

Análisis Multivariable de Flujo Biestable

Rogelio Castillo Durán, Javier Ortiz Villafuerte y Jorge A. Ruiz Enciso
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares
Carretera México-Toluca S/N La Marquesa México, CP 52750
rcd@nuclear.inin.mx.; jov@nuclear.inin.mx; jrenciso@nuclear.inin.mx

Gabriel Calleros Micheland
Comisión Federal de Electricidad
Central Laguna Verde
Carretera Cardel-Nautla Km 42.5, Alto Lucero Veracruz
gcm9acpp@cfe.gob.mx

Resumen

En este trabajo se presenta un análisis de flujo biestable con un modelo autoregresivo multivariable. El flujo biestable ocurre en los reactores nucleares de agua en ebullición con bombas de recirculación externas, y se presenta en el cabezal de descarga del lazo de recirculación hacia las bombas de chorro centrales. El fenómeno tiene dos patrones de flujo, uno con mayores pérdidas hidráulicas que el otro. A intervalos irregulares de tiempo, el flujo cambia de patrón de manera aleatoria. Se utilizó el programa NOISE que se encuentra en desarrollo en el ININ y que emplea un modelo autoregresivo multivariable para determinar los coeficientes de autoregresión que contienen la información dinámica de las señales y que posteriormente son empleados para obtener la contribución relativa de potencia, la cual permite establecer la influencia que existe entre las diferentes variables analizadas. Se analizó un evento de flujo biestable ocurrido en un BWR5 a condiciones de operación de 80% de potencia y 69% de flujo total a través del núcleo. Se obtuvo el ruido de las señales de flujo en cada una de las 20 bombas de chorro, de la potencia de un monitor de potencia promedio, de los flujos motrices de recirculación, de los controladores y de la posición de las válvulas de control de flujo en los lazos, de las señales de la instrumentación de las bombas de recirculación (potencia, corriente, caída de presión y temperatura de succión), y de los buses de donde toman el voltaje de alimentación los motores de las bombas. Entre los principales resultados se encontró que el fenómeno de flujo biestable afecta a la caída de presión en la bomba de recirculación del lazo en que ocurre, lo que afecta al flujo motriz en el lazo por lo que responde el sistema de apertura de la válvula de control de flujo de recirculación del lazo.

1. INTRODUCCIÓN

En algunos BWRs con bombas de chorro se han observado cambios aleatorios en el flujo de los lazos de recirculación. Estos cambios son el resultado de un patrón de flujo biestable en la T del

cabezal de descarga del lazo de recirculación y el tubo ascendente de las bombas de chorro centrales, el cual esta centrado con la tubería de descarga de la bomba del lazo [1].

En la cruz donde coinciden la descarga y el tubo ascendente central pueden presentarse los dos patrones de flujo mostrados en la Figura 1. Un patrón de flujo tiene mayores pérdidas hidráulicas que el otro. A intervalos irregulares, el flujo cambia de un patrón al otro de manera aleatoria y luego cambia a su patrón original de flujo.

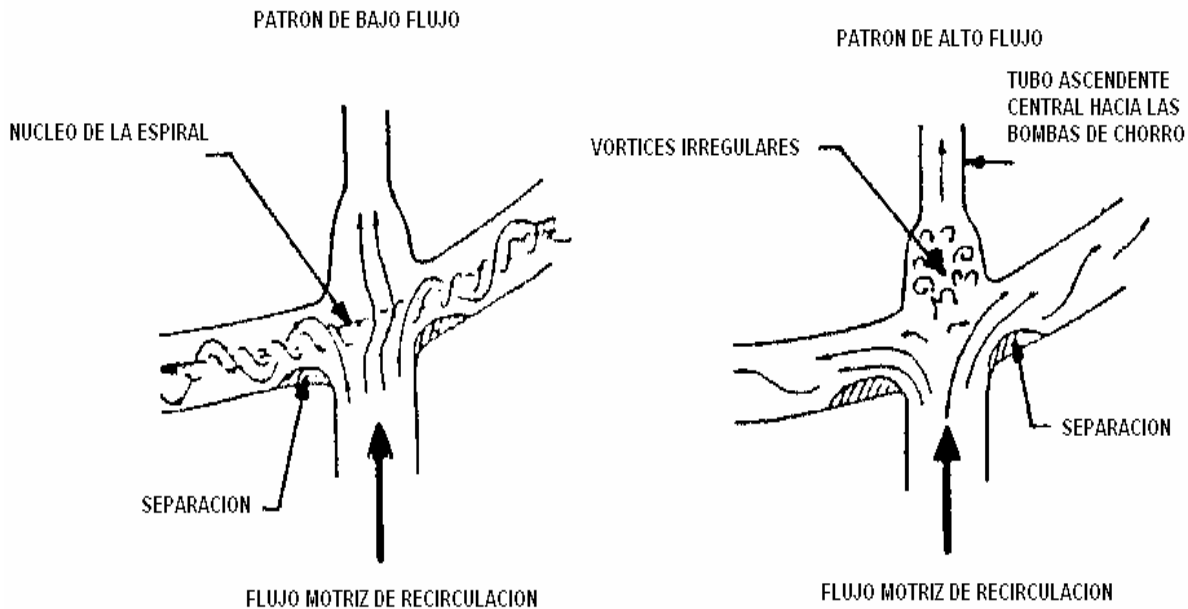


Figura 1. Patrones de flujo biestable

En pruebas experimentales de los lazos de recirculación a escala, se ha observado que el patrón de flujo que produce las mayores pérdidas (y por lo tanto produce menor flujo) consiste en un vórtice espiral en los brazos del cabezal. El otro patrón de flujo tiene una considerable turbulencia pero no contiene los vórtices espirales.

Una vez formados los vórtices, una parte de la cabeza dinámica de la bomba se disipa en estos, reduciendo el flujo hacia los tubos ascendentes laterales. El flujo al tubo ascendente central también cambia como resultado de esta redistribución. Los vórtices son barridos a intervalos irregulares y la rapidez de flujo de los tubos ascendentes laterales se incrementa durante un periodo pequeño de tiempo. Aunque la duración de los cambios de flujo varía considerablemente, la magnitud de los cambios es prácticamente constante.

En algunos BWR se ha presentado continuamente el fenómeno de flujo biestable en operación normal. El fenómeno se ha observado entre 80 y 92% de potencia y entre 69 y 79% de flujo a través del núcleo [2]. La magnitud de las fluctuaciones va desde 0.1% con cambios del flujo

durante breves periodos de tiempo, hasta 1.5% con cambios de flujo más prolongados y que han sido observados a frecuencias que van desde 1 hasta 200 ciclos por hora.

2. ANALISIS DE LA CONTRIBUCION RELATIVA DE POTENCIA

El análisis de la contribución relativa de potencia propuesto por Akaike, es un método utilizado para evaluar sistemas con realimentación y esta basado en modelación autorregresiva multivariable. Este modelo ha sido descrito previamente en detalle [3]. Brevemente, un modelo autorregresivo de k -variables de orden M es expresado como

$$x_i(s) = \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^M a_{ij}(m)x_j(s-m) + u_i(s) , \quad (1)$$

donde $a_{ij}(m)$ son coeficientes de pesado y $u_i(s)$ es un ruido blanco. Para este modelo se requieren las siguientes consideraciones:

- a).- El valor de las series depende sólo de sus valores previos y del ruido blanco $u_i(s)$.
- b).- La dependencia es considerada como una combinación lineal de los valores.

$P(f)$, la k - k matriz de $P_{ij}(f)$ [densidad espectral cruzada de $x_i(s)$ y $x_j(s)$] es expresada como

$$P(f) = A(f)^{-1} \Sigma [A(f)']^{-1} , \quad (2)$$

donde Σ es la k - k matriz de σ_{ij} [la covarianza de $u_i(s)$ y $u_j(s)$].

$$A(f) = - \left[I - \sum_{m=1}^M A(m) \exp(-i 2 \pi f m) \right] , \quad (3)$$

donde $A(m)$ es la matriz k - k de $a_{ij}(m)$. Suponiendo que $\sigma_{ij} = 0$ ($i \neq j$), se produce

$$p_{ii}(f) = \sum_{j=1}^k |A(f)_{ij}^{-1}|^2 \sigma_{jj}^2 , \quad (4)$$

donde σ_{jj} es la autocovarianza de $u_j(s)$, y

$$q_{ij}(f) = |A(f)_{ij}^{-1}|^2 \sigma_{jj}^2 , \quad (5)$$

donde $q_{ij}(f)$ representa la porción de $p_{ij}(f)$ originada en el ruido blanco $u_j(s)$. La contribución relativa de potencia (RPC) de la variable x_j a la variable x_i es definida por la siguiente ecuación

$$r_{ij} = \frac{q_{ij}(f)}{p_{ii}(f)} . \quad (6)$$

Una contribución relativa de potencia con valor de 0 indicará que x_j no tiene influencia sobre x_i , En cambio, una contribución de potencia con valor de 1 indica que x_i es completamente regulada por x_j , a esa frecuencia.

El modelo anterior fue adicionado al programa en desarrollo NOISE para análisis de ruido como dos nuevos módulos: MARPC que contiene tanto el modelo autoregresivo multivariable como la contribución relativa de potencia, y el módulo GMARPC que grafica la densidad espectral de potencia y la contribución relativa de potencia.

3. METODOLOGIA DE ANALISIS

Para el análisis de flujo biestable se utilizó un respaldo de un muestreo especial a 250 Hz de un BWR 5, en el cual se presentó el fenómeno en el lazo B. Las señales fueron grabadas con una frecuencia de muestreo de 250 Hz y contienen 150,000 datos cada una. Se seleccionaron las siguientes señales:

BJ1, BJ2,..., BJ10	Flujo en las bombas de chorro del lazo A
BJ11, BJ12,..., BJ20	Flujo en las bombas de chorro del lazo B
BUSA y BUSC	Voltaje bus 2A y bus 2C
CVVA y CVVB	Controlador de velocidad de movimiento de la válvula de control de los lazos A y B
FMRA y FMRB	Flujo motriz de recirculación de los lazos A y B
PMBA y PMBB	Potencia del motor de la bomba de recirculación de los lazos A y B
CMBA y CMBB	Corriente del motor de la bomba de recirculación de los lazos A y B
DPBA y DPBB	Caída de presión en la bomba de recirculación de los lazos A y B
TSA y TSB	Temperatura de succión en la bomba de recirculación de los lazos A y B
DPVA y DPVB	Demanda de posición de la válvula de control de los lazos A y B
PVCA y PVCB	Posición de la válvula de control de los lazos A y B
POTA	Potencia del APRM A
FTNR	Flujo total en el núcleo del reactor

Se utilizó el módulo TABULAR para extraer las señales , las cuales posteriormente se decimaron a 5 Hz con el módulo DECIMATE. Se acondicionaron las señales decimadas con el módulo SAVGOL suavizándolas con un polinomio de tercer orden aplicado a 50 puntos. Posteriormente se obtuvo el ruido de las señales empleando el módulo PREACOND para extraer la componente continua con un algoritmo de media recursiva. Por ultimo, con el módulo FORMATEAR se obtuvo el archivo de entrada de MARPC. Todos los módulos antes mencionados forman parte de NOISE [5].

Esta metodología fue utilizada anteriormente con resultados satisfactorios en el análisis del evento de activación de alarmas por alta escala en los monitores de potencia promedio y en el análisis del evento de oscilación de potencia, ambos ocurridos en la Central Laguna Verde [6].

4. ANALISIS DE LAS SEÑALES

Como el evento de flujo biestable se observó en el lazo de recirculación B, el par central de bombas de chorro BJ15 y BJ16 son las involucradas directamente en el fenómeno.

Analizando el lazo de recirculación B junto con sus correspondientes bombas de chorro se obtuvieron los siguientes resultados más importantes:

- No existe contribución significativa de las otras bombas de chorro a la BJ15. Se presenta una dependencia importante de la potencia del motor de la bomba y de la temperatura en la succión. Existe una influencia importante de la potencia y una dependencia pequeña del voltaje del BUSC.
- La densidad espectral de potencia (PSD) de la corriente del motor de la bomba presenta una resonancia a 1 Hz (Fig. 2), la cual es provocada por la potencia del motor y la BJ15 (Fig. 3).
- Aunque el controlador de velocidad de la válvula de control no presenta resonancias si existe una influencia a 1 Hz de las señales de la potencia del motor y de la BJ16, a 1.5 Hz de la potencia del motor y a 1.75 Hz de la potencia del motor y de la BJ 15 (Fig. 4).
- La caída de presión en la bomba en su PSD muestra tres resonancias, a 1, 1.5 y 1.75 Hz (Fig. 5), las cuales son provocadas principalmente por la potencia del motor y la BJ15 a 1 Hz, por la potencia del motor a 1.5 Hz y a 1.75 Hz por la posición de la válvula de control (Fig. 6).
- La PSD de la demanda de posición presenta también la resonancia a 1.75 Hz (Fig. 7), la cual es ocasionada por la posición de la válvula de control (Fig. 8).
- El flujo motriz en el lazo no presenta resonancias importantes, pero si una influencia significativa de la caída de presión en la bomba.
- La potencia del motor de la bomba presenta la resonancia a 1 Hz en la PSD (Fig. 9), la cual es ocasionada por la BJ15 (Fig.10).
- La PSD de la posición de la válvula de control muestra dos resonancias a 1.25 y a 1.57 Hz (Fig. 11), la primera depende de la BJ15 y la segunda de la potencia del motor y del controlador de velocidad de la válvula (Fig. 12).
- No existen resonancias en la PSD de la temperatura de succión de la bomba, pero en la RPC se ve la influencia de la BJ15 y del controlador de velocidad de la válvula de control.

Y para el lazo de recirculación A y sus bombas de chorro se obtuvo que:

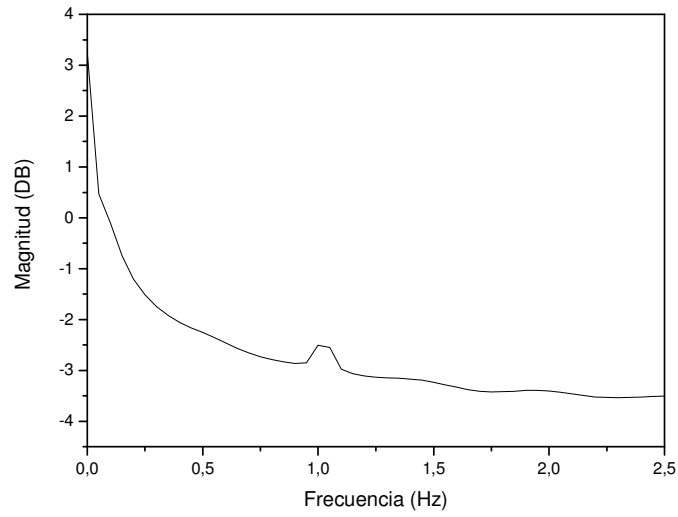


Figura 2. PSD de la corriente del motor de la bomba del lazo B

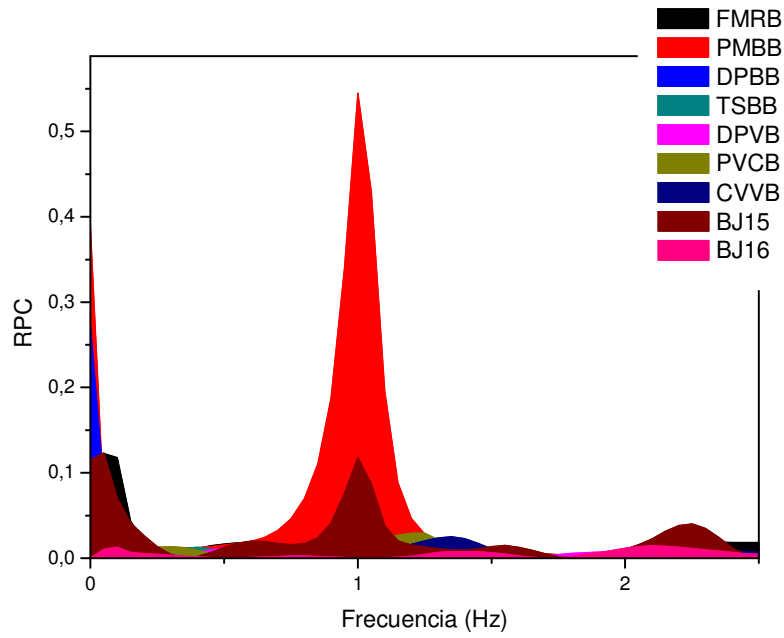


Figura 3. RPC de las señales del lazo B sobre la corriente del motor de la bomba.

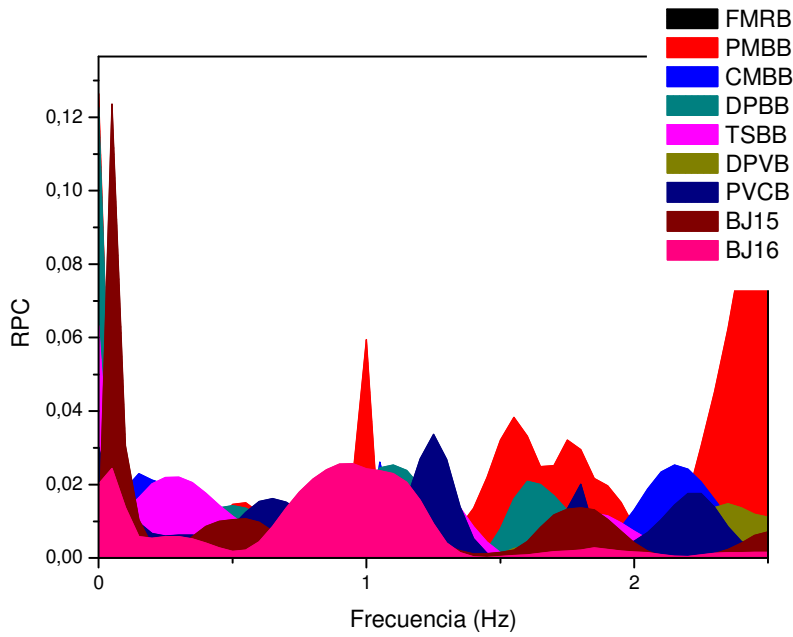


Figura 4. RPC de las señales del lazo B sobre el controlador de velocidad de la válvula de control de flujo.

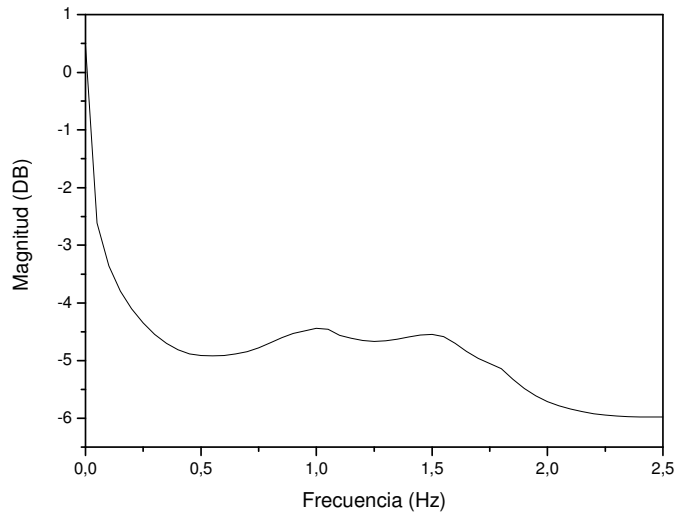


Figura 5. PSD de la caída de presión en la bomba del lazo B

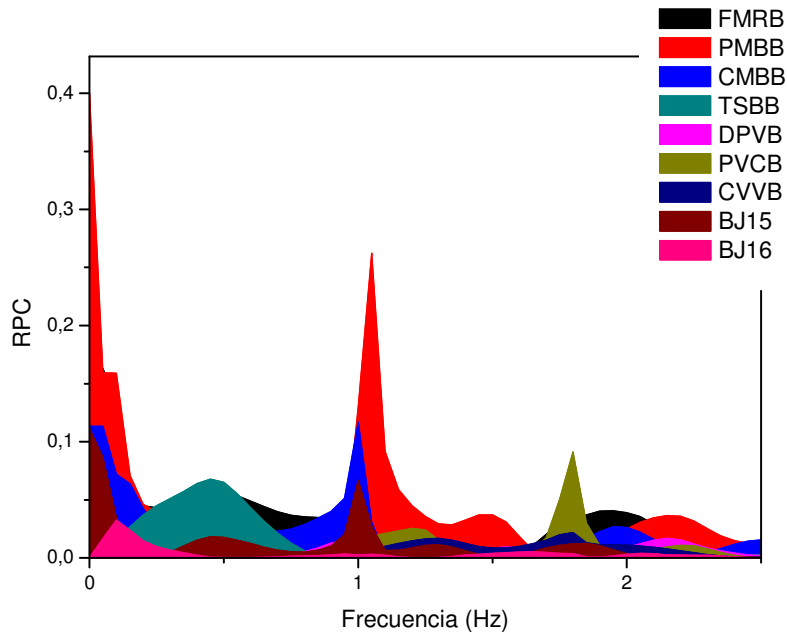


Figura 6. RPC de las señales del lazo B sobre la caída de presión de la bomba

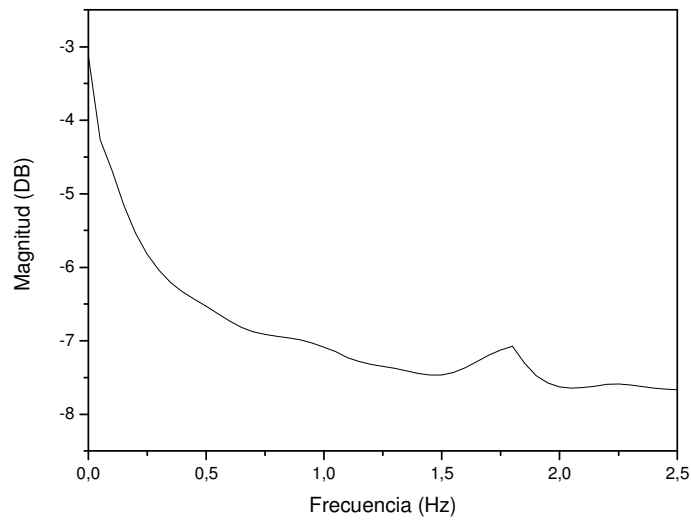


Figura 7. PSD de la demanda de posición de la FCV del lazo B

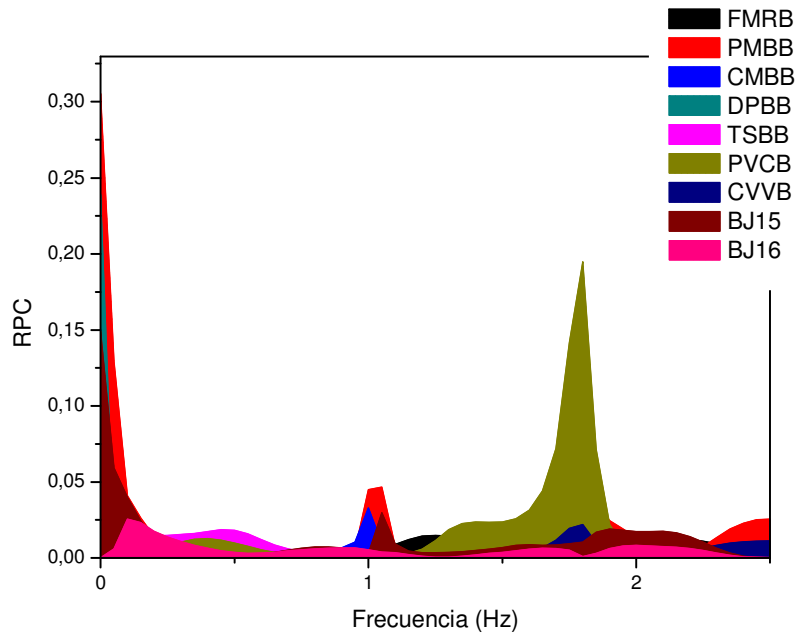


Figura 8. RPC de las señales del lazo B sobre la demanda de posición de la FCV

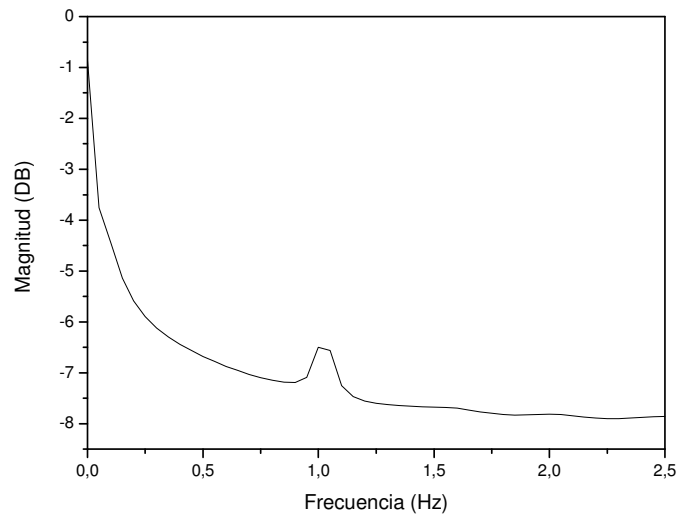


Figura 9. PSD de la potencia del motor de la bomba del lazo B

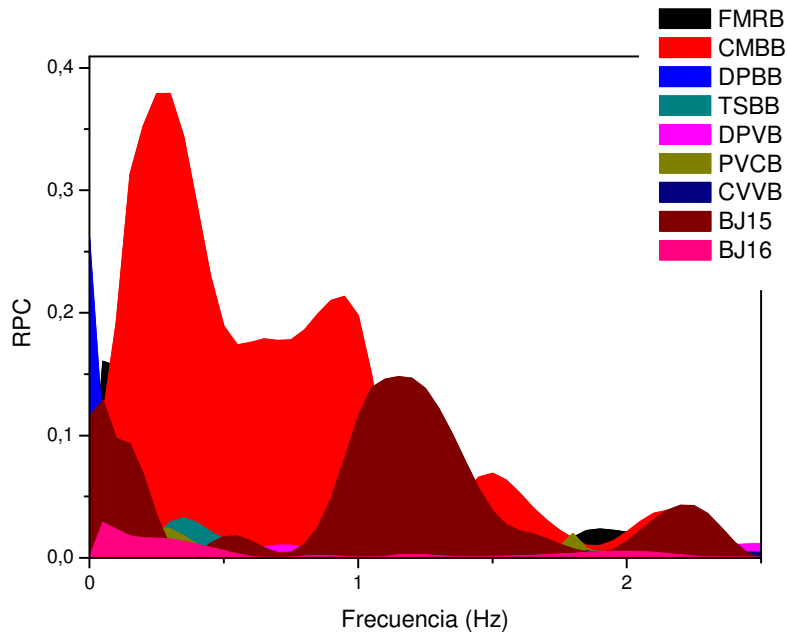


Figura 10. RPC de las señales del lazo B sobre la potencia del motor de la bomba

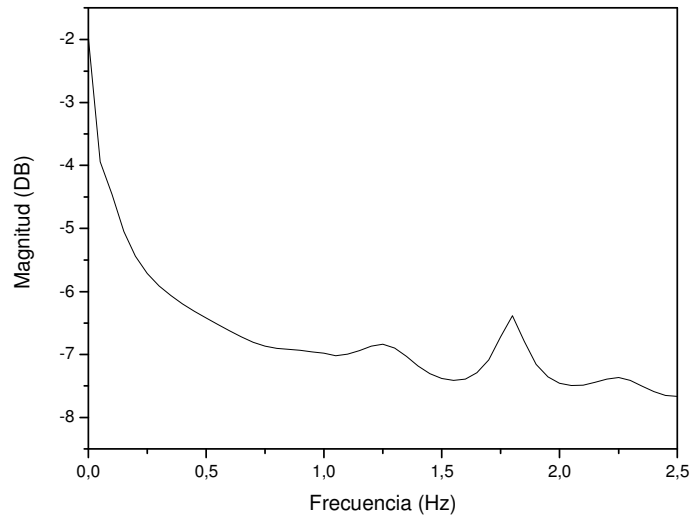


Figura 11. PSD de la posición de la FCV del lazo B

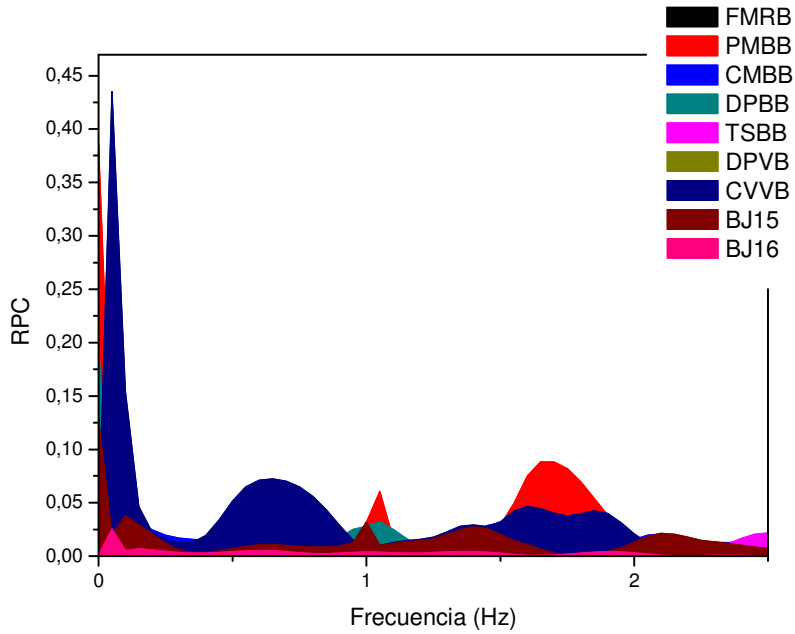


Figura 12. RPC de las señales del lazo B sobre la posición de la FCV

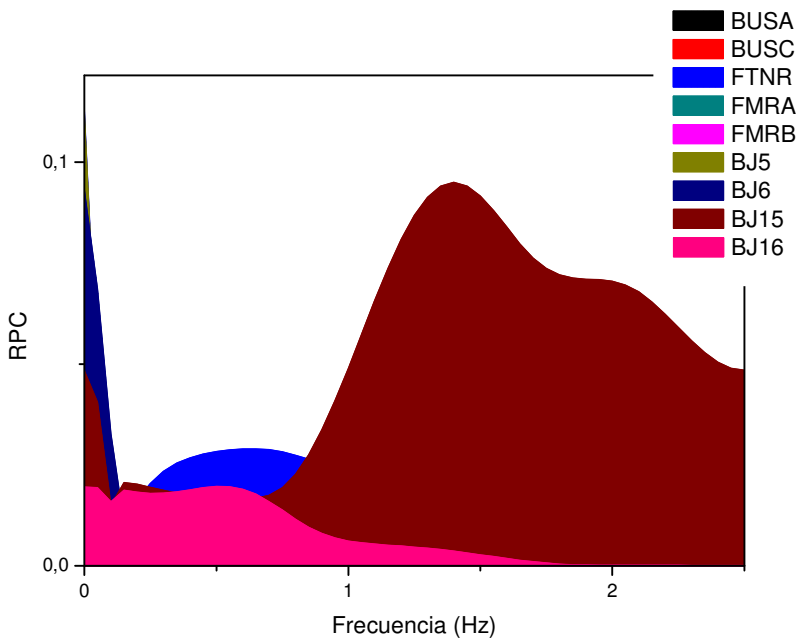


Figura 13. RPC de las señales principales sobre la potencia.

- No se encontraron resonancias significativas en las PSD de las bombas de chorro, ni en las otras señales del lazo, ni tampoco contribuciones relativas de potencia relacionadas con el fenómeno de flujo biestable en la mayoría de las señales.
- En cuanto a las señales tomadas en el lazo de recirculación, la temperatura de succión en la bomba tiene la mayor contribución sobre la BJ5 y depende esta bomba de chorro considerablemente de la BJ15 del otro lazo de recirculación.
- La principal contribución a la corriente del motor de la bomba del lazo A, proviene de su flujo motriz, aunque es pequeña.
- En el flujo motriz de recirculación del lazo A, se tiene influencia de la caída de presión en la bomba y de la BJ15.

Para las señales de los buses, potencia del reactor y flujo total en el núcleo se tiene que:

- Ambos buses presentan influencia de la BJ15 a 1 Hz.
- El flujo total en el núcleo a baja frecuencia depende principalmente de la potencia del reactor y a alta frecuencia de la BJ6.
- La potencia del reactor arriba de 1 Hz tiene una contribución relativa de potencia significativa de la BJ15 (Fig. 13).

La BJ15 contribuye a la potencia del reactor, así como a ambos buses, A y C. También tiene la bomba una influencia significativa sobre las otras bombas de chorro del lazo B, inclusive con la BJ5 del otro lazo.

A 1.75 Hz el controlador de velocidad de la válvula de control del lazo B esta afectando a la posición de la válvula, debido a una demanda de posición. La demanda fue ocasionada por una variación en la caída de presión en la bomba, la cual afecta al flujo motriz de recirculación.

La caída de presión en la bomba depende de la potencia del motor y de la BJ15, además de la posición de la válvula de control. La potencia del motor esta afectada por la corriente y la BJ15, pero la corriente también depende de la BJ15.

Por lo anterior, se puede establecer que el comportamiento presentado en la BJ15 está afectando a la caída de presión en la bomba de recirculación y a la posición de la válvula de control de flujo en el lazo, y por lo tanto, al sistema de control de la posición de la válvula.

5. CONCLUSIONES

Como conclusión se puede mencionar que al ocurrir el flujo biestable en la cruz donde coinciden la descarga y el tubo ascendente central a las bombas de chorro 15 y 16, solo la BJ15 sufre el fenómeno, afectando a la BJ16, a las otras bombas de chorro y al lazo de recirculación, inclusive a la potencia y a la BJ5 del otro lazo. Se pudo establecer que el flujo biestable afecta a la caída de

presión en la bomba de recirculación lo que altera el flujo motriz respondiendo el sistema de apertura de la válvula de recirculación del lazo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado bajo los proyectos de CONACYT SEP-2004-C01 y del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares CA-610. La colaboración del Departamento de Ingeniería del Reactor de la Central Laguna Verde fue muy importante en la realización del trabajo.

REFERENCIAS

1. CFE, *Flujo Biestable en el Sistema de Recirculación de BWRs con Bombas Jet. SIL No. 467*, Reentrenamiento de Personal Licenciado, 2001.
2. CFE, *Resumen de Eventos de Cambios Súbitos en el Flujo del Sistema de Recirculación de Ambas Unidades*, Reporte Interno, 2000.
3. Akaike, H. "On the use of a linear model for the identification of feedback systems", *Ann. Inst. Stat. Math.*, **20**, P. 425-439 (1968).
4. Akaike, H. "Statistical Predictor Identification", *Ann. Inst. Stat. Math.*, **22**, P. 203-217 (1970).
5. Castillo R., "NOISE-Un Programa para Análisis Dinámico en Centrales Nucleoeléctricas", *Memorias del XII Congreso Anual de la Sociedad Nuclear Mexicana*, Zacatecas México, Octubre 2001.
6. Castillo R., Ortiz J., Calleros G., "Análisis Multivariable en el Dominio de la Frecuencia Aplicado a la Central Laguna Verde", *Memorias de la XXIV Reunión Anual de la SMSR y XVII Congreso Anual de la SNM*, Acapulco México, del 3 al 8 de Septiembre, 2006.