

SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE BARRAS COMBUSTIBLE PARA EL REACTOR CAREM 25 MEDIANTE EL CÓDIGO BACO

Estévez¹ E.- Markiewicz¹ M. – Marino² A.

*¹Grupo Diseño de Combustibles Nucleares
Centro Atómico Bariloche, CNEA*

*²Grupo Diseño Avanzado y Evaluación Económica,
Complejo Tecnológico Pilcaniyeu, CNEA*

RESUMEN

El comportamiento termomecánico de una barra combustible sometida a irradiación es un proceso complejo en el que se acoplan gran cantidad de fenómenos físico-químicos interrelacionados. El código BACO simula el comportamiento termomecánico y de los gases de fisión de una barra cilíndrica en operación. La historia de potencia de la barra, que surge de los cálculos neutrónicos, es ingresada al programa como dato de entrada. El código calcula la distribución de temperaturas en el pellet y el cladding, las tensiones principales en el pellet y el cladding, los cambios en la porosidad y restructuración del pellet, la liberación de gases de fisión, la evolución de la presión interna y de la composición de los gases.

En este trabajo se analizan algunos de los límites de diseño del elemento combustible para el reactor CAREM 25 mediante el código BACO. Algunas variables de comportamiento directamente relacionadas con la integridad de la barra combustible son las siguientes:

- Temperatura central de la pastilla;
- tensión tangencial de la cara interna de la vaina;
- presión de los gases libres en la barra combustible;
- deformaciones axiales y radiales de la vaina, etc.

El análisis realizado se basa en una evaluación de los casos extremos de comportamiento, el cual se basa en la búsqueda de las combinaciones de parámetros del combustible, asociada a sus tolerancias de fabricación, que pueden llegar a alcanzar los límites de diseño (temperaturas, tensiones, deformaciones, presiones, etc.).

El análisis de los resultados indican que, en condiciones normales de operación, las temperaturas máximas del pellet, las tensiones en la vaina, la presión de gases a fin de vida, etc, se encuentran dentro de los límites de diseño considerados para el elemento combustible del reactor CAREM 25.

ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF CAREM 25'S FUEL RODS USING COMPUTER CODE BACO

RESUME

The thermo-mechanical behavior of a fuel rod subjected to irradiation is a complex process, on which a great quantity of interrelated physical-chemical phenomena are coupled. The code BACO simulates the thermo-mechanical behavior and the evolution of fission gases of a cylindrical rod in operation. The power history of fuel rods, arising from neutronic calculations, is the program input. The code calculates, among others, the temperature distribution and the principal stresses in the pellet and cladding, changes in the porosity and restructuring of pellet, the fission gases release, evolution of the internal gas pressure.

In this work some of design limits of CAREM 25's fuel rods are analyzed by means of the computer code BACO. The main variables directly related with the integrity of the fuel rod are:

- Maximum temperature of pellet;
- Cladding hoop stresses;
- Gases pressure in the fuel rod;
- Cladding axial and radial strains, etc.

The analysis of results indicates that, under normal operation conditions, the maximum fuel pellet temperature, cladding stresses, pressure of gases at end of life, etc, are below the design limits considered for the fuel rod of CAREM 25 reactor.

1. INTRODUCCIÓN

El comportamiento termomecánico de una barra combustible sometida a irradiación es un proceso complejo, en el que se acoplan gran cantidad de fenómenos físico-químicos interrelacionados. El modelado de una barra combustible de un reactor nuclear en operación es un área importante en el diseño, análisis de comportamiento y performance de elementos combustibles nucleares. Se puede destacar la posibilidad de predicción y análisis de los parámetros de diseño, como así también las facilidades para trabajar bajo condiciones normales de operación o en transitorios de potencia.

Para la simulación del comportamiento termomecánico de las barras combustibles del elemento combustible CAREM 25, se utilizó el código BACO [1].

2. GLOSARIO

BC: Barra combustible

EC: Elemento combustible

3. LÍMITES DE DISEÑO

Entre los límites de diseño establecidos para las BC, que pueden ser evaluados por el código BACO, se encuentran los siguientes:

3.1 PRESIÓN INTERNA

Este límite establece que la presión interior de las BC al final de vida no deberá ser superior a la del refrigerante (12,25 MPa) [2].

3.2 DEFORMACIÓN DE LA VAINA

Se limita la deformación tangencial máxima (elástica + plástica) en el rango de las tensiones de tracción a un 1% [3].

3.3 TENSIÓN TANGENCIAL

El valor límite para la tensión circunferencial es de 180 MPa [3], este valor no debe ser superado considerando además el desgaste máximo de la vaina por efectos del *fretting*, estimado en un 20% del espesor inicial de la vaina.

3.4 TEMPERATURA MAXIMA DE LA PASTILLA

Se establece como límite a la temperatura central de la pastilla un valor de 2700 °C [3].

4. HISTORIAS DE POTENCIA

Para la simulación del comportamiento de las BC se consideraron las siguientes historias de potencia, que corresponden al núcleo heterogéneo de 3,1% de enriquecimiento y modelado explícito de separadores de Inconel [4,5].

Se han seleccionado los EC más exigidos de acuerdo a los criterios establecidos en el punto 5, donde a comienzo de vida y en el recambio de EC, se incorporaron rampas de potencia de 15 minutos de duración para llegar a la potencia correspondiente.

Para los análisis del comportamiento de las BC, se consideraron las relaciones entre la potencia máxima de la BC y la potencia media de los elementos combustibles [5] para los diferentes canales analizados. En forma conservativa se consideró la relación máxima entre dichas potencias, la cual corresponde en todos los casos, al inicio de vida de los EC.

5. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES

Para analizar el comportamiento de las barras combustibles, fue necesario establecer previamente los criterios para seleccionar en cada caso el EC más exigido; los criterios adoptados son los siguientes:

A) La BC de mayor quemado:

- 1 - alcanzado durante los dos ciclos;
- 2 - alcanzado durante el primer ciclo;
- 3 - desarrollado durante el segundo ciclo.

B) El sector axial de mayor quemado:

- 1 - alcanzado durante los dos ciclos;
- 2 - alcanzado durante el primer ciclo;
- 3 - desarrollado durante el segundo ciclo.

C) El sector axial que en un determinado momento del ciclo se encuentra a mayor potencia.

D) La BC que en un determinado momento del ciclo se encuentra a mayor potencia.

De acuerdo a estos criterios y con los datos de entrada de la referencia [5], se seleccionaron los siguientes EC:

A-1) El EC que entra en el primer ciclo al canal 11 y pasa al canal 10 en el segundo ciclo (11→10) con un quemado de extracción máximo de BC de 25030 MWd/TU.

A-2) Corresponde al canal 5, con un quemado de BC de 15800 MWd/TU.

A-3) Corresponde al canal 10, con un quemado de BC de 11600 MWd/TU.

B-1) El sector axial 10 del EC (11→10) con un quemado de 30700 MWd/TU.

B-2) El sector axial 11 del canal 5, con un quemado máximo de BC de 20610 MWd/TU.

B-3) El sector axial 13 del canal 2 con un quemado de BC de 15600 MWd/TU.

- C) El sector axial 11 del canal 12 al comienzo de vida, con una potencia lineal de BC de 265 W/cm.
- D) Corresponde al canal 12 al comienzo de vida; y con una potencia lineal levemente inferior, el canal 3 al final del primer ciclo.

6. SIMULACIONES DE COMPORTAMIENTO

Se han realizado en consecuencia la simulación correspondiente a los EC (11→10), (3→15), (8→2), (5→18) y (12→19), de acuerdo con los criterios del punto anterior. Para ello se han ingresado en el código BACO las historias de potencia definidas en el punto 4, dividiendo al combustible en 7 secciones axiales, donde la sección 1 corresponde a la salida del refrigerante y la 7 a la entrada del mismo.

Se ha ajustado el coeficiente de transferencia de calor de manera tal de conseguir, en forma aproximada, la temperatura exterior de la BC dada por los cálculos termohidráulicos.

Se ha considerado una presurización inicial de la barra combustible de 1,5 y 2,5 MPa, siendo estos los valores extremos estipulados en [3]. Los factores de anisotropía de Hill fueron tomados de la referencia [6].

Para evaluar el comportamiento de la BC con una reducción del espesor de la vaina combustible del 20%, por posible efecto del *fretting*, se introdujo dicha reducción en todo el perímetro de la vaina y en forma conservativa desde el inicio de vida, en un caso particular.

7. CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados obtenidos con el código BACO, simulando el comportamiento de barras combustibles (de acuerdo a los diferentes criterios adoptados de selección de elementos combustibles) para el núcleo en equilibrio y bajo condiciones normales de operación, pueden obtenerse las siguientes conclusiones:

- a) La presión interior máxima alcanzada por una BC es inferior a los 7,5 MPa, habiéndose establecido como límite de diseño 12,25 MPa. (Fig. 35)
- b) La variación de la tensión tangencial máxima de la vaina para la BC más exigida, considerando a ésta acondicionada en el momento de la interacción pastilla-vaina y para una presión de llenado de 1,5 MPa, es de aproximadamente 70 MPa (Fig. 40). El valor máximo establecido es de 180 MPa.
- c) La variación de la tensión tangencial máxima, considerando una reducción en el espesor de la vaina del 20% y para una presión de llenado de 1,5 MPa, alcanza los 80 MPa. (Fig. 14).
- d) La temperatura central máxima de la pastilla combustible es menor a los 1150°C (Fig. 27). El valor límite establecido es de 2700°C.
- e) La deformación tangencial máxima de la vaina en el rango de las tensiones de tracción, considerando una reducción del espesor de la vaina del 20% y una presión

de llenado de 1,5 MPa, es de aproximadamente 0,1% (Fig. 15), frente al 1% establecido como límite.

- f) El alargamiento máximo de la vaina, considerando la longitud de pastillas como longitud de referencia, es menor a 1,1% (Fig. 5).
- g) La interacción pastilla-vaina, como es de esperar, se logra para quemados inferiores cuanto menor es la presión de llenado.
- h) Debido a la interacción pastilla-vaina, las mayores variaciones en la tensión tangencial se producen cuando la presión de llenado es menor (1,5 MPa).

El análisis de comportamiento de las BC fue realizado considerando una presión de llenado inicial entre 1,5 y 2,5 MPa. Los resultados obtenidos indican claramente, que para el núcleo de equilibrio y en condiciones normales de operación, no se sobrepasan los límites de diseño establecidos.

8. REFERENCIAS

- [1] C. Marino, E. J. Savino, S. Harriague, BACO (Barra Combustible) Code Version 2.20: a thermo-mechanical description of a nuclear fuel rod, Journal of Nuclear Materials Vol. 229, Abril 1996, pp 155-168.
- [2] Documento 0758-0610-IIAKC-061-10 “ Ingeniería conceptual de los elementos combustibles y conjuntos de barras de control y seguridad destinados al reactor CAREM 25 ”.
- [3] Documento 0758-0610-3IAKC-060-10 “ Revisión de los límites de diseño del elemento combustible para el reactor CAREM-25 ”.
- [4] MEM-NEU-00-0018 “ Núcleo heterogéneo para el reactor CAREM 25 con elementos combustibles de 3,1% de enriquecimiento y modelado explícito de separadores de Inconel 718 ”.
- [5] MEM-NEU-00-0019 “ Datos de quemado y densidad de potencia del núcleo del reactor CAREM ”.
- [6] MATPRO: “A Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of LWR Fuel Rod Behavior”, 1979, pp 329-334.

9. GRÁFICOS

Se presenta a continuación en forma gráfica, los resultados obtenidos del comportamiento de las BC para los diferentes criterios e historias de potencia adoptados.

En los resultados solamente se muestra la evolución en función del quemado de los parámetros que han sido limitados por diseño.

9.1 CRITERIO a-1)

La barra de mayor quemado a lo largo de los dos ciclos; corresponde al EC (11→10) con un quemado de extracción de 25030 MWd/TU.

La evolución de los radios (pastilla, vaina), tensión tangencial, temperatura máxima de pastilla y deformación de la vaina para este EC, se analiza en el criterio B-1).

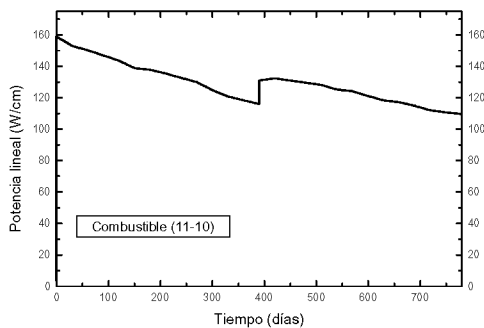


Figura 1: Potencia lineal en función del tiempo para una BC del EC (11→10).

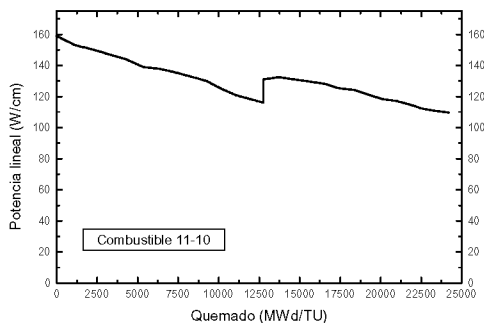


Figura 2: Potencia lineal en función del quemado para una barra combustible del EC (11→10).

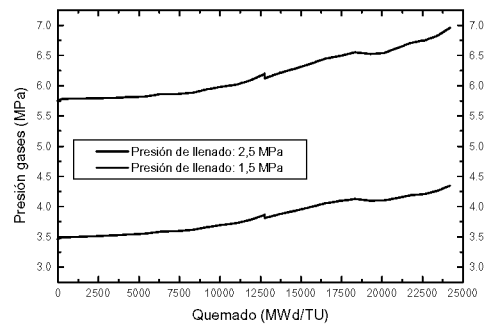


Figura 3: Evolución de la presión interna en función del quemado en una BC del EC (11→10) para dos presiones de llenado.

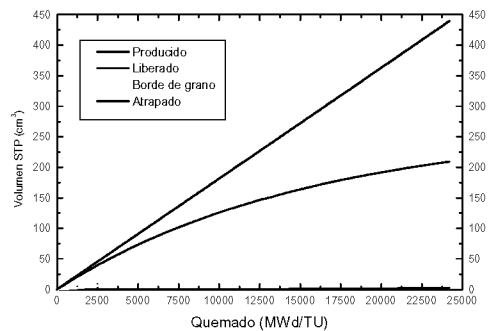


Figura 4: Gases producidos, atrapados y liberados en una BC del EC (11→10), para una presión de llenado de 2,5 MPa.

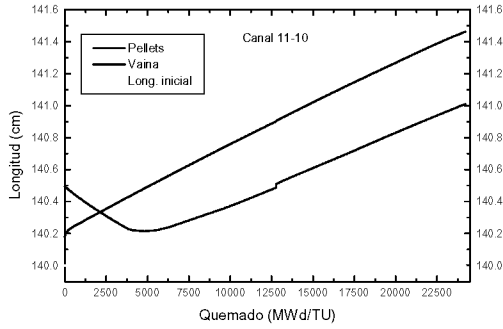


Figura 5: Longitud de la columna de pastillas y de la vaina combustible de una BC del EC (11→10) en función del quemado para una presión de llenado de 2,5 MPa.

9.2 CRITERIO A-2)

La BC de mayor quemado durante el primer ciclo; corresponde al canal 5. La evolución de los radios de pastilla y vaina, tensión tangencial y deformación radial, se analiza en el criterio B-2).

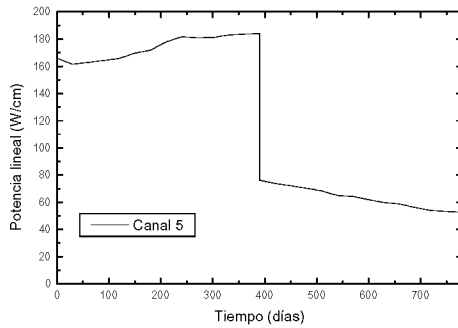


Figura 6: Potencia lineal en función del tiempo para una BC del EC en el canal 5.

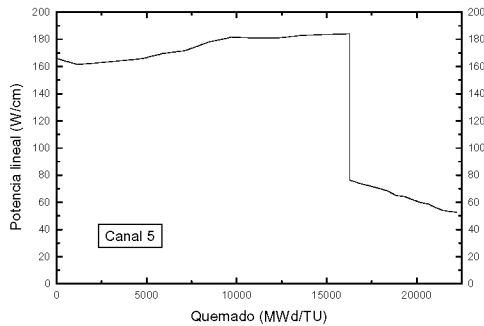


Figura 7: Potencia lineal en función del quemado para una BC del EC en el canal 5.

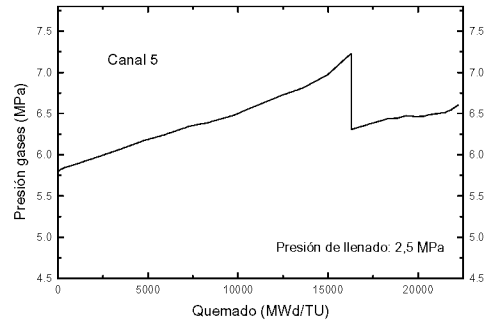


Figura 8: Evolución de la presión en función del quemado para una BC del canal 5, para una presión de llenado de la BC de 2,5 MPa.

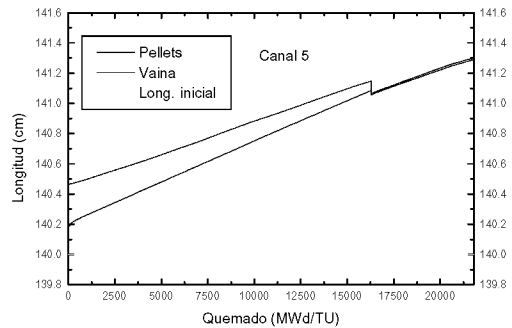


Figura 9: Longitud de la columna de pastillas y de la vaina de una BC del EC en el canal 5 con una presión de llenado de 2,5 MPa.

9.3 CRITERIO A-3)

La barra de mayor quemado durante el segundo ciclo corresponde al canal 10, con un quemado de BC de 11600 MWd/TU. Este combustible fue analizado en el punto 9.1 cuando fue considerado el EC de mayor quemado a lo largo de los dos ciclos.

9.4 CRITERIO B-1)

El sector axial de mayor quemado durante los dos ciclos; corresponde al sector axial 10 del EC (11→10) con un quemado de 30700 MWd/TU.

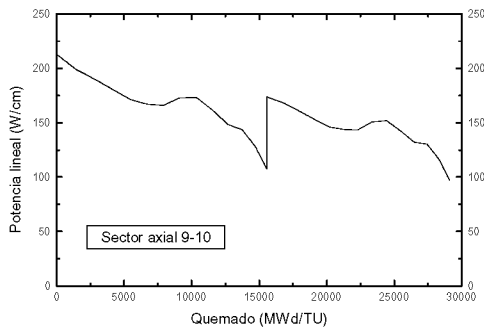


Figura 10: Potencia lineal en función del quemado para el sector axial 9-10 de una BC del EC (11→10).

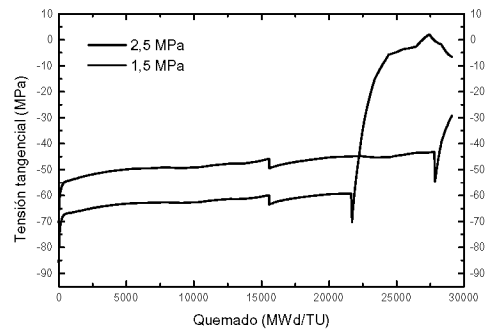


Figura 12: Tensión tangencial en la vaina en una BC para dos presiones de llenado en el sector axial 9-10 del EC (11→10).

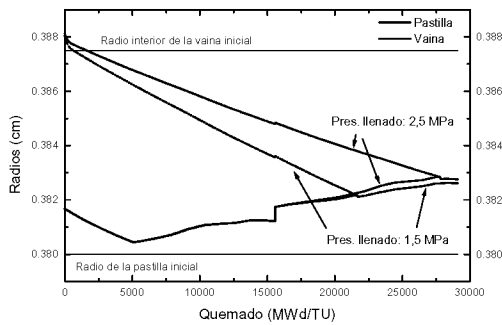


Figura 11: Radios de la pastilla y vaina del sector axial 9-10 de una BC del EC (11→10), para dos presiones de llenado de BC.

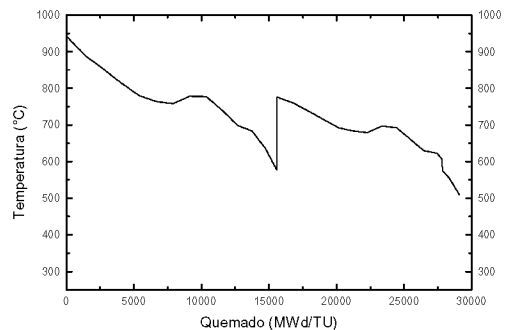


Figura 13: Temperatura central de la pastilla para el sector axial 9-10, en una BC del EC (11→10).

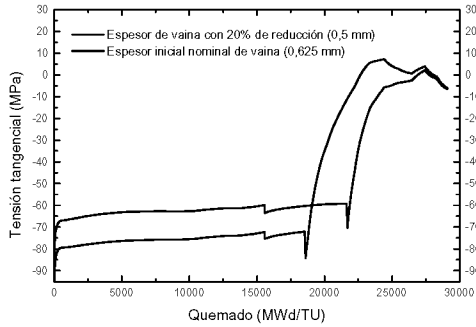


Figura 14: Tensión tangencial de la vaina en el sector axial 9-10 en una BC del EC (11→10), para distintos espesores de la misma y una presión de llenado de 1,5 MPa.

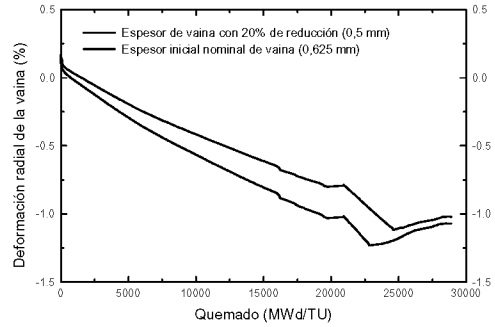


Figura 15: Deformación radial de la vaina para dos espesores de vaina en el sector axial 9-10 de una BC del EC (11→10), para una presión de llenado de 1,5 MPa.

9.5 CRITERIO B-2)

El sector axial de mayor quemado durante el primer ciclo; corresponde al sector axial 11 del canal 5, con un quemado máximo de BC de 20610 MWd/TU.

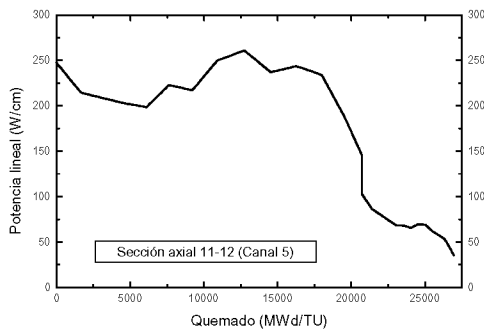


Figura 16: Potencia lineal en la sección axial 11-12 de una BC del EC en el canal 5.

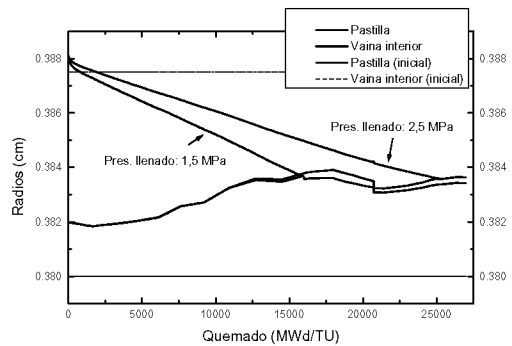


Figura 17: Radios en función del quemado de una BC, para dos presiones de llenado, del EC en el canal 5.

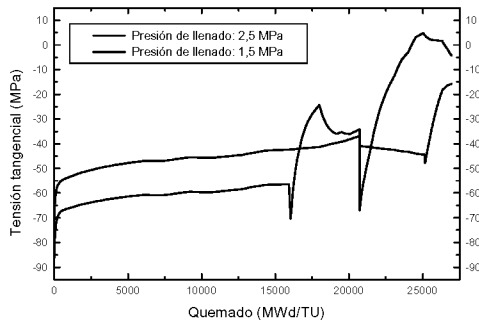


Figura 18: Tensión tangencial en la vaina, para dos presiones de llenado, en una BC del canal 5, para el sector axial 11-12.

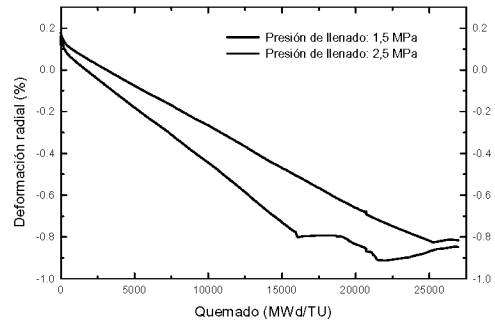


Figura 19: Deformación radial de la vaina, para dos presiones de llenado, en el sector axial 11-12 de una BC del canal 5.

9.6 CRITERIO B-3)

El sector axial de mayor quemado durante el segundo ciclo; corresponde al sector axial 13 del canal 2, con un quemado de 15600 MWd/TU.

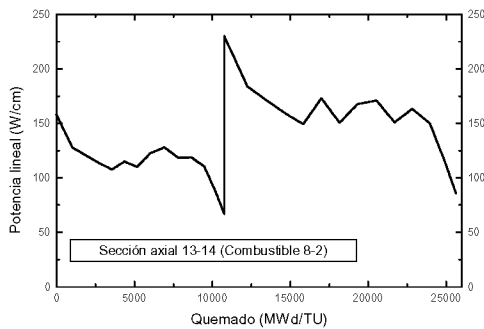


Figura 20: Potencia lineal de una BC de la sección axial 13-14 del EC (8→2).

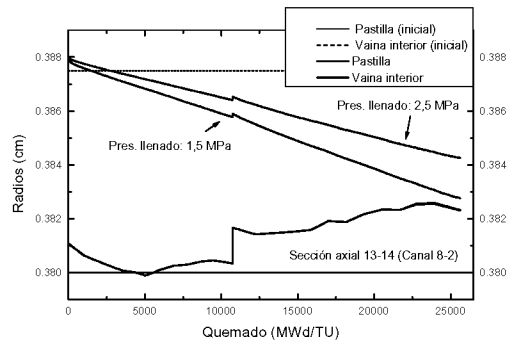


Figura 21: Radios de la pastilla y de la vaina de una BC en el sector axial 13-14 del EC (8→2) para dos presiones de llenado.

Como se observa en la Figura 21, no existe interacción pastilla-vaina, por lo tanto no se realiza una evaluación de la tensión tangencial de la vaina ni su deformación radial.

9.7 CRITERIO C)

El sector axial que en un determinado momento del ciclo se encuentra a mayor potencia; corresponde al sector axial 11 del canal 12 al comienzo de vida, con una potencia lineal de 265 W/cm.

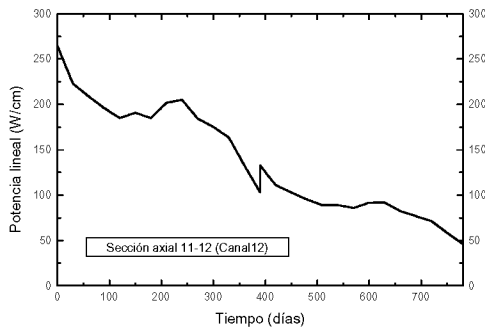


Figura 22: Potencia lineal de una BC en la sección axial 11-12 del EC del canal 12.

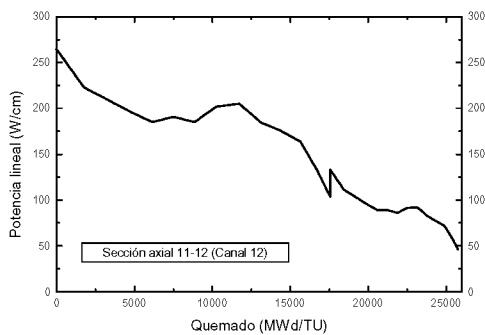


Figura 23: Potencia lineal en función del quemado de una BC en el sector axial 11-12 del canal 12.

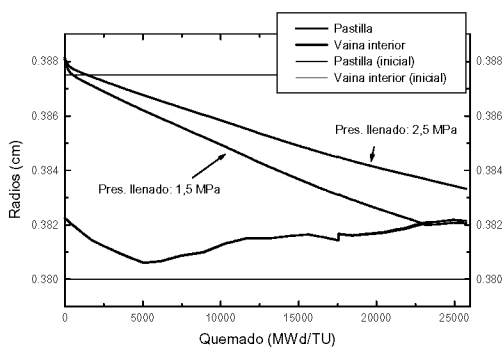


Figura 24: Radios de la pastilla y de la vaina del sector axial 11-12 de una BC del canal 12 para dos presiones de llenado.

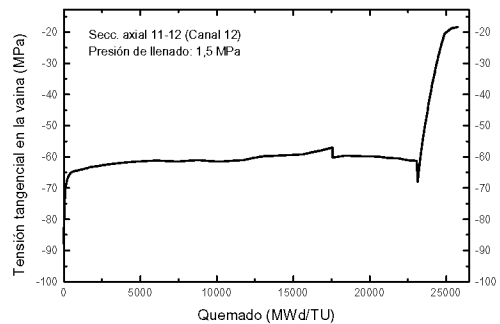


Figura 25: Tensión tangencial en la vaina, para una presión de llenado de 1,5 MPa.

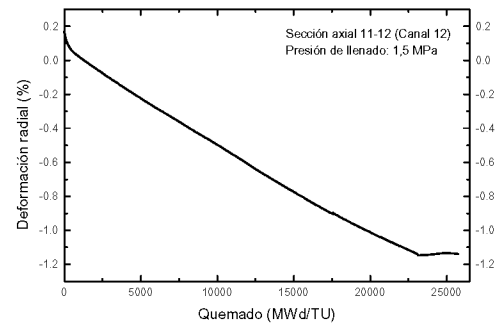


Figura 26: Deformación radial de la vaina para una presión de llenado de 1,5 MPa.

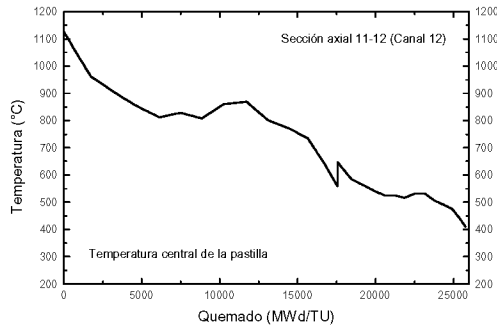


Figura 27: Temperatura central de pastilla de una BC en la sección axial 11-12 del canal 12. Al inicio de vida se tiene la máxima temperatura central (ver conclusiones).

9.8 CRITERIO D)

La barra que en un determinado momento del ciclo está a mayor potencia. Corresponde al canal 12 al comienzo de vida. Con una potencia lineal levemente inferior, se encuentra el canal 3 al final del primer ciclo. Se analizarán los dos casos.

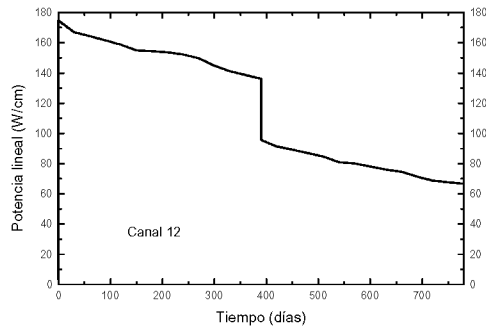


Figura 28: Potencia lineal en función del tiempo para una BC del canal 12.

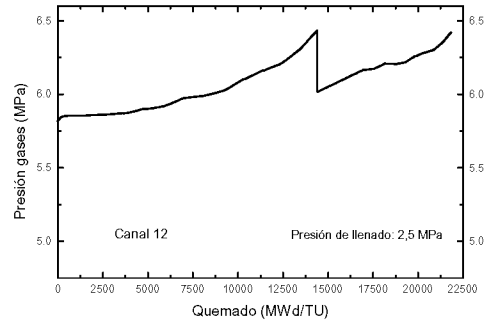


Figura 30: Presión interna de la BC en función del quemado para una barra del canal 12.

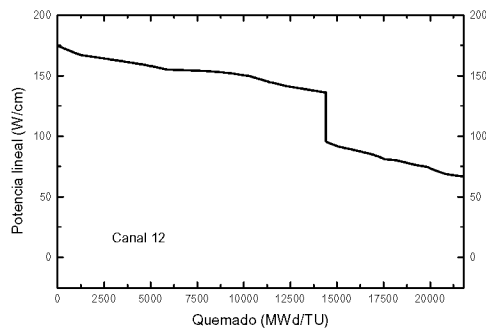


Figura 29: Potencia lineal en función del quemado de una BC del canal 12.

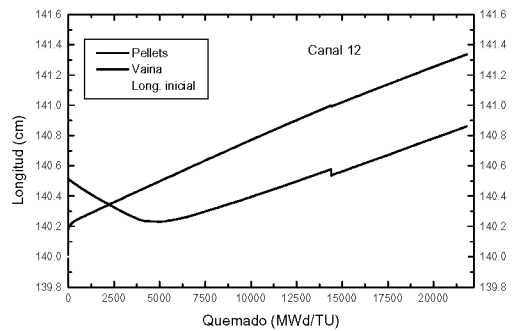


Figura 31: Longitud de la columna de pastillas y de la vaina de una BC en el canal 12.

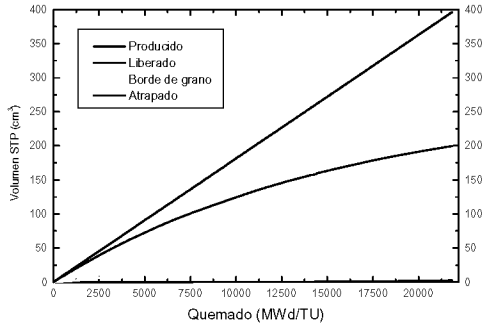


Figura 32: Gases producidos, atrapados y liberados en una BC del canal 12.

Pasaremos a analizar una BC del canal 3, que consigue una potencia similar a la anterior pero al final del primer ciclo.

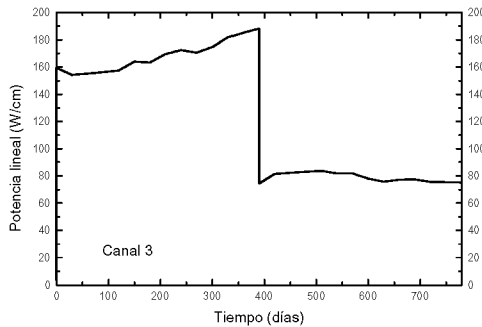


Figura 33: Potencia lineal de una BC del canal 3 en función del tiempo.

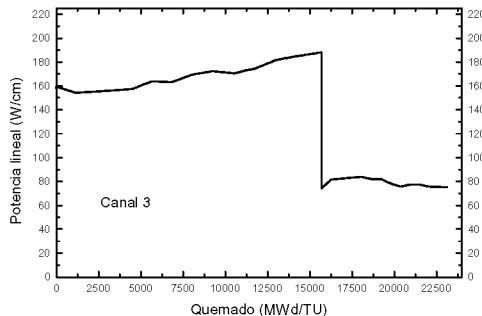


Figura 34: Potencia lineal en función del quemado para una BC del canal 3.

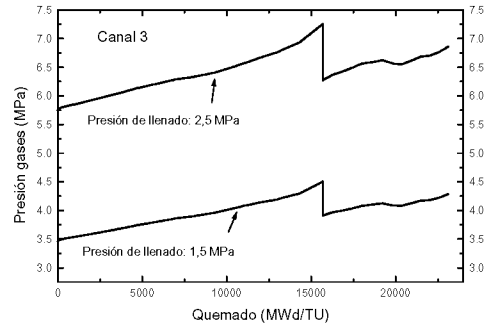


Figura 35: Presión de gases de una BC del canal 3 para dos presiones de llenado. La curva superior corresponde a la máxima presión interior alcanzada por una BC (ver conclusiones).

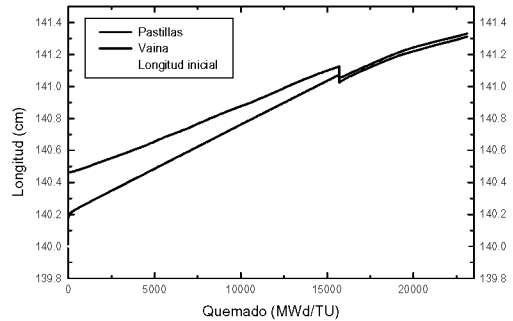


Figura 36: Longitud de pastillas y vaina de una BC en función del quemado en el canal 3 con una presión de llenado de 2,5 MPa.

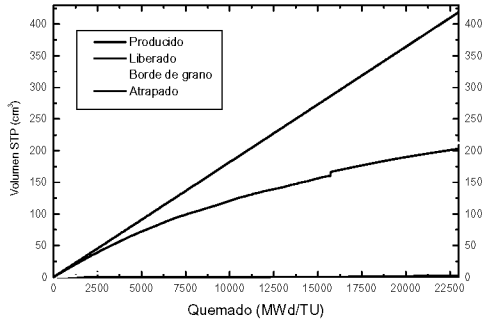


Figura 37: Gases en función del quemado de una BC en el canal 3.

Se analizará ahora, en este canal (canal 3), el sector axial de mayor quemado, que corresponde al sector axial 11.

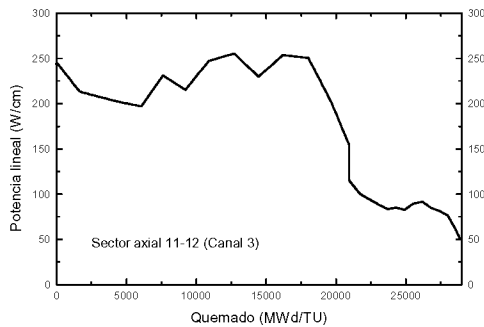


Figura 38: Potencia lineal en la sección 11-12 de una BC del canal 3.

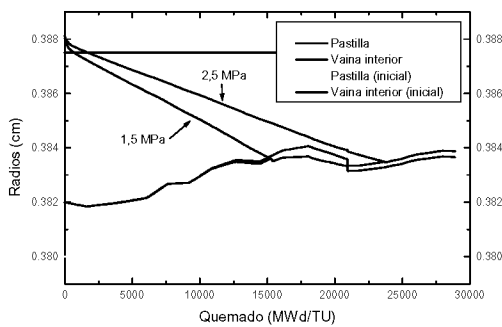


Figura 39: Radios de pastilla y vaina de una BC en la sección axial 11-12 del canal 3, para dos presiones de llenado de BC.

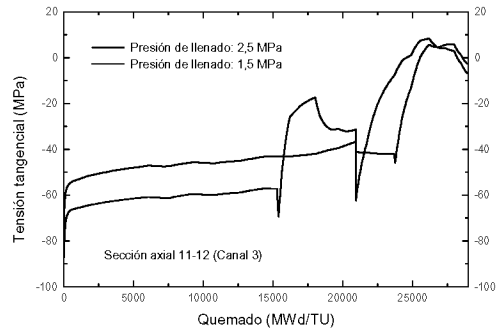


Figura 40: Tensión tangencial en la sección 11 del canal 3 de una BC para dos presiones de llenado. En la curva correspondiente a una presión de llenado de 1,5 MPa se tiene la variación máxima de la tensión tangencial (ver conclusiones).

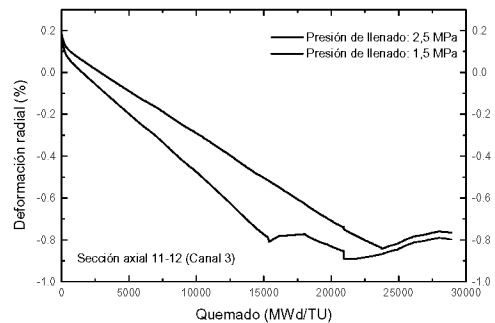


Figura 41: Deformación radial de la vaina de una BC en la sección 11 del canal 3 para dos presiones de llenado.