

Implementación del Sistema de Supresión de Oscilaciones Termohidráulicas Acopladas a la Neutrónica (OPRM), en la Unidad 2 de la Central Laguna Verde, para Ciclos 7 y 8

***Gabriel Calleros Micheland, Marxlenin Zapata Yáñez, Antonio Méndez Méndez,
Raymundo A. Gómez Herrera***

*Comisión Federal de Electricidad, Central Laguna Verde
Carretera Cardel-Nautla, Km., Alto Lucero, Veracruz
gcm9acpp@cfe.gob.mx; MZapata_Yanez@cfe.gob.mx*

Resumen

Este trabajo aborda el tema de la implementación en el Reactor 2 de la CLV, del método de detección y supresión de oscilaciones termohidráulicas acopladas a la neutrónica de un BWR. Dicho método está contemplado en el Monitor de Oscilaciones en Rango de Potencia (OPRM) incorporado al sistema de Monitoreo en Rango de Potencia Promedio (APRM), el cual analiza las señales provenientes de las lecturas de los 96 detectores en rango de potencia local (LPRM), para determinar si existe inestabilidad en el reactor. La supresión llevada a cabo por el OPRM es de apagado súbito del reactor (SCRAM), al determinar que las señales filtradas sobrepasan los puntos de ajuste de alguno de los tres algoritmos: basado en Período, en Amplitud y en Razón de Crecimiento.

1. INTRODUCCIÓN

Como se sabe, los reactores de tipo BWR, como los de la CLV, son propensos a experimentar oscilaciones termohidráulicas, principalmente cuando existen condiciones de bajo caudal y alta Potencia Térmica. En ambas unidades de la CLV se tienen núcleos homogéneos con combustible GE12, el cual involucra 92 varillas de combustible de enriquecimiento mayor al 3%, algunas de ellas de longitud parcial, con la finalidad de mejorar la refrigeración del ensamble y también aumentar la generación de Plutonio fisionable para alargar los ciclos de operación, lo que a su vez ocasiona exposiciones mayores a los ensambles. Adicionalmente a los requerimientos energéticos, se han implementado estrategias de operación que implican el uso de líneas de carga alta, con flujos entre el 82% y el 100% la mayor parte del ciclo (estrategia MELLLA). Dichas condiciones implican restricciones en los criterios de estabilidad, debido a que ésta se ve afectada por las caídas de presión tanto en el núcleo como en los ensambles (que se incrementan al aumentar los vacíos), por las constantes de tiempo de transferencia de calor (menor en los GE12 por el uso de la barrera entre el encamisado y las pastillas de combustible), por la región en el mapa caudal-potencia donde se realizan las maniobras y por la respuesta de los sistemas de

control.

La CLV adoptó medidas interinas para minimizar la probabilidad de ocurrencia de inestabilidades termohidráulicas, como fueron el empleo de regiones denominadas ICA en el mapa Caudal-Potencia, acompañadas del criterio de estabilidad 1, consistente en garantizar una frontera de ebullición en la parte activa del núcleo de, al menos, 4 pies de altura cuando se operaba en regiones de Entrada Controlada (ICA, antigua Región III). Actualmente se ha adoptado el uso de la Solución de Respaldo para la Estabilidad (BSP), que consiste de áreas delimitadas por funciones exponenciales $f(W_T, P_T)$ para las cuales la razón de decaimiento es constante a lo largo de la misma. Estas funciones se definen como sigue:

$$P = P_B \left[\frac{P_A}{P_B} \right]^{\frac{1}{2} \left[\left(\frac{W - W_B}{W_A - W_B} \right) + \left(\frac{W - W_B}{W_A - W_B} \right)^2 \right]}$$

Donde:

P es la potencia térmica del reactor.

W es el flujo del reactor asociado a la potencia P.

P_A y P_B son dos potencias de referencia donde se realizan estudios de estabilidad en la etapa de diseño del ciclo.

W_A y W_B son dos caudales de referencia, asociados a las potencias anteriores, donde se realizan estudios de estabilidad en la etapa de diseño del ciclo.

Estas curvas están evaluadas para las condiciones de presión y temperatura nominales del reactor (cuando la Temperatura del refrigerante disminuye, las regiones de inestabilidad crecen). En la Figura 1 se muestran las regiones BSP correspondientes a la Unidad 1 Ciclo13.

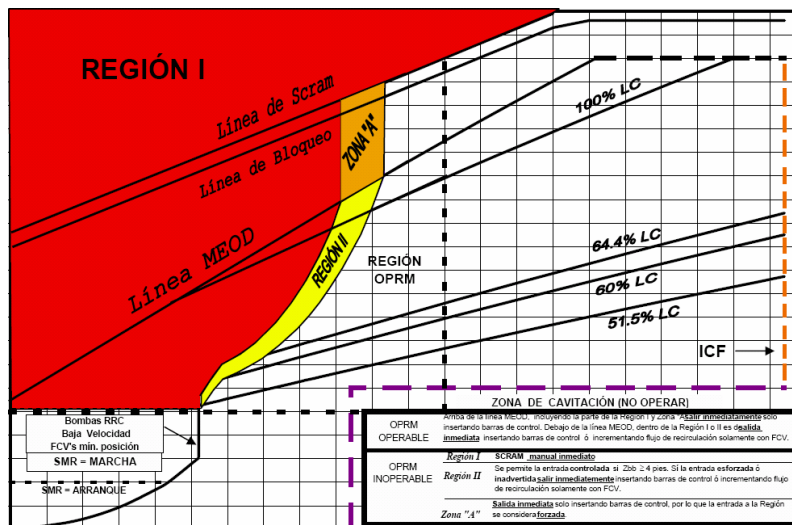


Figura 1. Mapa Caudal-Potencia con regiones BSP. U1C13, CLV.

Actualmente se complementa lo anterior con el empleo de un monitor de detección y supresión

de inestabilidades. Este monitor se basa en el análisis de señales de los LPRM, las cuales se filtran por medio del empleo de un algoritmo de detección basado en el periodo (PBA) y dos algoritmos adicionales, basados en la razón de crecimiento y la amplitud de la señal de flujo neutrónico para defensa en profundidad. El PBA consiste en agrupar y contar el número de veces (eventos) que la señal de flujo neutrónico proveniente de un grupo de 2 a 4 LPRM, denominado celdas, excede un límite preestablecido, aunado a una comparación de la magnitud de la amplitud máxima de la señal de flujo neutrónico. Cuando el número de eventos y la amplitud de la señal de las celdas de detección excede un punto de ajuste determinado, el sistema de supresión realiza el SCRAM automático del reactor.

La implementación del sistema de supresión es importante por otro motivo: los cálculos de estabilidad del núcleo permiten determinar el valor de los puntos de ajuste del OPRM, de tal forma que no se exceda el MCPR Límite de Operación (OLMCPR) resultado de los análisis de transitorios propuestos para el ciclo (AOO, Anticipated Operational Occurrences). Se determina el punto de ajuste a partir de los estudios derivados de la Opción III de estabilidad (OLMCPR_{OIII}), como sigue: cuando se obtiene el MCPR límite de seguridad (SLCPR), se calcula el OLMCPR_{OIII} para el disparo de dos bombas de recirculación, postulando que se reduce la potencia del reactor a un valor equivalente a un flujo del 30%WT. En este punto se realiza el cálculo del MCPR que, asociado con el MCPR en estado estable al 100%PTN, permiten calcular el $OLMCPR(2PT)=f(MCPR_{100\%PTN}, MCPR_{30\%WT})$. Este valor se compara, a su vez, con el OLMCPR_{100%PTN} y el más restrictivo define el OLMCPR_{OIII}. Finalmente este valor se compara con el OLMCPR_{AOO} y el más restrictivo se emplea para definir los puntos de ajuste por Amplitud del OPRM para el PBA. Una vez definido el punto de ajuste de Amplitud, se define el número mínimo de confirmaciones de ondas que se requieren para cumplir con este criterio y disparar al Reactor por PBA. Así, para un MCPR_{30%WT} dado, se determinan los criterios del PBA.

Durante la sexta recarga de combustible de la Unidad 2 se instaló el Sistema Power Range Neutron Monitor (PRNM). Una de sus principales diferencias con respecto al sistema de monitoreo neutrónico anterior es tener implementada la flexibilidad operativa ARTS (APRM o Monitor de Rango de Potencia Promedio, RBM o Monitor de Bloqueo de Barras y Technical Specifications o Especificaciones Técnicas) y el sistema OPRM (Monitor de Oscilaciones en Rango de Potencia).

El PRNM tiene incorporado el OPRM, el cual recibe señales de 16 celdas, cada una con entradas de tres o cuatro LPRM (Monitores Locales en Rango de Potencia). Las celdas están asignadas en distintas localidades del núcleo del reactor para detectar oscilaciones termohidráulicas del reactor acopladas a la neutrónica, tanto locales como globales. Además, el algoritmo que utiliza está conformado de tal manera que a medida que los LPRM asignados a cada celda, se vuelven inoperables o se ponen en baipás, el sistema OPRM se vuelve más sensible.

Con la finalidad de probar el funcionamiento del sistema PRNM se elaboró una prueba para verificar la operación de los sistemas APRM Y RBM de U2 (Referencia 2), con ella se verificaron las funciones operativas de los sistemas APRM, RBM, OPRM y su interfase con la computadora del SIIP (Sistema Integral de Información de Proceso).

Se realiza esta prueba porque las computadoras actuales no son lo suficiente rápidas como para generar pulsos de prueba para las celdas que constituyen el OPRM y verificar el funcionamiento de los OPRM, por lo que dicho sistema tiene que probarse con señales reales de flujo neutrónico.

2. SEGUNDA SECCIÓN

Se realizó un seguimiento operativo del OPRM (Referencia 3), con el propósito de que una vez terminada la prueba de verificación de la operación de los sistemas APRM Y RBM de U2, se realizara la verificación periódica de las funciones operativas del OPRM, así como la verificación de la afinación de los parámetros del OPRM.

La verificación se realizó sin disparos armados, durante el Ciclo 7, con el reactor a potencia. El alcance original, dependiendo de los resultados, era poner en servicio los disparos armados para el RPS (Sistema de Protección del Reactor) y estar en condiciones de suprimir inestabilidades automáticamente por medio de un SCRAM, a partir del Ciclo 8 de la Unidad Dos.

El seguimiento operativo del OPRM se extendió porque se consideró conveniente verificar su comportamiento durante parte del ciclo 8 de la Unidad 2, con el propósito de observar posibles cambios en su respuesta con respecto al ciclo 7. Esto debido a que el núcleo del ciclo 7 estuvo conformado por una mezcla de ensambles GE9B y GE12, a diferencia del núcleo del ciclo 8, constituido en su totalidad por ensambles GE12 (en consecuencia se esperaban señales de LPRM más estables que las asociadas al núcleo heterogéneo del Ciclo 7).

2.1. Resumen de las Conclusiones de la prueba para verificar la operación de los sistemas APRM Y RBM de U2 con Relación a la Parte Aplicable del OPRM

Esta parte de la prueba se aplicó durante el arranque del ciclo 7, al 28% y al 98% de potencia. De lo observado se destaca lo siguiente:

El OPRM se activa y desactiva adecuadamente de acuerdo a los valores de potencia térmica del reactor y caudal de recirculación. Los disparos se deben activar a una potencia mayor o igual al 30% y caudal del núcleo menor o igual al 60%.

El OPRM es muy sensible cuando la potencia es del 98% PTN comparada con la sensibilidad al 28%. Esta sensibilidad cumple con los criterios de aceptación de la prueba.

El OPRM se afinó correctamente en el rango donde éste se activa.

La prueba para verificar la operación de los sistemas APRM Y RBM de U2 fue terminada satisfactoriamente. Como se documenta en el reporte de esta prueba (Referencia 1).

2.2. Resumen de las revisiones prueba para verificar la operación de los sistemas APRM Y RBM de U2 con Relación a la Parte Aplicable del OPRM después de su primera aplicación, 2 de septiembre de 2003.

El 8 de Diciembre de 2003 se modificaron las instrucciones de la prueba para verificar la operación del OPRM (Referencia 3) sin necesidad de poner los canales PRNM respectivos en

baipás siempre y cuando no haya mensajes de disparo. También se corrigieron los criterios de aceptación conforme al GEK-105949 (Referencia 5).

A partir del 31 de agosto de 2004 se fija la frecuencia de corte (f_c) en 1Hz y la tolerancia en el periodo (ϵ) en 100ms, consistente con la Referencia 8. La alarma en el PBA, como criterio de aceptación, se establece 5 cuentas arriba del número máximo de eventos registrados durante un periodo de 5 a 10 minutos. Estas instrucciones modificadas se aplicaron por primera vez el 7 de septiembre de 2004.

La Referencia 5 contiene instrucciones que eliminan la afinación del OPRM para que sea lo suficiente sensible para que la mayoría de las 16 celdas que lo conforman respondan anticipadamente, ante un evento de inestabilidad, como se indica en las Referencias 7 y 8.

2.3. Concepto de la Afinación del OPRM.

La finalidad de la afinación, aplicada hasta el 31 de agosto de 2004, fue la de ajustar la sensibilidad del OPRM para que tuviese la sensibilidad suficiente para anticipar y suprimir eventos de oscilaciones termohidráulicas acopladas a la neutrónica. Pero sin tener demasiada sensibilidad como para enviar una señal de SCRAM ante un evento que no involucre una oscilación, sino que sólo involucre variaciones normales de flujo neutrónico.

La afinación del OPRM se realizó en condiciones estables y se consideró satisfactoria cuando se originaron como máximo, alarmas de oscilación sin originar la señal el disparo del sistema de protección del reactor. La afinación del OPRM se realizó ajustando la frecuencia de esquina o de corte (f_c), la tolerancia del periodo (ϵ) y los periodos mínimo (T_{min}) o máximo (T_{max}).

La frecuencia de corte [Hz] es un filtro pasa altos que permite que el OPRM detecte las señales que tienen una frecuencia mayor que la f_c . Si se aumenta el valor de f_c , disminuirá la sensibilidad del OPRM.

La tolerancia del periodo [milisegundos] determina si dos periodos están lo suficientemente cercanos para ser considerados como una condición de inestabilidad. Si se disminuye el valor de ϵ , bajará la sensibilidad del OPRM.

El Periodo Mínimo [segundos] determina si la diferencia de tiempo entre dos máximos sucesivos (o mínimos sucesivos) está por abajo del rango de la frecuencia de oscilación característica en donde ocurren inestabilidades termohidráulicas del reactor. Si el periodo mínimo se aumenta, la sensibilidad del OPRM disminuye.

El Periodo Máximo [segundos] determina si la diferencia de tiempo entre dos máximos sucesivos (o mínimos sucesivos) está por arriba del rango de la frecuencia de oscilación característica en donde ocurren inestabilidades termo hidráulicas del reactor. Si el periodo máximo disminuye, la sensibilidad del OPRM disminuye.

En la Referencia 4 se menciona que los valores $T_{min} \leq 1.2$ segundos y $T_{max} \geq 3.0$ segundos son aceptables para considerar operable el OPRM y recomienda utilizar $T_{min} = 1.0$ segundo y T_{max}

= 3.5 segundos, para obtener un margen adicional con respecto al periodo que se espera observar en un evento donde se presente una oscilación.

Con relación a la frecuencia de esquina o de corte (f_c) y la tolerancia del periodo (ϵ) para los OPRM, la Referencia 5 recomienda utilizar una $f_c = 2.5$ Hz y una $\epsilon = 150$ milisegundos.

2.3. Resultados de la aplicación de prueba para verificar la operación del OPRM durante el Ciclo 7 de la Unidad 2, 2 septiembre de 2003 a 12 de octubre 2004.

La primera aplicación de la prueba para verificar la operación del OPRM fue el 2 de septiembre de 2003 y desde esta fecha hasta el 14 de septiembre de 2003, se utilizaron los valores obtenidos en la última afinación realizada durante la aplicación de la prueba:

$f_c = 2.5$ Hz.
 $\epsilon = 150$ milisegundos.
 $T_{min} = 1.0$ segundo.
 $T_{max} = 3.5$ segundos.

El 16 de septiembre de 2003 se realizó una nueva afinación para disminuir la sensibilidad del OPRM, conforme a lo indicado en la Referencia 5, obteniéndose:

$f_c = 2.5$ Hz.
 $\epsilon = 150$ milisegundos.
 $T_{min} = 1.4$ segundos.
 $T_{max} = 3.0$ segundos.

A partir de esta fecha y hasta el 08 de octubre del 2003, se utilizaron estos valores.

A partir del 08 de octubre del 2003, para cumplir con las recomendaciones de General Electric (Referencia 4), se utiliza:

$f_c = 2.5$ Hz.
 $\epsilon = 150$ milisegundos.
 $T_{min} = 1.2$ segundos.
 $T_{max} = 3.0$ segundos.

Desde entonces y hasta el 30 de diciembre del 2003, estos valores no se modificaron. El seguimiento operacional que se realizó semanalmente desde el 2 de septiembre del 2003 hasta el 31 de agosto del 2004, comprendió condiciones del reactor entre 61 % y 100 % de potencia y entre 56.2% y 101.6% de caudal del núcleo, como se muestra en la Tabla 1.

Además de los resultados reportados durante la aplicación de la prueba para verificar la operación, en maniobras donde la potencia térmica es de alrededor del 60% y el caudal menor al 60%, se observó la presencia, con cierta frecuencia, de alarmas por número de cuentas en el PBA cuando no existía una evidencia real de alguna oscilación, conforme al comportamiento de los LPRM's y APRM's durante las maniobras. Esto se interpretó como una indicación de que el

OPRM estaba demasiado sensible, por lo que podría originar innecesariamente una señal de disparo y como consecuencia un SCRAM, en condiciones estables del reactor.

A partir del 7 de septiembre de 2004 se aplicó la prueba para verificar la operación del OPRM, modificación 4, conforme a las Referencias 5, 7, 8, 9 y 10. Las condiciones del reactor desde el 7 de septiembre de 2004 hasta el 12 de octubre de 2004 (EOC 7) estuvieron entre 89.3 y 98.8% de potencia y entre 102.4 y 105.9% de caudal del núcleo.

Los parámetros permitidos en el OPRM fueron los siguientes:

Parámetro	Valores Recomendados	Valores Permitidos
Corner frequency (fc)	1.0 Hz	1.0 Hz (8) (10)
Period Tolerance (ε)	100 ms	$100 \leq \epsilon \leq 300$ ms (7) (8)
Minimum	1.00 s	$1.00 \leq T_{min} \leq 1.20$ s (9)
Maximum	3.50 s	$3.00 \leq T_{max} \leq 3.50$ s
Count Trip Setpoint	10	10
Count Alarm Setpoint	≥ 5	≥ 5

Las aplicaciones que se realizaron con la versión modificada de la prueba para verificar la operación del OPRM, han dado lugar, en el algoritmo basado en el periodo (PBA), a que el punto de ajuste de alarma (Count Alarm Setpoint) esté arriba del punto de ajuste de disparo (Count Trip Setpoint) de eventos confirmados para 5 o más cuentas.

Desde el 9 de septiembre del 2003 hasta el 12 de octubre de 2004 se observaron dos alarmas, una el día 11 de marzo de 2004 y otra el 5 de junio de 2004, ambas por PBA. La alarma de PBA, a diferencia del disparo por PBA, no requiere que la amplitud exceda cierto punto de ajuste para que progrese la alarma, debido a que General Electric considera que esta condición es útil para observar el comportamiento del PBA durante el periodo de prueba con el disparo del RPS no conectado al OPRM.

En estos dos eventos no se observó una condición en la que la amplitud excediera el punto de alarma, coincidente con un número alto de cuentas confirmadas. Es decir, si estuviese conectado al RPS el OPRM el disparo no hubiera progresado, por lo que no hubiese ocurrido el SCRAM del reactor, como se indica en la sección 3 de la Referencia 11.

2.4 Resultados de la aplicación de la de prueba para verificar la operación del OPRM durante el Ciclo 8 de la Unidad 2, del 16 noviembre 2004 al 18 de abril 2006.

El seguimiento operacional que se realizó semanalmente desde el 16 de noviembre del 2004 hasta el 18 de abril del 2006, comprendió condiciones del reactor entre 63.6 % y 100 % de potencia y entre 66.8% y 105.6% de caudal del núcleo, como se muestra en la Tabla 1.

El 14 de diciembre de 2004, con el propósito de reflejar lo indicado en las Referencias 12 y 13, se ajustaron los puntos de ajuste por amplitud máxima en los OPRM a los valores siguientes: disparo en 1.10 y alarma en 1.05. Estos valores son menores, y como consecuencia más

conservadores, que los valores iniciales de la prueba para verificar la operación del OPRM, 1.30 y 1.20, respectivamente.

El 23 de septiembre de 2005, se encontró, que los puntos de ajuste por amplitud máxima, antes mencionados, relacionados con la defensa en profundidad, se afectaron, en lugar del punto de ajuste del PBA “Amplitude Trip Setpoint” (con un valor de 1.07), que debe tener un valor de 1.10 conforme a las Referencias 12 y 13. Por tal razón, el 27 de septiembre de 2005, los valores de los puntos de ajuste por amplitud máxima de la defensa en profundidad, se regresaron a su valor inicial 1.30 y 1.20, respectivamente.

Los valores inicialmente modificados, puntos de ajuste por amplitud máxima de la defensa en profundidad, fueron más conservadores que los valores reportados en la prueba para verificar la operación del OPRM. Sin embargo, en todo el seguimiento realizado durante el ciclo 8, las amplitudes máximas que se observaron no excedieron 1.04, es decir, fueron menores que los puntos de alarma por máxima amplitud. Lo cual significa que si el OPRM hubiese estado conectado al RPS no se hubiesen observado alarmas u ocurrido algún SCRAM. El cambiar el valor del punto de disparo por amplitud en el PBA, hace que el disparo por PBA esté aún más lejos (1.10 es mayor que 1.07).

El 13 de diciembre de 2005 inicia la aplicación revisada de la prueba para verificar la operación del OPRM, en la cual, se pide reportar la amplitud máxima observada. Los valores de amplitud que se han mencionado con anterioridad se habían obtenido con un formato adicional que no pertenece a la prueba para verificar la operación del OPRM.

El 17 de diciembre de 2005, no se cumple con el criterio de aceptación para 5 o más cuentas confirmadas entre 0 y 5 minutos. La toma de datos del OPRM se realizó cuando el reactor se encontraba al 79.6%PTN con WT=65.5% durante la prueba de válvulas de turbina, antes de realizar un ajuste de barras de control. En la gráfica de las señales de los LPRM y APRM, se observa una variación. La amplitud máxima observada fue 1.02. El OPRM por estar arriba del 60% de caudal de recirculación (WD=62.86%), no estaba “armado” (o habilitado). Si el OPRM hubiese estado conectado al RPS, no se hubiesen observado alarmas por altas cuentas y el SCRAM no hubiese progresado. Es decir, el OPRM respondió adecuadamente a las variaciones de potencia.

El 17 de enero de 2006, no se cumple con el criterio de aceptación para 5 o más cuentas confirmadas entre 0 y 5 minutos. La toma de datos del OPRM se realizó cuando el reactor se encontraba al 99.9% PTN con WT=93.7%. Se inserta un valor sustituto en la señal de WT en el SIIP, con el propósito de trabajar en las Bombas de Chorro (Bombas Jet) de recirculación, lo cual se refleja en las gráfica de esta señales. No se observa variación en las señales de los LPRM y APRM. La amplitud máxima observada fue 1.03. El OPRM por estar arriba del 60% de caudal de recirculación (WD=93.83%), no estaba “armado” (o habilitado). Si el OPRM hubiese estado conectado al RPS, no se hubiesen observado alarmas por altas cuentas y el SCRAM no hubiese progresado.

El 24 de enero de 2006, no se cumple con el criterio de aceptación para 5 o más cuentas confirmadas entre 0 y 5 minutos en el OPRM A. La toma de datos del OPRM se realizó cuando el reactor se encontraba al 99.9% PTN con WT=93.9%. No se observa variación en las señales de

los LPRM y APRM. La amplitud máxima observada fue 1.02. El OPRM por estar arriba del 60% de caudal de recirculación (WD=94.98%), no estaba “armado” (o habilitado). Si el OPRM hubiese estado conectado al RPS, no se hubiesen observado alarmas por altas cuentas y el SCRAM no hubiese progresado.

El 7 de febrero de 2006, no se cumple con el criterio de aceptación para 5 o más cuentas confirmadas entre 0 y 5 minutos en el OPRM B. La toma de datos del OPRM se realizó cuando el reactor se encontraba al 99.9% PTN con WT=98.5%. No se observa variación en las señales de los LPRM y APRM. La amplitud máxima observada fue 1.03. El OPRM por estar arriba del 60% de caudal de recirculación (WD=100.43%), no estaba “armado” (o habilitado). Si el OPRM hubiese estado conectado al RPS, no se hubiesen observado alarmas por altas cuentas y el SCRAM no hubiese progresado.

El 21 de febrero de 2006, no se cumple con el criterio de aceptación para 5 o más cuentas confirmadas entre 0 y 5 minutos. La toma de datos del OPRM se realizó cuando el reactor se encontraba al 99.8% PTN con WT=96.4%. No se observa variación en las señales de los LPRM y APRM. La amplitud máxima observada fue 1.02. El OPRM por estar arriba del 60% de caudal de recirculación (WD=98.03%), no estaba “armado” (o habilitado). Si el OPRM hubiese estado conectado al RPS, no se hubiesen observado alarmas por altas cuentas y el SCRAM no hubiese progresado.

El 28 de febrero de 2006, no se cumple con el criterio de aceptación para 5 o más cuentas confirmadas entre 0 y 5 minutos para los OPRM B, C y D. La toma de datos del OPRM se realizó cuando el reactor se encontraba al 99.9% PTN con WT=100.1%. No se observa variación en las señales de los LPRM y APRM. La amplitud máxima observada fue 1.04. El OPRM por estar arriba del 60% de caudal de recirculación (WD=100.39%), no estaba “armado” (o habilitado). Si el OPRM hubiese estado conectado al RPS, no se hubiesen observado alarmas por altas cuentas y el SCRAM no hubiese progresado.

El 28 de marzo de 2006, no se cumple con el criterio de aceptación para 5 o más cuentas confirmadas entre 0 y 5 minutos para los OPRM A y B. La toma de datos del OPRM se realizó cuando el reactor se encontraba al 99.9% PTN con WT=102.0%. No se observa variación en las señales de los LPRM y APRM. La amplitud máxima observada fue 1.03. El OPRM por estar arriba del 60% de caudal de recirculación (WD=100.8%), no estaba “armado” (o habilitado). Es decir, si el OPRM hubiese estado conectado al RPS, no se hubiesen observado alarmas por altas cuentas y el SCRAM no hubiese progresado.

El 11 de abril de 2006, no se cumple con el criterio de aceptación para 5 o más cuentas confirmadas entre 0 y 5 minutos para los OPRM B, C y D. La toma de datos del OPRM se realizó cuando el reactor se encontraba al 96.8% PTN con WT=105.7%. No se observa variación en las señales de los LPRM y APRM. La amplitud máxima observada fue 1.03. El OPRM por estar arriba del 60% de caudal de recirculación (WD=101.77%), no estaba “armado” (o habilitado). Es decir, si el OPRM hubiese estado conectado al RPS, no se hubiesen observado alarmas por altas cuentas y el SCRAM no hubiese progresado.

<i>TABLA I</i>				
<i>SEGUIMIENTO OPERACIONAL DEL OPRM EN LA</i>				
<i>UNIDAD 2 DE LA CENTRAL LAGUNA VERDE</i>				
<i>Fecha</i>	<i>Alarma Presente (Si / No)</i>	<i>Disparo Presente (Si / No)</i>	<i>Potencia Térmica(%)</i>	<i>Caudal Total del Núcleo(%)</i>
20030902	NO	NO	99.9	93.4
20030909	NO	NO	99.8	94.6
20030914	NO	NO	79.5	65.1
20030914	NO	NO	65.2	67.5
20030916	NO	NO	75.7	66.6
20031008	NO	NO	100.1	92.9
20031230	NO	NO	99.9	96.8
20040106	NO	NO	99.9	99.9
20040113	NO	NO	99.7	97.9
20040203	NO	NO	99.9	96.3
20040311	SI	NO	61.9	56.2
20040406	NO	NO	100.0	95.7
20040504	NO	NO	99.9	98.8
20040605	SI	NO	69.6	63.7
20040831	NO	NO	99.8	100.6
20040907	NO	NO	98.8	103.3
20041012	NO	NO	89.3	105.5
20041204 (BOC 8)	NO	NO	99.8	96.2
20041214	NO	NO	99.9	91.6
20050412	NO	NO	99.8	94.1
20050913	NO	NO	99.8	91.1
20050927	NO	NO	99.8	91.5
20051213	NO	NO	99.8	92.8
20051217	NO	NO	79.5	65.5
20060117	NO	NO	99.9	93.7
20060207	NO	NO	99.9	98.5
20060214	NO	NO	100.0	93.2
20060221	NO	NO	99.8	96.4
20060228	NO	NO	99.9	100.1
20060307	NO	NO	100.0	103.5
20060314	NO	NO	99.8	96.7
20060320	NO	NO	99.8	100.2
20060328	NO	NO	99.9	102.0
20060404	NO	NO	98.9	104.9
20060411	NO	NO	96.8	105.7
20060418	NO	NO	94.1	105.6

2.6 Análisis de Resultados

Los criterios de aceptación de las pruebas de instalación y de seguimiento operativo, al inicio del Ciclo 7 de la Unidad 2, estaban basados en el concepto de afinación del OPRM, la cual, permitía al usuario afectar la frecuencia de corte (f_c) y tolerancia en el periodo (ϵ).

La experiencia operacional externa mostró que:

Con la afinación del OPRM, el usuario podría disminuir demasiado la sensibilidad del OPRM y como consecuencia no actuar ante una inestabilidad. Por lo que el fabricante (General Electric) elimina el proceso de afinación. La frecuencia de corte se fija en 1.0 Hz. (Referencias 8 y 10). La tolerancia en el periodo puede ajustarse en el intervalo $100 \leq \epsilon \leq 300$ ms (Referencias 7 y 8). El periodo mínimo puede ajustarse en el intervalo $1.00 \leq T_{min} \leq 1.20$ s (Referencia 9). El OPRM debe estar armado desde el 25% PTN (Referencia 6).

Como parte de la experiencia interna de CFE sobre el seguimiento del OPRM al inicio del ciclo 7, se revisó la prueba de seguimiento operativo, incorporando:

- a) Instrucciones para observar el comportamiento del OPRM sin tener que colocarlo en baipás cuando no haya alarmas presentes en éste.
- b) Instrucciones para que la alarma por cuentas consecutivas para el PBA, se fije por arriba del punto de disparo, para no molestar al operador con alarmas innecesarias.
- c) Tabla con los puntos de disparo permitidos en el OPRM conforme al SRLR y RLTON de U2C8 (Referencias 12 y 13).
- d) El OPRM se “arma” adecuadamente conforme a las condiciones de potencia y flujo de recirculación.

En la prueba de seguimiento operativo se estableció un criterio de aceptación para 5 o más cuentas confirmadas. El no cumplir este criterio de aceptación, significa que el OPRM está demasiado sensible y como consecuencia podría ocurrir un SCRAM en una condición en la que no haya inestabilidad termohidráulica acoplada a la neutrónica en el reactor.

En los casos en lo que no se cumplieron los criterios de aceptación para 5 o más cuentas confirmadas, se observó que la amplitud nunca rebasó 1.04, por lo que si el OPRM hubiese estado conectado al RPS, no hubiese progresado el SCRAM.

Se confirmó que la constante de tiempo de filtro promedio está correcta en el EPROM.

4. CONCLUSIONES

El OPRM es la solución propuesta por el BWROG para detectar y suprimir inestabilidades en reactores BWR a través de un algoritmo de detección basado en el periodo y dos algoritmos adicionales, basados en la razón de crecimiento y la amplitud de la señal de flujo neutrónico para defensa en profundidad. El comportamiento mostrado por el OPRM de la Unidad 2 durante la ejecución de la prueba de seguimiento operativo fue satisfactoria, la cual comprendió 64 semanas del Ciclo 7 y 74 semanas del Ciclo 8.

En este periodo de tiempo, se realizó el seguimiento operacional del OPRM bajo dos tipos de diseños de combustible en el núcleo, en el Ciclo 7 una mezcla de combustibles GE9B y GE12B, y en el Ciclo 8, combustible GE12B.

Durante la ejecución de la prueba de seguimiento operativo se observó que el OPRM:

- a) Se “arma” correctamente arriba del 25% PTN y abajo del 60% de caudal RRC.
- b) Responde adecuadamente a los cambios de potencia en los LPRM.
- c) El PBA está discriminando correctamente los eventos en donde para 5 o más cuentas consecutivas, no se cumple el criterio de aceptación, lo cual significa que se excede el punto de disparo por cuentas consecutivas pero sin coincidir el punto de disparo por amplitud requeridos para que progrese el SCRAM automático del reactor.

Al finalizar el Ciclo 8 de la Unidad 2, los puntos de ajuste del OPRM están consistentes con la experiencia operacional externa (Referencias 5, 6, 7, 8, 9, 10) y el diseño del combustible para la Unidad 2 Ciclo 8 (Referencias, 12 y 13).

REFERENCIAS

1. Reporte de la Prueba Operacional 2-FT-264 de los sistemas APRM y RBM de la Unidad 2 de la Central Laguna Verde.
2. Prueba 2-FT-0264 “Prueba Operacional de Sistemas APRM y RBM de U2”.
3. Prueba 2-FT-0266, Seguimiento Operativo del OPRM.
4. Carta 02-10NRC.DOC, MFN 02-091 del 22 de noviembre de 2002.
5. GEK-105549, Operation and Maintenance Instructions NUMAC Power Range Neutron Monitoring System. Volume 1, revisión EA-2.
6. SC03-02, 10CFR21, Stability Option III Armed Region Boundary.
7. SC03-14, 10CFR21, Stability Option III Possible Successive Confirmation Count Resets.
8. SC03-20, 10CFR21, Stability Option III Period Based Detection Algorithm Allowable Settings.
9. SC03-21, 10CFR21, Stability Option III OPRM Tmin Specification.
10. SC03-22, 10CFR21, OPRM Signal Attenuation due to Conditioning Filter.
11. GE-NE-0000-0003-0223-R2, DRF 0000-0003-0223-R1, Class III, Licensing Basis Hot Channel Oscillation Magnitude for Laguna Verde 1 and 2. August 2004.

12. 0000-0026-1209-SRLR Revision 0, Class I, August 2004, Supplemental Reload Licensing Report for Laguna Verde 2 Reload 7 Cycle 8.
13. CLV2C8, Reporte de Límites Térmicos Operacionales del Núcleo (RLTON) para la Central Laguna Verde Unidad 2, Ciclo 8. 26 Octubre 2004.
14. GE-NE-0000-0028-9290-R0, Class III, August 2004, Option III Evaluation for Laguna Verde 2 Cycle 8.
15. GE Document 25A5041AA, Rev. 2 .
16. Carta de David L. Wilmer a Raymundo Gómez del 16 de Febrero 2006. "OPRM Average Filter Time Constant".
17. G. Calleros M., M. Zapata Y., "Estabilidad termohidráulica acoplada a la neutrónica en un BWR", *Memorias de la Reunión Anual de la SNM*.
18. Thie J. A., "Power Reactor Noise", American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois, 1981.
19. Calleros M., G., "Diseño Conceptual de un Sistema de Análisis de Señales de Flujo Neutrónico para Diagnosticar Vibraciones Mecánicas en la Central Laguna Verde", Tesis de Maestría, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional de Buenos Aires, Argentina (Diciembre 2000).
20. Calleros M., G., "Diseño Conceptual de un Sistema para Determinar Vibraciones Mecánicas con Análisis de las Señales de Flujo Neutrónico en los Componentes Mecánicos de los Reactores de la Central Laguna Verde", XII Congreso Anual de la Sociedad Nuclear Mexicana (Octubre 2001).
21. Bengt-Göran Bergdahl, Ritsuo Oguma, Joakim K. H. Karlsson, "Text Book BWR Stability", GSE Power Systems AB, Box 62, 611 22 Nyköping, Sweden (2005).
22. March-Leuba J and Blakeman E.D., A Mechanism for Out-of-Phase Power Instabilities in Boiling Water Reactors, *Nucl. Sci. Eng.*, Vol. 107, pp. 173-179 (1991).
23. Bravo S., J.M. "Analizador de Señales de Flujo Neutrónico de Reactores Nucleares de Potencia BWR", Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México D.F. (2002).