

Gestión de la deformación de canales en la central nuclear de Cofrentes

M. Albendea, P.J. García, J. Iglesias y R. Mascarell

La deformación de canales combustible en reactores BWR (*Boiling Water Reactor*) puede tener implicaciones para la seguridad. Este fenómeno es complejo y en la actualidad no se conoce en profundidad. En este artículo se presentan las actividades que está llevando a cabo Iberdrola Generación Nuclear SAU para conocer, predecir y mitigar las consecuencias que pueden ocasionar este fenómeno en la central nuclear de Cofrentes.

Fuel channels distortion in BWR (Boiling Water Reactor) reactors may have implication for safety. This phenomenon is complex and, at the present time it is not known in detail. This article provides the Iberdrola Generación Nuclear SAU ongoing activities to know, predict and mitigate the consequences that this phenomenon may cause in Cofrentes Nuclear Power Plant.

INTRODUCCIÓN

La Central Nuclear de Cofrentes (CNC) (Figura 1) dispone de un reactor de agua ligera en ebullición diseñado por General Electric (GE) a finales de los 50. El agua, que actúa como refrigerante y moderador, alcanza la ebullición y el vapor generado impulsa una turbina que a su vez mueve un generador eléctrico.

Para mantener la moderación y darle estabilidad estructural cada elemento combustible está alojado en una estructura cuadrangular que se denomina canal. Los elementos combustibles se disponen en celdas, esto es, cuatro elementos alrededor una barra de control cruciforme. El canal permite una separación hidráulica entre elementos combustibles y separación mecánica con las barras de control y los tubos de instrumentación (Figura 2).

Para minimizar la absorción neutrónica los canales combustibles se fabrican de distintas aleaciones de circonio: Zircaloy-2 (Zr-2), Zircaloy-4 (Zr-4), Low-Tin Zirlo y NSF. Es conocido que la radia-

ción afecta a las propiedades de las aleaciones de circonio y, por tanto, al comportamiento de los canales combustibles. Así por ejemplo, los canales pueden sufrir deformaciones, corrosión, cambios dimensionales, cambios en su microestructura, cambio en sus propiedades físicas, etc. Este comportamiento no solamente es función de la aleación de circonio sino, y muy importante, del diseño del canal, del proceso de fabricación e incluso del tratamiento térmico y de las condiciones de operación. Bajo la acción de tensiones mecánicas o inducidas por la radiación, aun siendo relativamente pequeñas, y elevada temperatura, los metales empiezan a cambiar gradual y lentamente su tamaño y forma. Este fenómeno se denomina *fluencia*.

En los reactores BWR una excesiva deformación de los canales combustibles y un tratamiento inadecuado puede provocar fricción con la barra de control. En los últimos años más de la mitad de los reactores BWR de Estados Unidos han notificado problemas de interferencias con barras de control debido a este fenómeno [2].

FENOMENOLOGÍA

Podemos decir que hay tres tipos principales de deformación del canal: hinchamiento (*Bulge*), pandeo (*Bow*) y torsión (*Twist*). El *Bulge* se produce por la fluencia debida a la radiación y a la diferencia de presión entre el interior y exterior del canal. El pandeo es debido al crecimiento diferencial de lados opuestos del canal inducido por la fluencia diferencial debida a la radiación y la dilatación por la difusión y precipitación del hidróge-



MANUEL ALBENDEA DARRIBA

Responsable del soporte a la operación de la Unidad de Combustible Nuclear. IBERDROLA GENERACIÓN NUCLEAR Físico por la UAM.



PABLO J. GARCIA SEDANO

Responsable de la Sección de Ingeniería del Combustible Nuclear. IBERDROLA INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN SAU Ingeniero industrial por la ETSII de Bilbao.



JAVIER IGLESIAS AYUELA

Tareas de Seguimiento del Núcleo de CN Cofrentes, análisis termohidráulicos y apoyo al licenciamiento. Ingeniero de Minas por la Universidad Politécnica de Madrid.



RUBÉN MASCARELL GIL

Jefe de la Oficina Técnica de Operación CENTRAL NUCLEAR DE COFRENTES Ingeniero químico por la Universidad de Alicante.

CARACTERÍSTICAS CNC
Propietaria al 100%: Iberdrola Generación Nuclear
Operada por: Iberdrola Generación Nuclear
Reactor de Agua en Ebullición: BWR/6 (GE)
Contención: Mark-III
Combustible: dióxido de uranio enriquecido (UO ₂)
Nº elementos: 624
Peso total de UO ₂ aproximado: 110Tm
Potencia térmica: 3237 MWt
Potencia eléctrica: 1092 MWe
Primera criticidad: 23 agosto 1984
Longitud del ciclo: 24 meses

Figura 1. Características de CN Cofrentes.

no en la red cristalina. El *Twist* es el resultado de pequeñas torsiones debidas a diferencias entre el hinchamiento y el pandeo. Aunque se puede producir los tres tipos de distorsión, el pandeo es la principal preocupación por poder afectar directamente a la actuación de las barras de control ya que puede alterar la separación entre canales adyacentes y puede restringir el movimiento de las barras de control (Figura 3) [3].

Históricamente se utilizaba Zr-4 para la fabricación de canales por su reconocida baja absorción de hidrógeno (HPUF, *Hydrogen Pick-up Fraction*). La oxidación del Zircaloy genera hidrógeno y una fracción del mismo se difunde y precipita en la red cristalina que la distorsiona y causa su crecimiento. Los principales suministradores de combustible fueron cambiando paulatinamente a Zr-2. GNF en los 80, para estandarizar materiales utilizados en sus reactores BWR; Westinghouse a mediados de los 90, por la baja sensibilidad a la corrosión nodular; y, por último a finales de los 90, Areva al comprobar, en sus programas de irradiación, un mejor comportamiento a la corrosión [3]. Con este cambio asumía que una mayor resistencia a la corrosión compensaba el aumento de absorción de hidrógeno dando como resultado un contenido menor de hidrógeno total e hipotéticamente un mejor comportamiento frente a la deformación.

Con el aumento de los requerimientos de producción, sobre todo aumento de la longitud de los ciclos, una mayor fracción de combustible fresco debe de estar en celdas de control. Se observó un nuevo mecanismo de corrosión denominado *shadow corrosion* por la marca observable en el canal (sombra de la barra de control en el canal). Este mecanismo es un tipo de corrosión galvánica asistida por la radiación entre metales con diferente electronegatividad que sólo se observa en reactores BWR, en reactores de agua a presión (PWR, *Pressurized Water Reactor*) este fenómeno no se observa quizás debido al bajo contenido de oxígeno disuelto en el agua [4]. Este fenómeno también se observa entre las barras de combustible y los espaciadores si estos están fabricados de Inconel. El pandeo debido a *shadow corrosion* se produce por la diferente precipitación de hidrógeno en la red cristalina entre la cara adyacente a la barra de control y su opuesta. Los mecanismos responsables de este fenómeno son muy complejos y difíciles de predecir. Dependen de la aleación,

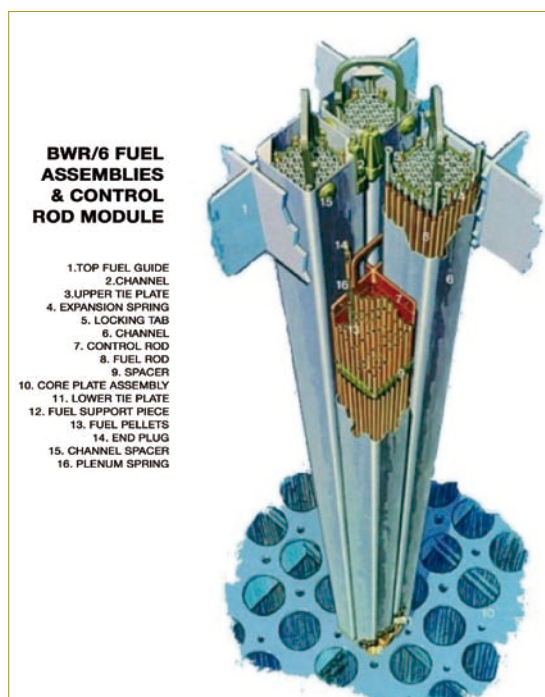


Figura 2. Celda de combustible.

tipo de planta, química del agua, criterios de operación, y otros factores. Pero lo más paradójico es que hay plantas similares que unas se ven afectadas y otras no y canales simétricos se ven afectados y otros no. El impacto en la distorsión del canal por *shadow corrosion* no sólo depende del tiempo que la barra de control ha estado insertada, sino que también depende de cuando el canal ha visto barra de control. Si elementos frescos se controlan al principio de su primer ciclo de irradiación el efecto se magnifica. En ciclos largos este hecho puede ser común ya que es necesario cargar elementos frescos en celdas de control.

ACTUACIONES

Iberdrola Generación Nuclear está implementado un amplio programa para conocer el fenómeno y eliminar o al

menos mitigar sus consecuencias. Por la dificultad del fenómeno es necesario desarrollar un programa amplio e interdisciplinar. Deben de estar presentes junto con el operador de la planta, institutos de investigación como EPRI (*Electric Power Research Institute* de Estados Unidos), grupo de propietarios de reactores BWR (BWROG, *BWR Owners Group*) y los suministradores principales de combustible.

Participación en programas internacionales

Desde el año 2006 Iberdrola ha participado en distintos proyectos de medidas de canales realizados dentro del Programa de Fiabilidad del Combustible (FRP, *Fuel Reliability Program*) de EPRI. En el año 2010 se forma el *Channel Distortion Program* (CDP) dentro del FRP con el objetivo de aunar esfuerzos dentro del sector (empresas eléctricas, suministradores, centros de investigación...) de cara a mitigar o eliminar si es posible el problema de la fricción entre las barras de control y el canal por excesiva deformación de este último.

Iberdrola ha participado activamente en el CDP siendo su representante designado como vicepresidente de dicho grupo. Además Iberdrola ha participado activamente con datos de deformación de canales obtenidos en varias campañas de medidas realizadas en CNC y con la interpretación de dichos resultados.

Los principales productos que se han obtenido del CDP han sido: la generación de una base de datos con todas las campañas realizadas por la industria y cofinanciadas por EPRI, la revisión del INPO SER 1-08 [5] con nuevas recomendaciones para diseño del núcleo y monitorización considerando el problema de la fricción, el desarrollo de un modelo atomístico sobre el efecto del H en las aleaciones de circonio, el desarrollo de

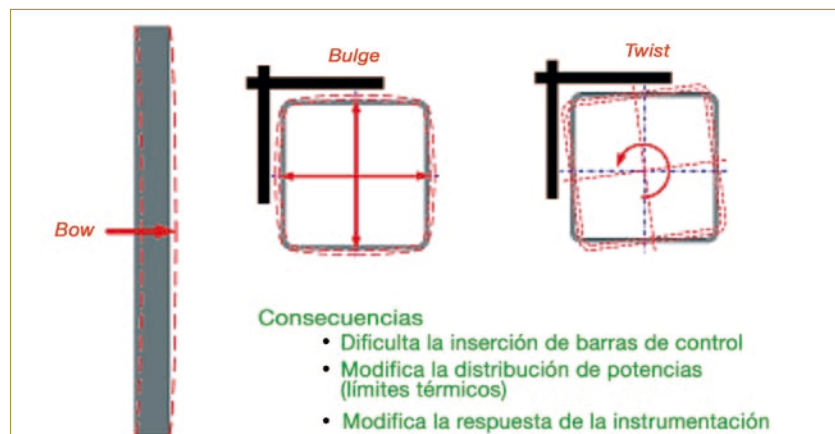


Figura 3. Tipos de distorsión en canales.

un modelo de pandeo patrocinado por EPRI, el lanzamiento de distintos programas experimentales de cara a entender el efecto del H en las aleaciones de circonio para información a la USNRC (*Nuclear Regulatory Commission* de Estados Unidos) de cara a acelerar el licenciamiento de los nuevos materiales de canal.

Aunque sigue habiendo casos de fricción reportados por la industria el número y severidad de los mismos ha disminuido con respecto a los reportados antes de 2010.

Desarrollo de un programa de predicción del pandeo

El uso de núcleos mixtos en CNC da lugar a que exista mezcla de distintos tipos de combustible en una misma celda de control. Esto dificulta el uso de herramientas desarrolladas por los suministradores para estimar el riesgo de fricción entre canal y barra de control, ya que suelen estar ajustadas para los combustibles específicos de cada suministrador y no dan buenos resultados cuando se usan con otros diseños.

Como parte de la estrategia para mitigar el problema, Iberdrola desarrolla su propio modelo de simulación de la deformación de los canales y la fricción entre canal y barra asociada a esa deformación (código SIMBOW) [6] que ha sido usado para la estimación de la fricción esperada en el núcleo desde el ciclo 18. Esta fricción se corrige en el diseño del núcleo bien cambiando la posición de los elementos en el núcleo, o bien recanalizando los elementos con canales nuevos cuando la recolocación del elemento no es posible por otros criterios de diseño. Además el código SIMBOW se utiliza para determinar las celdas más susceptibles de experimentar fricción y que serán objeto de pruebas periódicas durante la operación (Figura 4).

La variabilidad del pandeo debido al fenómeno de *shadow corrosion* hace a veces muy difícil su predicción. Para reducir esta incertidumbre se están recanalizando los elementos con canales de Zr-2 que se consideran más susceptibles de experimentar *Bow* anómalo y desde el ciclo 19 se están utilizando materiales menos susceptibles de sufrir esa variabilidad en las celdas de control del núcleo (celdas en las que usa más extensivamente las barras de control).

Programa de caracterización de materiales

Dada la variabilidad del comportamiento del material Zr-2 ante el *Bow* por *shadow corrosion*, se están utilizando por parte de la industria otros materiales menos susceptibles. En los combustibles de GNF se está utilizando el material Zr-4 que presenta mejor comportamiento que el Zr-2 y que está licenciado como material alternativo. No obstante el Zr-4 presenta

problemas de pandeo significativo por gradiente de fluencia neutrónica por lo que no elimina el problema de la fricción totalmente aunque la hace más predecible.

La industria está manejando nuevas aleaciones de circonio con niobio (Low Tin Zirlo-LTZ, NSF...). Estas aleaciones presentan un excelente comportamiento ante el fenómeno de pandeo por gradiente de fluencia dado su escaso crecimiento con la irradiación. Por otro lado presentan una baja captura de H por lo que son menos susceptibles a la deformación por *shadow corrosion*.

Iberdrola, en el ciclo 17, empezó a utilizar el Low Tin Zirlo recristalizado (LTZ) [7] en cuatro canales de demostración. Dos de ellos se reutilizaron tras dos ciclos de operación en elementos de un ciclo para extender su quemado por encima de la experiencia operativa de CNC. Se han medido e inspeccionado tras tres ciclos de operación y su comportamiento ante el crecimiento y deformación ha sido excelente y conforme a lo esperado.

El LTZ pretende utilizarse de forma generalizada en los elementos de Westinghouse a partir del ciclo 21. De forma análoga en el ciclo 21 se va a comenzar un programa de canales de demostración en elementos GNF usando el material NSF [8]. Cuando este material esté licenciado, la intención es usarlo de manera generalizada en los elementos de GNF.

Campañas de medida de distorsión de canales

En CNC se han realizado hasta la fecha cuatro campañas de medida dimensional, óxido, toma de muestras e inspección visual de canales de diferentes aleaciones y tratamientos irradiados.

- 1) Durante la recarga del ciclo 17 (verano del 2007) se midieron 180 canales combustible: 24 SVEA-96 +/L, 68 SVEA-96 Optima-2, 36 GE-12, 42 GE-14 y 10 ATRIUM-10XP.

- 2) En septiembre de 2009, recarga del ciclo 18, se midieron 55 canales: 31 SVEA-96 Optima-2, 22 GE-14 y 2 Atrium-10XP.

- 3) En octubre del 2011, recarga del ciclo 19, se midieron 58 canales: 37 SVEA-96 Optima-2, 18 GE-14, 1 GNF2 y 2 Atrium-10XP.

- 4) En enero de 2015 se han medido 54 canales descargados tras la recarga del ciclo 20: 42 SVEA-96 Optima-2 y 12 GE-14.

Los resultados las campañas de 2007, 2009 y 2011 se han documentado en distintos informes de EPRI (1016622[9], 1021455[10] y 1025202 [11]). La campaña del 2015 está en proceso de documentación.

Los resultados obtenidos han confirmado la susceptibilidad del material Zr-2 ante el pandeo por gradiente de fluencia a altos quemados y al pandeo por *shadow corrosion* cuando experimenta control temprano. También se confirma el mejor comportamiento del LTZ ante la deformación.

Adquisición de una máquina para medir deformaciones de canales combustibles

En el 2011 a raíz del cierre de varias centrales nucleares alemanas, Vattenfall, empresa propietaria de Brunsbüttel (KKB), puso en venta diversos equipos, entre ellos un equipo de medida dimensional de canales combustibles, desarrollado por WES, que se había utilizado en CNC en la recarga del ciclo 17 a mediados de 2007; Iberdrola vio la oportunidad de disponer de dicho dispositivo de medida.

Al equipo se le realizaron ciertas modificaciones para modernizarlo e instalarlo como equipo permanente de la central.

El equipo consiste en un dispositivo que permite alojar un canal combustible, está equipado con siete niveles de sondas ultrasónicas para medir sus características dimensionales, dispone de sondas adicionales para medir la longitud y

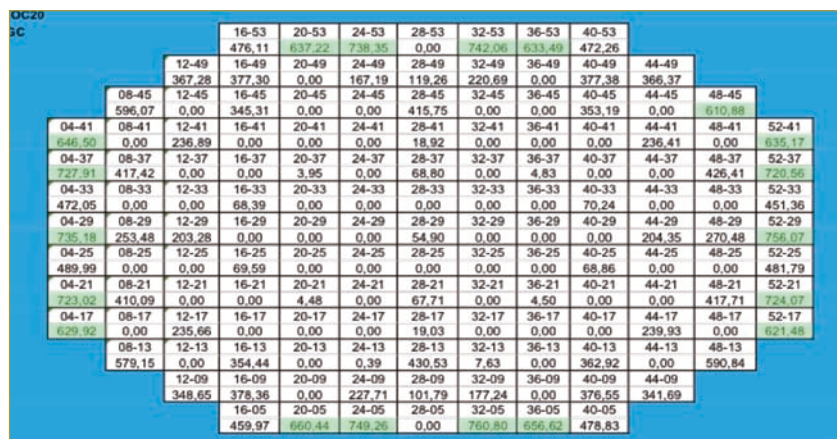


Figura 4. Ejemplo de mapa de fricción calculada con SIMBOW.

la temperatura del agua. También dispone de un sistema neumático para evitar que el elemento pueda caer, una unidad de control con el dispositivo generador de ultrasonidos, sistema de adquisición de datos y ordenador para el cálculo, control y presentación de resultados.

Actualmente el montaje, calibración y utilización del dispositivo es responsabilidad de CNC, para lo que fue necesario realizar un plan de formación interdisciplinar: mecánicos, eléctricos, ingeniería y combustible nuclear.

La última campaña, enero de 2015, la realizó íntegramente personal propio de la central utilizando este dispositivo (Figura 5).

Recanalizaciones

Aunque originalmente los canales combustibles irradiados podían reutilizarse y, de hecho, en CNC se reutilizaron más de 300 canales hasta la Recarga 6 (septiembre 1991). Con el aumento de fluencia neutrónica, quemado y longitud de los ciclos esta práctica se dejó de hacer debido a los cambios dimensionales y al aumento de corrosión.

Gracias a las predicciones del comportamiento de los canales aportados por SIMBOW se han realizado tres campañas de recanalización con canales nuevos para recanalizar a los elementos con mayor riesgo a tener alta deformación.

- 1) En la recarga del ciclo 18 se recanalizaron 10 elementos de Westinghouse con canales de Zr-2 para minimizar el riesgo al pandeo por *shadow corrosion*.
- 2) En la recarga del ciclo 19 se recanalizaron 16 elementos de Westinghouse con canales de Zr-2 para minimizar el riesgo de pandeo por *shadow corrosion*. También se recanalizaron 12 elementos de GNF con canales de Zr-2 por riesgo de *Bow* por *shadow corrosion*.
- 3) En la recarga del ciclo 20 se recanalizaron 24 elementos de Westinghouse con canales de Zr-2 para minimizar el riesgo del pandeo por *shadow corrosion* y por gradiente de fluencia. También se recanalizaron ocho elementos de GNF con canales de Zr-2 por riesgo de *Bow* por *shadow corrosion* y gradiente de fluencia.

Actuaciones en el diseño del núcleo y gestión del ciclo

Las actuaciones en el diseño del núcleo y en la gestión del ciclo son de vital importancia para mitigar el efecto que pudiera producir la deformación de canales. En primer lugar hay que conocer en profundidad el fenómeno por esta razón Iberdrola participa activamente en los grupos de trabajo *ad hoc*, ha realizado diversas campañas de inspección: medidas dimensionales, óxido y toma de muestra para su análisis en celdas calientes, etc. Iberdrola también participa con los su-

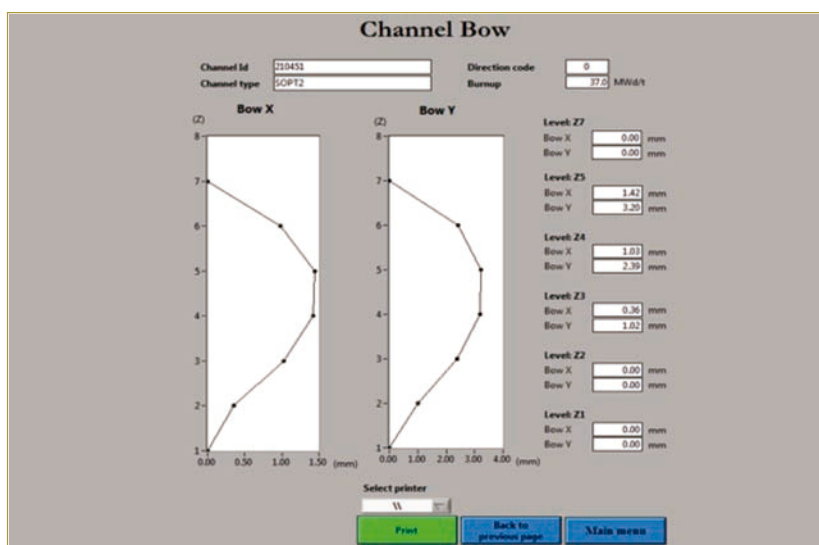


Figura 5. Ejemplo de la máquina de medida de distorsión de canales.

ministradores de combustible en programas de pruebas de materiales. Se han cargado e inspeccionado canales de distintas aleaciones y tratamientos: Zr-4, Zr-2, ZIRLO y NSF. Sería imposible acometer el diseño del ciclo que minimizara el efecto de la deformación de canales sin disponer de una herramienta predictiva de este fenómeno SIMBOW, pero sobre todo, sería imposible sin tener la capacidad total del diseño que aporta la metodología Giralda [12].

CONCLUSIONES

La deformación de canales de combustible en los reactores de agua en ebullición ha provocado problemas operativos y tener que realizar numerosas campañas de recanalización. Iberdrola Generación Nuclear SAU está desarrollando un amplio programa para conocer y mitigar o eliminar las consecuencias causadas por la deformación de los canales de combustible irradiados en la central nuclear de Cofrentes. Este programa incluye la participación activa en el Programa de Distorsión de Canales (CPD, *Channel Distortion Program*) del Programa de Fiabilidad del Combustible (FRP, *Fuel Reliability Program*) de EPRI (*Electric Power Research Institute*), y el desarrollo de una aplicación informática (SIMBOW) para simular y predecir la deformación de los canales con el fin de mitigar sus consecuencias.

La estrategia de gestión optimizada de combustible de CN Cofrentes conlleva la utilización de elementos combustibles de distintos suministradores, por lo que se dispone de información del comportamiento de los distintos diseños y aleaciones y tratamientos con el fin de encontrar el producto idóneo para la operación segura de la central. En este sentido Iberdrola junto con los principales suministradores participa

en un extenso programa de demostración de canales. Como parte de este programa se han realizado diferentes campañas de inspección de canales en la central nuclear de Cofrentes: visual, dimensional, óxido y toma de muestras para su análisis en celdas calientes. Con el fin de optimizar los recursos se ha adquirido una máquina de medida dimensional de canales irradiados.

Gracias a los resultados de este programa y la capacidad propia disponible para el realizar el diseño del núcleo y poder evaluar el impacto de la deformación de canales durante la operación del ciclo, se ha minimizado el impacto del abombamiento de canales reduciendo el número de recanalizaciones necesarias.

REFERENCIAS

- [1] ZIRAT-10 Special Topics Report. Structural Behavior of Fuel and Channel Components, September 2005, ANT International.
- [2] Nuclear Engineering International. Avoiding BWR channel distortion. 11 October 2013.
- [3] BWR Fuel Channel Distortion. October 2011. ANT International.
- [4] Mechanisms of Zirconium Alloy Corrosion in Nuclear Reactors, The Journal of Corrosion Science and Engineering. July 2003.
- [5] INPO SER 1-08 Boiling Water Reactor Fuel Channel Distortion. July 17, 2008.
- [6] NT-CONUC-529. Modelo de predicción del arqueamiento de canales en C.N. Cofrentes. Rev. 4. Oct. 2013.
- [7] WCAP-15942-P-A Material Changes for SVEA-96 Optima-2 Fuel Assemblies. Rev. 1. Sep. 2010.
- [8] NEDE 33798P Application of NSF to GEF Fuel Channel Designs, Licensing Topical Report. Feb. 2013.
- [9] EPRI 1016622. Cofrentes EOC-16B Poolside Measurements of BWR Channels. Aug. 2008.
- [10] EPRI 1021455. Cofrentes EOC-17 Poolside Measurements of BWR Channels. Jul. 2010.
- [11] EPRI 1025202. Cofrentes EOC-18 Poolside Measurements of BWR Channels. Jul. 2012.
- [12] SNE nº 212. Experiencias de diseño de combustible y de núcleo en C.N. Cofrentes, Octubre 2001. ■