



REPÚBLICA ARGENTINA
PODER EJECUTIVO NACIONAL
MINISTERIO DE PRODUCCIÓN

INSTITUTO NACIONAL de la PROPIEDAD INDUSTRIAL

TÍTULO DE PATENTE DE INVENCIÓN

AR107907B1

LA ADMINISTRACIÓN NACIONAL DE PATENTES, CONFORME LO RESUELTO EN EL EXPEDIENTE RESPECTIVO Y EN VIRTUD DE LO DISPUESTO POR LA LEY 24.481 (T.O.1996), Y SU DECRETO REGLAMENTARIO (DECRETO 260/96, ANEXO II), EXTIENDE EN NOMBRE DE LA NACIÓN ARGENTINA EL PRESENTE TÍTULO A COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA (CNEA). INVENTOR / ES SOBA, ALEJANDRO; MARAJOFSKY, ADOLFO.

QUE ACREDITA LA CONCESIÓN DE PATENTE DE INVENCIÓN SOBRE: BARRA CILÍNDRICA DE SECCIÓN RECTANGULAR PARA COMBUSTIBLES NUCLEARES. CUYA DOCUMENTACIÓN ANEXA ES COPIA FIEL DE LA DEPOSITADA EN EL INSTITUTO NACIONAL DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL CONFORME A LO ESTABLECIDO EN EL ART. 35 DE LA LEY 24.481 (DECRETO 260/96 - ANEXO I), EL TÉRMINO POR EL QUE SE ACUERDA LA PATENTE ES POR VEINTE AÑOS IMPRORRIGABLES CONTADOS A PARTIR DE LA PRESENTACIÓN DE LA SOLICITUD, POR LO CUAL EXPIRARÁ EL DÍA: 17 DE MARZO DE 2037.

BUENOS AIRES, 31 DE AGOSTO DE 2020.



Patentes de Invención
Modelos de Utilidad



Marcas



Modelos y Diseños
Industriales



Transferencia de
Tecnología



Información
Tecnológica

**MEMORIA DESCRIPTIVA
DE LA
PATENTE DE INVENCION**

Denominada:

**“BARRA CILÍNDRICA DE SECCIÓN RECTANGULAR PARA
COMBUSTIBLES NUCLEARES”**

Solicitada por:

Comisión Nacional de Energía Atómica

Av. Del Libertador 8250, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

Inventores:

- **Marajofsky, Adolfo**
- **Soba, Alejandro**

Por el plazo de VEINTE (20) AÑOS

TÍTULO Y CAMPO TÉCNICO DE LA INVENCION

- [1] La presente invención se refiere a una barra cilíndrica de sección rectangular para combustibles nucleares, la cual está conformada por una vaina cilíndrica de sección rectangular con vértices redondeados que contiene pastillas de material combustible de sección rectangular.
- [2] El campo técnico de la invención corresponde al de combustibles nucleares de reactores de potencia.

ESTADO DE LA TÉCNICA Y PROBLEMAS A SOLUCIONAR

Introducción

- [3] El diseño de elementos combustibles novedosos que den respuesta a la doble exigencia planteada por la elevación del quemado y la seguridad incentivan el estudio de propuestas alternativas a las tradicionales, atendiendo aspectos tan diversos como la ingeniería y la economía sin dejar de lado la seguridad. Para ello se han propuesto diferentes alternativas de diseño de reactores evolutivos que ofrecen mejorar la calidad de refrigeración en condiciones de incidentes y accidentes en general duplicando, triplicando, o aun cuadruplicando, los parámetros de seguridad. En la búsqueda de la reducción de la temperatura central de las pastillas cilíndricas y de sección circular, la tendencia ha sido la reducción del radio de la pastilla, logrando así distribuciones de temperaturas menos pronunciadas. Como esta elección supone una reducción de material físil por barra, los elementos combustibles aumentaron la cantidad de barras para mantener y/o aumentar incluso la cantidad de uranio en el núcleo. Otras soluciones ensayadas y en estudio son:
 - a) las de utilizar compuestos de uranio que posean conductividades térmicas mayores que permitan que la energía acumulada en caso de falta de refrigeración sean menores, por ejemplo carburos de uranio, siliciuros de uranio, etc.;

b) introducir modificaciones en la geometría del elemento combustible, como por ejemplo elementos que disminuyen el diámetro de las pastillas de combustible, disminuyendo el perfil de temperatura y por ende la energía acumulada en las mismas. Las barras así diseñadas poseen menor exigencia termomecánica, además de alejarse de las condiciones de DNB crítico, con lo que se posibilita rediseñar la termohidráulica del reactor en función de esta disminución.

- [4] La propuesta de la presente invención se clasifica dentro del último tipo de innovación mencionado e incluye la modificación de la geometría del elemento combustible conformado por pastillas de material físil puro –por ejemplo de óxido de uranio (UO_2), carburo de uranio (UC), siliciuro de uranio (U_3Si_2) u otro material físil, o bien, mezclado con un material no físil– y por la vaina de aleación de zirconio (zircaloy), siempre conservando el volumen y el número de moles del material físil respecto a las pastillas cilíndricas de sección circular como primera aproximación. Se propone diseñar un elemento combustible con barras de sección rectangular que mantenga el volumen de material físil (eventualmente el combustible puede ser UO_2 , u otro compuesto que posea un enriquecimiento adecuado, u otro compuesto fértil que provea después de los decaimientos pertinentes, el material físil en el nivel de enriquecimiento práctico para un reactor de potencia) contenido en una pastilla cilíndrica similar a la de un reactor de potencia de carácter comercial (PWR, BWR, CANDU, CAREM, u otros).

Reactores nucleares de potencia

- [5] Los componentes esenciales de un reactor nuclear de potencia son: un núcleo en donde se encuentran los elementos combustibles que contienen el material físil, un material moderador cuya función es frenar los neutrones hasta alcanzar velocidades adecuadas como para reproducir la reacción, un refrigerante, líquido o gaseoso, que remueve el calor generado por el combustible y un reflector que rodea al núcleo y evita que los neutrones escapen del sistema.

Los reactores que funcionan con moderador utilizan neutrones térmicos, y se denominan reactores térmicos (thermal nuclear reactor) mientras que reactores sin moderador, denominados reactores rápidos (fast reactor), utilizan neutrones sin moderar (de 2 MeV de energía), pero requieren para alcanzar criticidad de un incremento de átomos fíisiles pesados (U235, Pu239) en el combustible para elevar la probabilidad de colisión.

- [6] De acuerdo al tipo de moderador, del refrigerante o del rango de energía de los neutrones utilizados para la fisión, se pueden clasificar a los diferentes tipos de reactores nucleares para producción de energía. La *Tabla 1* muestra una lista de esos tipos de reactores en donde se reseñan brevemente las características de cada uno.

Reactor	PWR (VVER)	BWR	PHWR	UNGG MAGNOX	AGR	RHT	RBMK	FR LMFBR
Energía neutrón	Térmica	Térmica	Térmica	Térmica	Térmica	Térmica	Térmica	Rápida
Moderador	H ₂ O	H ₂ O	D ₂ O	Grafito	Grafito	Grafito	Grafito	--
Refrigerante								
Tipo	H ₂ O presur.	H ₂ O hirviendo	D ₂ O presur.	CO ₂	CO ₂	He	H ₂ O hirv.	Na
Presión (bar)	155	70	110	25	41	49	70	5
Temp. de salida (°C)	320	286	310	400	630	770	284	550
Combustible								
Tipo	UO ₂ (U,Pu)O ₂	UO ₂ (U,Pu)O ₂	UO ₂	Aleaciones bajas U	UO ₂	UO ₂ UC ₂	UO ₂	(U,Pu)O ₂ UPUZr
Enriquecimiento	Bajo	Bajo	U nat.	U nat.	Bajo	Alto	Bajo	Intermedio
Forma del elemento	Barra	Barra	Barra	Anillos o barras sólidas	Barra	Partículas	Barra	Barra
Material Vaina	Zry-4	Zry-2	Zry-4	Mg0.6%Zr	Acero inox.	C, SiC	Zr - 1 %Nb	Acero Aleac. FeNi
Posición combustible	Vertical	Vertical	Horizontal	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical

Tabla 1: Clasificación de reactores.

- [7] Los reactores de agua liviana (light water reactor, LWR) utilizan agua como refrigerante y moderador. En la *Tabla 1* son los denominados PWR (pressurized), BWR (boiling), VVER (iniciales en ruso, hacen referencia a los

tipo de reactores PWR en Europa del Este). Los de agua pesada (heavy water reactor, HWR), en cambio, utilizan D₂O como moderador. En la *Tabla 1* aparecen como PHWR porque utilizan el refrigerante a presión (a este último tipo de centrales pertenece Atucha I y II y Embalse). Luego están los reactores que utilizan grafito como moderador y gas como refrigerante, en la *Tabla 1* se listan tres tipos: UNGG-Magnox, sigla en el Reino Unido que significa Natural Uranium Gas-Grafithe, este tipo de reactor posee CO₂ como refrigerante; AGR (Advance Gas Cooled) que también utilizan CO₂ y el HTR (high temperature reactors) que utilizan He.

- [8] Los reactores LWR representan el 86% del total de la capacidad energética mundial generada con energía nuclear. De ese porcentaje 55% son PWRs, 8,5% PWRs rusos y 22,7 son BWR. En la Argentina se utilizan reactores PHWR, uno de ellos de fabricación canadiense desde donde deriva el nombre CANDU (CANadian Deuterium Uranium).

Combustibles nucleares de reactores de potencia

- [9] En la mayoría de los reactores (LWR y PHWR) se utiliza un combustible compuesto por óxido de uranio u óxidos mixtos (UO₂, (U,Pu)O₂). La elección de un combustible depende básicamente del tipo de reactor en el que va a utilizarse: para reactores PHWR, con agua pesada como moderador y refrigerante, el uranio se utiliza en su forma natural (0,7% de enriquecimiento) o levemente enriquecido (<~1%). En el caso de LWR, el enriquecimiento puede alcanzar hasta el 5% de U235. Además de esto, el combustible debe satisfacer ciertas condiciones geométricas relativas a la estabilidad mecánica y química bajo irradiación, poseer una compatibilidad fisicoquímica con el material de la vaina (para evitar reacciones de ataque químico) y con el refrigerante o el moderador en caso de posible contacto ante falla. Por último y no menos importante, poseer un costo de fabricación económicamente aceptable tanto en lo referente a su fabricación como a su reprocesamiento.

- [10] El óxido combustible es el más utilizado y el que acumula la mayor cantidad de experiencia en todo su ciclo de procesamiento; se compacta en forma de pastillas cilíndricas a partir de polvo de UO_2 . Las pastillas se envainan en tubos de Zircaloy constituyendo una barra combustible. Para una dada potencia lineal (por unidad de longitud), la temperatura en el centro de la pastilla se incrementa con el radio, por lo que barras de radio pequeño son recomendables. Por otro lado, esto último se contrapone con la necesidad de que la carga total de uranio del núcleo sea suficiente para mantener criticidad. Otro límite está impuesto por el flujo de calor máximo superficial que el refrigerante es capaz de extraer. Para una dada potencia lineal, el flujo calórico superficial decrece cuando aumenta el diámetro de la barra.
- [11] Un cierto número de barras ensambladas en configuraciones predeterminadas por el tamaño y forma del núcleo del reactor, constituyen un elemento combustible o ensamble de combustible (fuel assembly). En reactores LWR los elementos combustibles son de aproximadamente 4 metros de longitud con una estructura de soportes denominadas boquillas inferiores o superiores según la posición en el ensamblaje. Los reactores CANDU (PHWR), están constituidos por 36 barras distribuidas en forma de anillos concéntricos soldadas a dos grillas que hacen las veces de soportes. La longitud de estos elementos es de 60 cm aproximadamente y se ubican uno a continuación de otro en los tubos de presión. Esta disposición facilita el recambio de elementos combustibles sin tener que detener el reactor. El ensamble contiene también tubos guías de instrumentación o tubos vacíos para estabilizar el flujo neutrónico. También puede haber barras con venenos quemables, que en el comienzo de la vida nivelan el flujo de neutrones extra del combustible.
- [12] En la *Figura 1* se muestra un esquema de una barra combustible cilíndrica de sección circular, los elementos básicos constitutivos del elemento combustible. El tamaño de una barra, y por ende la cantidad de pastillas que contiene, depende del diseño del reactor.
- [13] Los componentes principales de una barra cilíndrica de sección circular son:

a) *La vaina*: construida de Zircaloy, con un espesor entre 0,6-1,0 mm. El Zircaloy es una aleación basada en zirconio con aleantes de Sn entre 1,2-1,7%, Fe 0,18-0,24%, Cr 0,07-0,13%, Fe+Cr 0,28-0,37% y O 0,1-0,15% (todos en porcentaje en peso). Los aleantes mejoran las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión de la vaina. La elección de este material para construir vainas de combustibles se debe a una combinación de propiedades que lo convierten en óptimo: En primer lugar, una sección eficaz de absorción neutrónica baja, además de que los isótopos de zirconio que se activan por captura neutrónica poseen una vida media corta. En segundo lugar, su resistencia mecánica es excelente. Por último, el Zry se corroe moderadamente en condiciones normales. Principalmente se utilizan dos aleaciones de zirconio denominadas Zircaloy-2 y Zircaloy-4.

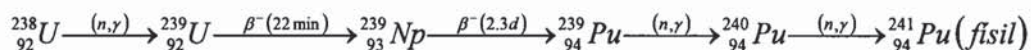
b) *La pila de combustible*: conformada por pastillas de UO_2 . El dióxido de uranio es un cerámico de densidad $10,96 \text{ g/cm}^3$. La pastilla se obtiene por sinterización del material en polvo debidamente compactado hasta densidades de 5 g/cm^3 con una porosidad luego del sinterizado 3-6%. Las dimensiones características varían por el tipo de elemento del que forman parte, pero aproximadamente los radios oscilan entre 0,5-0,6 cm y 1,0-2,0 cm de altura, algunos diseños de pastilla presentan *dishing*, es decir, un espacio cóncavo en las tapas que posee una profundidad de 0,01-0,03 cm destinado a evitar el contacto extremo entre pastillas cuando se encuentran dilatadas en operación o a muy alta temperatura. El hombro y el chanfle oscilan entre 0,01-0,02 cm (no todas las pastillas los poseen). El chanfle se prevé para evitar la interacción entre el extremo de la pastilla y la vaina en caso de que haya contacto. Una pastilla con chanfle se estima devendrá en una menor tensión de contacto.

[14] Las barras se sellan durante su fabricación con una presión interna no menor a 25 bar de helio, para compensar la tensión de compresión que el refrigerante impone a la vaina durante su operación (unos 100 bar). El helio se elige por poseer un coeficiente de conducción térmica alto para permitir así una buena transferencia de calor entre la pastilla y la vaina.

Comportamiento de los materiales bajo irradiación

Comportamiento de la Pastilla Combustible. (UO₂)

- [15] Además de las fisiones del U235 debido a los neutrones térmicos, ocurren dentro del material diversas reacciones de transmutación por captura neutrónica seguidas de decaimientos α y β^- . Uno de estos procesos es el que da lugar, por captura de un neutrón rápido, a la formación a partir del U238 de $^{238}_{92}\text{Pu}$ que es también un isótopo físil (se denomina material físil a aquel que puede sufrir fisión a partir del impacto de un neutrón). Existen cuatro isótopos físil (235U, 239Pu, 241Pu y 243Pu). La cadena de reacciones se lista a continuación:



- [16] La distribución del plutonio es mayor en la zona externa de la pastilla por la alta probabilidad de captura de neutrones epitérmicos por el 238U y la mayoría de esas reacciones ocurren al ingresar al UO₂. Más de 700 elementos transuránicos se producen por decaimientos β^- dentro de la pastilla como neptunio, americio, curio, berkelio, californio aunque la mayoría posee muy corta vida dentro del núcleo.
- [17] De todos ellos, desde el punto de vista neutrónico, los que deben ser tenidos en cuenta en cualquier cálculo de reactividad son los que poseen mayor sección eficaz de captura neutrónica como el 135Xe y el 149Sm y se comportan como venenos naturales de la reacción.
- [18] El xenón y el kriptón son gaseosos e insolubles en el UO₂, precipitan formando burbujas en el interior de un grano de óxido o en el borde de grano; estas burbujas contribuyen al hinchado de la pastilla (swelling) y degradan su conductividad térmica. Cuando se ha acumulado suficiente gas en borde de

grano, las burbujas se interconectan y el gas en exceso, debido al fuerte gradiente térmico, migra hacia el gap y el plenum, disminuyendo la transferencia de calor de la interfase gaseosa, ya que la conductividad del xenón es veinte veces menor que la del helio, y deteriorando de este modo el intercambio de calor a través del gap. El volumen de gases producido depende del enriquecimiento y aumenta con el quemado y aproximadamente representa el 30% de todos los productos de fisión generados durante la irradiación.

- [19] Los productos de fisión sólidos o fragmentos de fisión, incluyen elementos metálicos u óxidos insolubles en la matriz de UO_2 , y contribuyen al hinchado. El cesio y el yodo, que también son insolubles, migran hacia el gap e influyen en los mecanismos de corrosión de la vaina de Zircaloy.
- [20] El quemado de un combustible se mide en cantidad de isótopos fisiles fisionados. Se define como la energía total producida desde el comienzo de la irradiación por unidad de masa del combustible metálico. Para determinar el estado de quemado del combustible se utilizan diferentes métodos como dosimetría o espectrometría de rayos gamma. Ambos miden la cantidad de productos de fisión sólidos presentes en la pastilla.
- [21] Comportamiento térmico dentro del reactor: Cada fisión de $\text{U}235$ aporta un total de aproximadamente 200 MeV. Se requieren 1020 fisiones/seg para obtener una potencia térmica de 3.200 MW. Debido a la baja conductividad del UO_2 , se produce un gradiente elevado de temperatura dentro del combustible que depende del flujo de neutrones al que está sometido el combustible, es decir de la potencia a la que opera el reactor. Para un reactor PWR esa potencia (lineal) es del orden 160-420 W/cm generando una temperatura central de entre 900-1800 °C y una temperatura en el exterior de la pastilla de entre 500 y 620 °C. La temperatura media de la vaina es de aproximadamente 340 °C y la del refrigerante de 300 °C. El perfil de temperatura no es constante ya que durante la vida del combustible dentro del reactor, la potencia lineal varía.

[22] Estas variaciones de temperatura inducen diferentes cambios geométricos en la pastilla a saber:

- a) Expansión térmica y fisuración del cerámico por los grandes gradientes térmicos.
- b) Densificación: es un fenómeno que se produce al inicio de la vida del reactor en donde la porosidad de fábrica del combustible se consume rápidamente. Esta busca contrarrestar el crecimiento por hinchado que sucede con el tiempo en el combustible.
- c) Hinchado o Swelling: este fenómeno, resultado de la acumulación de productos sólidos y gaseosos de fisión, provoca cambios fundamentales y permanentes que afectan el comportamiento de la barra al reducir la distancia pastilla-vaina, además de reducir la conductividad del óxido. La cantidad generada de productos de fisión depende del quemado y aumenta con la temperatura. Experimentalmente se observa que el swelling gaseoso es mayor en la zona central de la pastilla.
- d) Liberación de gases de fisión: parte de los gases producto de la fisiones (Xe-Kr) son liberados al espacio libre dentro de la barra. Como se explicó anteriormente, esos gases aumentan la presión interna de la barra y deterioran la conductividad térmica del gap. Es un fenómeno térmicamente activado y depende de la densidad de fisiones.
- e) Cambios microestructurales: debido a las variaciones de temperatura que se producen dentro de la pastilla se observan diferencias de estructura cristalina en cada zona. En la zona central se observa acumulación de poros (que migran en sentido contrario al gradiente térmico) y crecimiento de granos columnares orientados en forma radial, mientras que en las zonas medias, se observa un crecimiento de grano equiaxial. En la zona exterior la estructura original permanece sin modificaciones.
- f) Creep: fenómeno de deformación lenta producto de la tensión continua sobre la pastilla.
- g) Deformación plástica: a altas temperaturas (mayores a 1400 °C) se observa deformación plástica del UO_2 .

Comportamiento de la vaina

- [23] A lo largo del quemado la vaina es sometida a un conjunto de tensiones que generan deformaciones instantáneas y permanentes. Asimismo, el contacto con el refrigerante por su lado externo, y con la cambiante atmósfera interna producto de agentes liberados por el quemado desde el combustible como el cesio y el yodo, genera diferentes tipos de ataques corrosivos que pueden llevar a la falla y rotura del metal. Además de producirse el ingreso de hidrógeno, agente altamente fragilizante, proveniente de la humedad que contiene la pastilla de combustible desde su inicio de vida. En el exterior se produce el crecimiento de una capa de óxido, de baja conductividad térmica, que provoca un aumento en la temperatura exterior de la vaina y funciona también como una fuente de hidrógeno. (Una capa de óxido de aproximadamente ~80 micrones incrementa en 30 grados Celsius la temperatura de la vaina). Este conjunto de fenómenos favorecidos por la distribución de tensiones sobre la barra provocan la denominada corrosión bajo tensiones (SSC: Stress Corrosion Cracking) que puede llevar a la rotura de la vaina.
- [24] La hidruración del Zircaloy es un fenómeno ligado al de oxidación. El hidrógeno que ingresa en la vaina es soluble hasta 100 ppm a 340 °C, pero es prácticamente insoluble a temperatura ambiente (< 1ppm). Un enfriamiento de la vaina provoca la precipitación del hidrógeno en exceso formando hidruros, induciendo la fragilización del material. El control de este fenómeno es fundamental en el diseño y análisis histórico del comportamiento de la vaina. En forma genérica se puede calcular que la cantidad de hidrógeno contenida es proporcional al ancho de la capa de óxido (zirconia) sobre la misma.
- [25] El primer mecanismo de tensión-deformación de la vaina se produce por la dilatación térmica y las presiones externas e internas sobre la misma. La irradiación que experimenta el Zircaloy con el paso del tiempo modifica ese campo tensión-deformación al agregar otros factores como:

- a) Creep: deformación progresiva y permanente bajo fuerzas constantes, que se suma a las instantáneas. Los aumentos de temperatura y la irradiación aceleran este fenómeno. Bajo irradiación el flujo neutrónico participa en la movilidad de los defectos e incrementa la velocidad de deformación. A bajas presiones (<100 MPa) la deformación por irradiación contribuye en un 80% a la deformación total por creep.
- b) Crecimiento bajo irradiación: se observa experimentalmente que las vainas de Zircaloy sufren un crecimiento debido a la irradiación que se manifiesta en forma diferenciada debido a las asimetrías de las vainas. La cantidad de deformación aumenta con el quemado y el tiempo. Este fenómeno globalmente causa la reducción del espacio entre las barras y las boquillas superiores e inferiores del elemento, por lo que debe tenerse en cuenta en el diseño.

Interacción Pastilla-Vaina

- [26] Bajo condiciones normales de operación y durante la vida del combustible el gap entre la pastilla y la vaina se cierra. Debido a la evolución geométrica de la pastilla (hinchado, creep, reestructuración) y la vaina (creep, crecimiento por irradiación) ambos materiales llegan a tocarse, contacto que introduce tensión y deformaciones locales de consideración.
- [27] Esta situación de contacto combinada con el campo de tensiones además de la presencia de una atmósfera corrosiva, lleva a la formación de micro roturas sobre la pared de la vaina que son las primeras manifestaciones del SCC. Las zonas de mayor riesgo se producen cuando contacta un sector de la pastilla que presenta fisuras con la pared de la vaina, pues en dichas situaciones se generan tensiones de expansión y espacio para que la atmósfera corrosiva provoque un ataque severo.
- [28] Bajo esas condiciones, una rampa de potencia rápida que eleve la exigencia del material sin dar tiempo a relajar tensiones puede provocar la rotura de la

vaina y la liberación de material fisil al circuito primario. Es por eso que como medida precautoria se limita el incremento de potencia, sobre todo en las primeras rampas, hasta permitir la relajación de tensiones.

- [29] Por otro lado, sin llegar al extremo de producirse fractura, como consecuencia del contacto y debido a la deformación diferencial de la pastilla se genera una deformación en la vaina denominada "efecto bambú". Bajo condiciones más extremas (alta potencia lineal ~ 450 W/cm) se producen deformaciones similares sobre la zona media de las pastillas.

Condiciones de incidente y accidente

- [30] Como se observa en lo antedicho, la búsqueda de extracción de calor del núcleo de un reactor de potencia requiere de una temperatura superficial de las vainas que ronda los 300°C . En combustibles cilíndricos como los usuales, esto significa que la temperatura central de una pastilla combustible alcance una rango de entre 1200 - 2000°C . Esta temperatura supone un calor acumulado en las pastillas cilíndricas sumamente alto, y es el principal problema que debe atenderse en caso de incidentes o accidentes del tipo de pérdida de refrigerante en un reactor comercial.
- [31] Los requerimientos principales que hacen a la seguridad de un reactor de potencia en EE.UU. sugieren una serie de criterios principales que deben cumplimentarse para salvaguardar la integridad de los elementos combustibles:
- a) Criterio de no alcanzar la temperatura de 1200°C para la vaina, ya que en este rango la deformación plástica de la misma se vuelve crítico.
 - b) Criterio de no alcanzar la capa de óxido un espesor superior al 17% de espesor de la vaina.
 - c) Criterio que limita la cantidad de hidrógeno producido en el sistema debido al proceso de oxidación.

Consideraciones térmicas: temperatura central y calor acumulado

- [32] Dado la necesidad de cumplimentar las condiciones mínimas de seguridad de los reactores, se han propuesto a lo largo del tiempo distintos cambios en la geometría de los elementos combustibles, así como en las barras que los constituyen, siempre buscando la disminución de la temperatura central de la pastilla, con la consiguiente disminución del calor acumulado. Una distribución térmica menor reduce las condiciones de exigencia termoquímica (en lo que hace a gases y productos de fisión y su migración) y termomecánicas (en lo referente a las tensiones a las que se somete la vaina) de todo el elemento, generando un reactor mucho más seguro.
- [33] A medida que la cantidad de calor por unidad de superficie de la vaina aumenta, se eleva la temperatura de la misma. Esto eleva así mismo la temperatura de la capa límite del refrigerante. Cuando ésta se acerca a la de ebullición la transferencia de calor se deteriora porque la interfase de contorno de una transferencia sólido-líquido es mucho mayor que la un sólido-líquido-vapor, en donde existe nucleación de burbujas. Este deterioro de la transferencia hace que se acumule calor en la barra y aumente la temperatura dentro de las pastillas combustible. Un aumento general de la temperatura de la barra sin generar un aumento en la transferencia de calor hacia el refrigerante y una consiguiente mejora en las condiciones de extracción de energía del reactor, no conlleva ningún beneficio, resultando perjudicial no sólo para el combustible, que en determinados casos puede llegar a fundirse en la zona central de la pastilla, sino que también lo es para la vaina, ya que la oxidación, la captura de hidrógeno y la fragilización consiguiente crecen en función de la temperatura.
- [34] Una de las modificaciones que se propuso para alejarnos de este punto crítico fue disminuir el flujo calórico por unidad de superficie de la vaina mediante la reducción de su diámetro. Barras de menor diámetro significa menor material físil dentro del elemento combustible, por lo que es necesario aumentar el número de barras por elemento. Ésta ha sido la tendencia durante los últimos cincuenta años en los elementos combustible para reactores de potencia de

agua presurizada e hirviente, alcanzando el límite fijado por la distribución neutrónica que requiere de una relación entre la cantidad de elemento fisil y de zircaloy dentro del núcleo.

- [35] Con nuestra propuesta en la presente patente buscamos disminuir el flujo calórico por unidad de área de la vaina mediante una modificación en la geometría (sección) de la barra combustible cilíndrica de sección circular, que además revierte en una menor distribución de temperatura en toda la barra y una menor cantidad de calor acumulado en las mismas.

ANTECEDENTES

- [36] La geometría rectangular es usual en los llamados reactores de investigación o MTR, en donde placas colaminadas de material fisil enriquecido (aproximadamente al 50% en volumen) mezclado con aluminio son ensambladas en elementos combustible rectangulares.
- [37] Formatos alternativos para elementos combustibles fueron propuestos en reactores destinados a submarinos nucleares, por ejemplo. En el caso de esta tecnología su preocupación estaba dada por los problemas de ruidos que generaban los combustibles de tipo cilíndrico. Pero además obtenían como efectos secundarios un incremento en las propiedades térmicas además de poder acomodar más material fisil en menos espacio. La *Figura 2* muestra dos tipos de diseños alternativos propuestos.

OBJETO DE LA PRESENTE INVENCIÓN

- [38] El objeto de la presente invención consiste en una barra cilíndrica de sección rectangular con vértices redondeados, como reemplazo de la geometría de una barra cilíndrica de sección circular, implicando así una igual o mayor superficie de extracción de calor sobre la vaina y, al mismo tiempo, un menor espesor de

la pastilla combustible que no sólo genere una temperatura menor en el centro sino una cantidad de calor acumulada mucho menor que en el caso de una geometría cilíndrica de sección circular.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LA INVENCIÓN

[39] Se presenta un tipo de barra combustible que consiste en una barra cilíndrica achatada de sección rectangular con vértices redondeados. La barra está compuesta por la vaina, que para la presente invención es de Zircaloy, la cual contiene pastillas combustible que pueden ser de un material fisil puro (que puede ser dióxido de uranio, carburo de uranio, siliciuro de uranio u otro compuesto) o mezclado con otro material no fisil que le permita incrementar ciertas propiedades que benefician a su comportamiento, poseyendo las siguientes características:

- 1) Dada la sección rectangular, los lados mayores (**A**) deben ser por lo menos 5 veces superiores a los lados menores (**B**), tal como se muestra en la Figura 11.
- 2) El espesor de la vaina, tanto en (**ea**) como en (**eb**), debe ser tal que la curvatura de la misma, correspondiente a los lados menores (**B**), no se deforme por efecto de la presión exterior. Ello implica que el huelgo (**ha**) se conserva y permite la dilatación de la pastilla, tal como se muestra en la Figura 12.
- 3) Hay un huelgo (gap) entre la vaina y la pastilla combustible en los lados mayores (**A**) denominado huelgo (**ha**), y hay un huelgo (gap) entre la vaina y la pastilla combustible en los lados menores (**B**) denominado huelgo (**hb**).
- 4) Los dos huelgos (**ha**) deben permitir, en condiciones normales de funcionamiento, absorber la dilatación de la pastilla, de tal modo que no se produzca "hoop stress" en (**hb**).
- 5) En el reactor en operación, las caras laterales de la vaina (**B**) se asentarán sobre la pastilla combustible cerrando gran parte del huelgo mayor (**hb**).

- 6) Es condición de funcionamiento de la barra, que la relación lado mayor sobre lado menor permita disipar la mayor parte del calor generado en la pastilla combustible por los lados mayores.
- 7) En estas condiciones geométricas, la temperatura central de la pastilla será mucho menor que la temperatura central de una pastilla de igual volumen y de sección circular, resultando en menores volúmenes de productos de fisión gaseosos y sólidos producto de su menor coeficiente de Difusión. Las roturas longitudinales serán menos probables. Las roturas transversales no modificarán el comportamiento sensiblemente. En caso de situación de falta de refrigerante, el calor acumulado será menor y las consecuencias menos dañosas para la vaina y la barra combustible, alcanzándose los valores críticos de temperatura de vaina a mayores tiempos, permitiendo, antes de esos tiempos, la llegada de refrigeración de emergencia.

Características geométricas de la barra propuesta

[40] En el interior de la vaina se encuentran la pastilla de material fisil y cuatro huelgos: dos en los lados mayores (**A**) y dos en los lados menores (**B**). Los huelgos entre ambos materiales pueden ser variables de acuerdo a diseño. Los huelgos de los lados mayores (**A**) de la barra se elegirán tratando de que dichos lados no tengan necesidad de ser rectificadas mientras que el de los lados menores (**B**) serán dimensionado para que las tensiones en la vaina sean mínimas. De igual modo se considera la existencia de un plenum (**7**), tal como se muestra en la Figura 10.

[41] La pastilla posee una densidad similar a la utilizada en un elemento típico PWR. La longitud de la pastilla se la dimensiona de tal modo que la barra posea igual cantidad de fisiones por unidad de tiempo que una barra de sección circular a los fines comparativos, pero podrá ser dimensionada de acuerdo a las conveniencias de las medidas del Elemento Combustible en concordancia con las condiciones neutrónicas y termohidráulicas impuestas al reactor.

Condiciones de diseño

[42] Se proponen algunas condiciones de diseño mínimas que debe requerir el elemento a construirse:

- 1) La presión interior nunca debe ser superior a la exterior.
- 2) Las propiedades de la vaina (6) y su espesor sean tales que la vaina no colapse en las caras menores (B), de tal modo de permitir que la pastilla (5) pueda dilatarse libremente para que no haya "hoop stress", a ello contribuye la curvatura de la cara menor.
- 3) Está admitido y es necesario que la vaina (6) en las caras mayores (A) pueda colapsar sobre la pastilla.
- 4) Los cálculos previos muestran que con la tecnología actual se puede obtener pastillas (5) que admitan no ser rectificadas.

Fabricación de la pastilla

[43] La pastilla (5) será fabricada por sinterizado en horno de alta temperatura de Molibdeno y en atmósfera reductora de H₂, llegando a densidades entre 10,40 a 10,70 g/cm³. Se trata de evitar el rectificado obteniéndose tolerancias compatibles con la tecnología de fabricación utilizada aceptadas por el comportamiento debido a la baja dilatación de la pastilla.

Fabricación de la vaina

[44] La vaina (6) aplanada es fabricada en una primera etapa por el método convencional de paso de peregrino y luego es sometida a procesos de aplanado con eventuales recocidos térmicos intermedios.

VENTAJAS Y APLICACIONES DE LA INVENCION

- [45] Basados en los análisis numéricos realizados podemos mencionar las siguientes y posibles ventajas de este nuevo prototipo de elemento combustible. Desde un punto de vista térmico, siempre teniendo en cuenta un rendimiento de potencia similar a la barra cilíndrica de sección circular, suponiendo que no se modifiquen las temperaturas externas, se obtiene una considerable reducción en la distribución de temperaturas internas en el combustible, con la consiguiente disminución del calor acumulado en la pastilla. Esto reduce la migración de gases de fisión, y su liberación al plenum **(7)**, limitando los valores que se alcanzan de presión interna de cada barra y además la cantidad de gases a ser incorporados al refrigerante en caso de rotura de la vaina.
- [46] Desde el punto de vista mecánico se observa que una geometría distinta a la circular propone, sobre todo en los extremos de la vaina **(6)**, una exigencia proporcional a la diferencia de presiones entre el exterior y el interior. Hemos supuesto que por construcción, la vaina es suficientemente "blanda" como para acompañar la expansión y contracción térmica y el swelling del combustible. En particular se estudiaron posibles reducciones en el tamaño del gap, en parte por la esperada menor cantidad de liberación gaseosa, así como menor swelling, y en parte por la posibilidad de cambiar la distribución geométrica del mismo, permitiendo mayor huelgo en el lado más pequeño de la sección **(hb)**, y reduciéndolo en la dimensión más grande **(ha)**. La primera condición contribuiría a generar un volumen libre disponible para alojamiento gaseoso en tanto que la segunda facilitaría la conducción calórica.
- [47] Desde un punto de vista de interacción pastilla-vaina, en esta nueva geometría con la disminución de la temperatura dentro de la pastilla se logra que los productos de fisión:
- a) permanezcan dentro de la pastilla en mayor medida, difundan más lentamente en ella (en particular I y Cs), y no arriben a la vaina para facilitar su rotura por SCC (stress corrosion cracking);

b) que en caso de rotura de vaina, los productos de fisión gaseosos y sólidos permanezcan dentro del volumen de la pastilla y no arriben al refrigerante o lleguen a la atmósfera exterior.

[48] Desde el punto de vista de la operación termohidráulica del reactor, al aumentar la superficie de la barra disminuirá el flujo calórico por unidad de superficie y por lo tanto nos alejamos del DNB crítico según función de la proporción en que se aumenta la relación de la superficie de la sección rectangular por sobre la superficie de la sección circular. En nuestro modelo, las condiciones de DNB permitirían pensar en dos escenarios posibles. O bien disminuir la velocidad de extracción para alcanzar el factor de operación de alrededor del 50% de DNB crítico (DNBR aproximadamente 2) o de igual manera, podría aumentarse la cantidad de material resistente al flujo sin perjuicio de la extracción del calor.

[49] En relación al comportamiento de la barra aplanada con respecto a la barra de sección circular (Ver Figura 1 – Arte previo), en situaciones de incidente o accidente es de destacar que trabajar a bajas temperaturas centrales, en caso de incidentes en los cuales se detenga la operación del reactor en forma brusca, disminuye el calor acumulado en el combustible, término a considerar, junto con el calentamiento gamma, sobre todo en los primeros momentos de la detención y hasta que comienza a operar la refrigeración de emergencia. Este hecho resulta positivo ya que a mayor calor acumulado en la pastilla, mayor la probabilidad de que en esos momentos de detención y comienzo de la refrigeración auxiliar, las vainas alcancen altas temperaturas (entre 800 y 1200 °C) y el correspondiente rango plástico de deformación, lo que puede llegar a producir el bloqueo de los canales de refrigeración, a esto debemos agregar la posibilidad de que la energía acumulada resulte superior a los valores recomendados. La estimación preliminar obtenida de la cantidad de energía acumulada de una barra aplanada es de 16% del correspondiente calor acumulado en el caso de barras de sección circular. El tiempo necesario para la extracción de ese calor es también proporcional a la diferencia de temperatura entre la pastilla y el refrigerante, por lo que también proporcionan

nuestras estimaciones un resultado sensiblemente menor al caso de elementos de sección circular y alcanza al 50% de ese valor aproximadamente.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION A TRAVÉS DE UN EJEMPLO

Un prototipo de barra combustible delgada

[50] Diferentes análisis teóricos han sido realizados para estudiar este prototipo de barra combustible. Recordemos que un elemento combustible es la unidad funcional en el reactor y consta de un conjunto de barras (en el caso del reactor tipo Candu son 37). Básicamente los análisis se realizan numéricamente basados en un diseño de un combustible de UO_2 con vaina de zircaloy, de formato semejante al combustible para reactor experimental, pero respetando el volumen de uranio contenido en una barra combustible característica de un reactor de potencia y suponiendo igual número de fisiones. El análisis se realizó desde un punto de vista térmico, en la búsqueda de un rendimiento de potencia del reactor similar a los casos de barras cilíndricas de sección circular, pero esperando que la nueva geometría no alcance temperaturas extremas, con la consiguiente reducción de liberación gaseosa y en general la atenuación de todo fenómeno activado térmicamente, así como otros que dependen del salto térmico como por ejemplo la rotura de la pastilla. Desde el punto de vista mecánico se debe analizar detenidamente la mayor exigencia que una geometría distinta a la circular propone, sobre todo en los extremos de la vaina (6), donde el huelgo (gap) en esa zona se dimensionará para que no haya tensiones en la vaina, equivalentes al "hoop stress". Se supone que la vaina es suficientemente "blanda" como para acompañar la expansión y contracción térmica y por swelling del combustible, pero por otra parte es suficientemente "dura" como para que conserve su forma en las caras de los lados menores conservando el huelgo. En particular se estudian posibles reducciones en el tamaño del huelgo mayor, en parte por la esperada menor cantidad de liberación gaseosa, así como menor swelling, y en parte por la posibilidad de cambiar la distribución geométrica del mismo, permitiendo mayor huelgo en el lado más pequeño de la sección, y reduciéndolo en la dimensión más grande.

La primera condición contribuiría a generar un volumen libre disponible para alojamiento gaseoso y espacio como para que la dilatación más el hinchado de la pastilla no lleguen a tocar la vaina, de tal modo que no se produzca interacción mecánica con la misma o equivalente del hoop stress en tanto que la segunda facilitaría la conducción calórica. Los códigos utilizados en este análisis han sido ampliamente validados en otros previos realizados en condiciones normales de operación de reactores.

[51] Para recapitular presentamos algunos de los resultados más relevantes del análisis previo realizado destacando que el mismo se realizó siempre suponiendo condiciones normales de operación del reactor. En la *Figura 3* se presenta un corte de la pastilla **(5)** y vaina **(6)** de la presente invención, teniendo en cuenta para establecer las dimensiones que la masa de combustible resultante sea aproximadamente la misma que la presente en un combustible de potencia. El combustible se considera UO_2 y el material de la vaina Zircaloy, sin embargo es posible reemplazar el UO_2 por cualquier otro compuesto fisil, pero manteniendo la cantidad de fisiones por unidad de tiempo. El huelgo es uniforme y se prevé un plenum **(7)** presente en los extremos longitudinales del elemento, para el alojamiento de los gases de fisión generados. Las dimensiones establecidas para combustible son de $1,84 \times 0,3 \times L$ cm mientras que el ancho de la vaina es de 0,080 cm. Siendo un combustible de pastillas de sección rectangular, de UO_2 , el tamaño del elemento puede determinarse por características neutrónicas, de ingeniería de reactor o por limitaciones de construcción del mismo, o mediante un compromiso de todos los mencionados factores unificados.

[52] La condición y forma del huelgo mayor **(hb)** es también uno de los puntos cruciales de este elemento. La presión ejercida sobre las caras de los lados mayores **(A)** en un reactor de potencia someterá a contacto entre la vaina y la pastilla en forma automática. Lo cual facilitará la conductividad térmica del elemento y limitará la liberación de gases de fisión. Situación que beneficia el diseño ya que con un plenum **(7)** adecuado, la presión interior del elemento no subirá a valores que dañen la estabilidad mecánica de mismo. Esta cadena de factores depende también del tipo de exigencias al que se someta al elemento

y debe ser sometida a pruebas experimentales. Sin embargo, los ensayos realizados en reactores experimentales señalaron que una laminación que fusione el combustible con la vaina (6) resiste condiciones de flujo exigentes. Para analizar ambos tipos de factores (tamaño del gap, tamaño del Plenum) el presente análisis numérico propone someter a un historia de potencia similar a las propuestas para reactores de potencia elementos combustibles con gap inicial variable, de 0, 10, 25 y 50 micrones, y un Plenum en la zona axial de 0.5, 1, 2 y 5 cm aproximadamente repartidos equitativamente entre ambas direcciones.

- [53] Un esquema de la Historia de potencia a la que se somete el elemento se observa en la *Figura 4*. Se considera una presión interna inicial de 1 Bar y una presión externa de 100 Bar. La temperatura exterior se establece en 300 °C.
- [54] Se presentan resultados en las *Figuras 5 y 6* de la evolución de temperatura central, gas liberado, presión interna del elemento en función del tamaño de gap considerado. En la *Figura 5* se incluye una comparación con el resultado de temperatura central de un combustible de potencia de geometría cilíndrica de sección circular sometido a la misma historia de potencia.

DNB

- [55] En la superficie de una barra combustible en contacto con el líquido refrigerante se produce la transferencia de calor desde el elemento caliente al líquido a menor temperatura. La velocidad del fluido así como la cantidad de calor a disipar desde la barra combustible son condiciones que deben tenerse en cuenta al momento del diseño de un reactor. Es necesario tener en cuenta que en la zona adyacente a la pared caliente, el líquido se encuentra en súper calentamiento, y una capa de nucleación de burbujas de vapor de agua es conformada y removida rápidamente de acuerdo a los parámetros de diseño. Esa zona de coexistencia de burbujas y el agua a velocidad en el proceso de transferencia se denomina "*partial nucleate boiling*". Pero si el flujo de calor se incrementa, las burbujas de vapor aumentan en densidad y se genera una zona

extensa de nucleación de burbujas que afectará dicha transferencia. Esa zona dependerá de la presión, temperatura de trabajo del refrigerante, la potencia lineal del sistema, las condiciones del flujo (caudal y velocidad), etc. La separación de la condición de “*nucleate boiling*” se suele denominar “*Departure from nucleate boiling (DNB) condition*” e implica que el sistema disminuye su capacidad extractiva de calor, con lo cual la temperatura de la superficie aumenta rápidamente, situación que debe evitarse operativamente.

- [56] Para diseñar elementos combustibles y circuitos de enfriamiento, se desarrollan tablas empíricas de predicción de comportamientos de barras combustibles en canales a determinados flujos máxicos del agua, presión, temperatura, y potencia de trabajo. También dependen dichos guarismos del diseño geométrico del elemento, básicamente del diámetro hidráulico de los elementos combustible. Esas tablas proporcionan un valor de flujo de calor crítico en el sistema dado y el DNBR que indica la relación del calor extraído en función del calor crítico. Cuanto más alto sea el valor de DNBR en las mismas condiciones de estudio, mayor será el rango de seguridad de trabajo de nuestro diseño y más apartados estaremos del flujo de extracción crítico.
- [57] En reactores tipo PWR suelen presentarse dos geometrías en la ubicación de las barras combustibles en el elemento: Distribución hexagonal y distribución cuadrada. En esta última la disposición de las barras aplanadas es simple de configurar, presentando mayores dificultades el caso hexagonal. Propondremos una configuración tentativa en el siguiente ejemplo. Así mismo se proveen dos escenarios de análisis: el caso de una sola barra/placa y el de tres barras/placas dispuestas de modo simétrico como se esquematiza en la *Figura 7*. Los guarismos calculados en la comparación del flujo crítico alcanzado en uno u otro caso para diferentes potencias lineales (300 y 600 W/cm, *Figura 8*) muestran que si bien el flujo crítico para el caso de una placa disminuye en comparación con la geometría cilíndrica, la reducción del flujo superficial es mucho mas pronunciada, mejorando el factor de DNB entre un 40 y un 54%. (Ver *Tabla 2*)

Parámetro	Barras 1/3	Placas 1/3
Calculado para Potencia Lineal 600 W/cm		
Flujo de calor [W/cm ²]	238,7324 / 238,7324	139,53 / 139,53
Flujo Crítico	245,1418 / 250,5293	201.0888 / 225,6916
DNBR	1,03 / 1,05	1,44 / 1,617
Calculado para Potencia Lineal 300 W/cm		
Flujo de calor [W/cm ²]	119,3662 / 119,3662	69,7674 / 69,7674
Flujo Crítico	245,1418 / 250,5293	201,2 / 225,6916
DNBR	2,05 / 2,1	2,88 / 3,23

Tabla 2: Comparación de los valores utilizados en la simulación.

Energía Acumulada en el dominio

[58] La distribución de temperatura en el caso de una pastilla de forma cilíndrica de sección circular sigue aproximadamente una forma parabólica. En forma análoga, si consideramos que la disipación se produce por el lado mayor para el caso de una sección rectangular y en forma simétrica en cada lado de la misma, obtenemos también una aproximación parabólica en función del lado menor de la placa sin considerar efectos de puntas en los extremos. Con ambas suposiciones se puede estimar la energía acumulada aproximada en cada geometría.

[59] Para una barra cilíndrica de sección circular la energía será aproximadamente

$$E = \frac{mc_p P_{vol} r^3}{6k_{th}}$$

[60]

[61] Mientras que para una barra aplanada (cilíndrica de sección rectangular con vértices redondeados) será:

$$E = \frac{mc_p P_{vol} l^3}{12k_{th}}$$

[62]

[63] Donde m es la masa de UO_2 en kg, c_p la capacidad calorífica en $J/kg^\circ C$, K_{th} es la conductividad del UO_2 en $W/cm^\circ C$, P_{vol} es la potencia volumétrica en W/cm^3 y r y l son los parámetros dimensionales característicos (Para una Potencia lineal de $300 W/cm$ los valores de cada energía son aproximadamente $21000,0$ y $3300,0 J$ por unidad de longitud de la barra respectivamente). Basados en esta estimación la energía acumulada o el calor que debe disiparse de un elemento combustible tipo placa es aproximadamente un $15,8\%$ del acumulado en un elemento cilíndrico de sección circular.

[64] En caso de falla del reactor en donde se produce la interrupción de la producción de potencia y es necesaria la extracción del calor por refrigeración de emergencia, situación apremiante en caso de accidente tipo LOCA o similar, hemos estimado el tiempo necesario para realizar dicha extracción mediante convección simple.

[65] El tiempo estimado puede considerarse como $t \propto \frac{\rho C_p \Delta T}{q}$ donde el numerador está representado por el producto de la densidad, la capacidad calorífica y la diferencia media de temperatura entre la pastilla y el refrigerante, el denominador corresponde a la potencia media proporcionada por la pastilla hasta el momento de la caída de la barras de control. El tiempo es directamente proporcional a la diferencia de temperatura entre la pastilla y el refrigerante, de modo que tendiendo a los resultados obtenidos previamente, el tiempo necesario para extraer el calor acumulado en una sección rectangular es un 42% del necesario para extraerlo en una barra cilíndrica de sección circular suponiendo las mismas condiciones de operación y materiales. Esto significa que la cinética de estabilización de la temperatura es un 42% más rápida que en el caso de barras cilíndricas de sección circular.

Resumen general cuantitativo y cualitativo

[66] A manera de conclusión podemos destacar que a consecuencia de su diseño, comparada con la barra cilíndrica de sección circular de UO_2 u otro material fisil que produzca la misma cantidad de fisiones por unidad de tiempo, este elemento poseerá las siguientes ventajas:

- 1) La geometría aplanada permite disminuir la temperatura central de la pastilla a valores de entre $\frac{1}{2}$ y $\frac{2}{3}$ del caso de sección circular.
- 2) Se acumula entre el 16 y el 20 % de la energía calórica del caso cilíndrico.
- 3) El tiempo de disipación de esa energía se disminuye en un 42 y un 50 %.
- 4) El DNBR se reduce en un 40% con respecto al caso cilíndrico de sección circular.
- 5) La tecnología necesaria para la construcción de vainas de estas características fue ensayada a nivel experimental con éxito.
- 6) Si el huelgo en los lados menores (**hb**) es el adecuado se evita que, en condiciones normales, la pastilla presente interacción mecánica con la vaina en (**hb**), evitando el equivalente al hoop stress en los extremos.
- 7) La dilatación térmica de la pastilla (**5**) en la dirección menor (**B**) (que es mucho menor a la de una barra de sección circular), más el hinchado, ejerce una presión sobre la vaina (**6**) en las paredes interiores de las caras mayores (**A**) que no llega a afectar la integridad mecánica de la vaina sobre dichas caras, situación que no es así en una barra de sección circular equivalente.

DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

- [67] En la Figura 1 se muestra un Esquema de una barra combustible, los elementos básicos constitutivos del elemento combustible. 1) Pastillas; 2) Vaina; 3) Resorte; 4) Tapones.
- [68] En la Figura 2 se observan dos tipos de diseños alternativos de elementos para submarinos nucleares. (Ole Reistad, Povl L. Ølgaard, Russian Nuclear Power Plants for Marine Applications, ISBN 87-7893-200-9, (2006))
- [69] En la Figura 3 se observa un Esquema y discretización mediante MEF del dominio de análisis propuesto.
- [70] En la Figura 4 se grafica la Historia de potencia genérica utilizada.
- [71] En la Figura 5 se muestran las Temperaturas centrales del elemento en función del gap.
- [72] En la Figura 6 se grafican la presión y gas liberado en el elemento en función del gap.
- [73] En la Figura 7 se observa un Esquema de barras y placas en el canal utilizado para calcular el DNB.
- [74] En la Figura 8 se grafica la Comparación entre el DNBR predicho para una placa y para una barra en función de la potencia lineal.
- [75] En la Figura 9 se observa una representación de la barra seccionada, la cual muestra la vaina de sección rectangular con vértices redondeados (6) y una pila de pastillas combustibles de sección rectangular (5).
- [76] En la Figura 10 se observa una representación de la barra completa, la cual muestra el plenum (7), la vaina de sección rectangular con vértices redondeados (6) y una pila de pastillas combustibles de sección rectangular (5).

- [77] En la Figura 11 se observa un corte de la barra en la cual se puede apreciar la vaina de sección rectangular con vértices redondeados (6) y una pastilla combustible de sección rectangular (5). Asimismo, se puede apreciar que los lados mayores de la vaina se denominan (A) y los lados menores de la vaina se denominan (B).
- [78] En la Figura 12 se observa un corte de la barra con un acercamiento que permite distinguir los huelgos de los lados mayores denominados (h_a), los huelgos de los lados menores denominados (h_b), los espesores de los lados mayores denominados (e_a) y los espesores de los lados menores denominados (e_b).
- [79] En la Figura 13 se observa una representación de la barra seccionada, la cual muestra la vaina de sección rectangular con vértices redondeados (9) y una pila de pastillas combustibles de sección rectangular con chanfle en sus vértices (8).
- [80] En la Figura 14 se observa un corte de la barra con un acercamiento que permite ver el detalle del chanfle (ch) de las pastillas combustibles (8) contenidas dentro de la vaina (9).

REIVINDICACIONES

Habiendo descrito y determinado la naturaleza y alcance de la presente invención, y la manera en que la misma ha de ser llevada a la práctica, se declara lo que se reivindica como invención y de propiedad exclusiva:

1) Una barra cilíndrica para combustibles nucleares para uso en reactores de potencia, caracterizada porque comprende

una vaina (cladding) de zircaloy en forma de tubo cilíndrico de sección rectangular con vértices redondeados, donde sus paredes poseen un espesor de entre 0,04 cm y 0,09 cm, y donde sus lados mayores (**A**) son al menos 5 veces mayores que sus lados menores (**B**),

una o más pastillas combustibles (fuel pellets) cilíndricas de sección rectangular compuestas por material fisil puro que contiene uranio, las cuales se alojan dentro de dicha vaina,

2) La barra cilíndrica de acuerdo a la reivindicación 1, caracterizada porque los huecos (**hb**) entre la vaina y las pastillas combustibles, en condiciones normales de funcionamiento, permiten absorber la dilatación de las pastillas de tal modo que no se produzca interacción mecánica entre las pastillas y la vaina en (**hb**), y se eviten tensiones sobre la vaina (hoop stress), siempre que

$$hb > (1 + \alpha \cdot \Delta T) \cdot A + ha$$

donde **hb** es el hueco de los lados menores, α es el coeficiente de dilatación térmica del material combustible, ΔT es la diferencia entre temperaturas ($T_{\text{central pastilla}} - T_{\text{exterior vaina}}$), **A** es la longitud de los lados mayores y **ha** es el hueco de los lados mayores.

3) La barra cilíndrica de acuerdo a la reivindicación 2, caracterizada porque dichas pastillas combustibles de sección rectangular poseen sus vértices con chanfle.

4) La barra cilíndrica de acuerdo a la reivindicación 2, caracterizada porque dichas pastillas combustibles están compuestas por material fisil que contiene uranio mezclado con material no fisil.

5) La barra cilíndrica de acuerdo a la reivindicación 4, caracterizada porque dichas pastillas combustibles de sección rectangular poseen sus vértices con chanfle.



Ing. Edgardo Sergio Alaniz

Agente de la Propiedad Industrial

Matrícula N° 2282

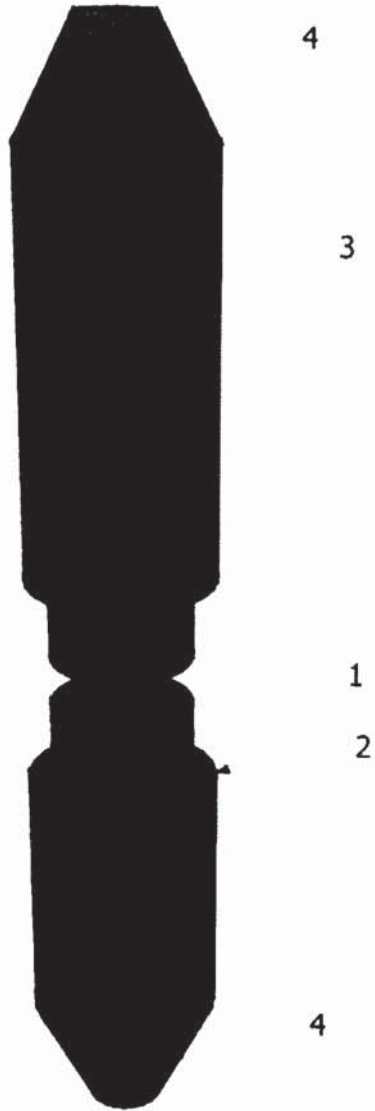


Figura 1 – Arte previo

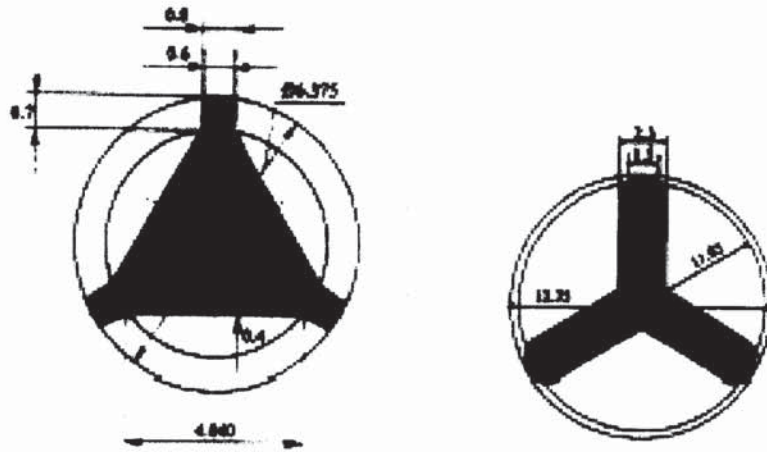


Figura 2 – Arte previo

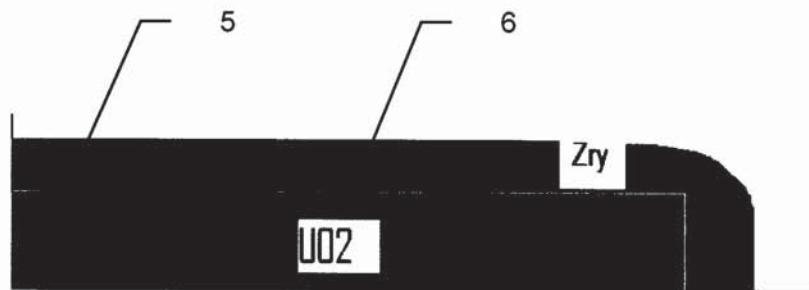


Figura 3

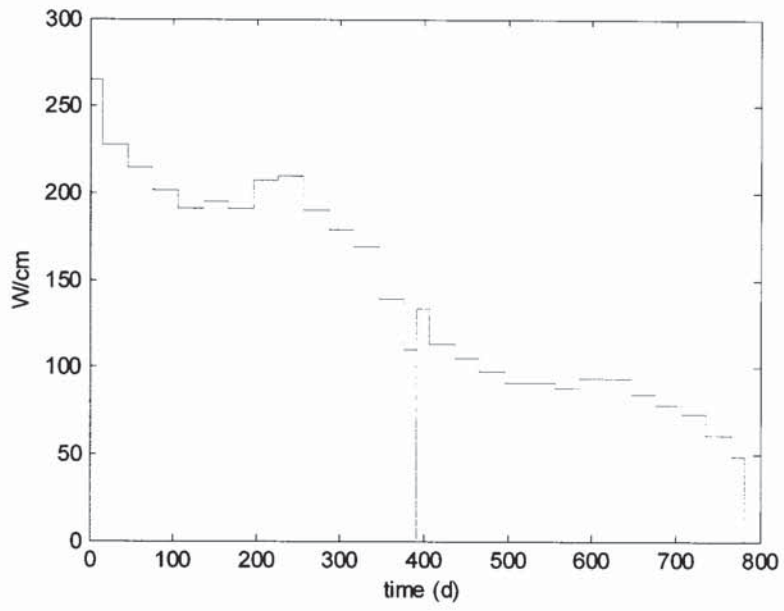


Figura 4

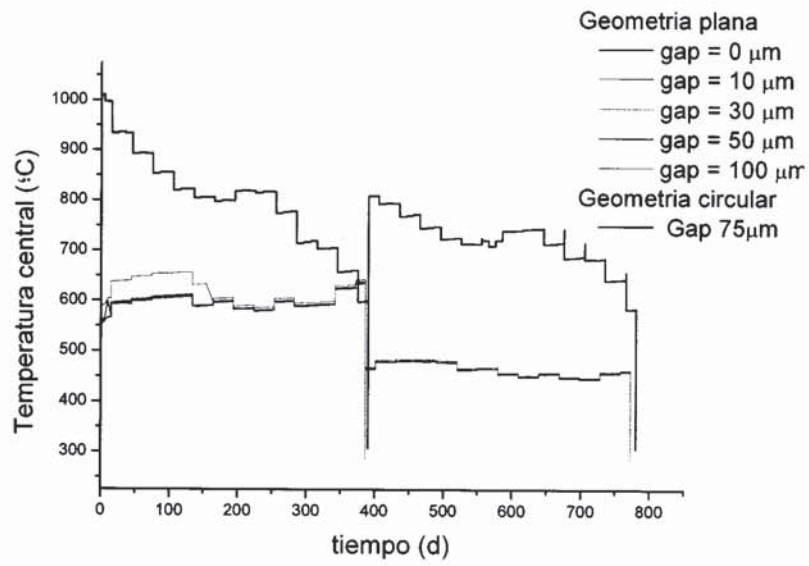


Figura 5

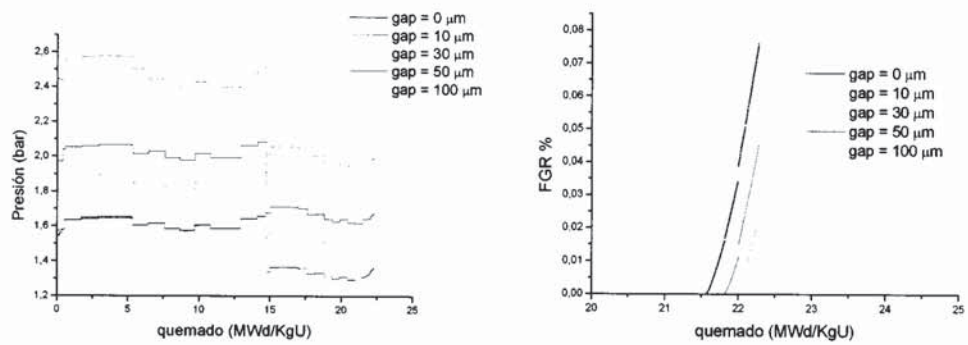


Figura 6

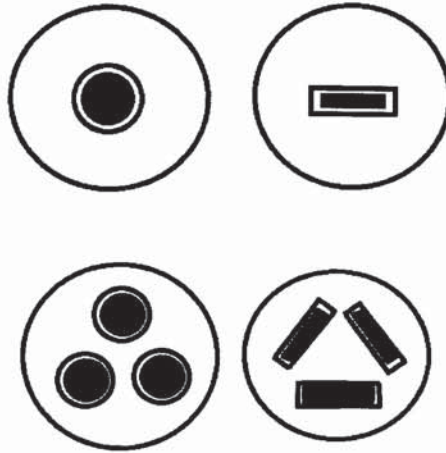


Figura 7

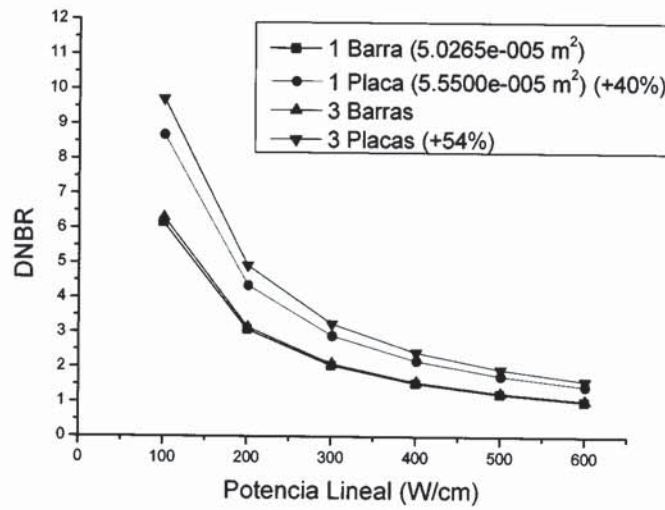


Figura 8

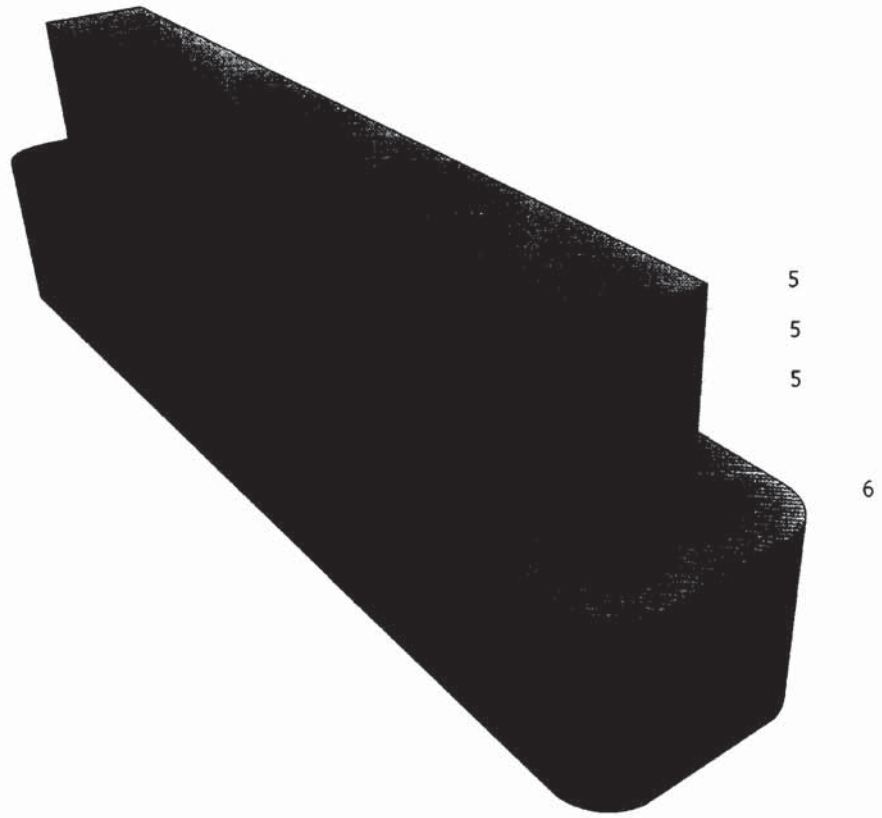


Figura 9

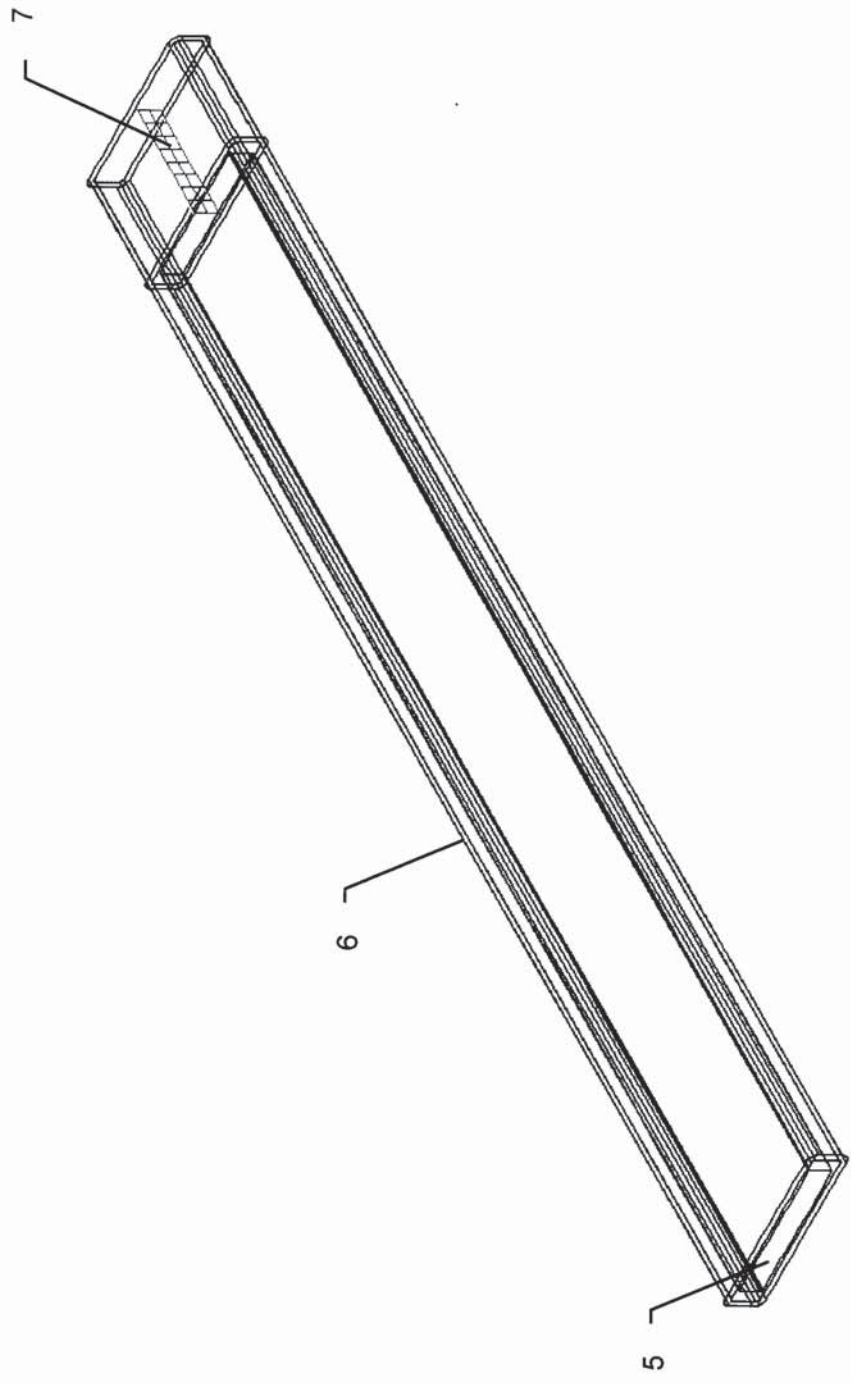


Figura 10

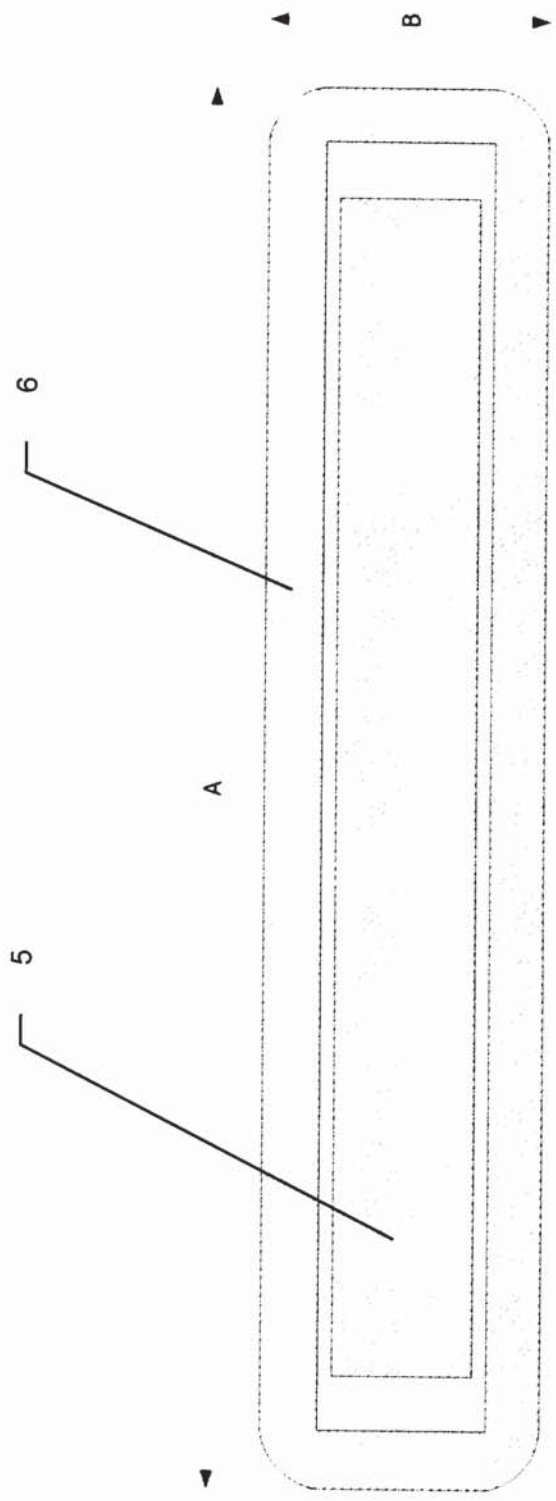


Figura 11

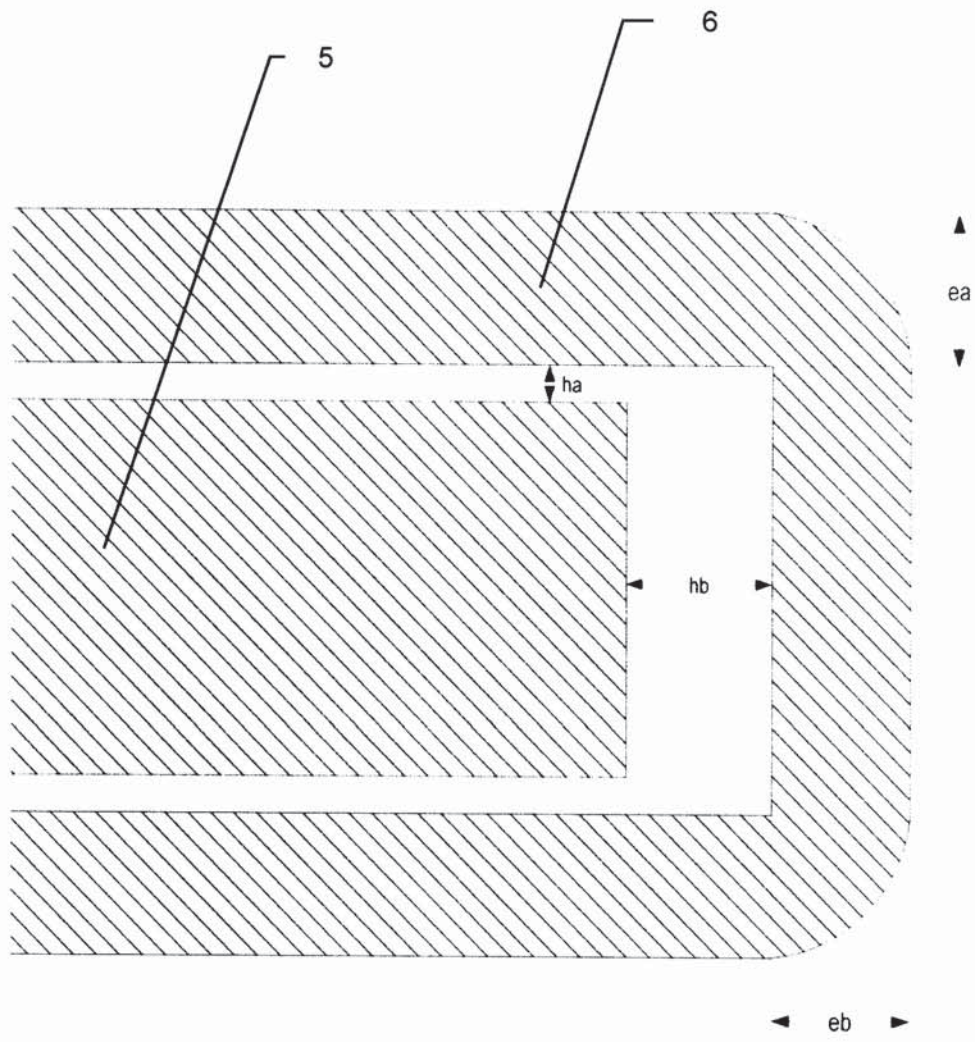


Figura 12

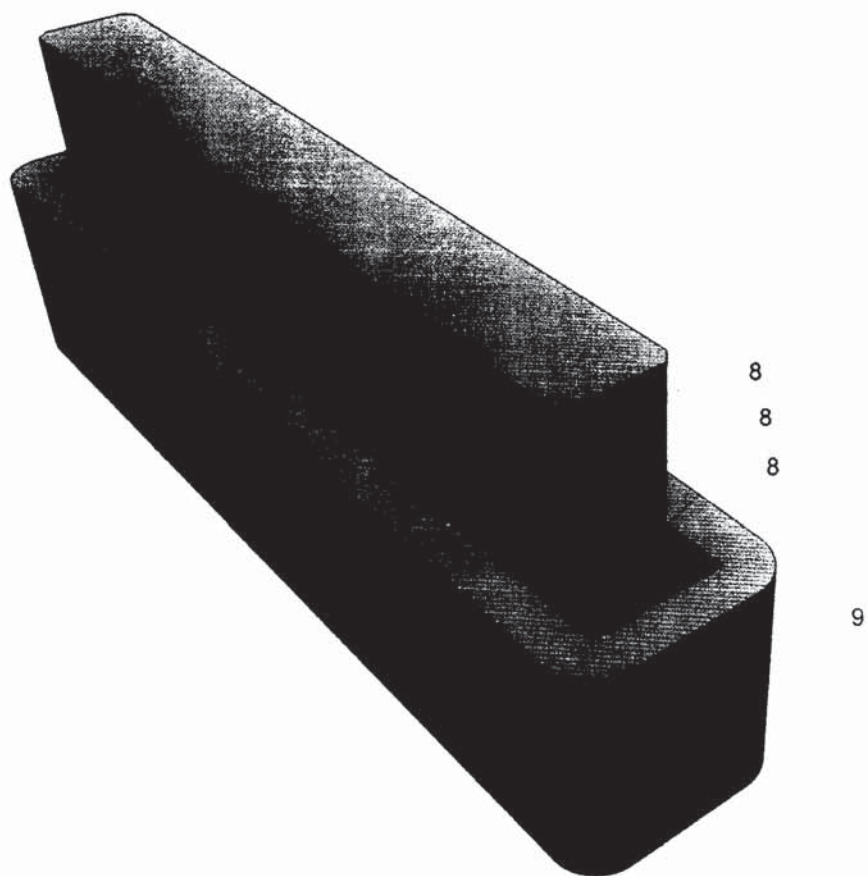


Figura 13

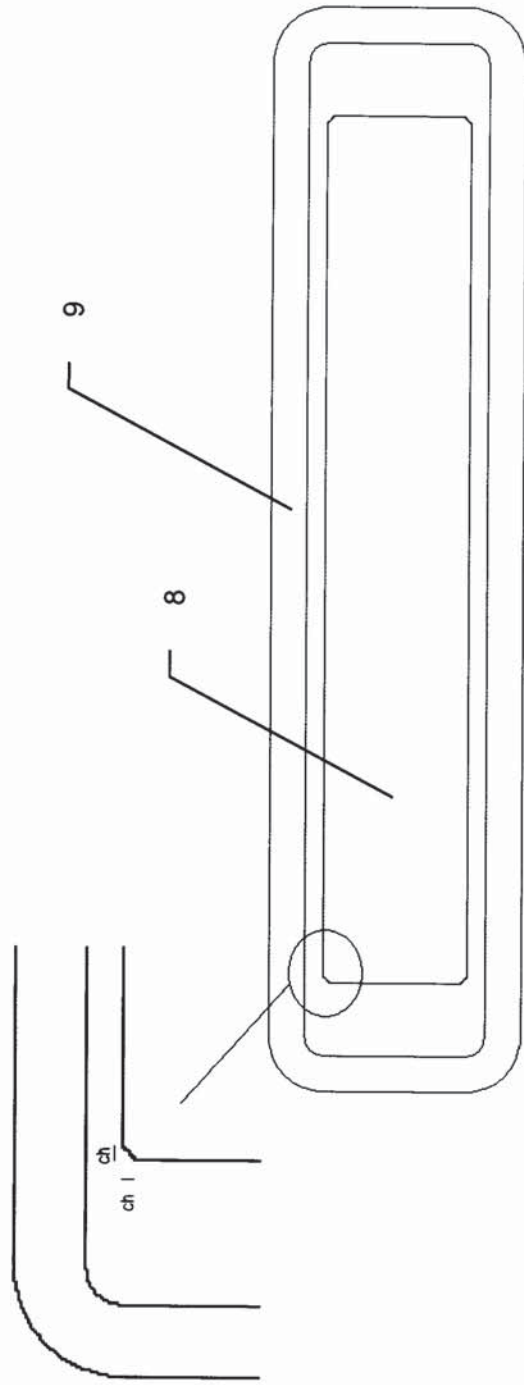


Figura 14



REPÚBLICA ARGENTINA

(10) PATENTE DE INVENCION

(11) RESOLUCION NUMERO: AR107907B1

(--) DISPOSICION GDE NUMERO: DI-2020-255-APN-ANP#INPI

(24) FECHA DE RESOLUCION: 31/08/2020

(--) FECHA DE VENCIMIENTO: 17/03/2037

(21) ACTA NUMERO: P20170100665

(22) FECHA PRESENTACION:17/03/2017

(51) INT.CL.7 : (CIP) G21C3/07, Y02E30/40

(30) PRIORIDAD CONVENIO DE PARIS

(54) TITULO :BARRA CILINDRICA DE SECCION RECTANGULAR PARA COMBUSTIBLES NUCLEARES.

(71) TITULAR :

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA (CNEA)

---- CON RESIDENCIA EN :

AV. DEL LIBERTADOR 8250 CAPITAL FEDERAL, (1429), Pais AR

(74) AGENTE :2282