

# **DISEÑO MECÁNICO DEL ELEMENTO COMBUSTIBLE PARA EL REACTOR CAREM-25**

**Estévez E. – Markiewicz M. – Gerding R.**

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

## **RESUMEN**

Se presenta el diseño mecánico del elemento combustible y conjunto araña-barras de control de reactividad y seguridad para el reactor CAREM-25.

El elemento combustible CAREM-25 posee una sección transversal de forma hexagonal con 127 posiciones, las que se disponen en un ordenamiento triangular. Las barras combustibles ocupan 108 de dichas posiciones mientras que las 19 posiciones restantes corresponden a los tubos guía para elementos absorbentes y al tubo de instrumentación. Desde el punto de vista estructural, el elemento combustible consiste de un esqueleto formado por los tubos guías, el tubo de instrumentación, 4 separadores y las piezas de acople inferior y superior.

La araña consiste en una pieza plana con seis brazos radiales en forma de T, los cuales poseen orificios donde se fijan las barras absorbentes. El cuerpo central termina en una articulación en su parte superior, la que permite su vinculación con los mecanismos de control. Las barras absorbentes están formadas por un material absorbente de neutrones (Ag-In-Cd) encerrados herméticamente en una vaina de acero inoxidable.

En este trabajo se fijan, además de las bases del diseño, las condiciones de operación, los requerimientos funcionales a satisfacer y en correspondencia con éstos, los criterios y límites adoptados, con el objeto de evitar fallas sistemáticas durante la operación normal.

Se detalla el programa propuesto para la verificación y evaluación del diseño. Para consolidar el diseño, se ha fabricado un prototipo, en base a los planos y especificaciones necesarias para su construcción.

## **FUEL ELEMENT MECHANICAL DESIGN FOR CAREM-25 REACTOR**

### **RESUME**

The Fuel Element mechanical design and spider-control reactivity and security rods assembly for the CAREM-25 reactor is introduced.

The CAREM-25 Fuel Element has a hexagonal cross section with 127 positions, in a triangular arrangement. There are 108 positions for the fuel rods while the guide tubes and instrumentation tube occupy the 19 remaining positions.

From the structural point of view, the fuel element is being composed by a framework formed by the guides and instrumentation tubes, 4 spacer grids and the upper and lower coupling pieces.

The spider is a plane piece, with a central body and six radial branches in T form, which has holes where the absorber rods are fitted. The central body ends in a joint in the upper side, which allows connect the assembly whit the reactor control mechanisms. The absorber rods are made of a neutron absorber material (Ag-In-Cd) hermetically closed in a stainless steel cladding.

In this work are determined, in addition to the basic design, the operational conditions, the functional requirements to be satisfied and in agreement with those, the adopted criteria and limits to avoid systematic failure during normal operation conditions.

The proposed program for the verification and evaluation of design is detailed. To consolidate the design, a prototype was manufactured, based on drawings and specifications needed for its construction.

## **1 BASES DE DISEÑO**

### **1.1 Condiciones de diseño**

La presente sección detalla las diferentes condiciones que se han considerado en el diseño de los elementos combustibles (EC) y conjuntos de barras de control para el reactor CAREM-25, las cuales se corresponden con la clasificación dada por las normas ANSI/ANS-57.5 y ANS-51.1:

Condición I: Operación normal y transitorios operacionales

Condición II: Eventos de moderada frecuencia

Condición III: Eventos infrecuentes

Condición IV: Fallas limitantes

### **1.2 Requerimientos funcionales para las diferentes condiciones de diseño**

Los EC, al igual que las restantes estructuras y componentes del núcleo y del sistema de protección del reactor, son diseñados para cumplir con los siguientes requerimientos funcionales, en el caso de ocurrir los eventos descritos en el punto 1.1:

Para los eventos clasificados como Condiciones I y II, el diseño debe asegurar que los EC no sufran defectos sistemáticos durante su vida útil. Desde este punto de vista, un combustible puede considerarse “no defectuoso” cuando:

- las vainas conservan su hermeticidad;
- las dimensiones y geometría permanecen dentro de las tolerancias operacionales prevista;
- la capacidad funcional no se ve reducida mas allá de los límites admisibles establecidos.

Para alcanzar este objetivo, el diseño debe contemplar adecuados márgenes de seguridad entre los valores máximos que se admiten en aquellos parámetros que influyen en forma significativa en la performance del combustible (como por ejemplo temperaturas, tensiones y deformaciones de la vaina, crecimiento bajo irradiación, etc.), con respecto a los valores reales que se estiman en la operación normal.

En el caso de condiciones accidentales de operación (condiciones III y IV), se admite –obviamente– que los EC sufran daños o deterioros de carácter permanente, los cuales pueden requerir de tareas de reparación para su uso posterior o incluso exigir directamente su reemplazo.

A pesar de ello, con el objeto de prevenir la liberación de productos de fisión al medio ambiente, el diseño de los EC debe asegurar que –aun en los accidentes más severos– los mismos conserven condiciones mínimas de integridad y geometría, de manera de cumplir con las siguientes dos funciones básicas:

- a) permitir la inserción rápida de las barras de control de seguridad, para llevar al reactor a una parada segura;
- b) permitir la adecuada refrigeración del núcleo durante el accidente y posteriormente a él, a fin de extraer el calor residual generado por el decaimiento de los productos de fisión.

En términos generales, el EC debe diseñarse para satisfacer los siguientes requerimientos funcionales, durante su permanencia en el núcleo de un reactor de potencia:

- 1) Conservar una adecuada geometría, necesaria para el correcto posicionamiento axial y radial de las barras combustibles (BC) dentro de los ensambles y de estos a su vez en el núcleo.
- 2) Proveer adecuadas condiciones para la extracción del calor generado durante la irradiación (espaciado entre BC adyacentes, mínima resistencia al flujo de refrigerante, etc.).
- 3) Proporcionar una barrera física para separar el combustible y los productos de fisión del refrigerante/moderador.
- 4) Proporcionar los huelgos necesarios para permitir la expansión axial y radial de las BC y los ensambles, teniendo en cuenta los desplazamientos relativos entre ambos y con respecto a las estructuras soportes del núcleo (por efectos de las temperaturas y de la irradiación).
- 5) Poseer la suficiente resistencia estructural para soportar su propio peso y las cargas mecánicas presentes durante el servicio.
- 6) Resistir satisfactoriamente los efectos de las fuerzas hidrodinámicas (vibración, desgaste, cavilación, pulsos de presión, inestabilidades del flujo).
- 7) Alojarse y guiar dentro del núcleo a los conjuntos de barras de control de reactividad y seguridad del reactor, soportando las sollicitaciones que los mismos introducen (picos de sobre-potencia en las BC, desgaste en las zonas de contacto, cargas de impacto durante las paradas de emergencia).
- 8) Alojarse y guiar a los dispositivos necesarios para la instrumentación “in-core”.
- 9) Soportar los efectos térmicos, químicos, mecánicos y el daño por irradiación, que actúan sobre los diferentes materiales (corrosión, hidruración y fragilización de las vainas, densificación del combustible, generación y liberación de productos de fisión, etc.).
- 10) Proveer los medios para el manipuleo y posicionamiento axial y radial de los EC en el núcleo (orificios para la sujeción de las herramientas, boquillas, pernos y/o agujeros para la fijación en las grillas, etc.).
- 11) Asegurar una completa compatibilidad (geométrica, dimensional y de materiales) con los restantes componentes del reactor, con los cuales los EC tienen interacción durante el servicio (herramientas de manipuleo, mecanismos de barras de control, química del refrigerante, estructuras soportes del núcleo).

A fin de satisfacer los citados requerimientos funcionales, se establecen una serie de criterios y límites de diseño, aplicables a las condiciones normales y autorizadas de operación del reactor (Condiciones I y II). Dichos límites tienen por objeto eliminar las fallas de combustible, atendiendo a los principales mecanismos de daño presentes durante la irradiación.

## **2 CRITERIOS Y LÍMITES DE DISEÑO**

### **2.1 Condiciones normales de operación**

#### **2.1.1 Barras combustibles**

Los criterios y límites descritos en esta sección, están destinados a evitar las fallas de BC durante su operación en condiciones normales y autorizadas. El término “falla” identifica a la pérdida de hermeticidad de la BC y por lo tanto a la eliminación de la primera barrera de contención de los productos radioactivos.

Los diferentes límites se presentan agrupados, en función de los mecanismos de daño con los que están relacionados:

### 2.1.1.1 Calentamiento de las BC:

Para evitar el sobre-calentamiento de las BC, se fijaron los siguientes límites de operación:

- 1) flujo de calor máximo de la vaina, fijado por consideraciones termohidráulicas en  $137 \text{ W/cm}^2$ ;
- 2) la temperatura central máxima de las pastillas combustibles deberá ser inferior a  $2700 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 2.1.1.2 Interacción pastilla-vaina:

Con el objeto de minimizar los riesgos de falla de las BC por la interacción entre la columna activa y la vaina, en el caso de rampas de potencia y como consecuencia de la expansión térmica diferencial entre ambas, se fijaron los siguientes límites a las potencias lineales:

$q' = 430 \text{ W/cm}$ , para quemados menores a  $15000 \text{ MWd/TU}$

$q' = 375 \text{ W/cm}$ , para quemados mayor a  $15000 \text{ MWd/TU}$  y menor a  $25000 \text{ MWd/TU}$

$q' = 360 \text{ W/cm}$ , para quemados mayor a  $25000 \text{ MWd/TU}$ .

Si bien estos valores representan el umbral de falla por PCI en función del quemado, no significa que sobrepasados los mismos se producirá la falla de la vaina, para que esto ocurra, el quemado acumulado, la potencia máxima, la variación de la potencia, la velocidad de la rampa de potencia y el tiempo de permanencia a la nueva potencia, deben estar dentro de un rango crítico simultáneamente, para ello es necesario realizar análisis de transitorios.

### 2.1.1.3 Contenido de hidrógeno

Para evitar la falla de las vainas combustibles por efecto de una hidruración primaria, es necesario limitar el contenido de hidrógeno inicial de las barras combustibles:

- 1) el contenido total de humedad de la BC, previo al inicio de la irradiación (teniendo en cuenta todas las fuentes posibles de contaminación durante la fabricación), deberá ser menor a  $2 \text{ mg H}_2\text{O/cm}^3$ ;
- 2) el contenido máximo de hidrógeno de la vaina, al final de la irradiación, no deberá ser mayor a  $250 \text{ ppm}$ .

### 2.1.1.4 Corrosión

Si bien existe una tendencia a nivel mundial de mejorar la resistencia a la corrosión de las vainas de las barras combustibles, con el objeto de incrementar los quemados de descarga, en donde la hidruración y oxidación de las vainas es un efecto limitante, para los quemados máximos previstos para los elementos combustibles del reactor CAREM 25, la utilización de vainas de Zircaloy-4 resulta adecuada, debiéndose establecer el límite de oxidación permitido.

El límite del espesor de óxido en las vainas del reactor CAREM 25 es de  $70 \text{ }\mu\text{m}$ .

Estudios experimentales [8] establecieron que para espesores hasta  $70 \text{ }\mu\text{m}$ , el óxido desarrollado sobre la vaina crece en forma homogénea. Para espesores mayores se produce un fenómeno de descamación, el óxido se desprende y se incrementa la velocidad de oxidación.

### 2.1.1.5 Colapso de la vaina

Un tubo sometido a presión externa puede experimentar aplastamiento elástico si la presión externa supera la presión crítica de la vaina.

El margen de seguridad para este tipo de deformación es calculado considerando el peor caso, esto es a comienzo de vida de la vaina, donde la presión interna de la barra combustible es mínima y la resistencia mecánica de la vaina aun no se ve incrementada por efectos de la irradiación, se considera además la presión inicial mínima estipulada por diseño.

De acuerdo a los cálculos realizados la presión crítica de aplastamiento elástico es de  $435 \text{ kg/cm}^2$ , con lo cual considerando una diferencia de presión externa-interna al principio de vida de

aproximadamente  $93 \text{ kg/cm}^2$  (para una presión de llenado de  $15 \text{ Kg/cm}^2$ ), se obtiene un margen de seguridad de aproximadamente 4,6. Dicho margen de seguridad para un PWR es de aproximadamente 3.

#### **2.1.1.6 Cargas estáticas**

Otro límite impuesto a la vaina es la tensión circunferencial máxima, la cuál debe ser acotada para evitar la falla de la misma por interacción pastilla - vaina asistida por una química interna agresiva, efecto producido durante determinadas condiciones de rampas de potencia.

De acuerdo a ensayos realizados con vainas de Zircaloy de LWR irradiadas, con quemados de hasta 30.000 MWd/tU, la tensión circunferencial umbral a partir de la cual existe una cierta probabilidad de falla por el mecanismo PCI-SCC, es de aproximadamente 180 MPa. Por lo tanto este es el valor límite adoptado para las vainas de las barras combustibles del reactor CAREM-25.

Otro límite impuesto es que la tensión equivalente, obtenida de las tensiones actuantes en las direcciones principales, sea inferior a la tensión de fluencia del Zry-4 a la temperatura de  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  y al inicio de la irradiación. La teoría de von Misses establece que la deformación plástica se inicia solamente si la tensión equivalente máxima alcanza la tensión de fluencia del material, independiente de la magnitud de las tensiones individuales actuantes.

#### **2.1.1.7 Cargas dinámicas**

Las cargas dinámicas actuantes sobre las BC pueden producir la falla de la vaina por fatiga del material. Basado en la curva de diseño a la fatiga para el Zircaloy-4 irradiado, el límite establecido es que la máxima amplitud de la tensión de flexión dinámica aplicada sobre la vaina no deberá ser superior a  $\pm 50 \text{ N/mm}^2$ , tanto para el Zry-4 irradiado como sin irradiar.

#### **2.1.1.8 Desgaste por rozamiento**

La vibración continua de las BC, excitada por el flujo del refrigerante, provoca un desgaste progresivo de la vaina en los puntos de contacto con los separadores elásticos.

En el caso del CAREM-25, se adopto como criterio de diseño, que la profundidad máxima de desgaste por rozamiento, no deberá provocar una reducción del espesor inicial de vaina mayor que el 20%.

#### **2.1.1.9 Deformación de la vaina**

Con el objeto de evitar la rotura de la vaina por los efectos de:

- a) diferencia de expansión térmica entre la vaina y pastilla combustible producido durante cambios de potencia,
- b) por el efecto de creepdown de la vaina debido a la presión del refrigerante,
- c) por el hinchado de las pastillas por efecto de la irradiación,
- d) por el incremento de presión producido por los gases de fisión,

es necesario limitar la deformación tangencial máxima (elástica + plástica) en el rango de las tensiones de tracción.

El valor máximo adoptado para la deformación tangencial, en el rango de tensiones de tracción de las vainas para el elemento combustible CAREM es 1%.

#### **2.1.1.10 Presión interna**

Se estableció que la presión interior de las barras combustibles al final de vida no deberá ser superior a la del refrigerante. Este límite está basado en el criterio de diseño de evitar el incremento del gap por sobrepresión interna, que reduciría el coeficiente de transferencia calórica, incrementando la temperatura del combustible y llevando a un aumento en la liberación de gases de fisión.

## **2.1.2 Barras de control de reactividad**

Los criterios y límites establecidos están destinados a mantener la integridad estructural y dimensional de las barras de control de reactividad, asegurando su correcta operación durante el tiempo previsto de residencia en el núcleo del reactor.

Los criterios y límites establecidos son los siguientes.

### **2.1.2.1 Calentamiento**

Se establecen los siguientes límites:

- a) temperatura máxima del material absorbente (Ag-In-Cd) inferior a la temperatura de fusión,
- b) no deberá producirse la ebullición del refrigerante entre la barra de control de reactividad y el tubo guía.

Es necesario evitar la fusión del material absorbente debido a:

- a) la elevada presión de vapor del cadmio a altas temperaturas que pueden tensionar y deformar la vaina,
- b) la reubicación de componentes internos de la barra de control de reactividad,
- c) cambio de volumen por cambio de fase de la aleación fundida, con elevación de la presión interna de la barra de control de reactividad
- d) cambios en las fuerzas de inercia durante una parada rápida,
- e) expulsión del material fundido ante una fisura de la barra de control de reactividad, con la posibilidad de bloqueo parcial o total del canal de refrigeración.

El criterio de evitar la ebullición del refrigerante radica en no incrementar la velocidad de corrosión en el interior de los tubos guías de Zircaloy-4, que produzca una fragilización por el incremento de la oxidación e hidruración en refrigerante de dos fases, considerando que los mismos son elementos estructurales del elemento combustible.

### **2.1.2.2 Colapso de la vaina**

Para evitar el aplastamiento de la vaina sobre el material absorbente, se establece como límite de diseño que la presión crítica de aplastamiento elástico debe ser superior que la presión máxima del refrigerante..

La determinación de este límite tiene incidencia en el tiempo de residencia de las barras de control de reactividad, ya que una vez que el gap absorbente-vaina se ha cerrado y debido al hinchado del primero, la vaina es deformada en las direcciones axial y tangencial.

### **2.1.2.3 Tensiones sobre la vaina**

A fin de evitar la fractura mecánica de la vaina, como consecuencia de todos los tipos cargas aplicadas durante su operación, la tensión equivalente en cualquier punto de la misma (según el criterio de von Misses), debe ser menor que la tensión de fluencia del material sin irradiar considerada a la temperatura de operación.

### **2.1.2.4 Tensiones cíclicas**

Las tensiones cíclicas pueden ser producidas por movimientos continuos de ascenso – descenso de las barras de control de reactividad y por vibraciones inducidas por el refrigerante.

Con el objeto de evitar la falla de las barras de control de reactividad por fatiga del material de la vaina, se establece que el número de ciclos de carga durante su vida útil no debe exceder el número de ciclos admisible correspondiente a la tensión aplicada.

### **2.1.2.5 Tiempo de residencia**

Como límite de diseño, desde el punto de vista del diseño mecánico, se establece que el tiempo de residencia de las barras de control de reactividad está dado por el momento en que se produce la interacción absorbente – vaina.

Este límite, indudablemente conservativo, está definido para evitar la deformación de la vaina (como consecuencia del hinchado del material absorbente por captura neutrónica) que conduzca a su rotura (considerando la progresiva pérdida de su ductilidad), o reduzca el gap existente con el tubo guía.

### **2.1.2.6 Desgaste por rozamiento**

El desgaste de las vainas de las barras de control de reactividad está ocasionado por su movimiento axial dentro de los tubos guías y por las vibraciones inducidas por el flujo refrigerante, pudiendo limitar la vida útil de las mismas

El adelgazamiento localizado progresivo del espesor de pared produce un incremento en las tensiones. Por lo tanto y para evitar la rotura de las vainas es necesario limitar el desgaste, estableciendo un espesor mínimo de vaina capaz de resistir las tensiones actuantes.

Cálculos realizados en forma conservativa determinaron que la reducción máxima localizada del espesor de la vaina no debería superar el 30 % de su espesor nominal.

### **2.1.3 Elemento combustible**

Durante las condiciones de operación normales y autorizadas, los elementos combustibles deben mantener su integridad geométrica y dimensional, para ello se establecen los siguientes criterios y límites de diseño.

#### **2.1.3.1 Cargas estáticas**

Con el fin de evitar la rotura o deformaciones de los componentes estructurales del elemento combustible, las cargas estáticas aplicadas durante su operación, transporte, inserción y extracción del núcleo, no deberán superar los límites de diseño establecidos en la Sección III del código ASME, considerando al material sin irradiar y a la temperatura de trabajo.

#### **2.1.3.2 Cargas dinámicas**

Considerando que los tubos guías son los elementos estructurales del elemento combustible mas comprometidos, desde el punto de vista de su comportamiento ante sollicitaciones de vibración inducidas por el refrigerante, se establece como límite de diseño que el número de ciclos en el tiempo de residencia de los elementos combustibles, no supere el número admisible de ciclos para el valor correspondiente a la tensión aplicada.

Considerando la curva de diseño a la fatiga para el Zry-4, se establece que la máxima amplitud de la tensión por flexión dinámica aplicada sobre la vaina no deberá ser superior a  $\pm 50 \text{ N/mm}^2$ .

#### **2.1.3.3 Crecimiento bajo irradiación**

Para evitar la posible interferencia axial entre las barras combustibles y las piezas extremas del esqueleto (boquilla y cajón), como consecuencia de la expansión térmica y crecimiento diferencial entre las barras combustibles y los tubos guías, el diseño del elemento combustible debe asegurar un huelgo suficiente que evite la aparición de cargas axiales sobre las barras combustibles, que puedan producir el curvado de las mismas.

En el diseño del elemento combustible para el reactor CAREM-25, el huelgo inicial para el crecimiento diferencial axial es de 2,5 %.

Con el mismo criterio de evitar cargas axiales sobre el elemento combustible, la distancia axial entre el extremo superior del elemento combustible y la grilla superior del núcleo no debe ser inferior a 20 mm (aproximadamente el 1 % de la longitud inicial del elemento combustible).

## **2.2 Condiciones accidentales**

Los criterios adoptados para el caso de situaciones accidentales están vinculados con los principales mecanismos de daño sobre las barras combustibles, cuando éstas están expuestas a excursiones de temperaturas.

Los límites establecidos por la U.S. Nuclear Regulatory Commission sobre la vaina de Zircaloy durante un LOCA son la temperatura máxima de la vaina y la oxidación total de la misma.

### **2.2.1 Temperatura máxima de la vaina**

Si bien los criterios de aceptación de los sistemas de refrigeración de emergencia del núcleo de los reactores de potencia refrigerados por agua, establecen un límite máximo de 1200 °C a la temperatura de la vaina, es necesario considerar la interacción química desarrollada entre el Zry e Inconel de los separadores elásticos a elevadas temperaturas. Dicha interacción produce la formación de fase líquida a temperaturas del orden de los 1000 °C.

Considerando el efecto de la interacción química ante la ocurrencia de un accidente a principio de vida de un elemento combustible (mínimo espesor de óxido) y que los separadores elásticos son íntegramente de Inconel, la máxima temperatura de la vaina de las barras combustibles no deberá superar los 1000 °C.

### **2.2.2 Oxidación máxima de la vaina**

Resultados experimentales demostraron que la ductilidad de la vaina de Zry depende de la fracción de espesor que permanece en fase  $\beta$  y de la cantidad y distribución de oxígeno en dicha fase. En vista de estos resultados, los sistemas de refrigeración de emergencia del núcleo para reactores refrigerados por agua, deben limitar la oxidación total de la vaina a un máximo del 17%. Este mismo valor es el adoptado para las vainas del elemento combustible CAREM.

### **2.2.3 Accidente sísmico**

Para asegurar que los EC no impidan o dificulten la parada de emergencia del reactor, mediante la inserción rápida de las barras de seguridad, las cargas aplicadas durante el máximo sismo de diseño, no deberá producir los siguientes efectos, de acuerdo a la U.S. Nuclear Regulatory Commission:

- a) la fragmentación de las BC,
- b) la fractura mecánica de los separadores,
- c) tensiones sobre los componentes superiores al 70% de la tensión de rotura a la temperatura de operación.

## **2.3 Inserción de reactividad**

Para restringir las consecuencias de este tipo de accidente, la U.S. Nuclear Regulatory Commission establece que el máximo accidente iniciado por reactividad (RIA), no deberá resultar en un valor de entalpía en el combustible superior a 280 cal/g UO<sub>2</sub>.

# **3 DESCRIPCION DEL DISEÑO**

## **3.1 Ensamble general**

El EC para el reactor CAREM-25 posee una sección transversal de forma hexagonal con 127 posiciones, las que se disponen en un ordenamiento triangular (Fig.1). Las BC, con una longitud



activa de 1400 mm, ocupan 108 de dichas posiciones, mientras que las 19 restantes corresponden a los tubos guías para las barras de control (18) y a un tubo destinado a la instrumentación “in-core”.

Desde el punto de vista estructural, el ensamble consiste en un esqueleto (formado por los tubos guías, el tubo de instrumentación, los separadores elásticos y las dos piezas de acople con las grillas del reactor, Fig.2), dentro del cual se aloja el conjunto de las BC, las que son posicionadas axial y radialmente por los separadores.

El EC está diseñado para alojar y guiar al conjunto de barras absorbentes, el cual está formado por una pieza superior o araña y 18 barras conteniendo el material absorbente, los cuales se deslizan dentro de los tubos guías del EC. En su parte superior, la araña posee una unión articulada, a través de la cual el conjunto se vincula con los mecanismos de control del reactor.

El núcleo de equilibrio del CAREM-25 prevé el uso de combustibles con dos enriquecimientos diferentes en U-235, 1.8 % para el EC central y 3.1 % para los restantes 60 EC.

Una parte de los EC contienen además un cierto número de barras combustibles con veneno quemable ( $Gd_2O_3$ ).

En los párrafos siguientes, se describen brevemente las principales características de los materiales y componentes del EC.

### **3.1.1 Barra combustible**

En el núcleo del CAREM-25 existirán tres tipos de BC:

- a) de  $UO_2$  enriquecido al 1,8 %,
- b) de  $UO_2$  enriquecido al 3,1 %,
- c) de  $UO_2$  natural y  $Gd_2O_3$ , conteniendo un 8% en peso de veneno quemable.

La columna activa, formada por un apilamiento de pastillas combustibles sintetizadas, es encerrada herméticamente por la vaina de Zry-4 y dos tapones del mismo material, soldados en ambos extremos por proceso TIG (Tungsten Inert Gas), lo cual permite aislar totalmente el combustible y los productos de fisión del refrigerante, durante la irradiación (Fig.3).

En el interior de la BC se encuentran además dos pastillas de alúmina ( $Al_2O_3$ ), en ambos extremos de la columna activa (para su aislación térmica), y un resorte helicoidal de compresión. Este resorte es alojado en el extremo superior, en el espacio libre previsto para el almacenamiento de los gases de fisión (plenum), el cual posee las dimensiones necesarias para evitar el aumento excesivo de la presión interior, al final de la vida útil.

Durante su fabricación, las BC son pre-presurizadas internamente con gas helio a una presión de 25 bar. Esta presión inicial tiene por objeto mejorar la transferencia térmica a través del espacio libre y disminuir la deformación inicial de la vaina, por efecto de la elevada presión del refrigerante (creep-down).

### **3.1.2 Separador elástico**

El separador elástico consiste en una grilla formada por flejes de Inconel 718 los cuales son soldados en sus intersecciones mediante puntos, realizados con arco eléctrico de plasma (Fig.4). Los flejes conforman la superficie externa del separador, son soldados entre sí por cordones continuos, mediante el mismo proceso.

El espacio delimitado por la intersección de los segmentos de fleje, constituye la celda donde se alojan las BC, los tubos guías y el tubo de instrumentación.

Cada una de las celdas para las BC posee un resorte y cuatro tetones. A través de ellos, las BC son posicionadas y fijadas elásticamente en las direcciones radial y axial.

Los separadores elásticos son fijados a determinados tubos guías mediante apéndices soldados a estos últimos, los cuales impiden su deslizamiento axial.

### **3.1.3 Tubos guías y de instrumentación**

Los tubos guías y de instrumentación son fabricados en Zry-4 y suministrados con un tratamiento térmico final idéntico al de las BC (relevado de tensiones).

En ambos casos están provistos de pequeños orificios para la refrigeración interior, a través de los cuales circula una fracción del caudal de agua, necesario para extraer el calor generado por la absorción neutrónica y el calentamiento gamma.

Los tubos guías y el tubo de instrumentación son fijados rígidamente a las piezas de acople superior e inferior mediante uniones roscadas.

### **3.1.4 Piezas de acople superior e inferior**

La pieza de acople inferior esta diseñada para posicionar al EC sobre la grilla inferior del núcleo, para lo cual dispone de una zona cilíndrica en su extremo, la que se inserta en los orificios practicados al efecto en la grilla; la que remata en la zona superior, de forma hexagonal y con amplias ventanas en cada una de sus caras, para minimizar las pérdidas de carga. En la parte superior, la zona hexagonal posee una grilla con orificios, en los cuales se insertan y fijan los tubos guías y de instrumentación.

Para evitar las posibles rotaciones del EC durante la irradiación, la pieza de acople inferior posee un saliente (tetón), diseñada para introducirse en una muesca de forma similar en la grilla inferior del núcleo.

La pieza de acople superior consiste en un cajón de sección transversal hexagonal, provisto en su extremo inferior de una grilla con agujeros, en los cuales se inserta el extremo superior de los tubos guías y de instrumentación. En cada una de sus caras, el cajón posee una amplia abertura para permitir la sujeción del EC durante las maniobras de inserción y extracción del núcleo.

En tres posiciones situadas a  $120^\circ$  sobre sus vértices interiores, se localizan las zapatas elásticas, que tienen por finalidad la vinculación elástica entre el EC y los pernos de la grilla superior del núcleo.

### **3.1.5 Conjunto de barras de control y seguridad**

Las BCR destinadas al sistemas de ajuste y control y al sistema de extinción rápido, están formadas por lingotes apilados del material absorbente, los cual son encerrados herméticamente por un revestimiento constituido por una vaina de acero inoxidable y dos tapones del mismo material, soldados mediante arco eléctrico de plasma (Fig.5).

El espacio libre entre la vaina y el material absorbente es llenado con gas helio a presión atmosférica, con el objeto de facilitar el control de estanqueidad y mejorar la transferencia térmica durante la irradiación.

El material absorbente es una aleación ternaria de plata (80%), indio (15%) y cadmio (5%).

Las BCR son fijadas rígidamente en sus posiciones mediante un husillo central, situado en la parte superior y denominado araña en razón de su forma (Fig.6).

La araña es una pieza plana, compuesta por un cuerpo central y seis brazos radiales en forma de T, los cuales poseen orificios donde se fijan las BCR, mediante uniones roscadas. El cuerpo central termina en una articulación en su parte superior, la que permite vincular el conjunto de BCR con los mecanismos de control del reactor

#### **4 VERIFICACION DEL DISEÑO**

La verificación del diseño se realiza mediante el uso de programas, soluciones analíticas convencionales, ensayos de laboratorio y experiencias de irradiación, de acuerdo con el siguiente detalle:

- Los estudios de verificación del comportamiento de las BC se realizan con un código de cálculo de barras (BACO), para definir los valores nominales óptimos, desde el punto de vista mecánico-estructural, de los parámetros más importantes de las BC y verificar los límites establecidos en el diseño.
- Para las BCR se realizaron cálculos de transferencia térmica para conocer la distribución de temperaturas en la barra de control, evaluación de los fenómenos de irradiación y verificar los criterios y límites de temperaturas y resistencia mecánica. mediante el uso de soluciones analíticas convencionales, estableciéndose el tiempo de residencia en el reactor.
- Verificación de la resistencia mecánica de los componentes y ensambles de EC, bajo las sollicitaciones actuantes en condiciones normales y autorizadas de operación.
- Realización de ensayos hidrodinámico del EC para determinar la pérdida de carga a través del ensamble, comportamiento frente a las vibraciones inducidas por el flujo de refrigerante, desgaste por rozamiento, etc.
- Verificación del comportamiento mecánico-estructural de los EC y conjuntos de barras de control, en el caso del accidente sísmico.
- Caracterización de las propiedades de los materiales semi-elaborados empleados en la fabricación de los EC y conjuntos de barras de control.
- Ensayo de irradiación de un prototipo de EC (escala 1:1) hasta el quemado máximo de extracción previsto en el diseño del núcleo, incluyendo un Programa de Vigilancia y Evaluación de Comportamiento, que comprenda la realización de inspecciones periódicas y una inspección final posirradiación.

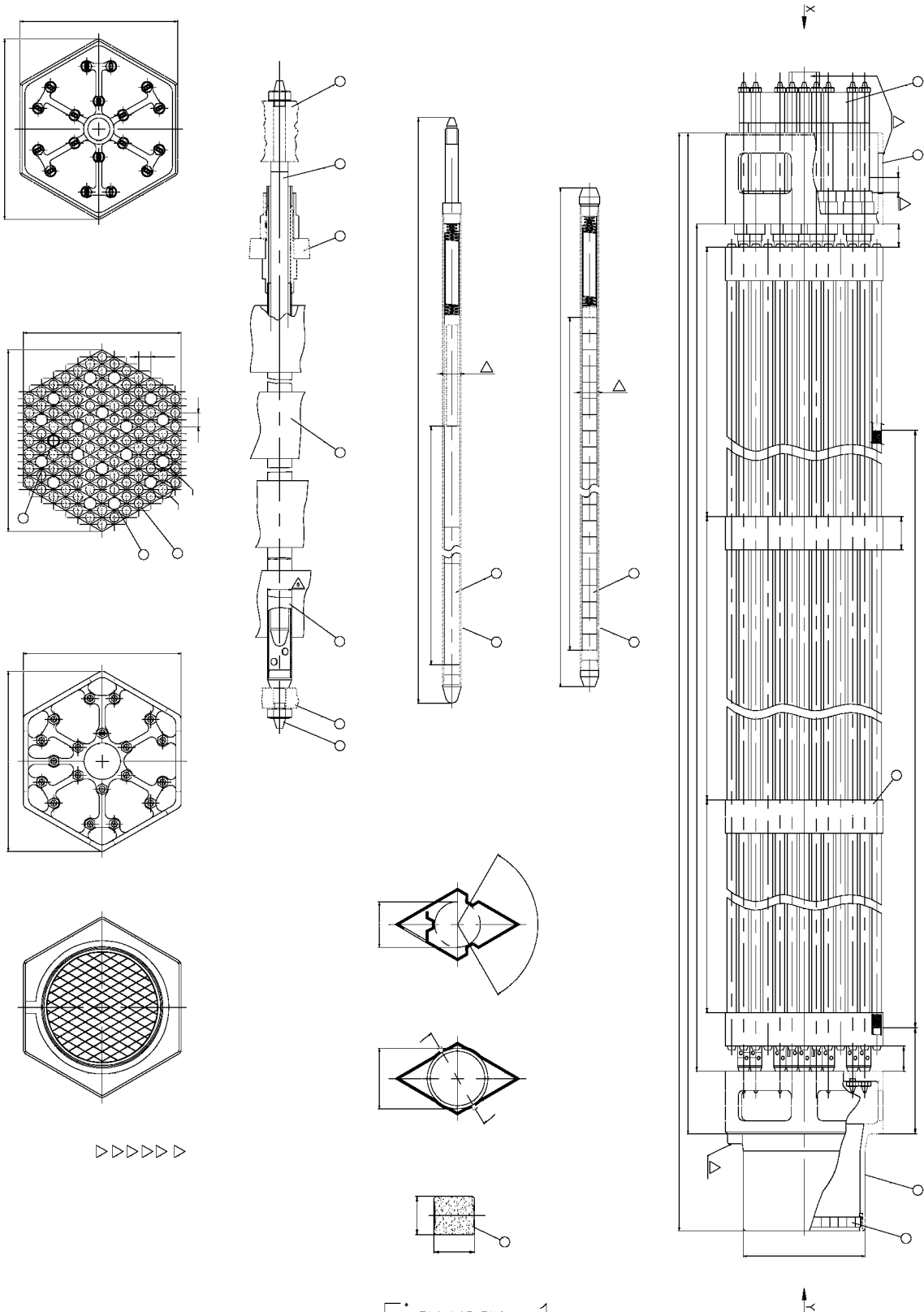


Figura: 1

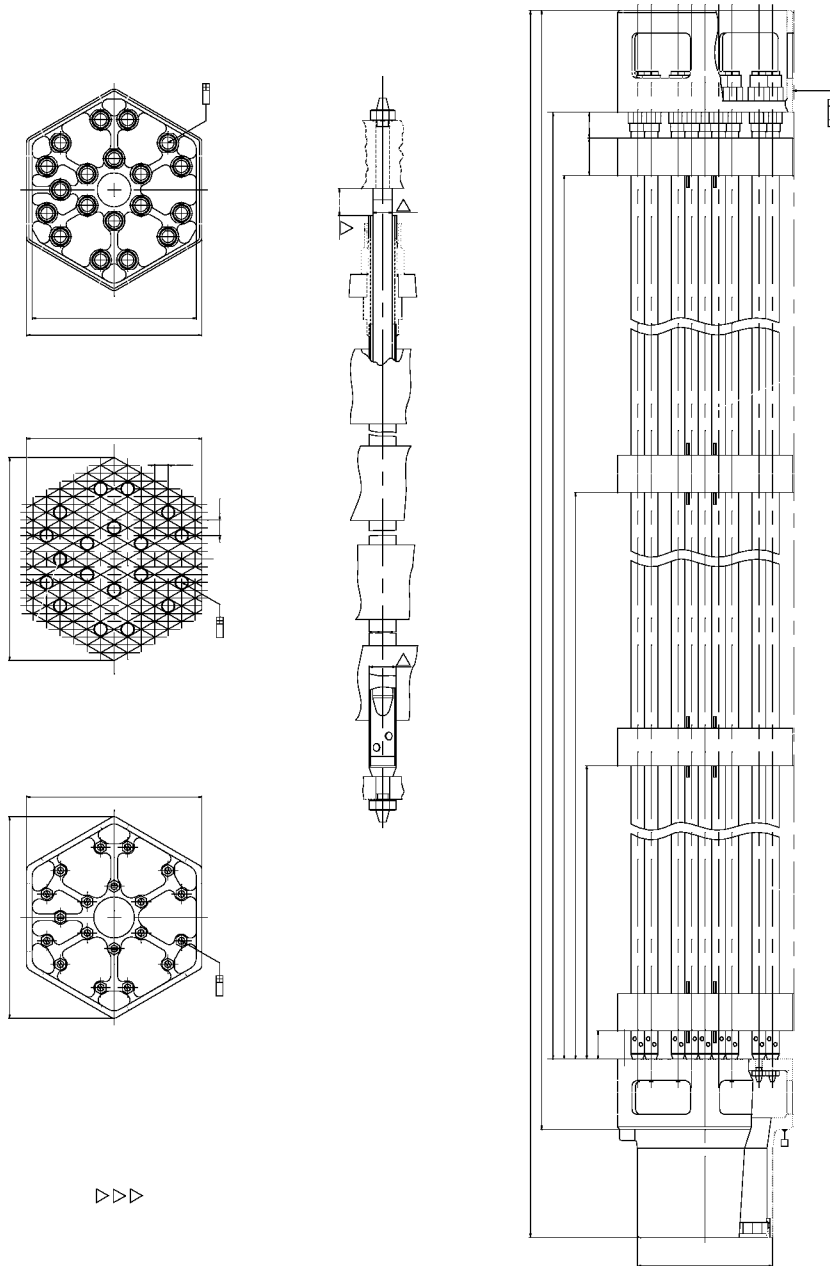


Figura: 2

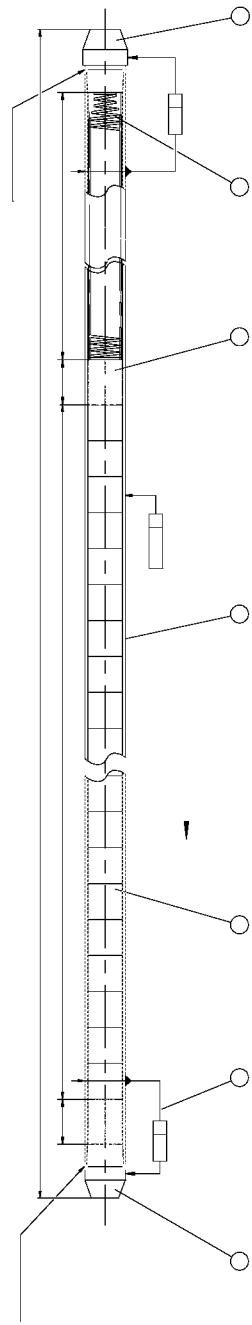


Figura: 3

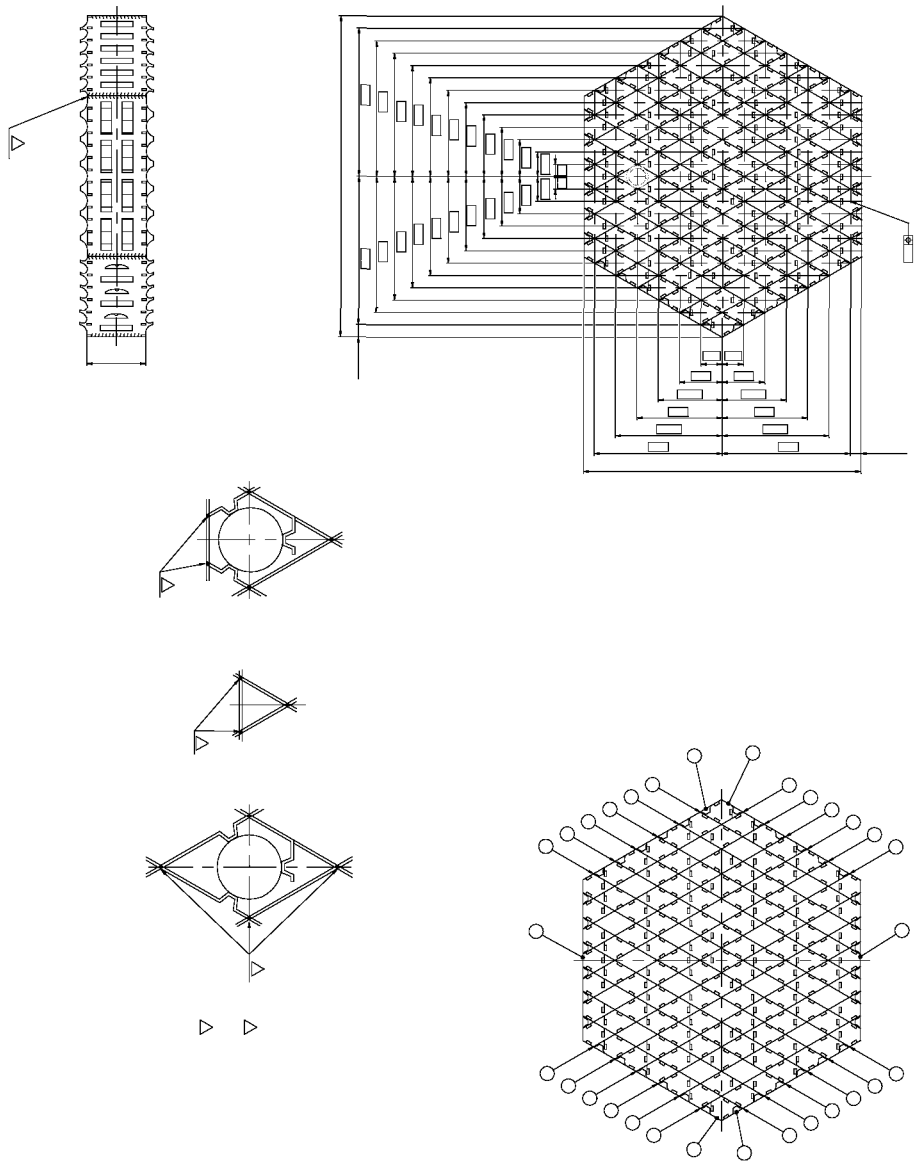


Figura: 4

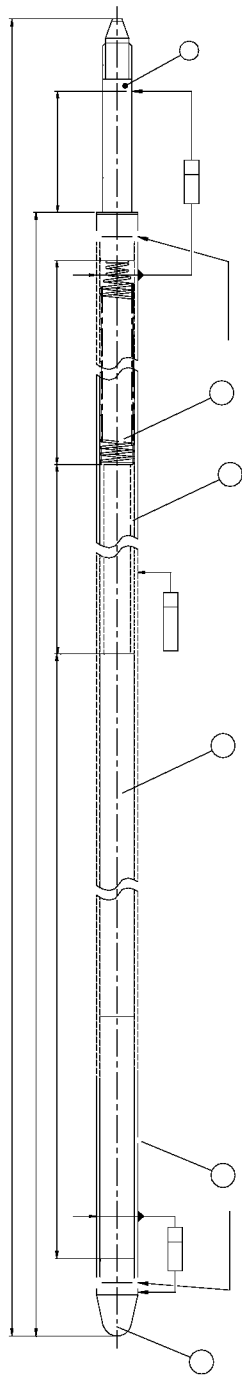


Figura: 5



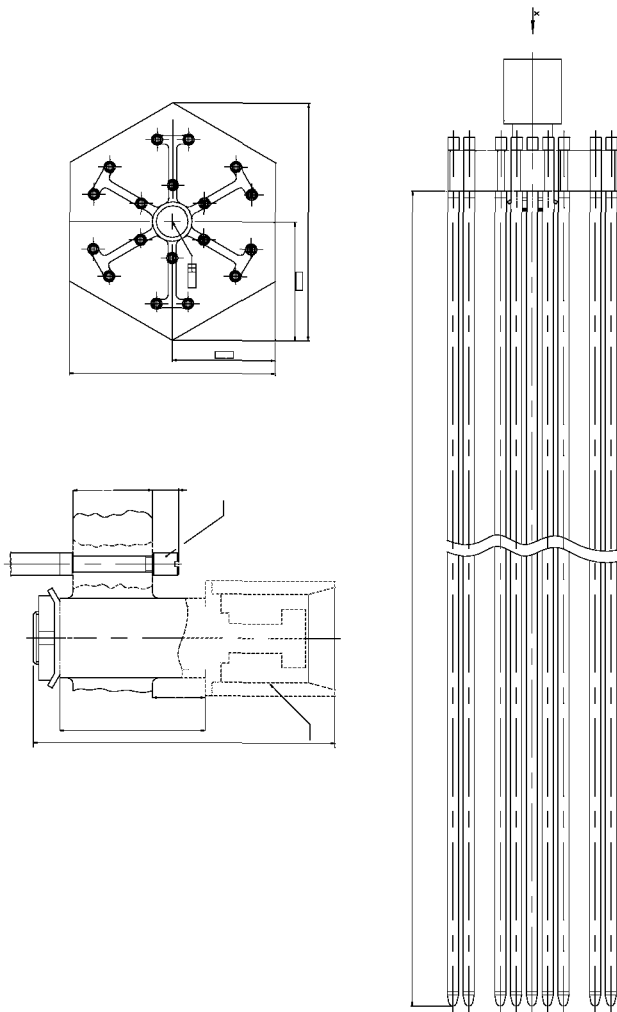


Figura: 6