SMORN VII proceedings* (ed. OCDE/NEA). Avignon, France, 19-23 Jun., 1995.
14. Blázquez J., Ballestrín J. “A Simple Differential Equation for BWR Power Oscillation”. In *8th Symposium on Power Plant Dynamics, Control and Testing*. Knoxville, Tennessee, USA, May 27-29, 1992.