

APROXIMACIÓN PROBABILÍSTICA AL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE BARRAS COMBUSTIBLES NUCLEARES BAJO IRRADIACIÓN

Armando C. Marino y Gustavo L. Demarco

* División Diseños Avanzados y Evaluación Económica
Centro Atómico Bariloche, CNEA
Av. Bustillo Km. 9,500, San Carlos de Bariloche, R8402AGP Río Negro, Argentina
e-mail: marino@cab.cnea.gov.ar, web page: <http://www.cab.cnea.gov.ar>

Key words: Nuclear Fuels, UO₂, Enief 2004.

***Abstract.** El código BACO (simulación del comportamiento de combustibles nucleares) permite cálculos iterativos como parte de su estructura de programación, permitiendo búsqueda de casos extremos de comportamiento, análisis probabilístico (o estadístico), análisis paramétrico (o de sensibilidad) y puede incluir como datos de entrada a las incertezas asociadas con datos de fabricación, con parámetros del código y de sus modelos. El análisis probabilístico (o estadístico) consiste en el cálculo reiterado del código, seleccionando al azar los parámetros de una barra combustible, teniendo en cuenta sus respectivas distribuciones de probabilidad. Obtenemos un conjunto de datos de entrada de BACO equivalentes a una posible (y real) representación de algún EC resultante de los procesos de fabricación. En este trabajo presentaremos el método y su aplicación en el diseño del combustible CARA y del combustible para el reactor CAREM.*

1 INTRODUCCIÓN

El comportamiento termo-mecánico de una barra combustible (BC) sometida a irradiación es un proceso complejo en el que se acoplan gran cantidad de fenómenos físico-químicos interrelacionados. Los experimentos efectuados en reactores experimentales distan mucho de dar cuenta completa de tal comportamiento en razón de las dificultades experimentales inherentes al proceso. Tanto los modelos, como los resultados, son predicciones determinísticas de procesos que distan de serlo. Por lo tanto, lo único que puede exigírseles para ser tenidos en cuenta como predicción confiable, es que ajuste a los datos experimentales existentes. El código BACO (BARRA COMbustible) ha sido desarrollado en CNEA para la simulación del comportamiento de combustibles nucleares. Una de las aplicaciones de este tipo de códigos es predecir, dentro de cierto margen de confiabilidad, los parámetros de diseño a ajustar a fin de conseguir mayor economía o rendimiento, proveyendo una aproximación sistemática a la optimización del diseño del combustible. Por otro lado estos códigos resultan una eficaz herramienta matemática en cuyo marco presentar los resultados experimentales, asignándoles su importancia relativa para el comportamiento del elemento, como así también dar una guía dentro de la cual ensayar los elementos combustibles, disminuyendo el número de costosas experiencias. BACO permite cálculos iterativos como parte de su estructura de programación, permitiendo búsqueda de casos extremos de comportamiento, análisis probabilístico (o estadístico), análisis paramétrico (o de sensibilidad) y puede incluir como datos de entrada a las incertezas asociadas con datos de fabricación, parámetros del código y de los modelos asociados. Siendo uno de los pioneros es este tipo de técnicas.

Una barra combustible nuclear consiste en un tubo (o vaina) de Zircaloy en cuyo interior se apila un conjunto de pastillas cilíndricas de UO_2 . Un elemento combustible nuclear consiste en un manojó de barras combustibles ensambladas con elementos estructurales, en general, de Zircaloy (ver figura 1).

El análisis de los “casos extremos” de comportamiento se basa en la búsqueda de los límites de operación del Elemento Combustible (EC) y de las combinaciones de parámetros del combustible (especialmente dimensiones), asociada a sus tolerancias de fabricación, que alcanzan los límites de operación en los parámetros (o variables) de comportamiento (temperaturas, tensiones, deformaciones, presiones, etc.).

Definimos como análisis paramétrico (o de sensibilidad) al estudio de la sensibilidad de las variables de comportamiento producto de la variación de los parámetros de la BC. La mecánica del análisis de sensibilidad consiste en series de cálculos. Cada serie corresponde a la variación de un parámetro de la BC (o de la irradiación) entre valores máximos y mínimos dados por tolerancias, especificaciones o sentido común, mientras el resto mantiene su valor nominal. Cada serie produce una curva de sensibilidad para cada variable de comportamiento. A partir de esas curvas se determina la influencia relativa de cada parámetro. El análisis paramétrico (o de sensibilidad) es particularmente útil como paso previo al análisis probabilístico (o estadístico) pues reduce el costo computacional al reducir el número de variables de comportamiento y de parámetros de la BC que deberán incluirse en los cálculos.

El análisis probabilístico (o estadístico) consiste en el cálculo reiterado del código seleccionando conjuntamente al azar los parámetros de la BC teniendo en cuenta sus respectivas distribuciones de probabilidad. La variación simultánea de parámetros produce el equivalente a un nuevo conjunto de datos de entrada de BACO y puede ser considerado como una posible (y real) representación de algún EC resultante de los procesos reales de fabricación. El análisis probabilístico puede ser ejecutado sin las etapas anteriores. Sin embargo, el costo computacional representado por el método de Montecarlo puede ser reducido a partir del conocimiento de la influencia relativa de los parámetros involucrados.

Este tipo de técnicas conduce a resultados relevantes que el análisis habitual de las situaciones habituales del combustible nuclear no preveían. El diseño del combustible CARA y del combustible para el reactor CAREM hacen uso intensivo del método de análisis de sensibilidad en todas sus facetas. La definición de las irradiaciones, de las características dimensionales y tolerancias de las barras combustibles CARA utilizan métodos estadísticos.

En trabajos previos presentados en anteriores reuniones de ENIEF hemos presentado al código BACO y sus aplicaciones ¹, validación y extensión del rango de uso de BACO a través la participación en programas internacionales “ad hoc” ² y aspectos preliminares al análisis probabilístico efectuado con BACO ³. En este trabajo presentamos el estado actual de desarrollo de BACO y el método de análisis probabilístico aplicado al diseño de combustibles innovativos como CARA ⁴ y el combustible del reactor CAREM ⁵.



Figura 1: Primer prototipo de combustible CARA.

2 EL CÓDIGO BACO

2.1 Descripción del Código

El código BACO, en su actual estado de desarrollo, permite calcular el estado de tensión-deformación de una barra combustible (BC) bajo irradiación. Trabajamos bajo hipótesis de estado plano de tensión-deformación y simetría axial. BACO consta de aproximadamente 10000 instrucciones escritas en FORTRAN 90 compatible con sistemas Windows, LINUX y UNIX. Se utilizan planillas de cálculo EXCEL o QUATRO PRO para la visualización automática de los resultados (en formato gráfico).

2.2 Tratamiento mecánico

Conocido el estado de tensión-deformación para un dado tiempo t_0 , se supone que el correspondiente a un tiempo $t_0 + \delta t$ (para δt suficientemente pequeño) puede calcularse como:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \delta\varepsilon$$

donde: ε_0 es el valor de una magnitud tensión o deformación en t_0 y $\delta\varepsilon$ su variación temporal. Las ecuaciones a integrar consisten esencialmente en las ecuaciones de compatibilidad para cada anillo, la de equilibrio y las ecuaciones de Hooke generalizadas. Esto constituye un sistema de siete ecuaciones diferenciales acopladas. Al aplicar la aproximación de diferencias finitas se obtiene un sistema de ecuaciones algebraicas, el cual es linealizable. La solución, al fin del intervalo δt , se obtiene por un proceso de inversión de matrices.

2.3 Tratamiento térmico

El perfil de temperatura se calcula a geometría actualizada, por integración sucesiva de la ecuación de Fourier suponiendo conocida la temperatura en la superficie de la vaina y la potencia térmica extraída por el refrigerante.

2.4 Tratamiento numérico

- Hipótesis de simetría axial y deformaciones planas (cálculo cuasi-bidimensional).
- Coordenadas cilíndricas.
- División espacial de pastilla y vaina en anillos circulares concéntricos.
- División espacial de la columna activa (pastillas y vaina) en secciones axiales.
- Método de diferencias finitas para la integración de las ecuaciones de comportamiento.
- Tiempo de irradiación subdividido en intervalos finitos para efectuar la integración temporal

2.5 Análisis de sensibilidad

BACO incluye el tratamiento del error estadístico proveniente de los datos de entrada; el análisis paramétrico (o de sensibilidad) y el análisis probabilístico (o estadístico), junto con la evaluación de los casos extremos de comportamiento. BACO permite cálculos iterativos como parte de su estructura de programación permitiendo búsqueda de casos extremos de

comportamiento y análisis de sensibilidad. Para esto se incluye como datos de entradas a las incertezas asociadas con los parámetros de fabricación, de los diferentes modelos incluidos y propios del código. Este tipo de técnicas conduce a resultados relevantes que el análisis basado en simples corridas de códigos no preveían ni pueden prever, resultando relevantes a la hora de diseñar elementos combustibles novedosos, preparación de irradiaciones experimentales e interpretación de las mismas.

2.6 Modelos de Comportamiento Incorporados

Fenómenos de comportamiento incluidos en BACO:

2.6.1 Pastillas de UO₂

- Expansión térmica lineal.
- Deformaciones elásticas.
- “Creep” bajo irradiación.
- Conductividad térmica del UO₂.
- Apertura y cierre de fisuras axiales y tangenciales en la pastilla (fisuras abiertas por tensiones axiales o tangenciales).
- Tratamiento de las fisuras “radiales” (fisuras circunferenciales abiertas por tensiones radiales).
- “Relocation” de fragmentos de pastilla.
- Reestructurado (crecimiento de granos columnares, equiaxiados, apertura de un canal o agujero central).
- “Swelling” (hinchado de la pastilla producido por productos de fisión gaseosos).
- Densificación térmica y por irradiación (migración de porosidad).
- Liberación de gases de fisión (Xe y Kr).

2.6.2 Para las vainas de Zircaloy

- Expansión térmica lineal.
- Elasticidad.
- Plasticidad.
- “Creep” bajo irradiación.
- Crecimiento bajo irradiación.
- Conductividad térmica.

2.6.3 Fenómenos generales

- Conductancia térmica del gap (separación) entre la pastilla y la vaina.
- Transitorios de potencia.

2.7 “Input” del código BACO

2.7.1 Datos generales:

2.7.1.1 Característicos de la BC:

- Dimensiones de pastilla, vaina y barra (radios, longitud, “dishing”, “plenum”, etc.)
- Gases de llenado (composición de gases, presión de llenado, etc.)

2.7.1.2 Característicos de los materiales:

- Constantes de comportamiento (constantes de anisotropía, constante de elasticidad y plasticidad)

2.7.1.3 Característicos de los materiales:

- Historia de potencia.
- Datos del refrigerante (presión y temperaturas).
- Datos neutrónicos (flujo de neutrones rápidos, calentamiento gamma de la vaina, etc.)

2.7.2 Estudios de sensibilidad (diseño de EC):

- Valores medios, distribución y parámetros de la distribución de los datos de entrada, parámetros internos de los modelos y del código.
- Valores mínimos y máximos de los diferentes parámetros.

2.7.3 Estudios modelísticos (no válidos para diseño y análisis de BC):

- Selección de diferentes modelos para un mismo aspecto de comportamiento.
- Influencia relativa de los diferentes modelos.

2.8 “Output” del código BACO

2.8.1 Salida standard (principales parámetros):

- Estado de tensión-deformación.
- Radios y longitudes de pastilla y vaina.
- Apertura, cierre y sellado de fisuras (“cracks”) axiales y radiales.
- Perfil de temperatura.
- Composición, distribución y presión de gases
- Estructura de grano, zona de granos equiaxiados y columnares.
- Apertura y cierre de agujero central.
- Volumen de plenum.
- Histograma de porosidad.

2.8.2 Estudios de sensibilidad:

- Curvas de sensibilidad de resultados del cálculo en función de la variación de un parámetro de entrada (o interno del código).
- Histogramas de parámetros calculados por el código.

3 DISEÑO DE BARRAS COMBUSTIBLES

3.1 Análisis de Sensibilidad de Barras Combustibles CANDU y ATUCHA I

El análisis de sensibilidad de un combustible tipo CANDU está detallado en la Referencia 6 y, el combustible de la CN Atucha, en la Referencia 7. Los principales resultados de ese análisis los focalizamos en la temperatura central de la pastilla (donde encontramos el máximo valor durante la irradiación), las tensiones en la cara interna de la vaina (o “hoop stress”, por su relación uno de los mecanismos de falla de combustibles) y la presión de gases libres en el interior de la BC (debido a razones de seguridad), en síntesis:

- 1) Las curvas “random” de temperatura están incluidas dentro de la franja comprendida por las curvas “extremas” (es decir, están por debajo o por encima de las temperaturas máximas y mínimas, respectivamente). Este es el resultado que esperamos luego de los análisis conservativos “habituales”.
- 2) El “hoop stress” de la vaina muestra varias curvas que representan valores mayores (o menores) que las curvas que surgen del análisis de los casos extremos. Esto último resulta novedoso y no deseable por su vínculo con el aumento de la probabilidad de falla por PCI-SCC (“Pellet Cladding Interaction – Stress Corrosion Cracking”)
- 3) Encontramos una gran dispersión a comienzo de la irradiación (debido a la diferente separación entre pastilla y vaina iniciales) para la “hoop stress”. Sin embargo,
- 4) Estas curvas convergen a medida que se “quema” el combustible.
- 5) El cálculo de la presión de gases muestra curvas por encima y por debajo de los valores “extremos”.
- 6) Siguiendo con la presión de gases, se observa que la dispersión de las curvas aumenta con el “quemado”.

El diseño original de esos combustibles está fundamentado en la determinación de casos extremos de comportamiento. Sin embargo, hallamos que esos límites pueden superarse por una combinación de dimensiones y parámetros de materiales compatibles con el diseño original, supuestamente conservativo. Este tipo de análisis es especialmente útil para la evaluación del diseño de combustibles de mayor quemado como los nuevos combustibles tipo ULE (Uranio Levemente Enriquecido) en la CN Atucha I [8].

3.2 Barra Combustible CARA: Análisis Paramétrico

Una aproximación al análisis paramétrico realizado en la etapa de diseño de las barras combustibles CARA se representa en el grupo de Figuras 2 a 7. En esta etapa del diseño estamos analizando la influencia, o peso, de los diferentes parámetros de la barra (dimensionamiento, constantes de materiales, límites de operación, etc.) con la idea de

identificar su influencia relativa en el comportamiento del combustible. Con fines ilustrativos, las figuras mencionadas sólo incluyen los parámetros más significativos: radio de la pastilla, densidad del UO_2 , radio interno de la vaina, altura de la pastilla y profundidad del “dishing” (concavidad que se incluye en las superficies planas de la pastilla cilíndrica).

En la Figura 2 se analiza la respuesta de la temperatura central de la pastilla durante una rampa de potencia al comienzo de vida (o BOL, “Beginning Of Life”). El eje X varía entre 0 y 1 (corresponde al menor y mayor valor aceptable del parámetro). El menor valor de la densidad del UO_2 produce las mayores temperaturas debido al fenómeno de densificación (reducción del volumen de la pastilla provocado por sinterizado térmico UO_2). La densificación aumenta la separación radial (“gap”) entre la pastilla y la vaina, ello reduce la conductancia incrementando la temperatura.

La figura 4 analiza la tensión tangencial (“hoop stress”) en la cara interna de la vaina durante una exigente (y real) rampa de potencia durante la irradiación (corresponde a un recambio de combustible en la CN Atucha I). Las figuras 2 y 4 corresponden al análisis paramétrico como etapa posterior a un análisis de casos extremos. La pastilla alcanza su mínima temperatura cuando el radio de la pastilla o el radio interno de la vaina presentan el menor gap. Sin embargo, la ventaja de esos radios particulares la perdemos cuando vemos que, en esa condición particular, la “hoop stress” presenta los mayores valores para esa tensión. Esas tensiones resultan incompatibles con márgenes de seguridad que mantengan la integridad de la vaina y no provoquen una falla del combustible por PCI-SCC. Repetimos el análisis paramétrico evaluando tensiones, deformaciones, temperaturas, presiones, etc. bajo diferentes condiciones de irradiación. El procedimiento permite obtener un buen conocimiento de la influencia individual de cada parámetro en el comportamiento del combustible. La figura 6 representa la evaluación de la presión interna de los gases libres en la BC.

Esos resultados permiten ajustar los parámetros como así también, luego del “feedback” con los fabricantes, efectuar una primera evaluación de sus tolerancias de fabricación. De hecho, sólo obtenemos un nuevo conjunto de parámetros más acotado, pero más real, que utilizaremos para una nueva sesión de análisis paramétrico que permita finalizar la elección de un plano y procesos para la fabricación del combustible. Las figuras 3, 5 y 7 muestran estos nuevos cálculos. Una definición realista podría significar un incremento de los valores de esos parámetros. Sin embargo, esos incrementos producen una solución ingenieril estable manteniéndose dentro de los márgenes de seguridad previstos. Esto último es lo que se refleja en las figures 6 y 7 (presión de gases libres dentro de la barra combustible).

De este conjunto de cálculos se determinó que, para un combustible CARA, los principales parámetros de diseño, en cuanto a la mayor influencia en el comportamiento bajo irradiación, son: el radio de la pastilla, la profundidad del “dishing” y el radio interno de la vaina. El radio del “dishing” y la densidad del UO_2 siguen en importancia. El volumen libre de la BC (o “plenum”) y la altura de la pastilla presentan una influencia mínima. Finalmente, el resto de los parámetros resultan despreciables o fuera del rango de aplicación de BaCo.

Esta serie de cálculos no habilita para tener una apreciación válida del conjunto de parámetros y sus tolerancias que define una BC CARA desde un punto de vista ingenieril.

CARA Fuel Rod - Ramp at BOL Pellet Center Temperature

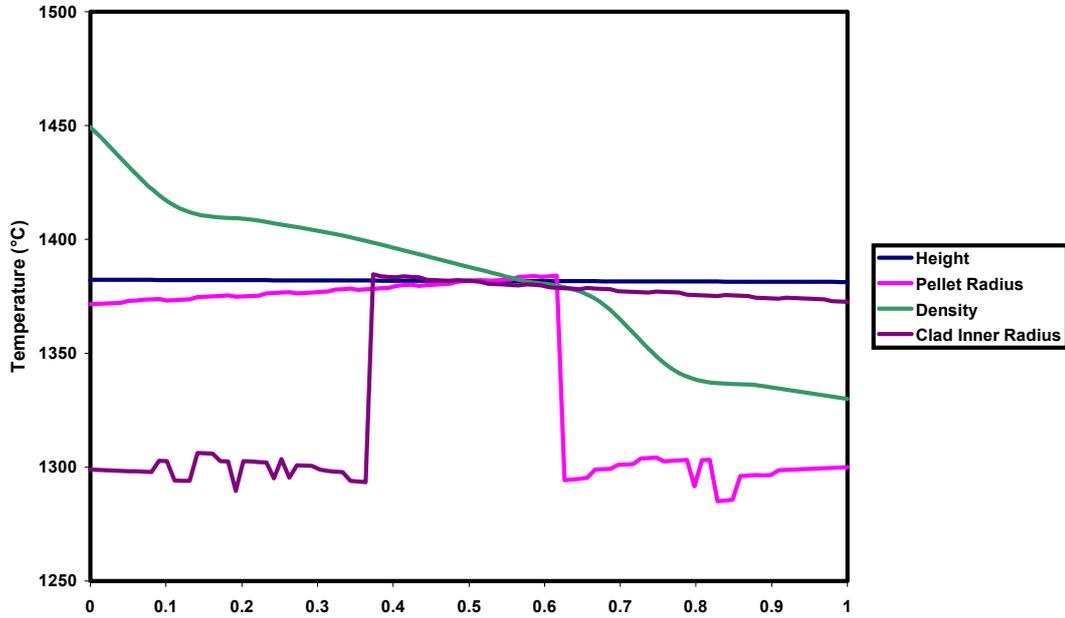


Figura 2: Análisis paramétrico, temperatura central de una pastilla de UO_2 de una barra combustible CARA durante una rampa de potencia a comienzo de la irradiación (BOL). Evaluación de parámetros “razonables” obtenidos luego de la determinación del análisis de casos extremos comportamiento.

CARA Fuel Rod - Ramp at BOL Pellet Center Temperature

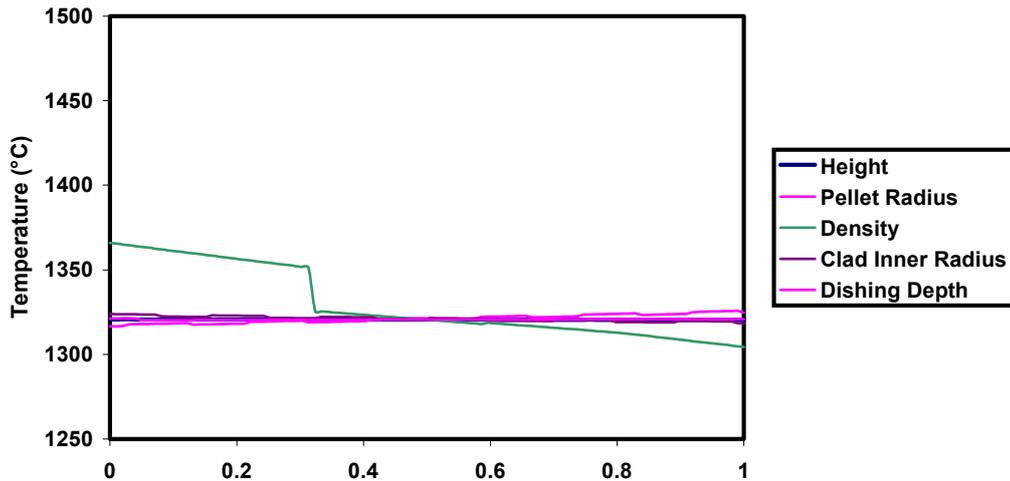


Figura 3: Análisis paramétrico de la susceptibilidad de la temperatura central de una pastilla de UO_2 de una barra combustible CARA luego del ajuste de los parámetros resultado del análisis de la figura 2 y de “feedback” con el fabricante nacional de combustibles (CONUAR).

CARA Fuel Rod - 1er Reshuffling "Hoop Stress" at the inner surface of the clad

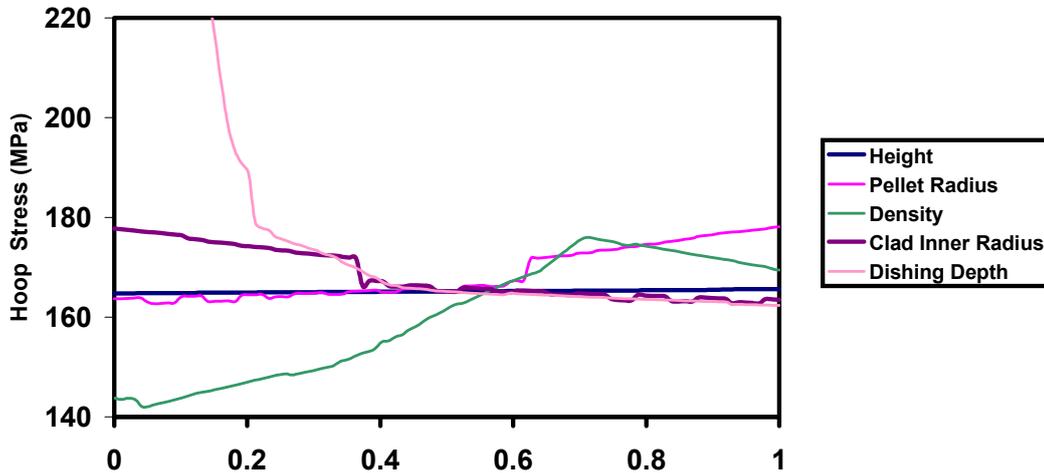


Figura 4: Análisis paramétrico de la susceptibilidad de la tensión tangencial (o “hoop stress”) en la cara interna de la vaina de una BC tipo CARA durante una rampa de potencia en la CN Atucha. Evaluación de parámetros “razonables” obtenidos luego de la determinación del análisis de casos extremos de comportamiento.

CARA Fuel Rod - 1er Reshuffling "Hoop Stress" at the inner surface of the clad

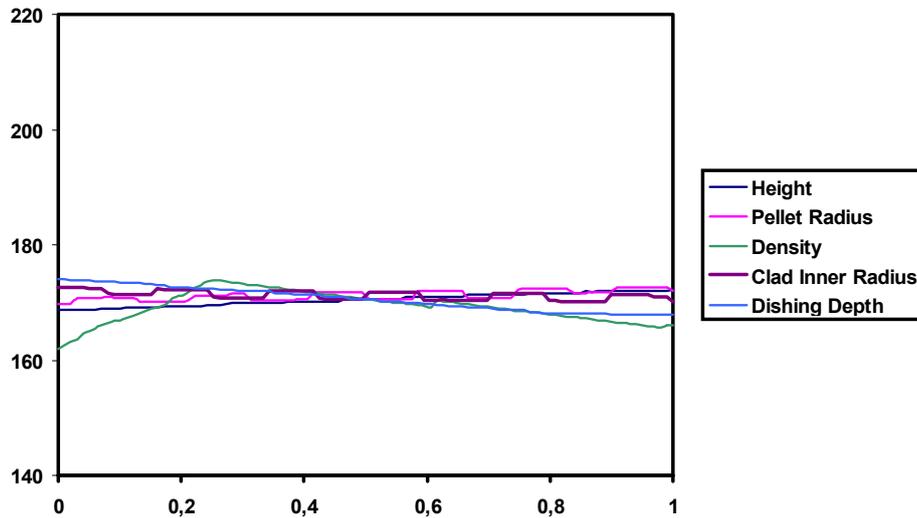


Figura 5: Análisis paramétrico de la susceptibilidad de la tensión tangencial (o “hoop stress”) en la cara interna de la vaina de una BC tipo CARA en una rampa de potencia en la CN Atucha, luego del ajuste de los parámetros resultado del análisis de la figura 4 y del “feedback” con el fabricante nacional de combustibles (CONUAR).

CARA Fuel Rod - 1er Reshuffling Pressure of the Free Gases in the Rod

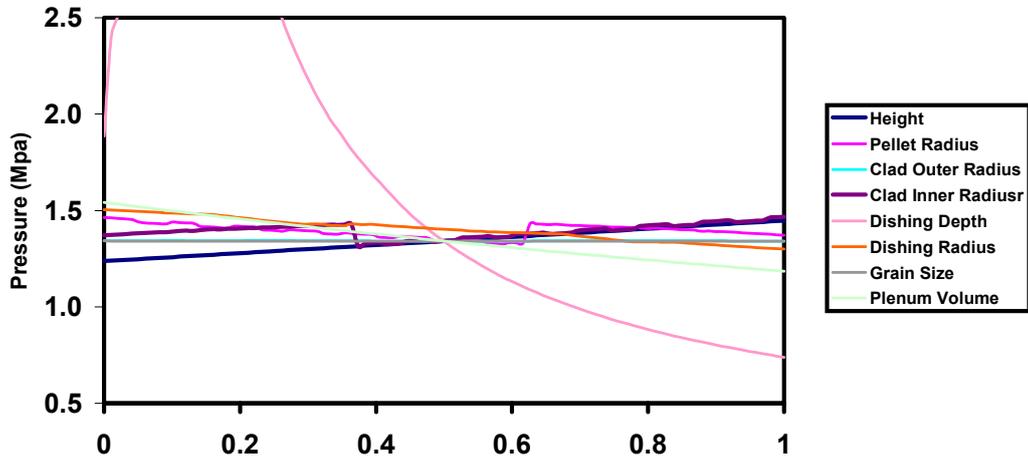


Figura 6: Análisis paramétrico de la susceptibilidad de la presión de gases libres en una BC tipo CARA durante una rampa de potencia en la CN Atucha. Evaluación de parámetros “razonables” obtenidos luego de la determinación del análisis de casos extremos de comportamiento.

CARA Fuel Rod - 1er Reshuffling Pressure of the Free Gases in the Rod

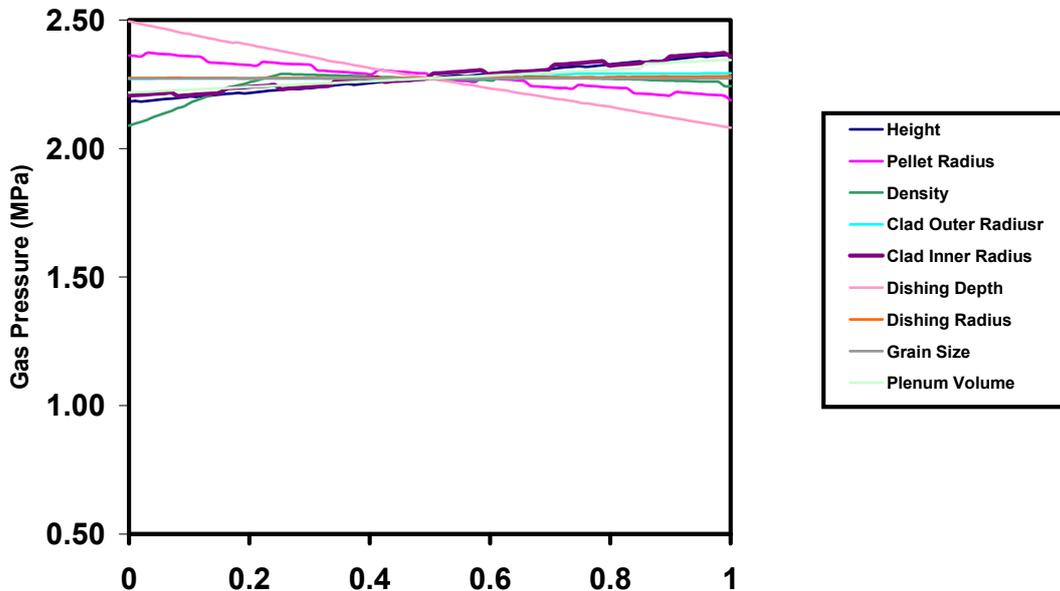


Figura 7: Análisis paramétrico de la susceptibilidad de la presión de gases libres en una BC tipo CARA durante una rampa de potencia en la CN Atucha, luego del ajuste que resulta del análisis de la Figura 6 y del “feedback” con el fabricante nacional de combustibles (CONUAR).

3.3 Barra Combustible CAREM: Análisis Probabilístico

Un análisis probabilístico puede ser efectuado sin necesidad de las etapas anteriores de análisis de casos extremos y análisis paramétrico. Sin embargo, el costo computacional de un cálculo Monte-Carlo puede ser reducido cuando los extremos de comportamiento y la influencia individual de los parámetros es conocida. El diseño del combustible para el reactor CAREM fue asistido mediante análisis probabilístico.

La figura 8 muestra la temperatura central de una pastilla CAREM bajo irradiación en la posición más exigente del núcleo, para las curvas “random” obtenidas con BaCo. La densidad de puntos que se observa en la figura proviene de trazar las n curvas con líneas de puntos. La figura 10 muestra el “hoop stress” de la vaina y la figura 12 incluye la presión interna de los gases libres en el interior de la BC CAREM (a los que se suman los gases liberados durante la irradiación). Las tres figuras evidencian resultados conservativos en cuanto a la integridad de la BC. Las figuras 9, 11 y 13 incluyen la curva promedio (de las n curvas “random”), la curva “standard” (que proviene de un cálculo efectuado con los parámetros nominales) y las curvas promedio mas (y menos) la desviación standard.

Los cálculos de la temperatura presentan una pequeña dispersión durante la irradiación con una convergencia a final de vida (EOL, “End Of Life”). Las curvas promedio y standard muestran comportamientos acordes con esa observación (Figuras 8 y 9).

El cálculo de la “hoop stress” de la vaina (figuras 10 y 11) muestra una gran dispersión entre 6000 y 14000 MWd/tonUO₂. Esta situación se enfatiza en la figura 11 donde encontramos una gran diferencia entre las curvas promedio y standard, a lo que se suma una amplia brecha entre las curvas que incluyen (el promedio mas y menos) la desviación standard. La curva promedio no reproduce una situación real. Esa curva se incluye con propósitos ilustrativos para evaluar cuan representativa es la curva standard del comportamiento planteado por el análisis probabilístico. Sin embargo, la aparición de un incremento en la dispersión de las curvas random puede ser la “llave” para el entendimiento de situaciones particulares que deberán ser tenidas en cuenta. La diferencia en el “gap” radial pastilla-vaina a BOL (comienzo de vida) produce un contacto a diferentes tiempos, de aquí sigue que este efecto es el responsable de esa mayor dispersión. Un argumento equivalente no se puede realizar con el cálculo de la presión de gases (figuras 12 y 13). Esta presión proviene del cálculo extremadamente acoplado de temperaturas y volúmenes dentro de la BC (resultados de la evaluación de tensiones y deformaciones), de ello resulta una difícil búsqueda de sencillos argumentos para explicar las curvas obtenidas.

Este tipo de cálculo y análisis conduce al dimensionamiento final y definición de calidad de materiales para la fabricación de un elemento combustible. La posterior verificación del comportamiento de un elemento combustible será un test de durabilidad (“endurance test”) y/o mediante irradiaciones experimentales. En el caso del combustible CAREM está prevista la realización de este tipo de experimentos con barras instrumentadas en el reactor experimental HRP (Halden Reactor Project) en Noruega [9] y de un prototipo de elemento combustible en el reactor NRU de AECL (Atomic Energy of Canada Ltd) en Canadá [10].

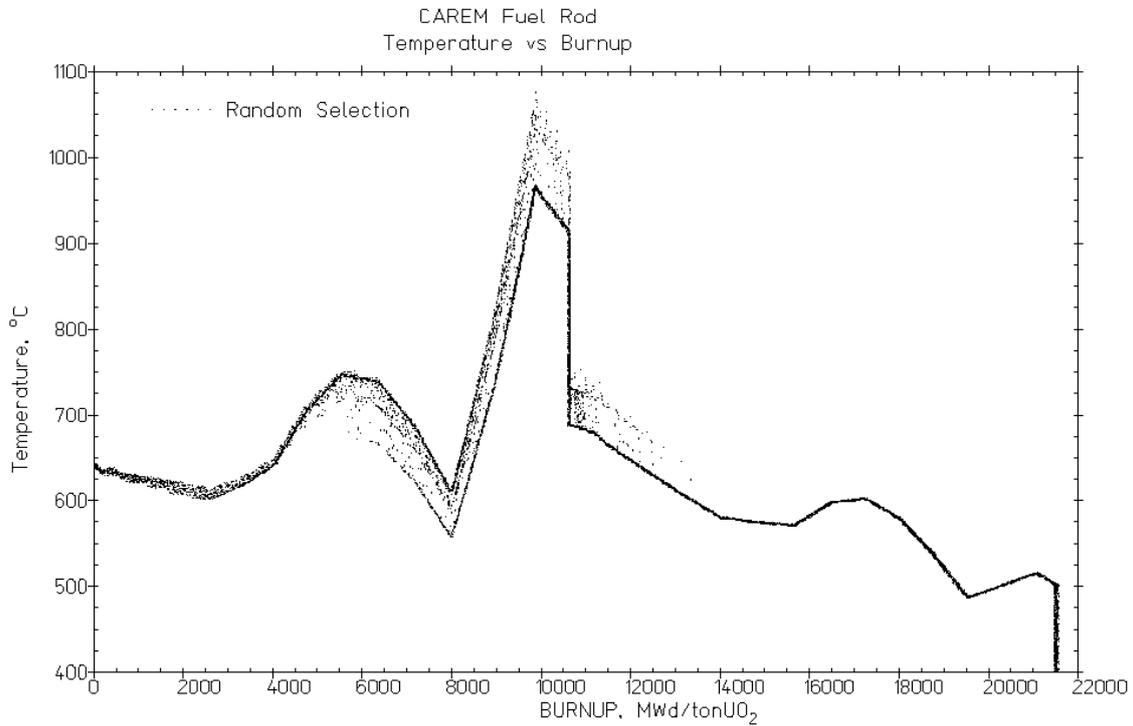


Figura 8: Análisis probabilístico de la temperatura central de una pastilla de UO₂ de una barra combustible tipo CAREM (valores “random”).

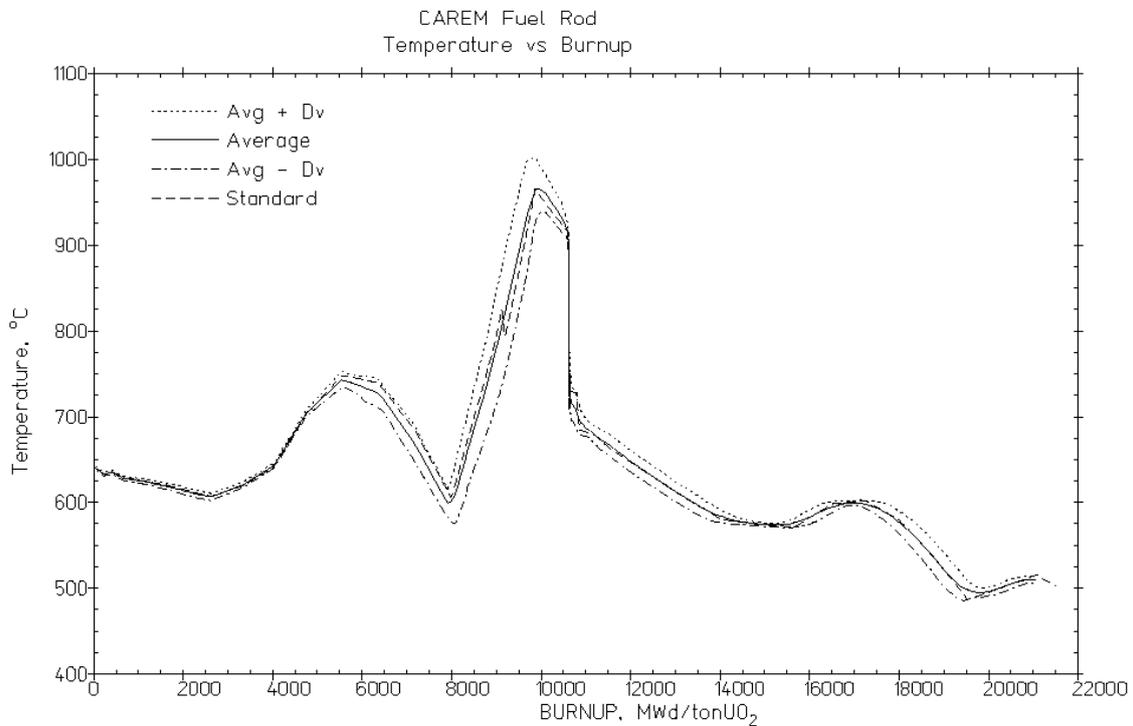


Figura 9: Análisis probabilístico de la temperatura central de una pastilla de UO₂ de una barra combustible tipo CAREM (valores promedio).

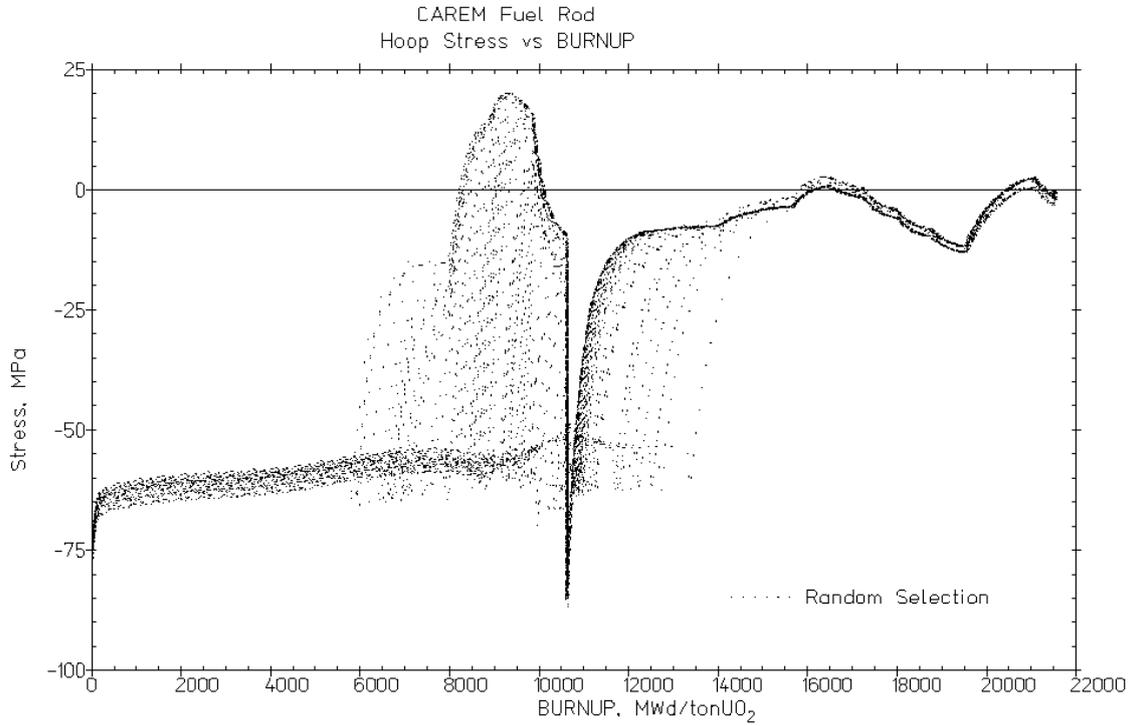


Figura 10: Análisis probabilístico de la tensión tangencial en la cara interna de la vaina (o “hoop stress”) de una barra combustible tipo CAREM (valores “random”).

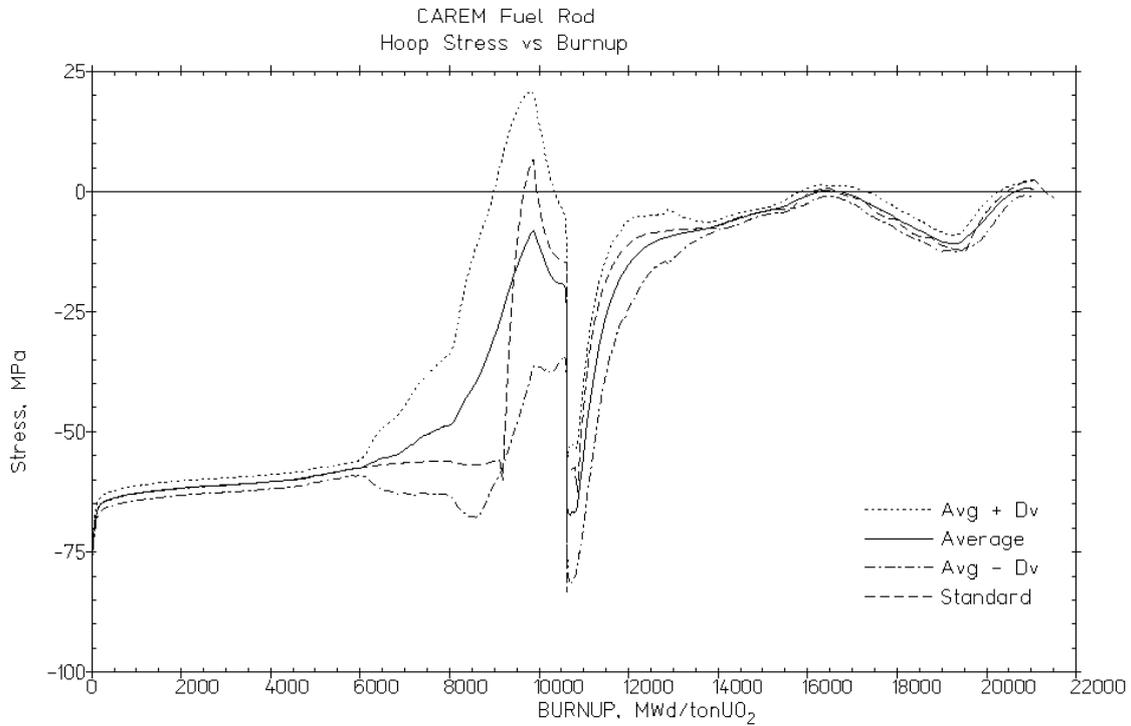


Figura 11: Análisis probabilístico de la tensión tangencial en la cara interna de la vaina (o “hoop stress”) de una barra combustible tipo CAREM (valores promedio).

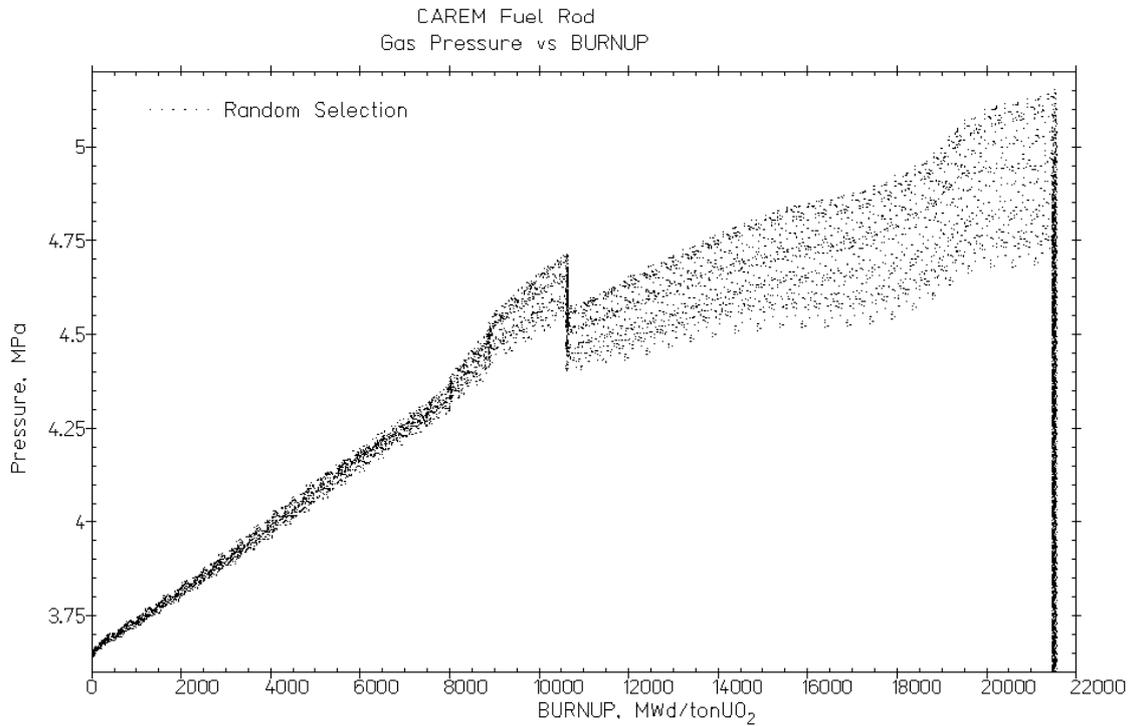


Figura 12: Análisis probabilístico del de la presión de gases libres en el interior de una de una barra combustible tipo CAREM (valores “random”).

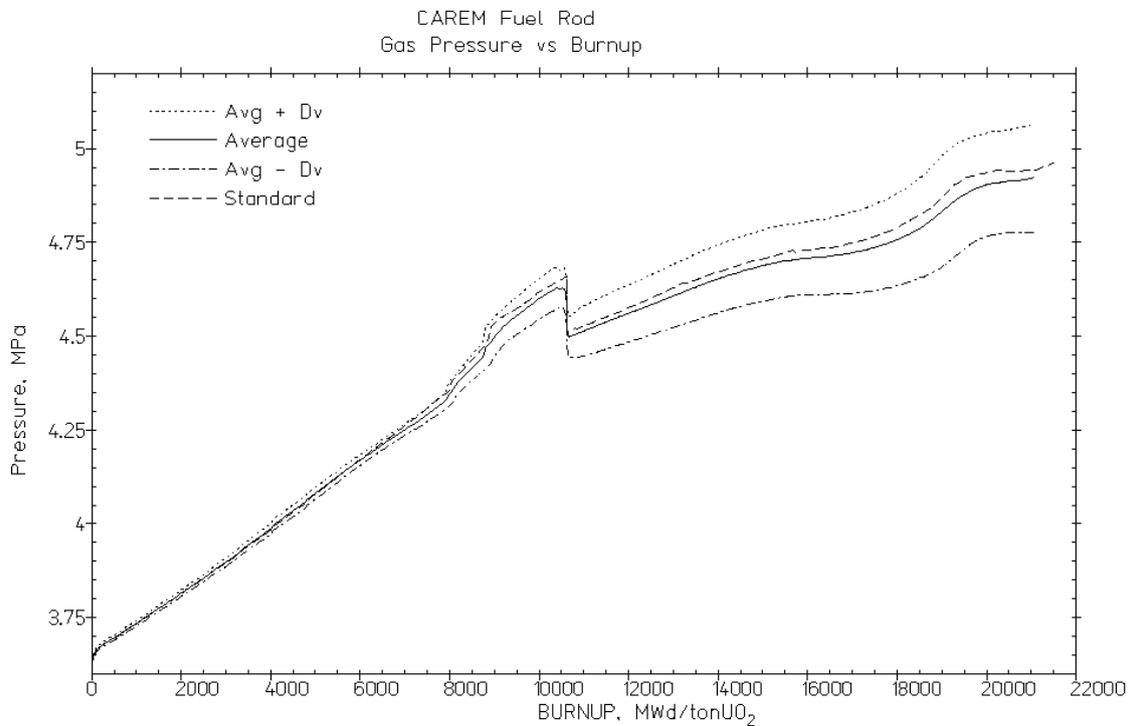


Figura 13: Análisis probabilístico del de la presión de gases libres en el interior de una de una barra combustible tipo CAREM (promedio).

4 CONCLUSIONES

El código BACO se refleja como una poderosa herramienta para el diseño de elementos combustibles, sus aplicaciones y el análisis de la performance de los mismos. El análisis probabilístico aplicado al diseño de los combustibles CARA y CAREM resulta en un mejoramiento sensible en los aspectos de seguridad, performance y economía. Asimismo, reflejan el “estado del arte” en cuanto a las actuales tendencias en el diseño de combustibles nucleares, siendo BaCo uno de sus pioneros.

REFERENCIAS

- [1] A.C. Marino, “Análisis del comportamiento de una barra combustible de un reactor en operación. Código BACO, versión 2.20”, 9° Congreso Sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones (ENIEF’95), 6 al 10 de Noviembre de 1995, S.C. de Bariloche.
- [2] A.C. Marino, “Proyectos internacionales de “benchmarking” y validación de códigos de combustibles nucleares.”, X Congreso Sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones (X ENIEF), 10 al 14 de Noviembre de 1997, S. C. de Bariloche.
- [3] A.C. Marino, “Preliminares de análisis estadístico aplicado a diseño y performance de combustibles nucleares.”, X Congreso Sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones (X ENIEF), 10 al 14 de Noviembre de 1997, S. C. de Bariloche.
- [4] P.C. Florido et al., “CARA, new concept of advanced fuel element for HWR”, International Atomic Energy Agency Technical Committee Meeting (TCM) on “Fuel Cycle Options for Light Water Reactors and Heavy Waters Reactors”, Victoria, Canada, 28 April to 1 May, 1998, IAEA-TECDOC-1122.
- [5] E. Estévez et al., “Simulación del comportamiento se una Barra Combustible para el Reactor CAREM 25”, paper 39, XXVII Reunión Científica de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear (AATN 2000), 22 al 24 de Noviembre de 2000, Buenos Aires.
- [6] A.C. Marino, “Computer simulation of the behaviour and performance of a CANDU fuel rod”, 5th International Conference on CANDU fuel, 1997, September 21-24, Toronto, Ontario, Canada, ISBN 0-919784-48-8.
- [7] A.C. Marino et al., “Sensitivity analysis applied to nuclear fuel performance related to fabrication parameters and experiments“, 14th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, SMiRT 14, August 17-22, 1997, Lyon, France.
- [8] L. Alvarez, “SEU Fuel in Atucha 1 NPP, a valuable experience for a CANDU-6 core enrichment”, 6th International Conference on CANDU Fuel, 1999 September 26-30, Niagara Falls, Ontario, Canada.
- [9] A. C. Marino et al., “Irradiación experimental de barras combustibles CARA en el Reactor OECD Halden”, paper 68, XXVII Reunión Científica de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear (AATN 2000), 22 al 24 de Noviembre de 2000, Buenos Aires.
- [10] A.C. Marino et al., “Irradiación experimental de un elemento combustible CARA en el Reactor NRU (Canadá)”, paper 124, XXVII Reunión Científica de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear (AATN 2000), 22 al 24 de Noviembre de 2000, Buenos Aires.