

DIAGNÓSTICO DE LAS VIBRACIONES DEL BARRILETE Y DE LOS ELEMENTOS COMBUSTIBLES EN LOS PWRs DE RINGHALS, SUECIA

Imre Pázsit¹ and C. Montalvo Martín²

¹Chalmers University of Technology, Department of Nuclear Engineering
SE-412 96 Goteborg, Sweden

²Dto. de Física Aplicada a los Recursos Naturales
E.T.S.I. de Minas, U.P.M., 28003 Madrid, Spain
cristina.montalvo@upm.se

1 INTRODUCCIÓN

El diagnóstico de las estructuras internas de los PWR, en particular del barrilete del núcleo y su soporte se pueden realizar por medio del análisis de las señales de los detectores de neutrones extra-nucleares. Se han elaborado varios procedimientos que se han usado en diversas plantas en todo el mundo [1], [2]. El objetivo es la vigilancia de la integridad de la estructura del núcleo y la detección temprana y la cuantificación de signos de fatiga, desgaste, etc en las diferentes estructuras tales como el muelle, la placa de sujeción del barrilete del núcleo, etc.

Esta vigilancia se ha venido realizando en las tres unidades PWR 2, 3 y 4 de la central sueca de Ringhals desde 1970. Durante las últimas dos décadas el trabajo se ha llevado a cabo en el contexto de un contrato de colaboración entre la Universidad de Chalmers y Ringhals. Esta actividad de colaboración ha consistido tanto en el desarrollo de nuevos métodos, la mejora de éstos así como su aplicación continuada para diagnóstico, vigilancia, incluyendo un análisis de tendencia a lo largo del tiempo. Este trabajo describe el desarrollo realizado en los últimos años con un énfasis especial en los tres últimos.

2 ANTECEDENTES

Por medio del análisis de las señales procedentes de los detectores de neutrones extra-nucleares se puede obtener el espectro en frecuencia de los diferentes componentes del núcleo. Los detectores de neutrones extra-nucleares en Ringhals están localizados según se muestra en la Figura 1.

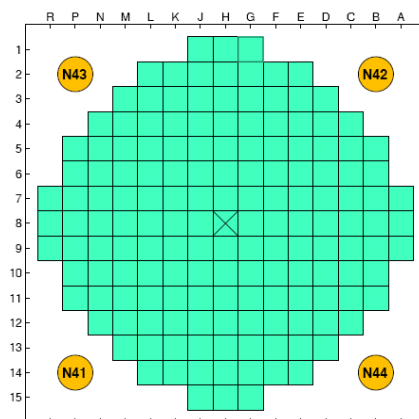


Figura 1: Esquema de localización de los detectores ex-core alrededor del núcleo

Los espectros obtenidos por medio de la transformada de Fourier de la autocorrelación de cada señal de cada detector se muestran en la Figura 2.

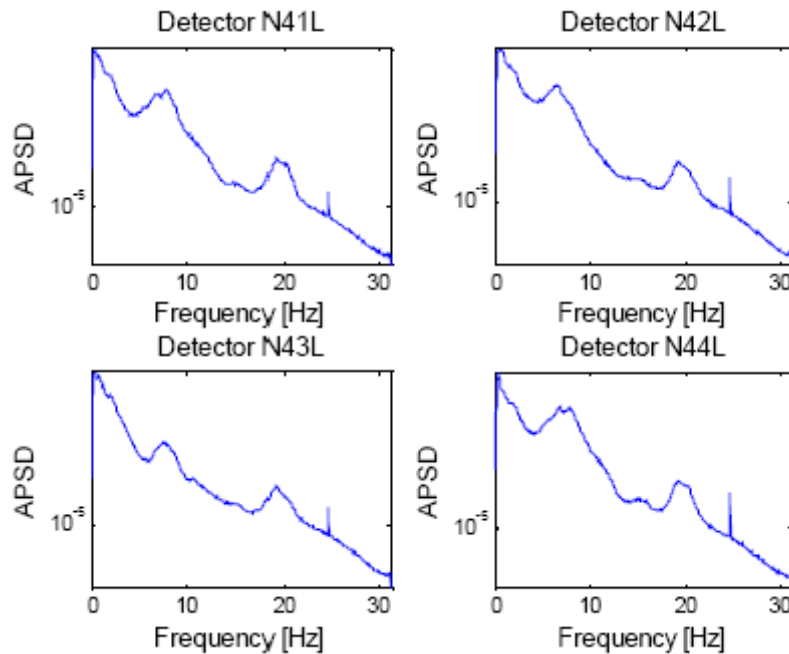


Figura 2: Espectros procedentes de las señales de los detectores ex-core inferiores

Existen dos picos bien diferenciados que describen la vibración del barrilete. Por un lado, en torno a los 8 Hz, se tiene la vibración *Beam Mode*, que se trata del movimiento pendular del barrilete, mientras que por otro lado, en torno a los 20 Hz, se tiene la denominada vibración *Shell Mode*, que describe la vibración de tipo extensional del mismo. Esta última no será estudiada en este trabajo.

Así, a lo largo de los años, se ha podido realizar un análisis del valor de la amplitud del *Beam Mode* en las diferentes unidades PWR de Ringhals observándose un aumento de la amplitud a lo largo del tiempo.

3 DESARROLLOS DESPUÉS DE 2005

El trabajo de diagnóstico se intensificó en 2005 cuando ciertas inspecciones mostraron signos de fatiga y desgaste en la placa inferior del soporte del núcleo y en su equivalente del barrilete. Se tomaron dos a o tres medidas en cada ciclo desde 2005 en todas las unidades y se analizaron regularmente. El primer conjunto de medidas se realizó en Ringhals 3 y 4 antes de la recarga en 2005.

Este conjunto de datos, con varias medidas dentro de un mismo ciclo reveló cualitativamente un nuevo comportamiento, que no se había observado en Ringhals anteriormente. Las amplitudes del *Beam Mode* aumentaban durante el ciclo y volvían a los valores que tenían al principio del ciclo tras la recarga. Vigilando varios ciclos, se pudo observar un comportamiento bastante característico en todas las unidades, en el que la amplitud aumentaba durante el ciclo y disminuía tras la recarga a valores similares al inicio del ciclo anterior. Como ilustración de este comportamiento se muestra la figura 3 de la unidad 4 de Ringhals.

Se realizaron varios intentos para entender la razón de este incremento periódico de las amplitudes dentro del ciclo. Una sugerencia tomada de la literatura es que el factor de escala entre las vibraciones mecánicas y el ruido neutrónico normalizado aumenta con el quemado y con la disolución del contenido de boro en el ciclo. Se han realizado cálculos a este respecto y no se han podido confirmar dichas hipótesis [3], [4]. El factor de escala calculado o bien permanecía constante o incluso disminuyó en el ciclo con el contenido de boro. Por tano, si el pico en las señales de los detectores extra-nucleares se debe a las vibraciones del barrilete del núcleo, entonces el aumento de la amplitud del pico debería corresponder a aumentos periódicos de la amplitud de las vibraciones del barrilete, lo que parece improbable.

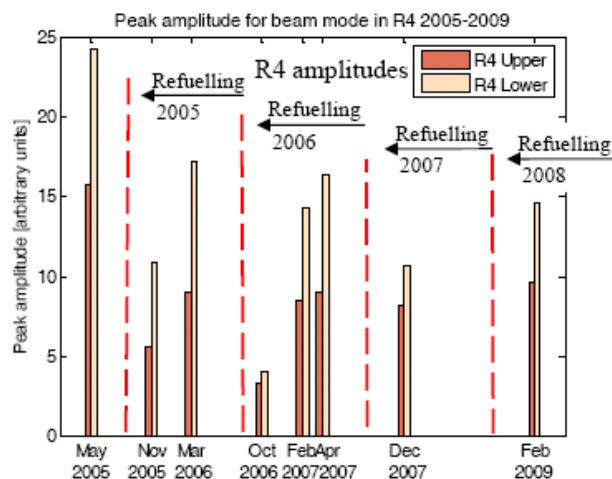


Figura 3: Evolución de la amplitud del *Beam Mode* en varios ciclos en la unidad 4 de Ringhals

Otra característica peculiar de las nuevas medidas fue que las coherencias y las fases entre detectores adyacentes y enfrentados no seguían el patrón esperado supuesto para señales que registran movimientos pendulares. Por ejemplo, la coherencia debería ser alta entre detectores enfrentados, y baja entre detectores adyacentes. En varias de las medidas las coherencias mostraron exactamente el comportamiento contrario.

4 DESARROLLOS RECIENTES: MEDIDAS INTRANUCLEARES Y UN PROCEDIMIENTO DE AJUSTE NO LINEAL.

Una posible explicación para los cambios periódicos de los picos del *Beam Mode* del espectro procedente de los detectores extra-nucleares es asumir que dichos picos no son debidos exclusivamente a vibraciones coherentes del barrilete, sino a vibraciones individuales de los elementos combustibles. Se puede apreciar en la figura 2 que el pico del *Beam-Mode* alrededor de los 8 Hz parece ser doble, tal que posiblemente estemos ante dos vibraciones de orígenes físicos diferentes.

Este supuesto ya se ha planteado anteriormente por Sweeney [5]. Su interpretación de las medidas realizadas en el PWR Sequoyah 1 es que los detectores ex-core sienten parcialmente el movimiento *Beam Mode* del barrilete, por un lado el movimiento colectivo del barrilete como un todo y de manera individual, las vibraciones de los elementos combustibles con la frecuencia de vibración del *Beam Mode* del barrilete, y parcialmente las vibraciones de los elementos combustibles debidas al flujo del refrigerante correspondientes al segundo modo de vibración de éstos. Si las señales de los detectores ex-core están afectadas también por las vibraciones individuales de los elementos combustibles, esto abre un debate para explicar parte de los datos y observaciones inconsistentes.

Para aclarar la situación, se llevaron a cabo dos acciones. Por un lado, se tomaron medidas de ruido neutrónico intranuclear en varias posiciones axiales en el núcleo, y se investigó la dependencia axial de la amplitud del ruido para varias frecuencias [4], [8]. El propósito era identificar los posibles modos de vibración de los elementos combustibles, ya sean vibraciones individuales inducidas por el flujo o vibraciones forzadas debido al movimiento del barrilete. Por otro lado, se implementó un método avanzado de ajuste no lineal basado en la fórmula de Breit-Wigner, tal y como se sugiere en [6] y [7], para resolver y cuantificar objetivamente los picos de los espectros de los detectores extra-nucleares que se solapan [4],[8]. Anteriormente la determinación manual de la amplitud de los picos de vibración no era capaz de resolver objetivamente los picos que estaban muy próximos unos de otros.

4.1 Las medidas analizadas

El desarrollo y la aplicación del procedimiento de ajuste se realizaron en dos etapas. En la primera, se tomaron tres medidas extra-nucleares, tomadas en R4 en otoño de 2006 y en

primavera de 2007, así como una medida intranuclear procedente de 5 detectores móviles, realizada en 2008 en R4. Las medidas intra-nucleares fueron analizadas manualmente, mientras que las medidas extra-nucleares se evaluaron con el nuevo procedimiento de ajuste. Este trabajo se llevó a cabo en la etapa 12 del proyecto de colaboración Ringhals-Chalmers y se puede consultar más detalladamente en [4]. En la segunda etapa, se tomaron simultáneamente tres medidas ex-core e in-core durante la primavera de 2009, y todas las medidas fueron analizadas con el método de ajuste. Esta parte del trabajo constituye parte de la etapa 13 del proyecto de colaboración [8].

4.2 El procedimiento de ajuste

El procedimiento de ajuste se basa en la fórmula de Breit-Wigner tomada de [6],

$$APSD(\omega) = \sum_{\lambda} \left\{ \frac{\mu_{\lambda} A_{\lambda} + (\omega - \nu_{\lambda}) B_{\lambda}}{\mu_{\lambda}^2 + (\omega - \nu_{\lambda})^2} + \frac{\mu_{\lambda} A_{\lambda} - (\omega - \nu_{\lambda}) B_{\lambda}}{\mu_{\lambda}^2 + (\omega + \nu_{\lambda})^2} \right\} \quad (1)$$

donde λ es el índice de los picos encontrados en el espectro, A_{λ} es la amplitud del pico, ν_{λ} es la frecuencia, μ_{λ} es el amortiguamiento y B es la asimetría, un parámetro que se utiliza como medida del solapamiento entre picos. Estos cuatro parámetros se determinan para cada pico resonante ajustando el espectro medido y asumiendo un cierto número de resonancias que debe ser cuantificado.

Tal y como se describe en [6] y en [7], la ecuación (1) basada en la fórmula de Breit-Wigner para resonancias nucleares, tiene ventajas respecto a una fórmula basada en un oscilador amortiguado lineal con un cierto ruido de fondo, tal y como se usó en [3]. Una es que no se necesita asumir una forma especial para el fondo en el espectro, porque éste está formado por las colas de cada resonancia. Esta es una ventaja muy importante ya que no hay un buen modelo físico para el fondo, que en caso de definirlo necesita ser determinado de una manera arbitraria en el método tradicional. Como consecuencia de esto, el método tradicional tiene una arbitrariedad que afecta a la precisión de los resultados. La segunda ventaja de la fórmula (1) es su habilidad de resolver objetivamente dos picos que estén muy próximos entre sí, incluso en casos cuando la distinción de los picos de manera visual resulta imposible.

Las capacidades mejoradas de la fórmula deben venir acompañadas del esfuerzo de un experto para aplicar el método y estimar adecuadamente los valores iniciales del ajuste. Como se apuntó en [6], para explotar todo el potencial del método se requiere asumir un gran número de resonancias, posiblemente mayor que el número de picos que se pueden apreciar a simple vista. En la etapa 12, el ajuste se realizó hasta los 10 Hz, con aproximadamente 5 picos resonantes que ajustar, mientras que la etapa 13 el ajuste se extendió hasta los 20 Hz. Esto implicó en algunos casos ajuste de hasta 17 picos.

Para ilustrar la calidad del ajuste hasta los 20 Hz, se muestra la figura 4 y los resultados para un determinado ajuste se muestran en la tabla 1. El principal énfasis de este trabajo está en la zona de 7-8 Hz. El ajuste se realizó para todas las medidas, extra-nucleares (3 en la etapa 12 y 3 en la 13) e intranucleares (3 medidas con 5 detectores móviles en 6 posiciones axiales en la etapa 13). Para más detalle se puede consultar [4][8].

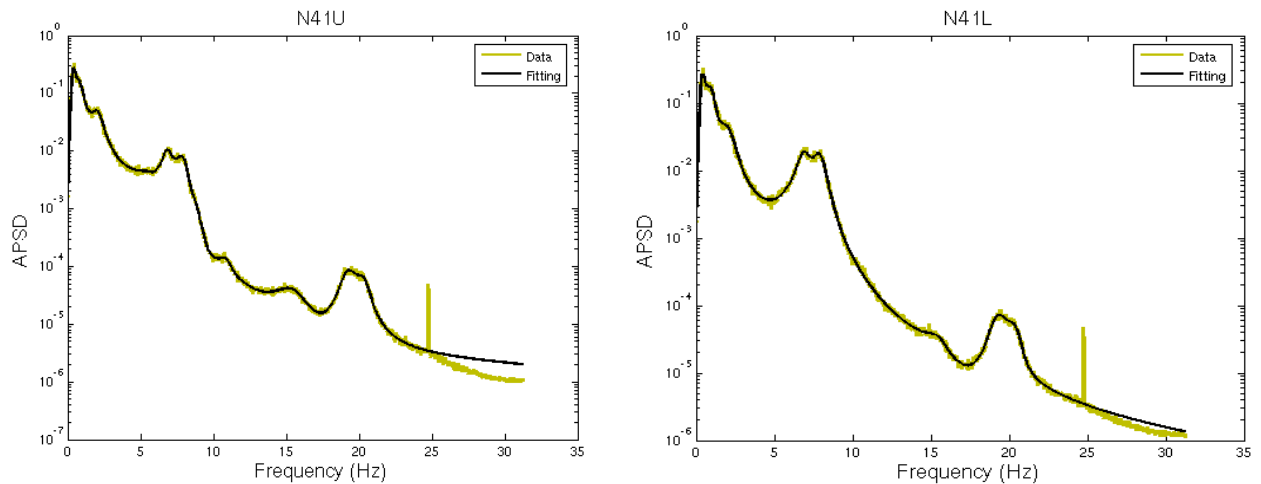


Figura 4: Ajuste de los espectros de las resonancias de vibración del barrilete obtenidas de los detectores ex-core N41 por medio de la fórmula de Breit-Wigner

Tabla 1: Resultados del ajuste del espectro del detector N41 inferior con la fórmula de Breit-Wigner

| N41L March | | | | |
|-----------------|-----------|----------|-----------|-----------|
| Number of peaks | Frequency | Damping | Amplitude | Skewness |
| 1 | 0,359244 | 0,153686 | 0,029641 | 0,024518 |
| 2 | 0,972781 | 0,327023 | 0,033933 | -0,013579 |
| 3 | 2,033277 | 0,587999 | 0,018444 | -0,005654 |
| 4 | 6,901079 | 0,502406 | 0,007285 | -0,000769 |
| 5 | 7,912272 | 0,461811 | 0,006819 | -0,001495 |
| 6 | 15,568348 | 0,846872 | 0,000010 | -0,000008 |
| 7 | 19,167469 | 0,676822 | 0,000035 | 0,000016 |
| 8 | 20,490965 | 0,499610 | 0,000010 | -0,000011 |

4.3 Las medidas Intranucleares

Se tomaron con 5 detectores móviles. En la figura 5 se muestra un mapa del núcleo y las diferentes posiciones axiales. Para cada posición radial, se determinó la amplitud de los picos relevantes en 6 posiciones axiales, y más adelante se muestra una figura de dichas amplitudes respecto a su posición axial. La idea era obtener una indicación del tipo de vibración. Dado que los detectores intranucleares no pueden detectar el movimiento del barrilete como un todo, sino que únicamente son sensibles a las vibraciones de los elementos combustibles. Basadas en las consideraciones descritas anteriormente, se esperan dos tipos de vibraciones en el rango de frecuencia del Beam-Mode, 7-8 Hz:

- Vibraciones forzadas de los elementos combustibles debido a la vibración Beam Mode del barrilete.
- Vibraciones inducidas por el flujo de refrigerante en los elementos combustibles (segundo modo de vibración de los elementos combustibles).

Estos dos tipos de vibración supuestamente deben mostrar una dependencia axial distinta. Hay que añadir que debido a restricciones técnicas, las medidas in-core en cada posición axial duran 20 minutos como mucho, por tanto la calidad del espectro es mucho peor que el espectro excore, que se calcula con señales de 3 horas de duración.

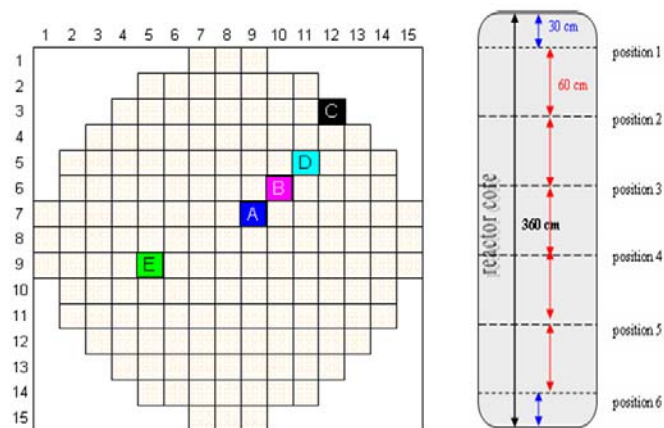


Figura 5: Mapa del núcleo con las posiciones de los detectores móviles in-core.

Los resultados de la única medida realizada en la etapa 12 en 2008, se muestran en la figura 6. Las frecuencias relevantes son 6.8 Hz y 7.9 Hz. Estos resultados sugieren que los picos de vibración in-core indican un movimiento pendular de los elementos combustibles, inducido por las vibraciones del barrilete, mientras que la frecuencia 7.9 Hz indica un modo de vibración debido a las fluctuaciones de presión del flujo turbulento. Estos modos de vibración serán denominados a partir de ahora como Modo 1 y Modo 2, respectivamente. Esta suposición del origen de los modos de vibración se usará como hipótesis de trabajo en la evaluación e interpretación de las medidas excore, descritas en la subsección siguiente.

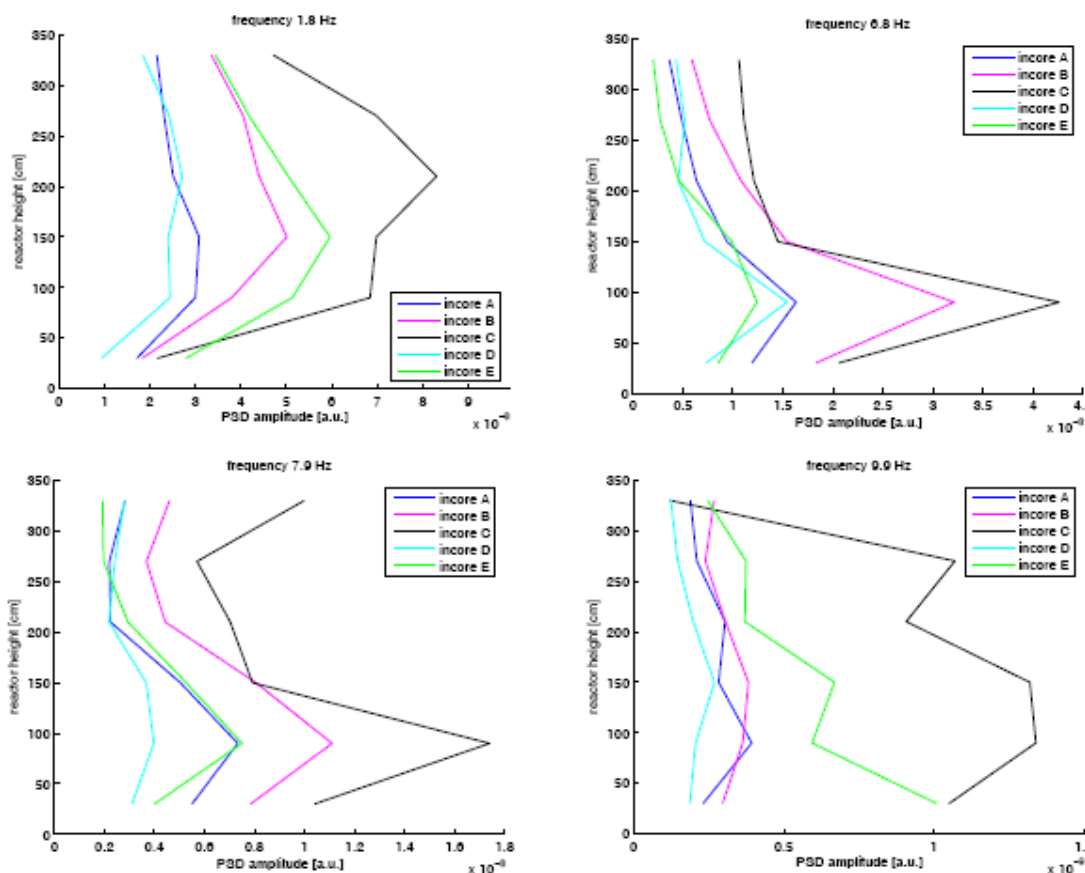


Figura 6: Dependencia axial de las amplitudes obtenidas de los picos del espectro in-core

4.4 Interpretación y discusión de las medidas extranucleares

Los resultados de las medidas se pueden interpretar mejor si se dibujan las amplitudes de los modos 1 y 2 a lo largo de un mismo ciclo. Esta representación junto con la evolución de las frecuencias se muestra en la figura 7.

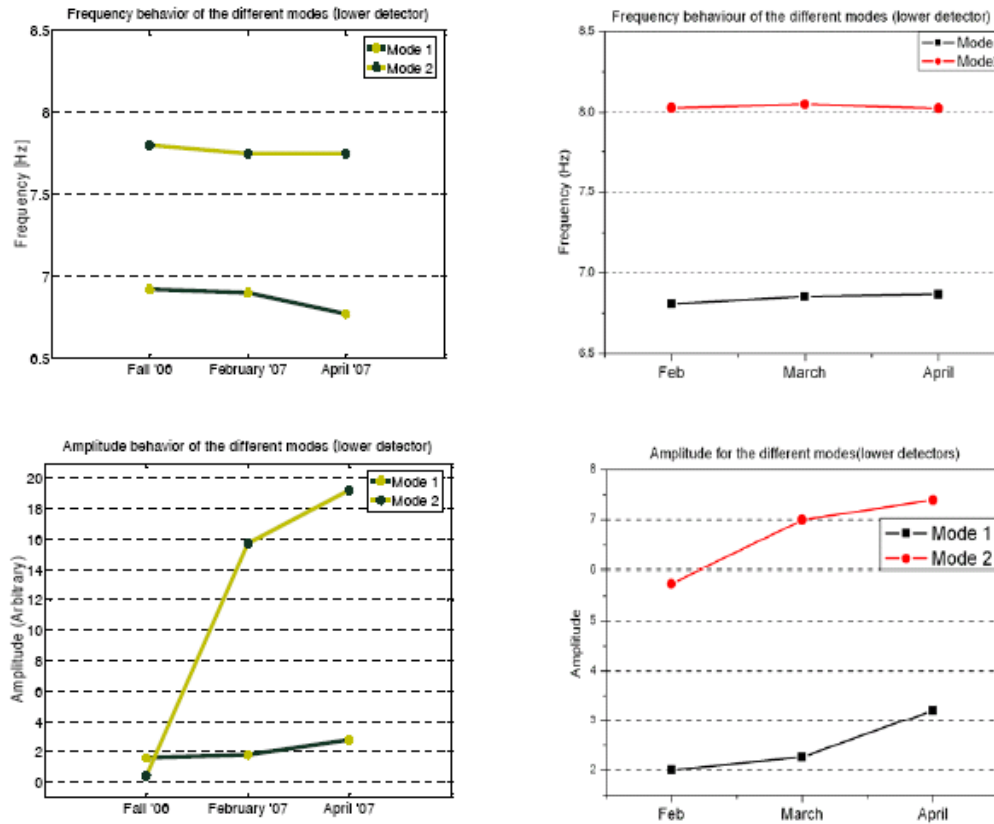


Figura 7 Evolución de las frecuencias y amplitudes de los picos del Modo 1 y Modo 2 de medidas ex-core en 2007 (izquierda) y 2009 (derecha)

De estos resultados, y en particular de las medidas hechas en 2006-07, se puede ver que las amplitudes de los dos modos muestran una evolución claramente distinta (Las tres medidas realizadas en 2009 son muy próximas en tiempo como para afirmar este cambio en la amplitud). El pico de menor frecuencia (Modo 1), no cambia apenas en el ciclo. Dado que este modo se ha identificado como el correspondiente a la vibración pendular del barrilete, es lógico pensar que no cambie mucho en el ciclo.

Por otro lado, la amplitud del modo 2, correspondientes a las vibraciones inducidas por el flujo turbulento de los elementos combustibles aumenta en el ciclo. Esto puede deberse a un aumento de la amplitud de la vibración debido al cambio en las propiedades mecánicas de los elementos combustibles como consecuencia del quemado y, otra razón, es que el factor de escala entre el ruido neutrónico y las vibraciones de los elementos cambie [5]. Hay que tener en cuenta que este factor de escala es diferente del encontrado en la vibración del barrilete.

El hecho de que el efecto de las vibraciones de los elementos combustibles contribuyan a las señales excore explica las coherencias inconsistentes encontradas entre los detectores excore.

5 CONCLUSIONES

Los resultados experimentales sostienen la idea de la presencia de dos componentes en los detectores excore de diferentes orígenes y diferente información de cara a propósitos de diagnóstico. Sería deseable que se hicieran más medidas excore para confirmar completamente las hipótesis, distribuidas de manera más separada en el tiempo a lo largo de un ciclo. El cambio en el factor de escala entre las vibraciones de los elementos de combustible y el ruido

neutrónico será investigado en trabajos futuros para confirmar la razón del incremento en la amplitud del modo 2. Las posibilidades de diagnóstico se pueden mejorar midiendo otros parámetros como el desplazamiento mecánico y la presión, etc.

6 REFERENCES

- [1] Thie, J.A. *Power Reactor Noise*, ANS, La Grange Park, Illinois (1981).
- [2] I. Pázsit I, J. Karlsson and N. Garis N, “Some developments in core-barrel vibration diagnostics”, *Ann. nucl. Energy* **25**, pp. 1079 - 1093 (1998)
- [3] C. Sunde, C. Demazière and I. Pázsit, *Final Report on the Research Project Ringhals Diagnostics and Monitoring, Stage 11*. Chalmers internal report CTH-NT-206/RR13, Chalmers University of Technology, Sweden (2007).
- [4] I. Pázsit, C. Demazière, C. Sunde, P. Bernitt and A. Hernández-Solís (2008), *Final Report on the Research Project Ringhals Diagnostics and Monitoring, Stage 12*. Chalmers internal report CTH-NT-220/RR-14, Chalmers University of Technology, Sweden (2008).
- [5] F. J. Sweeney, J. March-Leuba and C. M. Smith, “Contribution of Fuel Vibrations to Ex-Core Neutron Noise During the First and Second Fuel Cycles of the Sequoyah-1 Pressurized Water Reactor. *Prog. Nucl. Energy* **15**, pp. 283-290 (1985)
- [6] R. Perez and D. N. Wood (1991) “Modeling and Analysis of Neutron Noise from an Ex-Core Detector at a PWR”. *Proceedings of SMORN-VI*, Gatlinburg, Tennessee, USA (1991).
- [7] A. Garcia-Berrocal, J. Blázquez, C. Montalvo and M. Balbás, “Resolving Mechanical Resonances with the Breit-Wigner Formula”, *J. Vibr. Control* (2010)
- [8] I. Pázsit, C. Montalvo Martín, V. Dykin and T. Tambouratzis (2010) *Final Report on the Research Project Ringhals Diagnostics and Monitoring, Stage 13*. Chalmers internal report CTH-NT-230/RR-15, Chalmers University of Technology, Sweden (2010).