

PROYECTOS INTERNACIONALES DE "BENCHMARKING" Y
VALIDACIÓN DE CÓDIGOS DE COMBUSTIBLES NUCLEARES

Armando Carlos Marino
Centro Atómico Bariloche, Comisión Nacional de Energía Atómica,
8400 S. C. de Bariloche, Argentina

RESUMEN

En el desarrollo de códigos y modelos de comportamiento de barras combustibles entran en juego un gran número de fenómenos interrelacionados. De aquí la importancia de la validación de los códigos a partir de su comparación con datos de reactores en operación, experiencias "ad hoc", exámenes post-irradiación y comparaciones entre códigos. La participación del código BACO en este tipo de ejercicios ha sido relevante para su desarrollo especialmente en el área de ampliación de su rango de validez. Siendo además la semilla de una incipiente base de datos sobre irradiaciones. En el presente trabajo se presenta la evolución del código a partir de la participación directa o indirecta en ejercicios organizados por el EPRI (Electric Power Research Institute) y del IAEA (International Atomic Energy Agency).

INTRODUCCIÓN

A partir de 1974, en la CNEA (Comisión Nacional de Energía Atómica), comenzó el desarrollo del código BACO (BARRA COMBUSTIBLE), para la simulación del comportamiento de una barra combustible de un reactor nuclear en operación [1, 2]. En el desarrollo de códigos y modelos de comportamiento de barras combustibles entran en juego un gran número de fenómenos interrelacionados. De aquí la importancia de la validación de los códigos a partir de su comparación con datos de reactores en operación, experiencias "ad hoc", exámenes post-irradiación y comparaciones entre códigos. La coparticipación a partir de instituciones como el EPRI o el IAEA es la base para este tipo de benchmarking internacional.

Como ejemplo, los siguientes proyectos forman parte de la literatura clásica del área de simulación de comportamiento de barras combustibles:

- "Light Water Reactor Fuel Rod Evaluation" financiado por el EPRI (Electric Power Research Institute) y organizado por la Combustion Engineering Inc. [3],
- "D-COM blind exercise" organizado por el IWGFTP (International Working Group on Fuel Performance and Technology for Water Reactors) del IAEA (International Atomic Energy Agency) [4],
- "CRP FUMEX" (Co-Ordinated Research Project on Fuel Modelling at Extended Burnup) del IAEA [5, 6].

En ellos hemos formado parte directa o indirectamente con el código BACO.

La última versión de uso público (2.30) del código BACO fue desarrollada en conexión con el CRP FUMEX del IAEA [7]. El proyecto produjo una revisión conceptual del código original. Esta revisión incluye criterios de convergencia, tratamiento matemático y modelado de los aspectos de comportamiento de materiales en el complejo ambiente de un reactor nuclear en operación.

EL CÓDIGO BACO Y LOS ELEMENTOS COMBUSTIBLES NUCLEARES

La barra combustible (BC) de un elemento combustible (EC) de un reactor nuclear consiste de un tubo metálico, en cuyo interior se encuentran apiladas pastillas de óxidos fisionable (Dióxido de Uranio, UO_2), con longitudes que varían entre 0.5 y 5 metros. El interior de la BC se encuentra en una atmósfera de He y/o Ar, a los cuales se le suman, durante la irradiación, los gases producidos por la fisión nuclear, en particular Xe y Kr. En el caso de reactores de uranio natural esta vaina está construida de una aleación de base Zr (Zrly) debido a la baja sección de captura neutrónica de este metal. En servicio esta BC alcanza temperaturas centrales superiores a los $2000^{\circ}C$, se halla refrigerada externamente a aproximadamente $300^{\circ}C$, con gradientes térmicos de $3000^{\circ}C/cm$. Sumado a los efectos de la temperatura, hay un gran daño por radiación.

El elemento combustible de un reactor nuclear se halla bajo condiciones físicas extremadamente complejas. Un gran número de fenómenos físicos, químicos y termomecánicos entran en juego con intrincados procesos de interacción mutua. Las deformaciones y tensiones que sufren tanto la pastilla de material fisionable como la vaina durante el servicio resultan de múltiples efectos interrelacionados. Por ello estas deformaciones y tensiones, fundamentales a los fines de diseño y predicción del comportamiento del elemento, no resultan descriptibles por expresiones analíticas, siendo necesario desarrollar códigos numéricos de simulación que incluyan modelos empíricos de los fenómenos físicos que ocurren durante la irradiación y que resultan relevantes al comportamiento mecánico. De aquí la importancia de la validación de los códigos de comportamiento a partir de su comparación con datos de reactores en operación, experiencias "ad hoc" y exámenes post-irradiación.

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. Además el uso de estos códigos permite dar una guía dentro de la cual ensayar los elementos combustibles, disminuyendo el número de costosas experiencias.

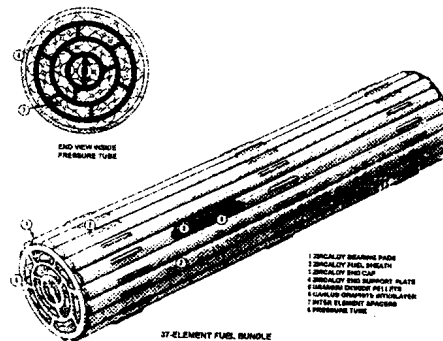


Figura 1: EC (Elemento combustible) tipo CANDU, compuesto por 37 BB.CC. (Barras Combustibles).

CAMPO DE VALIDACIÓN DEL CÓDIGO BACO

El campo principal de aplicación del código BACO es para HPWR (Heavy Pressurised Water Reactor), pero puede ser utilizado para la simulación de PWR, CANDU (CANadian Deuterium Reactor), FBR (Fast Breeder Reactor) y aplicaciones particulares como pueden ser combustibles MOX ($(U,Pu)O_2$ Mixed Oxide fuels), combustibles experimentales y diseño de las BC de reactores en etapa de desarrollo (Reactor CAREM-25).

Argentina posee dos centrales de potencia en operación. Estas son la Central Nuclear Atucha I (un HPWR de 350 MW) y la CN EMBALSE (HWR de 600 MW). Las mismas presentan variaciones conceptuales en las características del diseño de sus combustibles, por ejemplo:

- Las barras combustibles en la CN Atucha I tienen una longitud de 5,3 metros, son autoportantes y presurizadas con He a 17 bar.
- Por su parte las BC de la CN EMBALSE son de 50 cm de longitud, vainas colapsables, sin presurizar.

El código resuelve los dos casos con el mismo conjunto de modelos.

En la Figura 1 se encuentra un elemento combustible para reactores nucleares tipo CANDU. El mismo está compuesto por 37 barras combustibles (BB.CC.). El objetivo del código BACO es la simulación del comportamiento individual de una de esas BB.CC.

DESCRIPCIÓN DEL CÓDIGO BACO

El código está escrito en FORTRAN 77 y es independiente del compilador. Actualmente estamos migrando el código fuente a FORTRAN 90. El código supera las 9000 sentencias y las 70 subrutinas, y ese número de líneas de programa crece continuamente debido a la inclusión de nuevos aspectos de comportamiento. La última versión documentada del código es la 2.30. El programa puede correr incluso en una PC compatible IBM basada en el microprocesador i486 a velocidades razonablemente rápidas en casos complejos. Por ejemplo, el tiempo de cálculo, en dicho entorno mínimo y para la CN Atucha I, es de 5 minutos. Pero, algunas aplicaciones particulares pueden demorar varias horas (por ejemplo los complejos casos incluidos en la evaluación internacional FUMEX para códigos patrocinada por IAEA). Una descripción detallada del código BACO se encuentra en las Referencias 7, 8 y 9.

DESARROLLO DE CÓDIGOS DE CÁLCULO PARA ELEMENTOS COMBUSTIBLES

En el desarrollo de una compleja herramienta de cálculo como es el caso de este código existen diversas etapas. Primero la puesta a punto que implica:

- i)* Planteo del problema físico,
- ii)* Simplificación matemática del mismo, que lleva a un algoritmo calculable analítico o numéricamente,
- iii)* Demostrar, en el caso del método numérico, la convergencia del mismo,
- iv)* Seleccionar una base de modelos físicos representativos de los fenómenos dominantes, utilizando experiencias confiables para su selección,
- v)* Comparar las predicciones del código contra experiencias que incluyan el mayor número de parámetros controlables experimentalmente, esto implica además, flexibilidad del algoritmo de cálculo para reproducir las diferentes condiciones de contorno que plantea cada experiencia,
- vi)* Utilizar los resultados de *v)* en cuanto a comparación contra experiencias para modificar la base de modelos físicos *iv)* y en cuanto a flexibilidad para modificar, si es necesario la estructura matemática *ii)*.

Los procedimientos *ii)* a *iv)* pueden llegar entonces a constituir un ciclo que puede o no completarse totalmente antes de pasar a la segunda etapa: la de aplicaciones. Esto implica el uso del código en situaciones tecnológicamente relevantes. La posibilidad de pasar de la etapa uno a la dos, paradójicamente, no depende de haber completado la primera totalmente sino de que, habiéndose por lo menos realizado una vez el ciclo de *i)* a *v)* y asegurado la coherencia

matemática del código, exista una documentación adecuada para el usuario, especialmente un adecuado manual del usuario, y la documentación respecto a los modelos y simplificaciones.

Finalmente una tercera etapa consiste generalmente en ampliar el alcance del código hacia situaciones y problemas diferentes a las consideradas originalmente. Por ejemplo si el código se diseñó para simular el comportamiento de elementos combustibles en condiciones normales de servicio, el extenderlo para examinar este comportamiento ante transientes o accidentes. Es decir, en esta etapa de aplicación concreta de los códigos, las etapas pueden ser:

3.i) Diseño de experiencias con BB.CC.

3.ii) Diseño de BB.CC. de reactores en operación (cuanto menos asistencia ingenieril),

3.iii) Diseño de BC.CC. originales,

3.iv) Participación benchmarking internacionales (o bilaterales).

Con respecto a estos puntos y lo realizado últimamente con BACO:

4.i) Experiencias MOX en Petten (3.i) [10],

4.ii) Análisis de las BB.CC. de Atucha I y Embalse (3.ii) [11, 12],

4.iii) Diseño del EC del reactor CAREM (3.iii) [13, 14],

4.iv) Participación en el CRP FUMEX del IAEA (3.iv) [15, 16].

Este último punto produjo la última "vuelta" completa en el esquema cíclico presentado anteriormente. Este esquema de trabajo implicó e implica la inter-relación continua con distintos grupos de trabajo de la Comisión Nacional de Energía Atómica comprometidos con los lineamientos básicos de la institución.

PROYECTO D-COM DE IAEA

Durante los años 1982-1984, IAEA coordinó un proyecto de desarrollo llamado "The Development of Computer Models for Fuel Element Behaviour in Water Reactors" (D-COM) [4]. Argentina participó del mismo con el código BACO (Ver Tabla 1). Los test estudiados consistían en 3 barras cortas irradiadas conjuntamente hasta un quemado aproximado de 32000 MWd/tU en el reactor Danish DR 3. Posteriormente estas barras eran sometidas a rampas de potencia de distintas características para cada una de ellas. Las predicciones requeridas a los códigos estaban referidas a los cálculos térmicos y liberación de gases de fisión, aunque algunos participantes incluyeron resultados referentes a aspectos mecánicos del comportamiento.

EVALUACIÓN DE CODIGOS DEL EPRI

El Electric Power Research Institute (EPRI, Ref. (3)) financió la evaluación de seis códigos (ver Tabla 1) como un paso hacia una mas efectiva utilización de estos códigos en la industria nucleoelectrónica. La evaluación consistía en enumerar y comparar cuantitativamente los atributos y puntos flojos de los códigos, sumado a un ranking de los mismos.

La coordinación técnica la realizó Combustion Engineering Inc., que consistió en:

- Selección de propiedades standard de materiales,
- Caracterización de los datos experimentales,
- Comparación de los resultados de los códigos con la información experimental,

Con estos ejercicios se consolidó la fama de buen código del COMETHE de Belgonuclaire.

En la Figura 2 se encuentra la evaluación de los gases de fisión liberados en el caso A. Se incluye el cálculo efectuado con BACO v2.20. Es extraña la forma en que el código LIFE-THERMAL-1 llega al valor correcto sin diferenciar fenómenos térmicos y transientes de potencia.

CÓDIGO	COMPAÑÍA
COMETHE-III J	BELGONUCLEAIRE
BEHAVE-4	SCIENCE APPLICATIONS, INC.
LIFE-THERMAL-1	O'DONNELL AND ASSOCIATES, INC.
GAPCON-THERMAL-2	SCIENCE APPLICATIONS, INC.
CYGRO-3	O'DONNELL AND ASSOCIATES, INC.
FMODEL	COMBUSTION ENGINEERING, INC.

Tabla 1: Códigos y Compañías participantes en la evaluación de códigos del EPRI

En la Figura 3 se encuentra la temperatura central de la pastilla en el caso C. Sólo se incluye la performance del mejor resultado (COMETHE) y los datos experimentales, sumados al resultado de BACO y al del código hindú FAIR (17). FAIR, en 1995, se complace con repetir la performance de COMETHE en 1977. El excelente resultado de BACO es producto de la inclusión de un novedoso (en su momento) modelo de relocalización de fragmentos de pastilla dentro de la vaina (fenómeno de "relocation") (7).

Los ejercicios de este test internacional siguen siendo una referencia obligada en el ambiente del desarrollo de códigos de comportamiento de BB.CC..

EPRI NP-369 Caso A Barra 4113-AE1

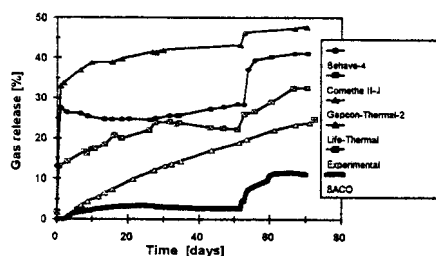


Figura 2: Caso A de EPRI. Fracción de gases de fisión liberada. (Ref. (18).)

Pellet Centre Temperature
IFA-418 Rod 6 (EPRI NP-369)

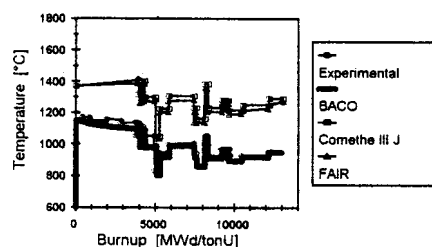


Figura 3: Caso C de EPRI. Temperatura central de la pastilla.

PROYECTO FUMEX DE IAEA

En 1992 comenzaron los contactos con la Agencia Internacional de Energía Atómica para concretar la participación de Argentina en el CRP FUMEX (Co-Ordinated Research Project in Fuel Modelling at Extended Burnup).

El proyecto FUMEX consiste en ejercicios de comparación de datos experimentales con predicciones de códigos. Los datos provienen de un conjunto de seis experiencias realizadas en el OECD-HALDEN Reactor (Noruega). Se trata de un total de diez barras combustibles instrumentadas para poder seguir la evolución de diversos parámetros (temperatura central de pastilla, presión de gases, diámetro de vaina, elongación de vaina, etc.) durante la irradiación, y de las respectivas post-irradiaciones (que incluyen liberación de gases, análisis dimensional, etc.). Se alcanzan quemados intermedios (25 MWd/kgU) y altos (50 MWd/kgU).

Se cuenta con la participación de 19 códigos de 14 países (Ver Tabla 2).

El alcance del código BACO está centrado en los bajos quemados de la CN Atucha I y la CN Embalse. Algunos modelos incluidos en el código están validados individualmente para altos quemados. Por ejemplo, el modelo de gases de fisión incluido en BACO reporta un buen

acuerdo con quemados de hasta 50 MWd/kgU. Es de interés validar el BACO para los quemados intermedios que se alcanzarían con el reactor CAREM-25, además de incrementar la base de datos de irradiaciones disponibles. Todos los casos son útiles hasta el quemado de nuestro interés.

Los ejercicios propuestos incluyen variadas y exigentes geometrías, gases de llenado basados en mezclas de He y Xe, simulación de "reshuffling", rampas de potencia de diversas características, etc., mas la influencia de los sistemas de instrumentación de las barras. Las vainas son, en general, de Zy2.

PAÍS	Organización	Código	
		D-COM (1982-84)	FUMEX (1993-96)
Dinamarca	RISØ	Experimentos	
Noruega/OECD	Halden		Experimentos
Argentina	CNEA	BACO	BACO
Bélgica	BN	COMETHE III-L	
Bulgaria	INRNE		PINmicro
Canadá	AECL	ELESIM2.MOD10	ELESIM
Finlandia	VTT	FRAPCON-2	ENIGMA 5.8f
Francia	CEN-Saclay	RESTA	
	Electricite de France	CYRANO-2	TRANSURANUS- EdF 1.01
	CEA/DRN-Grenoble	CREOLE	METEOR-TRANSURANUS
CEC/Alemania	TU-Darmstadt/ITU	URANUS	
CEC	ITU		TRANSURANUS
India	BARC	PROFESS	PROFESS
	NPC		FUDA
	BARC		FAIR
Japón	NNFD		TRUST 1b
	CRIEPI	FEMAXI-III	EIMUS
China	CIAE		FRAPCON-2
Rumania	INR		ROFEM-1B
Suecia	Studsvik	GAPCON-SV	
Suiza	PSI		TRANSURANUS-PSI
Checoslovaquia	REZ	PIN/RELA	
República Checa	NRI		PIN-W
Reino Unido	UKAEA	MINIPAD-E	
	BNFL	HOTROD	ENIGMA 5.2
	NE		ENIGMA 5.8 D
Rusia	IIM		START 3
USA	EXXON	RAMPX2	

Tabla 2: Países y Códigos Participantes

DESCRIPCIÓN DE LAS EXPERIENCIAS DEL CRP FUMEX .

El reactor OECD Halden es HBWR con una temperatura de refrigerante de 240°C y presión de 34 bar. El reactor es operado con 3 "shutdowns" principales por año para carga/descarga de

combustibles y experimentos. El bajo flujo rápido determina una generación poco importante de Pu y la depresión de flujo se mantiene constante durante la irradiación.

El "creep-down" de la vaina es muy pequeño debido a la baja presión del refrigerante, baja temperatura y el bajo flujo rápido. La oxidación de la vaina es despreciable ($1\mu\text{m}$ de óxido a 50000 MWd/tU) debido a la alta pureza del refrigerante y la baja temperatura.

Los cálculos se efectúa con las historias de potencia reales, obtenidas por el monitoreo continuo (cada 15 minutos) que se realiza en el reactor de Halden. Esto implica: picos de potencia, ruido experimental, paradas del reactor, cambios de la posición de las barras a nuevas posiciones de irradiación, etc. En algunos casos el monitoreo fue realizado durante tiempos del orden de 10 años. Como ejemplo de este conjunto de ejercicios se presentan los principales resultados de los tres primeros casos de CRP FUMEX. Los mismos fueron presentados en las Referencias (8), (15) y (16).

Caso 1) Barra combustible tipo PWR bajo condiciones de irradiación poco exigentes. Condiciones generales de modelado, incluyendo algunas rampas de potencia prestando especial atención a la interacción pastilla-vaina y la liberación de gases en las rampas de potencia. Se cuenta con mediciones "in-pile" de temperatura, presión de gases libres, elongación de vaina y caracterización pre y post-irradiación. Originalmente, en esta experiencia, se intentaba determinar el efecto de un decaimiento lento de potencia. La vaina es de Zy4. El quemado alcanzado es del orden de 40 MWd/kgU. Este "blind test" consiste en comparación contra mediciones.

En la Figura 4 se encuentra la medición efectuada durante la irradiación de la temperatura central de la pastilla en la zona superior de la BC. El monitoreo de la temperatura se efectúa cada 15 minutos con un error de ± 50 °C. La Figura 5 incluye el cálculo efectuado con el código BACO. La fracción de gases de fisión liberados al finalizar la experiencia dio un valor, determinado por los análisis post-irradiación, de 1.8 %. El cálculo con BACO indicó 2.5 %.

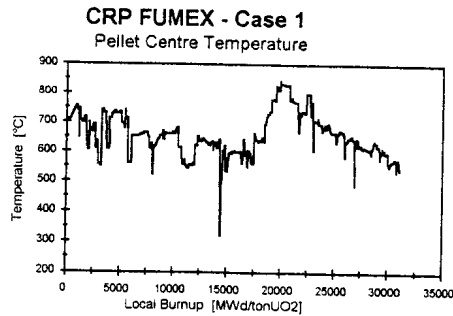


Figura 4: Temperatura central de la pastilla. Caso 1 del CRP FUMEX. Monitoreo "on line" en el OECD Halden Reactor.

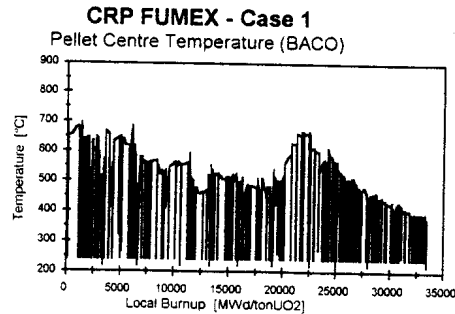


Figura 5: Resultado del cálculo de BACO para la temperatura central de la pastilla. Caso 1 del CRP FUMEX.

Caso 2) Ejercicio de calibración y comparación de códigos, utilizando BB.CC. de geometrías inusuales, prestando particular atención a la liberación de gases y la temperatura. Se cuenta con mediciones "in-pile" de presión de gases y temperatura de pastilla. El quemado alcanzado por la barra es mayor que 50 MWd/kgU. En la Figura 6 se encuentra la presión de gases libres en la BC (gases de fisión mas gases iniciales de llenado). La Figura 5 corresponde al cálculo de BACO. Los resultados son mucho menores que la presión del refrigerante ($P_{ref} = 34$ bar).

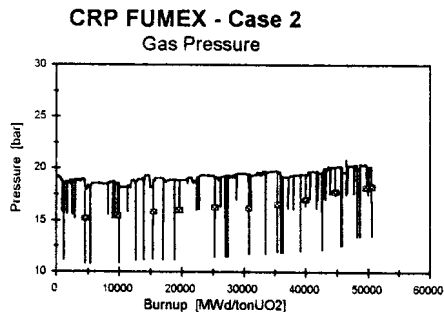


Figura 6: Caso 2 de FUMEX. Presión de gases libres en la BC. Datos experimentales.

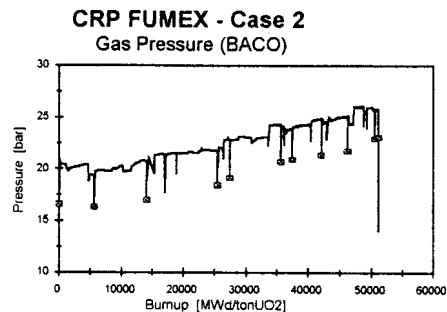


Figura 7: Caso 2 de FUMEX. Presión de gases libres en la BC. Resultado de BACO.

Caso 3) Se trata de 3 barras cortas equipadas con termocuplas en el centro de las pastillas. Son 3 irradiaciones para el estudio de la influencia de la composición de gases (He y Xe) y el tamaño del gap, con particular atención a la liberación de gases y la temperatura. Se dispone de mediciones de temperatura de pastilla para comparar con los códigos, además de caracterización pre y post-irradiación. El quemado final promedio de las tres irradiaciones de este caso es de aproximadamente 25 MWd/kgU, en todos los casos se incluye una severa rampa de potencia a fin de vida.

El caso número 1 de esta tercera serie consta de una barra presurizada con He. El segundo sub-caso incluye Xe como gas de llenado (para simular experimentalmente el efecto de alta liberación de gases a altos quemados). El sub-caso 3 también fue llenada con Xe pero su gap es substancialmente mas pequeño, también cuenta con granos de UO_2 de mayor tamaño (ídem que 3-2 simulando además, el "swelling" de la pastilla y el crecimiento de grano, a alto quemado). Es decir, un experimento para simular alto quemado, es simulado con códigos computacionales. Ver Figuras 8 y 9 (datos experimentales y cálculos con BACO de temperaturas centrales de pastilla durante rampas de potencia).

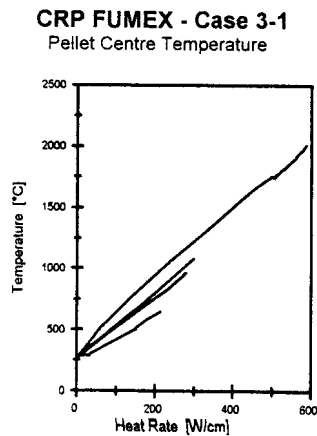


Figura 8: Temperatura central de la pastilla durante rampas de potencia. Caso 3-1 de FUMEX. Datos experimentales.

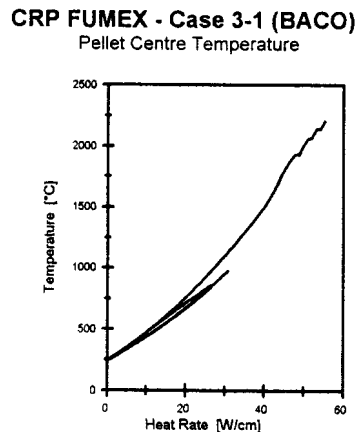


Figura 9: Temperatura central de la pastilla durante rampas de potencia. Caso 3-1 de FUMEX. Cálculo de BACO.

CONCLUSIONES

Con el objeto de sustentar la tecnología de elementos combustibles, ha sido apuntado en el presente trabajo, la necesidad de la participación en programas internacionales de comparación de códigos para el análisis de comportamiento de barras combustibles, como BACO. Estos códigos deben a su vez estar sustentados por una estructura de investigación teórico-experimental que se fortalece con este tipo de ejercicios.

Para cada proyecto en que se participó, directa o indirectamente, se debió hacer un exhaustivo trabajo de programación en el código BACO y en programas para el pre y post-procesamiento de los datos y de los resultados, independientemente de la utilidad para los combustibles nacionales del caso particular analizado.

El CRP FUMEX, como la mayoría de los "test", indican claramente que no se trata de una competencia entre códigos, pero la realidad indica que hay prestigio (y futuros negocios) en juego. La complejidad de los casos redundará en un claro beneficio para el código BACO. El presente trabajo no pretende reflejar la performance de los otros códigos participantes. Pero, de la comparación, surge una excelente ventaja del código BACO en el área de quemados bajos e intermedios, y de altos quemados a bajas potencias. Los problemas de modelado que se presentan están en un área alejada de la realidad de los reactores en operación en Argentina (CN Atucha I, CN Embalse, e incluso la futura CN Atucha II) y en desarrollo (CAREM). Los principales aspectos de modelado a mejorar son:

- 1) Conductividad térmica de la mezcla de gases de llenado (mas gases de fisión) en el caso de altas concentraciones de Xe y Kr (fenómeno presente a altos quemados y altas temperaturas),
- 2) Estabilidad numérica en el caso de una alta presión de gases libres en la interfase pastilla-vaina (fenómeno presente luego de una rampa de potencia a altos quemados) especialmente con vainas delgadas,
- 3) Aspectos del tratamiento mecánico en la dirección axial, esto se refiere al cálculo de la elongación de la barra combustible.

Los ejercicios de los proyectos presentados mantienen su validez como referencia habitual para la simulación digital del comportamiento de barras combustibles nucleares (Ejemplo: EPRI con FAIR y BACO). Los casos estudiados dan origen a una bases de datos experimental para la evaluación de las nuevas versiones de BACO con la idea de mantener activo su rango de validez y aumentarlo con la inclusión de nuevas irradiaciones.

REFERENCIAS

- [1] HARRIAGUE S., COROLI G. and SAVINO E., "BACO (Barra Combustible), a computer code for simulating a reactor fuel rod performance", Nuclear Engineering & Design 56(1980) 91-103.
- [2] HARRIAGUE S., SAVINO E. J. and COROLI G., BASOMBRIO F., SÁNCHEZ SARMIENTO G., "Theoretical fuel element modelling at CNEA", Nuclear Engineering & Design 56(1980) 83-89.
- [3] FREEBORN H. et al. 1977. Light Water Reactor Fuel Rod Modeling Code Evaluation. EPRI NP-369 (Project 397-1) Final report, March 1977.
- [4] MISFELDT I., "The D-COM blind problem on fission gas release", IAEA, International Group on Fuel Performance and Technology for Water Reactors, OECD-NEA-CSNI/IAEA Specialists' Meeting on Water Reactor Fuel Safety and Fission

- Product Release in Off-Normal and Accident Conditions, Risø National Laboratory (1983), IWGFTP/16, 411-422.
- [5] CHANTON P., TURNBULL J. and WIESENACK W., "Summary of findings of the FUMEX program", IAEA Technical committee meeting on water reactor fuel element modeling at high burnup and its experimental support, Windermere, UK, 19-23 Sept. 1994.
- [6] WIESENACK W., "Data for FUMEX: Results from Fuel Behaviour Studies at the OECD Halden Reactor Project for Model Validation and Development", IAEA Technical committee meeting on water reactor fuel element modeling at high burnup and its experimental support, Windermere, UK, 19-23 Sept. 1994.
- [7] MARINO A. C., SAVINO E. J. and HARRIAGUE S., "BACO (Barra Combustible) code version 2.20: a thermo-mechanical description of a fuel rod", Journal of Nuclear Materials 229 (1996), 155.
- [8] MARINO A. C., "Análisis del comportamiento de una barra combustible de un reactor en operación. Código BACO, versión 2.20", 9º Congreso Sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones (ENIEF'95), 6 al 10 de Noviembre de 1995, S. C. de Bariloche, Argentina.
- [9] MARINO A. C., SAVINO E. J. and HARRIAGUE S., "Thermo-mechanical description of a nuclear pin, BACO code version 2.20", 13th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, (SMiRT 95), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil, August 13-18, 1995
- [10] MARINO A. C., PÉREZ E. E. and ADELFGANG P., "Irradiation of Argentine MOX fuels. Post-irradiation results and experience analysis with the BACO code.", Journal of Nuclear Materials, Volume 229, pages 169-186, April II, (1996).
- [11] MARINO A. C., SERRA O., ANBINDER G., "Comportamiento de barras combustibles de la Central nuclear de Atucha I", 81ª Reunión Nacional de Física, Asociación de Física Argentina, (AFA 96), 16-20 de septiembre de 1996, Tandil, Argentina.
- [12] MARINO A. C., "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.
- [13] MARINO A. C., PÉREZ E. E., NASSINI H., "Simulación y análisis del comportamiento de una barra combustible tipo CAREM", XIX Reunión Científica de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear, (Buenos Aires, noviembre/1991).
- [14] REALE H. F. Y MARINO A. C., "Simulación del comportamiento de BB.CC. para el reactor CAREM-25 con el Código BACO.", Informe Técnico CNEA-CAB 62/13/97.
- [15] MARINO A. C. y SAVINO E. J., "Proyecto FUMEX (Fuel Modelling at Extended Burnup) de OIEA. Introducción y Performance del código BACO a quemados bajos e intermedios.", XXIII Reunión Científica de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear, Córdoba, Argentina, Noviembre de 1995.
- [16] MARINO A. C. y SAVINO E. J., "Proyecto FUMEX (Fuel Modelling at Extended Burnup) de OIEA. Performance del código BACO a altos quemados y Conclusiones.", Armando Carlos Marino y Eduardo J. Savino, XXIII Reunión Científica de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear, Córdoba, Argentina, Noviembre de 1995.
- [17] DUTTA B. et al., "High burnup models in computer code FAIR", IAEA Technical committee meeting on water reactor fuel element modeling at high burnup and its experimental support, Windermere, UK, 19-23 Sept. 1994.
- [18] MARINO A. C., "Simulación del Caso A de EPRI NP-369. Experimento CC-7 de CEA en el Reactor EL3 de Saclay", Informe Técnico CNEA-CAB 62/13/97.