

---

## **Acoplamiento de Cinética Neutrónica Unidimensional a Canales Termohidráulicos en Paralelo**

---

**Miguel Ceceñas F., Rina M. Campos G.**  
*Instituto de Investigaciones Eléctricas*  
*Av. Reforma 113 Col. Palmira*  
*Cuernavaca, Mor.*  
[mcf@iie.org.mx](mailto:mcf@iie.org.mx); [rmcampos@iie.org.mx](mailto:rmcampos@iie.org.mx)

### **Resumen**

En este trabajo se estudia mediante series de tiempo el comportamiento dinámico de un sistema consistente en quince canales en paralelo que representan el núcleo de un reactor tipo BWR, acoplados a un modelo de cinética neutrónica en una dimensión. El arreglo de canales se obtiene colapsando los ensambles de que consta el núcleo a un arreglo de canales dispuestos en línea recta, y se acopla a la solución unidimensional de la ecuación de difusión de neutrones. Esta solución representa la distribución radial de potencia, e inicialmente se obtiene la solución estática para verificar que el núcleo modelado es crítico. El conjunto acoplado nuclear-termohidráulico se resuelve numéricamente mediante una red de CPUs trabajando en el esquema maestro-esclavo mediante Parallel Virtual Machine (PVM), sujeto a la restricción de que la caída de presión sea igual para cada canal, la cual se cumple iterando sobre la distribución de refrigerante. Los canales se dimensionan de acuerdo al Benchmark de Estabilidad de la planta sueca Ringhals, organizado por la Agencia de Energía Nuclear en 1994. De la información de este benchmark se obtiene el perfil axial de potencia para cada canal, el cual se asume invariante en el tiempo. Para obtener las series de tiempo, el sistema se excita con ruido blanco (secuencia que estadísticamente obedece a una distribución normal con media cero), de forma que la potencia generada en cada canal posee las mismas características de una señal típica obtenida mediante la adquisición de las señales de flujo neutrónico en un reactor BWR.

### **1. INTRODUCCIÓN**

El modelado de canales termohidráulicos acoplados a alguna representación de la cinética neutrónica inició como resultado de la necesidad de entender la dinámica de canales calentados por medios nucleares. En la literatura existen trabajos que emplean análisis lineales o no lineales, con flujo de calor distribuido uniformemente o con una distribución no uniforme [1,2,3]. También se encuentra en la literatura el empleo de cinética modal acoplada a dos canales [4,5]. En este trabajo, se emplea un conjunto de canales en paralelo, específicamente quince, acoplados a la ecuación de difusión de

neutrones en una dimensión. Las características dinámicas se estudian perturbando el flujo de refrigerante en cada canal mediante una contribución aditiva de ruido blanco, y las propiedades de estabilidad del sistema se obtienen mediante la densidad espectral de potencia y el modelado autoregresivo. Para la solución numérica, se toma ventaja de la manera natural en que los canales termohidráulicos operan en paralelo para calcular la solución de cada canal mediante PVM (Parallel Virtual Machine) empleando el esquema maestro-esclavo en una configuración de procesamiento distribuido en varios CPUs.

El modelo está basado en el modelo de un canal que considera tres regiones: de una fase, de ebullición subenfriada y de ebullición de bulto [6]. Para este modelo, la distribución axial de potencia se proporciona como entrada mediante una función polinomial. El modelo termohidráulico ha sido probado exhaustivamente y se ha mostrado adecuado para describir la dinámica de un sistema BWR al acoplarse a cinética puntual o modal [4,6].

Para el caso de un arreglo en paralelo, se asume que cada perfil axial se mantiene invariante en el tiempo, pero se tiene un perfil radial dinámico a partir de la solución de la ecuación de difusión de neutrones.

## 2. MODELO DE CANALES EN PARALELO

El modelo presentado en esta sección permite generar un arreglo de varios canales en paralelo y observar su respuesta cuando se acopla a un modelo de neutróica y se le aplican condiciones de frontera que reflejen la operación en paralelo. Estas condiciones son básicamente dos: La caída de presión deber ser la misma para todos los canales, y la sumatoria del flujo en los canales debe ser igual al flujo total del núcleo. El modelo no incluye baipás. Para lograr la primera condición se asigna un flujo inicial proporcional a cada canal según el número de ensambles que represente, se calculan las caídas de presión y se ajusta el flujo de manera iterativa hasta lograr que la caída de presión para todos los canales sea la misma, o esté dentro de una tolerancia. En las siguientes secciones se describe el modelo neutrónico y el termohidráulico.

### 2.1. Cinética Neutrónica

El modelo de cinética neutrónica contempla una sola dimensión, y por simplicidad se selecciona un solo grupo de energía y un grupo de precursores. La ecuación de difusión está dada como [7]

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla \cdot D \nabla \phi - \Sigma_a \phi + (1 - \beta) \nu \Sigma_f \phi + \lambda C \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \beta v \Sigma_f \phi - \lambda C \quad (2)$$

donde

$\phi$	densidad de flujo neutrónico
$D$	Coefficiente de difusión
$\Sigma_a$	sección eficaz total de absorción
$\Sigma_f$	sección eficaz de fisión
$C$	densidad de precursores de neutrones retardados
$\beta$	fracción de neutrones retardados
$\lambda$	Constante de decaimiento de los precursores

Las ecuaciones (1) y (2) para el caso estacionario se reducen a

$$\nabla \cdot D \nabla \phi - \Sigma_a \phi + v \Sigma_f \phi = 0 \quad (3)$$

Para el caso de una dimensión, y aplicando la Ley de Fick que relaciona corriente y flujo, la ecuación de difusión se simplifica a

$$\frac{dJ}{dx} + \Sigma_a \phi = \frac{1}{k} v \Sigma_f \phi \quad (4)$$

donde se introduce el factor  $1/k$ , siendo  $k$  el eigenvalor del sistema o factor de multiplicación y debe ser igual a la unidad para obtener un reactor crítico. La variación espacial es en una sola dimensión y para nuestra aplicación representa la dirección radial, por lo que la solución a esta ecuación es la representación radial del flujo neutrónico. Aplicando el método de diferencias finitas de tres puntos se llega a la siguiente formulación para estado estacionario:

$$\begin{aligned} a_{i,j-1} \phi_{i-1} + a_{ii} \phi_i + a_{i,j+1} \phi_{i+1} &= S_i \Delta_i \\ a_{i,j} &= d_{i-1,j} + d_{i,j+1} + \Delta_i \Sigma_{ai} \\ a_{i,j+1} &= -d_{i,j+1} \\ a_{i,j-1} &= -d_{i-1,j} \\ d_{i,j+1} &= \frac{2d_i d_{i+1}}{d_i + d_{i+1}} \\ a_{1,1} &= 2d_1(1-\beta) + \Delta_1 \Sigma_{a1} + d_{1,2} \\ a_{N,N} &= 2d_N(1-\beta) + \Delta_N \Sigma_{aN} + d_{N-1,N} \\ d_k &= \frac{D_k}{\Delta_k} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{1}{4d_i} \left( \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \right)} \quad l = 1 \text{ or } N$$

donde, para la celda  $i$ ,  $S_i$  representa la fuente de neutrones, y  $\Delta_i$  es la dimensión de la celda. Adicionalmente,  $\alpha$  representa el albedo en las fronteras, y se le asigna un valor de cero (se asume vacío en el exterior del reactor). Estas ecuaciones se resuelven para encontrar la distribución de flujo, y las secciones eficaces se ajustan para obtener un eigenvalor unitario del sistema, esto es, para obtener un reactor crítico. Una vez que se tiene definido el estado estacionario, se incorporan las contribuciones de los neutrones retardados en el término fuente, de manera que las ecuaciones dinámicas para obtener una solución a la ecuación de difusión son:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \vdots \\ \dot{\phi}_N \\ \dot{C}_1 \\ \dot{C}_2 \\ \vdots \\ \dot{C}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1N} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_{11} & a_{11} & & a_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{11} & a_{11} & \dots & a_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -\lambda & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & -\lambda & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & -\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_N \\ C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_N \\ Q_{C1} \\ Q_{C2} \\ \vdots \\ Q_{CN} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Donde las fuentes para el flujo y los precursores  $Q_i$  y  $Q_{ci}$  están dadas por

$$Q_i = (1 - \beta) \nu \Sigma_f \phi_i \quad Q_{ci} = \beta \nu \Sigma_f \phi_i \quad (7)$$

El sistema de  $2N$  ecuaciones para  $N$  nodos definido por (6) puede ser resuelto en función del tiempo para calcular la respuesta dinámica del flujo en un escenario dado.

## 2.2. Modelo Termohidráulico

El modelo para la parte termohidráulica consiste en un canal que presenta tres secciones. La primera sección corresponde a la entrada al canal de agua subenfriada y consiste en una sola fase, la segunda sección considera ebullición subenfriada y la tercera corresponde a ebullición de bulto. Este modelo fué desarrollado para realizar estudios de estabilidad y ya está descrito en [5,6] por lo que solamente se presentan las ecuaciones más importantes.

Para la parte de conducción de calor, se resuelve la ecuación de conducción de calor en una dimensión a través de un arreglo que considera la pastilla, el gap o huelgo y el encamisado. Las ecuaciones para la transferencia de calor son [8]:

$$m_f c_{pf} \frac{d\bar{T}_f}{dt} = q'(t) - \frac{1}{R'_g} [\bar{T}_f(t) - \bar{T}_c(t)] \quad (8)$$

$$m_c c_{pc} \frac{d\bar{T}_c}{dt} = \frac{1}{R'_g} [\bar{T}_f(t) - \bar{T}_c(t)] - \frac{1}{R'_c} [\bar{T}_c(t) - \bar{T}_m(t)] \quad (9)$$

donde  $R'_g$  y  $R'_c$  son resistencias térmicas por unidad de longitud y están definidas como

$$R'_g = \frac{1}{8\pi k_f} + \frac{1}{2\pi a h_g} + \frac{1}{2\pi k_c} \left[ \left( \frac{b^2}{b^2 - a^2} \right) \ln \left( \frac{b}{a} \right) - \frac{1}{2} \right] \quad (10)$$

$$R'_c = \frac{1}{2\pi k_c} \left[ \frac{1}{2} - \left( \frac{a^2}{b^2 - a^2} \right) \ln \left( \frac{b}{a} \right) \right] + \frac{1}{2\pi b h_c} \quad (11)$$

En estas ecuaciones  $T_f$  y  $T_c$  son las temperaturas medias del combustible y el encamisado, respectivamente.

Las ecuaciones anteriores se complementan con la parte hidráulica, la cual se obtiene a partir de las ecuaciones de conservación de masa, energía y momentum para cada región en el canal.

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial G_m}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial G_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{G_m^2}{\rho_m^+} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{f G_m |G_m|}{2D_e \rho_m} - \rho_m g \cos \theta \quad (13)$$

$$\rho_m \frac{\partial h_m}{\partial t} + G_m \frac{\partial h_m}{\partial z} = \frac{q'' P_h}{A_z} + \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{G_m}{\rho_m} \left( \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{f G_m |G_m|}{2D_e \rho_m} \right) \quad (14)$$

Estas ecuaciones de conservación se resuelven aplicando el modelo de la integral de momentum [9], donde se asume que el refrigerante es incompresible pero térmicamente expandible, y la densidad es función de la entalpía a presión constante.

Las ecuaciones para el combustible se integran mediante el método de Euler, y las ecuaciones de conservación se resuelven mediante una formulación en diferencias finitas.

En el núcleo de un reactor tipo BWR, los ensambles de combustible están comunicados en sus extremos por un pleno inferior y uno superior, de manera que la caída de presión es la misma para todos los ensambles. Asumiendo que el flujo total proporcionado por los lazos de recirculación es constante, este flujo se distribuye entre todos los canales para lograr una misma caída de presión. Esta distribución de flujo se realiza de manera iterativa realizando una corrección hasta igualar las caídas de presión. Para la iteración  $k+1$  se corrige el flujo según los resultados de la iteración  $k$ :

$$G_i^{k+1} = G_i^k + w G_i^k \left( \frac{\bar{P}^k - P_i^k}{P_i^k} \right) \quad (15)$$

donde  $G_i$  representa el flujo en el canal  $i$ ,  $P_i$  es la presión del canal  $i$  en la iteración  $k$  y  $\bar{P}^k$  es el promedio de todas las caídas de presión en la iteración  $k$ :

$$\bar{P}^k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i^k \quad (16)$$

Se considera que la condición de igual caída de presión se satisface cuando se cumple la siguiente relación:

$$\sum_{i=1}^N |\bar{P}^k - P_i^k| < \varepsilon \quad (17)$$

donde  $\varepsilon$  es un número arbitrariamente pequeño.

Para cada iteración, al modificar el flujo en cada canal es necesario actualizar la entalpía y la fracción de vacíos.

### 2.3. Aplicación a un reactor BWR con generación de ruido

Para aplicar los modelos descritos en las secciones anteriores se selecciona el reactor Ringhals, particularmente el ciclo 14 de operación [10]. Este ciclo se selecciona por tener documentado un caso de inestabilidad, donde el núcleo del reactor presenta una oscilación fuera de fase en su distribución de potencia. El núcleo del reactor consiste de 648 ensambles, a partir de los cuales se definen quince de manera que representen la operación de todo el núcleo. La información proporcionada por el Benchmark de Estabilidad proporciona el perfil axial de potencia para cada canal, así como información importante de operación. De particular interés es el caso de prueba número 9, caso que presenta una oscilación fuera de fase. En este caso se opera a 72.6% de potencia nominal con un flujo en el núcleo de 3,694 kg/s.

Los ensambles del núcleo de Ringhals están colocados en una retícula de 30 por 30 ensambles, donde las esquinas son suprimidas para aproximar la geometría a una circunferencia, obteniendo un total de 648 ensambles. Al resolver preliminarmente la ecuación de difusión en 30 nodos, se tienen problemas de convergencia para definir el eigenvalor, por lo que el número de nodos se incrementa a 60. Esta configuración produce una matriz de 120 por 120 con cuatro bloques, dos de ellos de 60X60. El primer bloque es una submatriz tridiagonal que contiene 60 ecuaciones diferenciales, una para el flujo en cada nodo, y otro bloque es una matriz diagonal que contiene 60 ecuaciones diferenciales para los precursores de cada nodo. Dos bloques contienen únicamente ceros.

El sistema matricial de 120 ecuaciones diferenciales se resuelve mediante un programa para ecuaciones diferenciales basado en el método de Runge Kutta con control adaptivo del paso de integración [11].

Para la parte termohidráulica, la Figura 1 muestra el agrupamiento de canales. Para cada grupo se obtiene un perfil de potencia axial promedio, y a cada uno de estos perfiles se le ajusta un polinomio de sexto orden para definir una función de buen comportamiento y fácil de integrar, útil para calcular las variables termohidráulicas. Los 15 perfiles resultantes se integran y normalizan para definir su contribución a la potencia total generada. El lado derecho de la Figura 1 muestra el perfil radial obtenido al calcular la contribución de cada canal a la potencia total.

El perfil obtenido en la Figura 1 se fija como objetivo y se itera el valor de las secciones eficaces en la solución estática de la ecuación de difusión para obtener un perfil semejante y adicionalmente lograr un eigenvalor unitario con una tolerancia menor a  $10^{-6}$ . Al obtener un núcleo crítico se facilita iniciar con un buen estado estacionario durante la parte dinámica.

La solución en el tiempo a la ecuación de difusión permite actualizar la potencia entregada a cada canal, asumiendo que el perfil axial de cada canal se mantiene constante.

Para el cálculo termohidráulico se requiere inicialmente alcanzar un estado estacionario en el cual la caída de presión en todos los canales es la misma. Posteriormente se perturba el sistema con ruido mediante una contribución aditiva de ruido blanco a la solución del flujo de refrigerante. Dado que la media de la perturbación es cero, en promedio las caídas de presión se mantienen constantes, al igual que la potencia. Este esquema permite obtener mediciones de potencia estacionarias, adecuadas para análisis de series de tiempo

Particularizando el caso a modelar, se selecciona el caso 9 de Ringhals, con operación a 72.6% de potencia a un flujo en el núcleo de 3694 kg/s. La potencia de los 15 canales se define de esta manera en 1,648 MWth:

$$Q_{core} = \frac{C}{N} \sum_{i=1}^N n_i I_i \quad (18)$$

Donde  $Q_{core}$  es la potencia térmica del núcleo,  $n_i$  es el número de ensambles que integran el grupo  $i$ , y finalmente  $I_i$  es la integral del perfil axial de potencia. Esta ecuación permite evaluar la constante  $C$ , de manera que la contribución de potencia por cada canal es:

$$Q_i = \frac{C}{N} n_i I_i \quad (19)$$

Existen dos tipos de ensambles en el núcleo, ambos de 8X8, y se considera el área de flujo de cada uno de ellos para definir el área de flujo de cada canal. La Tabla 1 muestra los parámetros que definen cada uno de los canales.

La Figura 2 muestra la gráfica de la integral de cada perfil axial mediante cruces, y la línea continua es la solución a la ecuación de difusión en una dimensión, en la cual las secciones eficaces fueron ajustadas para lograr una curva aproximada al perfil actual. Se observa una depresión en el centro del núcleo, y es interesante hacer notar en la Figura 1 que los canales equivalentes se definieron como zonas horizontales en el núcleo. Al realizar el ejercicio de agrupar como zonas verticales se obtiene un perfil radial diferente, sin depresión en la parte central. Es bien sabido que un perfil axial con un pico de potencia en la parte inferior representa un sistema menos estable que un perfil más uniforme, por lo que la depresión en forma de sombrero al agrupar horizontalmente puede sugerir que este perfil menos uniforme puede aumentar la probabilidad de desarrollar inestabilidades. Adicionalmente, al colapsar en grupos horizontales se puede definir una línea neutra de oscilaciones fuera de fase a cero grados, que precisamente fue la que se observó en el caso 9 del Benchmark.

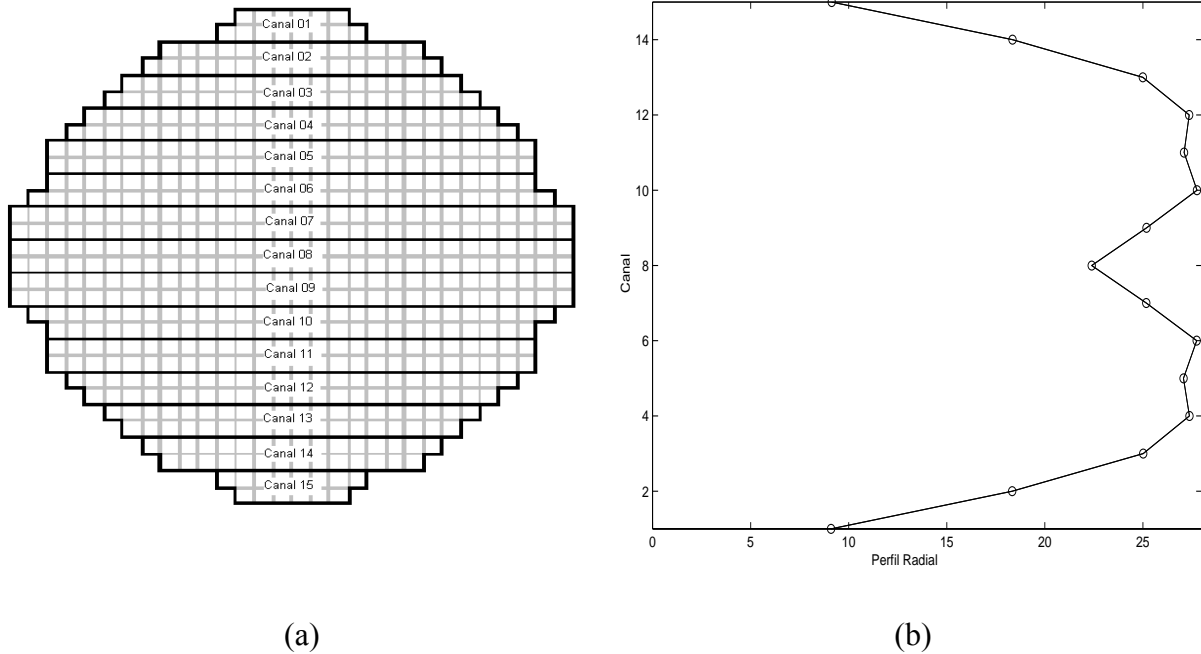


Figura 1. Asignación de ensambles a los canales paralelos



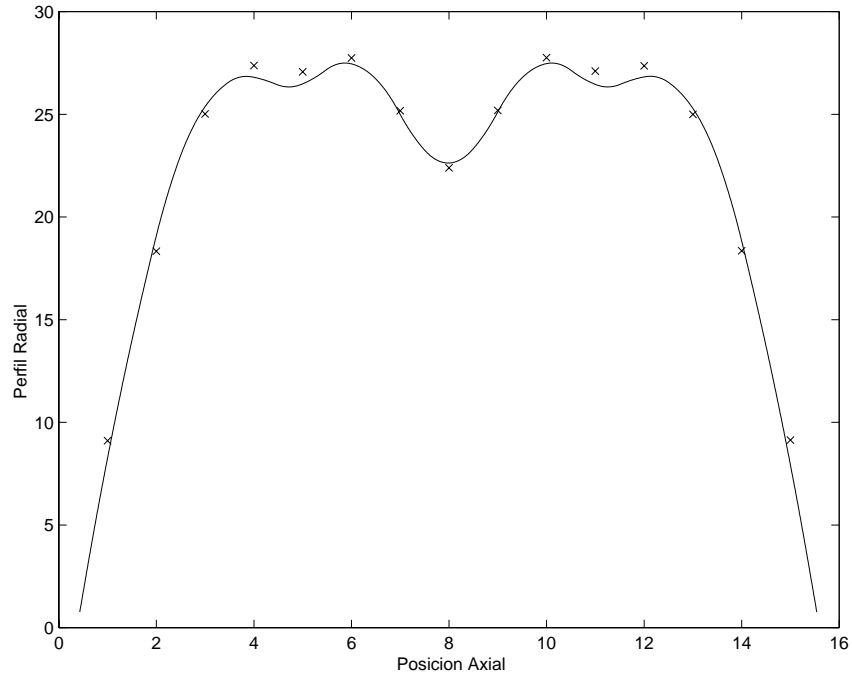


Figura 2. Perfil radial de potencia

El acoplamiento entre la neutrónica y la termohidráulica se define mediante el efecto de la temperatura y de los vacíos en las secciones eficaces cuando el punto de operación se desvía del estado estacionario inicial, como lo muestra la siguiente ecuación:

$$\Sigma_f = \Sigma_{f0} + \frac{\partial \Sigma_f}{\partial T} (T_f - T_{f0}) + \frac{\partial \Sigma_f}{\partial \alpha} (\alpha - \alpha_0) \quad (20)$$

donde la sección eficaz de fisión inicial  $\Sigma_{f0}$  es el valor para un sistema crítico,  $T_f$  es la temperatura promedio de la pastilla de combustible, y  $\alpha$  es la fracción de vacíos promedio.

Como se mencionó anteriormente, el estado estable se obtiene cuando la caída de presión es la misma para todos los canales, y este requerimiento se cumple evaluando las ecuaciones (15) a (17) de manera iterativa. Al alcanzar el estado estacionario, se introduce la perturbación consistente en ruido blanco.

### 2.3. Aspectos computacionales

Los cálculos numéricos se realizan mediante un arreglo de estaciones de trabajo intrerconectadas entre sí mediante red Ethernet, empleando el software Parallel Virtual

Machine (PVM) [12]. El arreglo contiene dos estaciones de trabajo Compaq DS20 con sistema operativo Tru64 UNIX, una estación de trabajo Alpha AU600 con Digital UNIX V4.0D y dos computadoras personales con sistema operativo Linux, kernel 2.2.16-22. El conjunto de CPUs se coordinan mediante un esquema maestro-esclavo, donde la DS-20 que funge como maestra realiza los cálculos de la neutrónica y coordina a las tareas de los esclavos, que consisten en la solución de la temohidráulica para algunos de los 15 canales paralelos. Para este esquema se generan dos programas ejecutables, un programa maestro y un programa de canal genérico que se corre en cada esclavo.

### 3. RESULTADOS

Las series de tiempo resultantes al perturbar el conjunto de canales acoplados nuclear-termohidráulicos representan señales de potencia análogas a las obtenidas por la instrumentación de flujo del reactor. Estas series son acondicionadas posteriormente al normalizarlas y extraerles su media. Durante la simulación se selecciona reportar la potencia cada 0.01 segundos, por lo que la frecuencia de muestreo de las señales es de 100 Hz. La Figura 3 muestra la densidad espectral de potencia del canal 5, el cual fue seleccionado arbitrariamente. Las densidades de los otros canales no se muestran por ser muy similares.

La razón de decaimiento y la frecuencia de resonancia para cada canal se obtienen aplicando técnicas de autoregresión [13]. El modelo lineal autoregresivo se calcula minimizando el criterio de Schwarz para obtener el orden óptimo [13], y una vez definido el modelo se calcula su respuesta al impulso. De esta respuesta se definen los parámetros de estabilidad. La Figura 4 muestra una respuesta al impulso típica, en este caso correspondiente al canal 5.

La Figura 5 muestra la razón de decaimiento calculada para cada canal, graficada según su posición axial. De esta figura se observa que los canales presentan valores similares para la razón de decaimiento, con excepción de los canales cercanos a la periferia, que presentan un valor menor. El canal 5 es el que presenta mayor razón de decaimiento. Dado que la razón de decaimiento es una medida de estabilidad, los canales más estables son los de la periferia, y el menos estable es el 5. La frecuencia de resonancia varía entre 0.46 y 0.58 Hz, siendo los canales periféricos los de menor frecuencia, seguidos por el canal central.

El análisis preliminar basado en APRMs de los distintos casos del benchmark reportado en [10] muestra una razón de decaimiento de 0.57 para nuestro caso de estudio, con una frecuencia de resonancia de 0.54 Hz. Estos datos se comparan favorablemente con los resultados obtenidos.

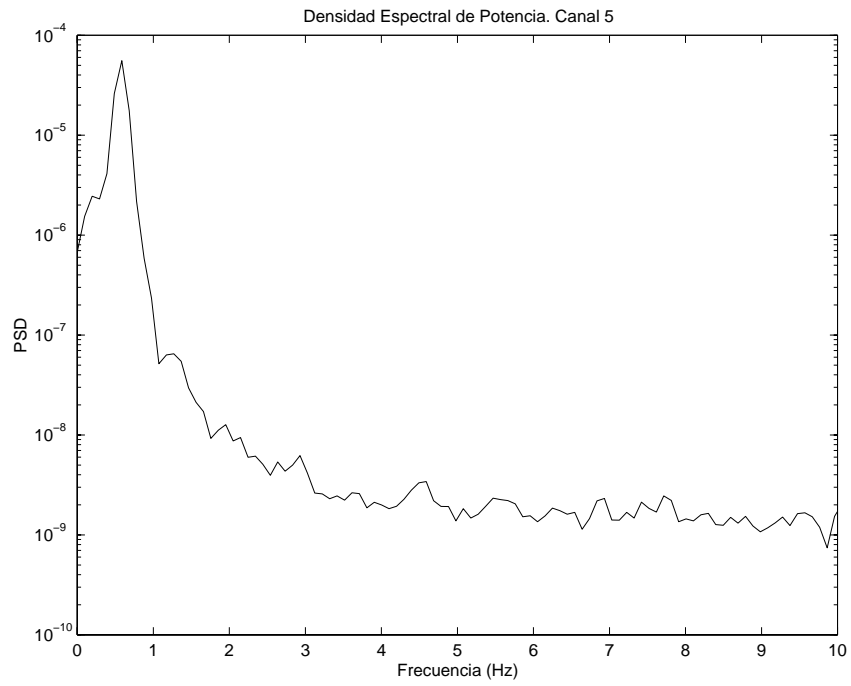


Figura 3. Densidad espectral de potencia para el canal 5

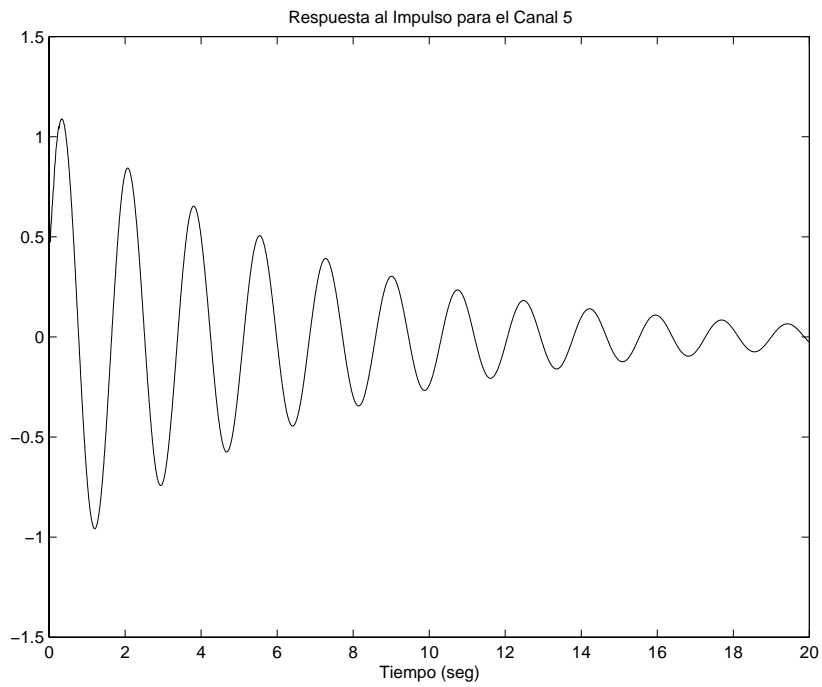


Figura 4. Respuesta al impulso del modelo autoregresivo del canal 5

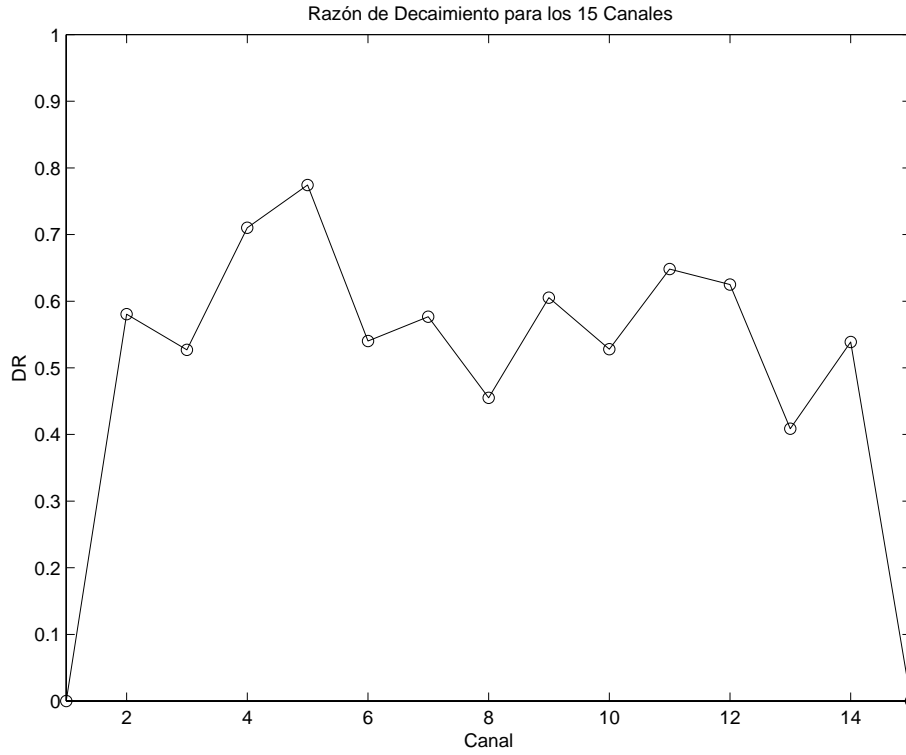


Figura 5. Razón de decaimiento para cada canal

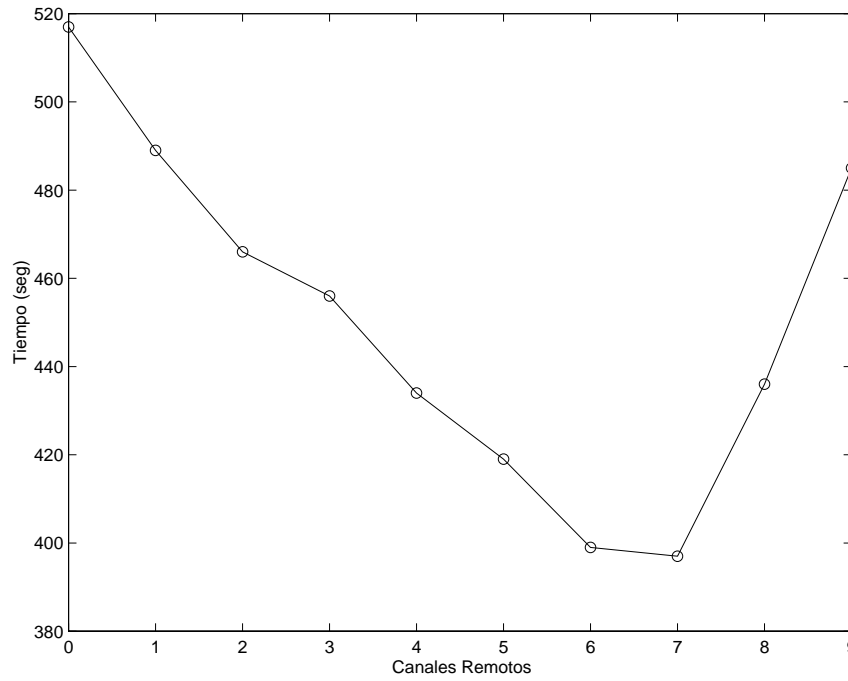


Figura 6. Tiempo de ejecución para dos CPUs idénticos

Respecto al tiempo requerido para simular el sistema, la Figura 6 muestra el efecto de distribuir la carga computacional entre dos CPUs idénticos, donde el tiempo mínimo se logra al asignar 7 canales al esclavo. Para mayor número de CPUs, el tiempo mínimo de ejecución se obtiene al asignar 6 canales al maestro, 4 al esclavo idéntico al maestro, 3 al esclavo Alpha AU600 y 2 al esclavo Pentium III-800MHz. En este caso el tiempo de ejecución se reduce al 70% del tiempo requerido por el maestro para realizar la totalidad de los cálculos.

#### 4. CONCLUSIONES

Las ecuaciones dinámicas de la neutrónica unidimensional y de la termohidráulica que se presentan son capaces de generar series de tiempo estacionarias cuando el flujo de refrigerante inicialmente en estado estable se perturba mediante la adición de ruido blanco. Estas series de tiempo son adecuadas para caracterizar las propiedades dinámicas del sistema mediante técnicas de series de tiempo como modelado autoregresivo.

De mayor interés será observar la respuesta dinámica a una perturbación de secciones eficaces, manteniendo la restricción de igual caída de presión para todos los canales, de manera que el flujo tenderá a redistribuirse y probablemente producirá oscilaciones fuera de fase si se parte de un punto de operación cercano a la frontera de estabilidad. Este escenario será analizado en un trabajo futuro.

Tabla 1. Parámetros de operación para cada canal

Canal	Potencia (MWth)	Flujo (Kg/s)	Area Flujo (m <sup>2</sup> )	Número de Ensamblés
01	13.24	34.31	0.1411	14
02	57.13	142.13	0.2994	30
03	98.74	215.27	0.3734	38
04	130.79	273.49	0.4526	46
05	146.21	312.53	0.5123	52
06	155.61	331.07	0.5339	54
07	156.90	355.64	0.5907	60
08	139.54	336.06	0.5929	60
09	156.96	355.85	0.5907	60
10	155.71	331.31	0.5339	54
11	146.38	312.85	0.5123	52
12	130.73	273.49	0.4526	46
13	98.67	215.15	0.3734	38
14	57.20	141.93	0.2986	30
15	13.28	34.46	0.1411	14

## REFERENCIAS

1. J.L. Achard, D.A. Drew, R.T. Lahey, "The analysis of nonlinear density-wave oscillations in boiling channels," *J. Fluid Mechanics*, **155**, pp 213-232, 1985.
2. M.Z. Podowsky, M.Pinheiro Rosa, "Modeling and numerical simulation of oscillatory two-phase flows, with application to boiling water nuclear reactors," *Nuclear Engineering and Design*, **177**, pp 179-188, 1997.
3. Rizwan-Uddin, J.J. Dorning, "Some nonlinear dynamics of a heated channel," *Nuclear Engineering and Design*, **93**, pp 1-14, 1986.
4. M. Ceceñas-Falcón, R.M. Edwards, "Stability monitoring tests using a nuclear-coupled boiling channel model", *Nuclear. Technology*, **131**, 2000.
5. J.L. Munoz-Cobo, M.Z. Podowski, S. Chiva, "Parallel channel instabilities in boiling water reactor systems: boundary conditions for out of phase oscillations," *Annals of Nuclear Energy*, **29**, pp 1891-1917, 2002.
6. M. Ceceñas Falcón, "Análisis de Estabilidad del BWR Mediante un Canal Acoplado Neutrónico-Termohidráulico," *México Nuclear*, **Vol. 1**, No. 1 pp 8-16, 2000.
7. J.J. Duderstadt and L.J. Hamilton, *Nuclear Reactor Analysis*, John Wiley and Sons, 1976.
8. E.E. Lewis, *Nuclear Power Reactor Safety*, John Wiley and Sons, USA, 1977.
9. N.E. Todreas, M.S. Kazimi, *Nuclear Systems I: Thermal Hydraulic Fundamentals*. Hemisphere Publishing, USA., 1989.
10. T. Lefvert, "OECD/NEA BWR stability benchmark, final specifications," NEA/NSC/DOC(94)13, 1994.
11. W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, B.P. Flannery, *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press, Segunda Edición, 1992.
12. A. Geist et al., *PVM Parallel Virtual machine. A User's Guide and Tutorial for Networked Parallel Computing*. The MIT Press, 1994.
13. George E.P. Box, Gwilym M. Jenkins, Gragory C. Reinsel., *Time Series Analysis, Forecasting and Control*. Tercera Edición, Prentice-Hall 1994.