

FABRICACION DE COMBUSTIBLE NUCLEAR PARA REACTORES DE AGUA LIGERA

José Luis GONZALEZ MARTINEZ

GENERAL

CLASIFICACION DE LOS ELEMENTOS COMBUSTIBLES

Los elementos combustibles para reactores de agua ligera son de dos tipos, los destinados a Reactores de Agua a Presión (PWR), y los destinados a Reactores de Agua en Ebullición (BWR).

En la Fig. I se muestra un Elemento Combustible del tipo PWR, siendo sus componentes principales los siguientes:

- Barra de combustible formada de tubo y tapones de zircaloy, muelle y pastillas de óxido de uranio.
- Tubos guía de zircaloy o acero inoxidable según los casos.
- Rejillas de inconel.
- Cabezales (superior e inferior) de acero inoxidable.

En la Fig. II se indica un Elemento Combustible del tipo BWR, con los siguientes componentes principales:

- Barra de combustible, formada de tubo y tapones de zircaloy, muelle, conjunto absorbente y pastillas de óxido de uranio.
- Barra de gadolinio formada igualmente de tubo y tapón de zircaloy, muelle, conjunto absorbente, pastillas de óxido de uranio y además pastillas de una

mezcla de óxido de gadolinio y óxido de uranio.

- Barra de agua de zircaloy.
- Rejilla de zircaloy e inconel.
- Cabezales (superior e inferior) de acero inoxidable.

Aunque existen diferencias en la fabricación de los dos tipos de Elementos Combustibles descritos anteriormente, para el desarrollo de este artículo, se unificarán ambos procesos de fabricación.

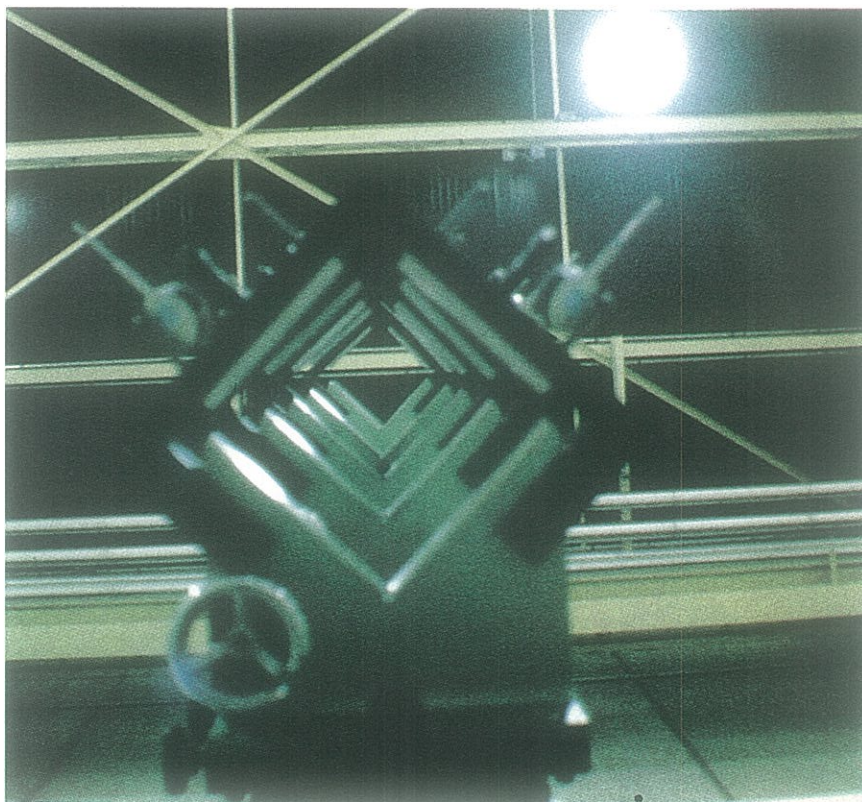
PROCESOS DE FABRICACION

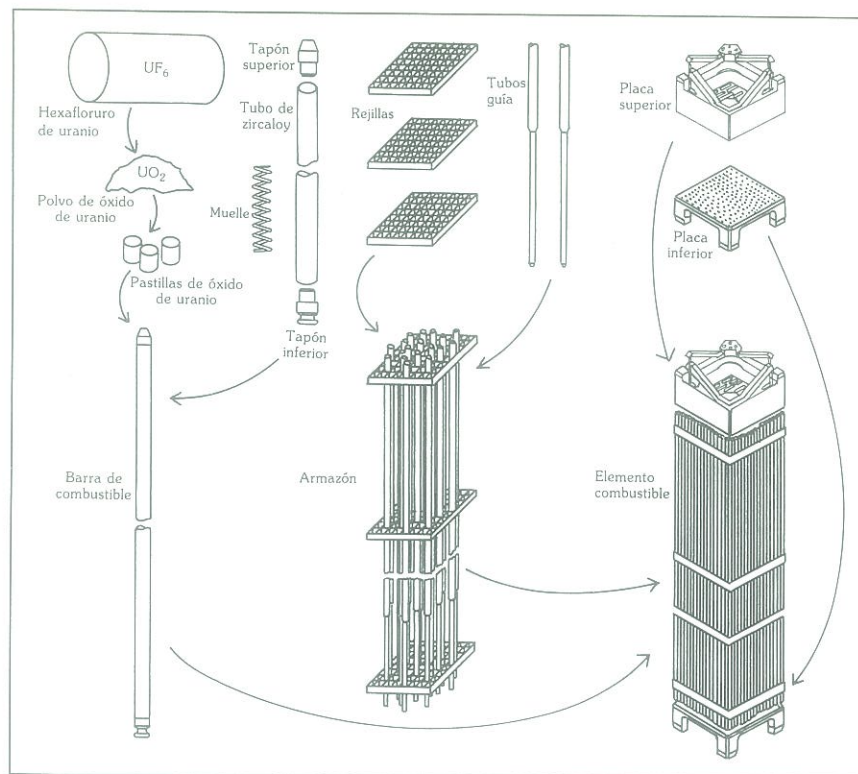
En la Fig. III se indican las distintas etapas del Proceso de Fabricación realizadas en las instalaciones de ENUSA en Juzbado:

- Proceso cerámico, paso de polvo de óxido de uranio a pastillas de alta densidad.
 - Proceso Mecánico que incluye:
 - La carga de pastillas en tubos.
 - La fabricación de cabezales, rejillas y tapones.
 - El montaje de los distintos componentes,
- así como el Proceso Químico, paso del hexafluoruro de uranio a polvo de óxido de uranio, que hasta el momento actual no se realiza en esta fábrica.



José Luis GONZALEZ MARTINEZ es Ingeniero Industrial por la ETSII (Madrid). Trabajó durante tres años en «3M España, S. A.», en el Departamento de Ingeniería de Proceso. En 1975 se incorpora a la División del Combustible de ENUSA donde, tras una estancia de especialización en Estados Unidos, colabora en el Proyecto y puesta en marcha de la Fábrica de Juzbado, en la que después es nombrado Jefe del Departamento de Producción. Actualmente es Director de dicha Fábrica de Elementos Combustibles.





FI Proceso de fabricación del elemento combustible para reactor de agua a presión.

PROCESO CERAMICO

Descripción del Proceso

Mediante el proceso cerámico el polvo de óxido de uranio se transforma en pastillas cerámicas, con las características requeridas en cada contrato.

Características del polvo de óxido de uranio

El polvo de UO_2 adquirido debe de poseer una serie de características que es necesario determinar para conocer su comportamiento en la fase de fabricación posterior.

Las características físicas a comprobar son las siguientes:

- Superficie específica.
- Densidad volumétrica.
- Tamaño de grano.

Mientras que las características químicas que deben ser analizadas son las siguientes:

- Relación O/U.
- Contenido de humedad.
- Contenido en cada isótopo de uranio.
- Impurezas químicas.

La secuencia de operaciones dentro del proceso, está expresada esquemáticamente en la Fig. IV, describiendo a continuación cada una de estas etapas individualmente.

Preparación

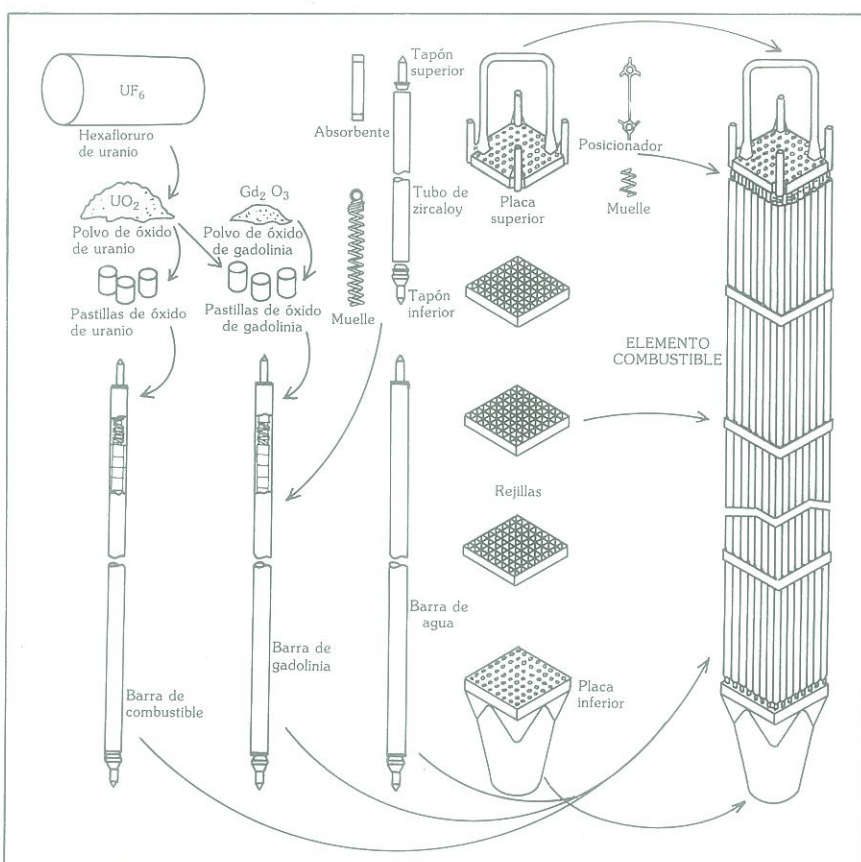
Consiste en la formación de una mezcla uniforme de polvo de óxido de uranio virgen y del material limpio reciclado (residuos) debidamente tratado de la propia línea de fabricación. Los residuos pueden ser de dos tipos principales:

- Residuos procedentes de las etapas posteriores al sinterizado, excepto los lodos de la rectificadora (residuos duros).
- Lodos de la rectificadora.

Los residuos duros son oxidados en un horno especial, transformándose en U_3O_8 , que, asimismo, es cribado.

De esta forma, al utilizar el reciclado de los residuos, que de otra forma no podrían ser utilizados como producto aceptable, aumenta el rendimiento de fabricación de la línea.

FI Proceso de fabricación del elemento combustible para reactor de agua en ebullición.



Preprensado, Granulado y Homogeneizado

Consiste en la formación de un material de alimentación a la prensa, con buenas características de fluidez y manejo para la etapa de prensado.

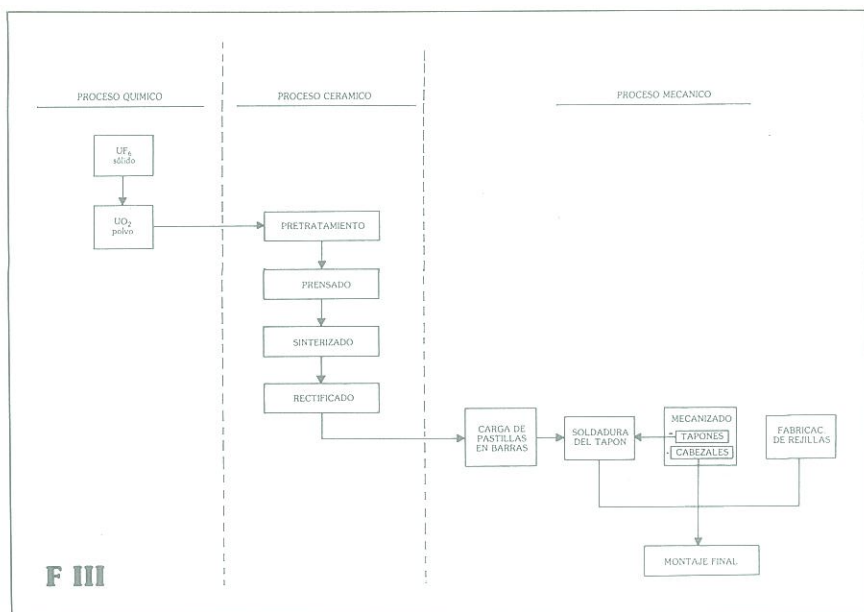
Si los granos de alimentación no tuvieran unas buenas características sería muy difícil controlar la densidad de la pastilla por los problemas de llenado de las cavidades de la prensa.

La operación consiste en la compactación, en una prensa de características similares a la utilizada en el prensado del polvo, formando una pastilla con una densidad tal que la haga consistente. Esta pastilla es triturada y las partículas formadas se pasan a través de una malla de acero inoxidable, obteniéndose los granulos que sirven de alimentación a la prensa. Estos granulos son previamente mezclados con un lubricante (para favorecer la formación de la pastilla en el prensado y garantizar la vida de la prensa) en un homogeneizador adecuado.

Prensado

El objetivo de esta operación consiste en compactar el polvo, preparado en las etapas anteriores, para formar pastillas de la adecuada densidad y tamaño.

Las pastillas a la salida de la prensa deben presentar unas características de dureza, densidad y resistencia a las frac-



turas adecuadas, para conseguir un buen producto al final del Proceso Cerámico y no tener problemas durante las etapas de Sinterizado y Rectificado.

Una densidad fuera de especificación puede dar lugar a que las pastillas sean rechazadas al final del sinterizado. Si dicha densidad es muy alta puede dañar a la propia prensa, puede dar lugar a pastillas sobredimensionadas después del sinterizado y puede producir fracturas en las bases de las pastillas, mientras que si es muy baja puede dar lugar a pastillas subdimensionadas después del sinterizado.

Sinterizado

El objetivo del sinterizado es transformar las pastillas de óxido de uranio en un elemento cerámico de la apropiada densidad e integridad para su uso en el reactor.

El sinterizado consiste en un proceso de densificación, a altas temperaturas, de polvos compactados, dando lugar a una mayor solidez y dureza de los mismos.

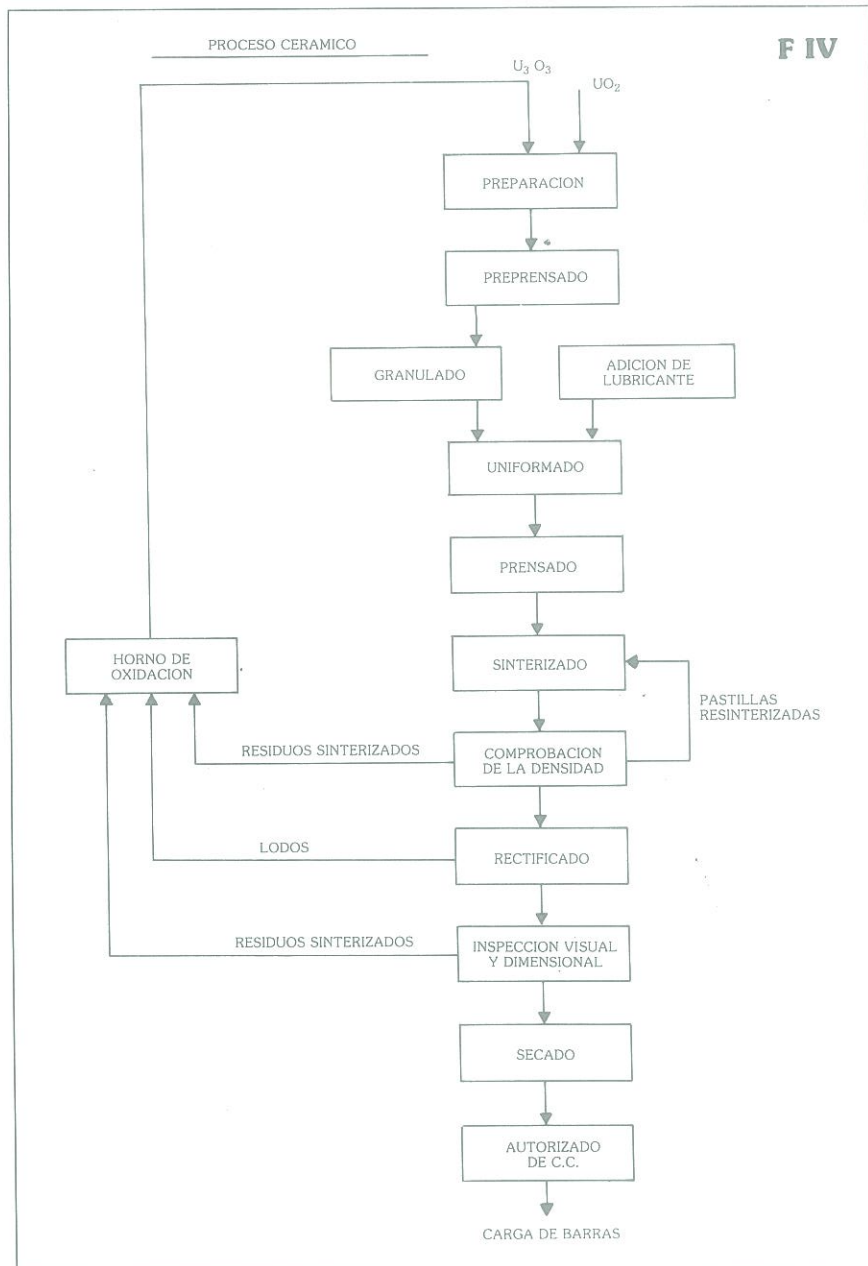
Este fenómeno ocurre mediante cambios en el número, tamaño y forma de los granos y poros, y generalmente tiene lugar en tres etapas:

1. *Inicial*, controlada por una difusión superficial y/o volumétrica de los granos. Esta difusión se debe a la diferencia de presiones entre la superficie de las partículas y la existente en los radios de curvatura formados por la conexión entre dos partículas o granos. No se produce un crecimiento de los granos, sino un crecimiento de la unión entre los mismos.
2. *Intermedia*, controlada por una difusión superficial de los granos, produciéndose una reducción en el tamaño de los poros. En esta etapa tiene lugar el 90 % de la densificación total, empezando a producirse un crecimiento del grano.
3. *Final*, controlada por una difusión volumétrica, produciéndose la mayor parte del crecimiento del grano.

El proceso consiste en calentar las pastillas durante un determinado tiempo a una temperatura debidamente controlada, en una atmósfera húmeda de hidrógeno, enfriándose posteriormente bajo control hasta la temperatura ambiente del local. De esta forma el contenido de fluoruros y oxígeno es reducido a los valores especificados.

Estas operaciones son realizadas mediante una combinación adecuada de calor, condiciones ambientales en la cámara y tiempo de permanencia en la misma. Las características físicas de las pastillas dependerán de la temperatura de sinterizado (existente en la zona de alta temperatura) y del ciclo de empuje, mientras que las químicas están en relación con las condiciones ambientales del horno.

La influencia de la densidad obtenida en el prensado es muy importante cuando se trata de la formación de pastillas a partir de polvo. En el estado final de sinterizado, las partículas deben estar formando una configuración de lo más unida posible, de forma que los poros sean tan



pequeños como se pueda. Al existir una relación entre el tamaño de los poros en la pastilla antes del sinterizado y la máxima densidad que pueda ser obtenida después del sinterizado, se deduce la importancia de la densidad del prensado, ya que los poros pequeños pueden ser eliminados fácilmente, pero los poros con tamaño superior al crítico no pueden ser eliminados en el proceso normal del sinterizado.

En la operación de sinterizado uno de los factores que requiere un alto grado de cuidado y seguridad es la atmósfera de gas en su interior. En el caso del óxido de uranio se requiere una atmósfera reductora o inerte para evitar la oxidación de las pastillas, ya que parte del oxígeno es eliminado del compuesto UO_{2+x} durante el sinterizado. La relación O/U para las pastillas antes del sinterizado está comprendida entre los valores de 2,0-2,20, siendo su valor promedio 2,08-2,12, mientras que la relación O/U después del sinterizado está muy próxima a 2, por lo que es preciso eliminar este oxígeno con la adición de hidrógeno en la cantidad capaz de reducir los moles de oxígeno producido durante la operación. Siendo el hidrógeno muy caro para ser utilizado como reductor en el horno, se usa amoníaco, que es disociado antes de introducirlo en el mismo.

Comprobación de la Densidad

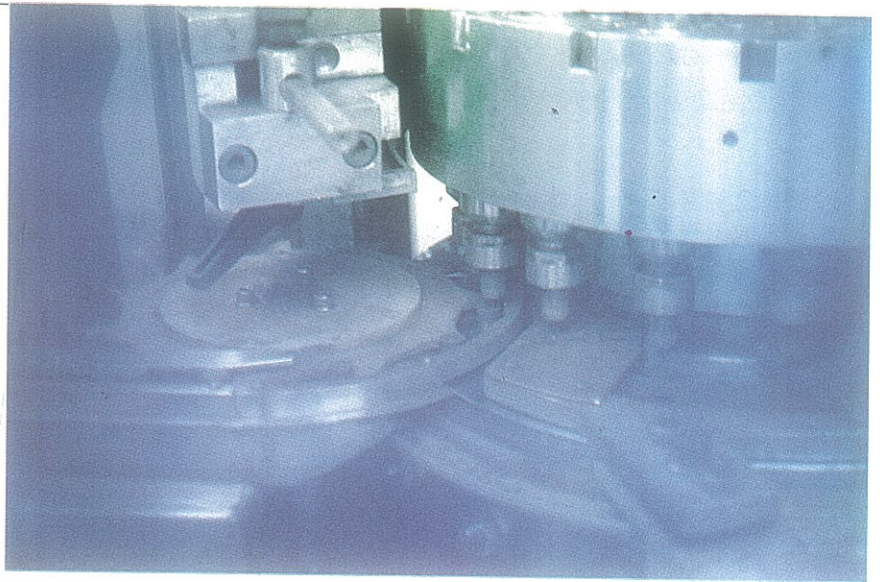
Siendo la razón principal del sinterizado aumentar la densidad de las pastillas, existe al acabar el mismo, un sistema de comprobación de densidad que nos permite determinar con la mayor exactitud si las pastillas están dentro de la especificación del contrato.

Si una caja de pastillas tiene su densidad de sinterizado inferior a lo especificado, debe de ser sinterizada nuevamente y si, por el contrario, tiene una densidad superior a los límites de aceptación, debe ser enviada al sistema de recuperación de residuos existentes.

Existen distintos modos de comprobar la densidad de sinterizado; se resumen a continuación dos de los más utilizados por los fabricantes.

El primero de ellos es el conocido por densidad aparente, que consiste en seleccionar un número determinado de pastillas por cada caja y determinar su peso en aire y agua. Manteniendo las condiciones del agua, de forma que 1 gr. sea igual a 1 cm³, se determina la densidad media aparente del conjunto de pastillas al dividir las diferencias de ambas mediciones por su peso de aire.

El segundo método consiste en medir la longitud y el peso de un número determinado de pastillas de cada caja y determinar las regiones de densidad para cada una de ellas, según un gráfico previamente definido. Conocidas estas regiones se determina la región media para el conjunto de pastillas que, junto al rango de las mismas (número de regiones menos uno), permite conocer si las pastillas son aceptadas o rechazadas en el gráfico de aceptación de pastillas.



La caja de pastillas aceptadas va directamente a la sección de rectificado, mientras que la de pastillas rechazadas es apartada a la espera de volver a ser sinterizada (baja densidad de sinterizado) o ser enviada al proceso de recuperación correspondiente (alta densidad de sinterizado, contaminación de las pastillas, etc.).

Rectificado

El combustible nuclear para un reactor está diseñado con un diámetro específico. Este diámetro de la pastilla mantiene una separación entre la pared interior de la vaina y pastilla muy pequeña y precisa.

Consistiendo la operación de rectificado en rectificar la pastilla sinterizada a un tamaño previamente especificado en contrato, mediante una rectificadora sin centros.

Los problemas que se presentan principalmente en el rectificado son debidos a la mala alimentación de las pastillas a la rectificadora, resultando pastillas con diámetros no uniformes, pastillas con forma de tronco de cono, pastillas rotas, etc. Las pastillas con diámetro sobredimensionado son nuevamente rectificadas, mientras que las de diámetros subdimensionados son rechazadas y enviadas al sistema de recuperación correspondiente.



Horno de Oxidación

Los residuos producidos después del sinterizado, incluido los lodos de la Rectificadora, son transformados en el Horno de Oxidación, a U_3O_8 que es cribado a través de una malla muy fina y transportado a la cabina de preparación, donde se combina en la proporción indicada en cada momento con el polvo virgen de óxido de uranio y/o con los residuos procedentes de las etapas previas de sinterizado.

Características del Producto

Las pastillas producidas en el proceso cerámico deben poseer una serie de propiedades que son indispensables para su aceptación y posterior uso en el reactor.

Las características físicas y químicas que deben ser comprobadas son principalmente:

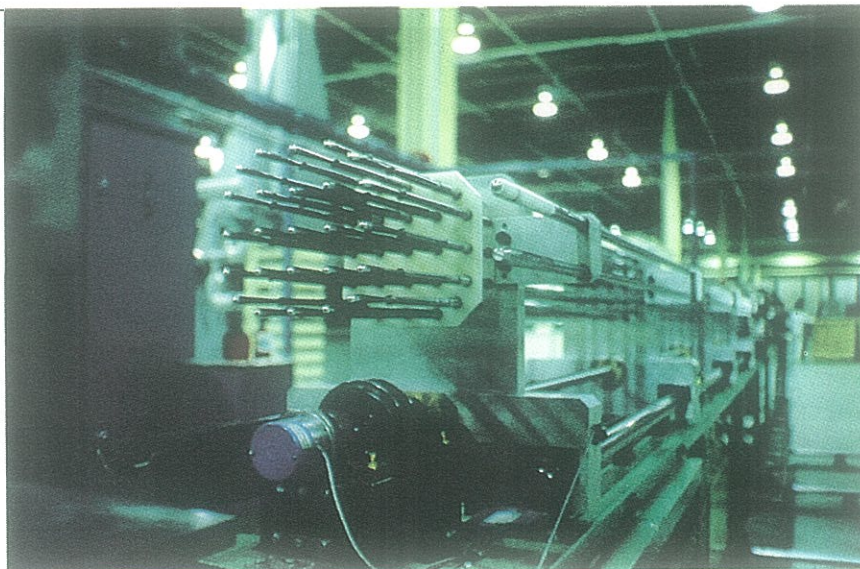
- Contenido isotópico.
- Contenido en uranio.
- Contenido en oxígeno.
- Contenido en hidrógeno.
- Contenido en impurezas.
- Tamaño de las pastillas.
- Densidad de las pastillas.

También debe ser tenida muy en cuenta la microestructura de la pastilla, que viene afectada por el tamaño de los poros y su distribución y el tamaño de los granos, y el comportamiento térmico de las pastillas, definido por la estabilidad de la misma frente a la temperatura y la irradiación.

Características del Equipo

La descripción del equipo básico necesario para la fabricación de pastillas consta de las siguientes unidades:

- *Prensa de prepsado.* Prensa de características similares a la de prensado, con unas dimensiones de cavidad constante para todo tipo de polvo, capaz de compactar el polvo de alimentación y así formar pastillas de densidad variable, según la densidad a obtener en la etapa de Prensado.



- *Granulador.* Triturador capaz de reducir las pastillas prepsadas, tamizándolas a través de una malla.
- *Dispositivo rotatorio.* Uniformador del lubricante y de los gránulos del material de alimentación.
- *Prensa de pastillas.* Prensa capaz de compactar el polvo y formar pastillas de la apropiada longitud y diámetro para que después del Sinterizado y Rectificado tengan las dimensiones especificadas en el contrato.

Consta de una alimentación automática y debe tener la flexibilidad necesaria para que al modificar sus condiciones de funcionamiento pueda obtenerse la pastilla con las propiedades adecuadas, como son diámetro y densidad.

Debido al transporte y movimiento del polvo debe existir un sistema de extracción de aire para evitar la contaminación ambiental del área.

La Fig. V muestra una sección de la prensa y de sus parámetros de funcionamiento, cuya puesta a punto adecuada da lugar a pastillas con las características deseadas.

- *Horno de sinterizado.* El horno de sin-

terizado consta de una unidad dividida en tres zonas principales:

- Zona de precalentamiento.
- Zona de alta temperatura.
- Zona de enfriamiento, calentadas eléctricamente y con una atmósfera protectora de hidrógeno.

Los sistemas auxiliares del horno son de vital importancia, siendo los siguientes:

- Suministros de agua de refrigeración.
- Suministros de gas nitrógeno.
- Suministro de gas hidrógeno.
- Suministro de propano.
- Suministro de aire comprimido y electricidad.
- Sistema de ventilación.

En la Fig. VI puede verse una vista esquemática de un horno de sinterizado y en la Fig. VII un perfil de temperatura a lo largo del mismo.

El horno es alimentado automáticamente y posee un sistema auxiliar hidráulico para el movimiento de las cajas de pastillas a lo largo del mismo.

Deben tenerse en consideración los factores enumerados a continuación para conseguir un funcionamiento seguro y eficiente del horno de sinterizado.

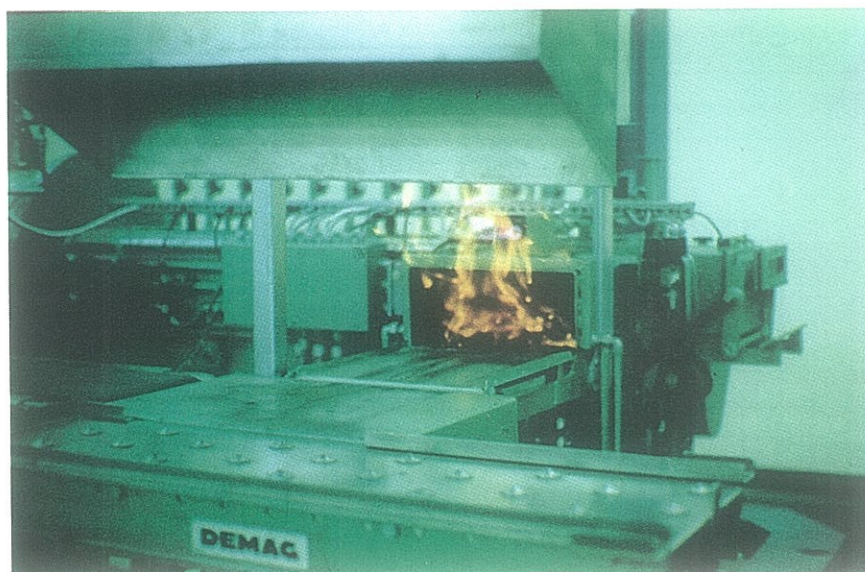
- a) Explosión de gases.
- b) Protección del horno y del uranio de la oxidación.
- c) Protección de una temperatura excesiva.

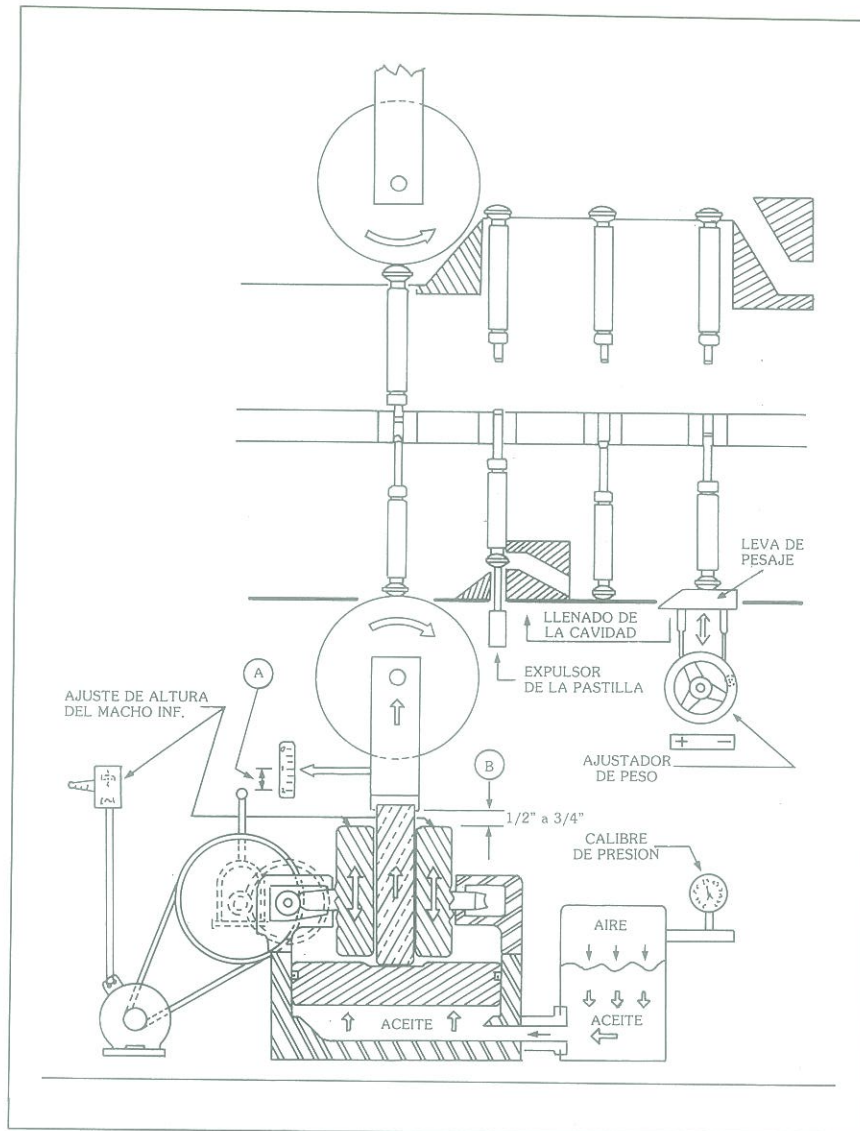
- *Rectificadora.* El equipo principal consta de una rectificadora sin centros, de gran precisión, que consta de dos ruedas, una de arrastre y otra rectificadora, entre las que discurre la columna de pastillas a rectificar.

En la Fig. VIII viene representada una sección de la rectificadora en el momento del rectificado.

El equipo auxiliar a la rectificadora consta de:

- Alimentadora vibratoria, que permite alinear las pastillas y mantenerlas en movimiento hacia el rectificado.
- Tobera de refrigeración, situada sobre la rueda rectificadora; sirve para





F V Esquema de un modelo de prensa de pastillas.

retirar todas las partículas de polvo producidas en el rectificado y refrigerar las pastillas y la propia rueda rectificadora.

- Secado por vacío, que retira el agua residual de la superficie de las pastillas antes de ser depositadas en la bandeja.
- Tanque de refrigeración, que permite almacenar el refrigerante y las partículas finas de UO_2 arrastradas por el mismo.
- Bomba de refrigeración, suministra el refrigerante a la tobera.
- Centrifugadora, que permite recoger la mayor parte de las partículas de UO_2 arrastradas por el refrigerante, dando lugar a los llamados lodos de la rectificadora.

Al ser la zona de fabricación de pastillas potencialmente alta en actividad ambiental, debido al transporte del material, a la vibración de los equipos, etc., el material nuclear es siempre transformado en el interior de cabinas que están en depresión con el área exterior y conectadas al sistema de ventilación de la fábrica a través de un banco de filtros de alta eficacia.

PROCESO MECANICO

Descripción del Proceso

Comprende este proceso la fabricación de tapones, de barras de combustible, de rejillas, de cabezales y el montaje de todos los componentes citados anteriormente.

te y así formar el Elemento Combustible. En la fábrica de Juzbado se realiza en estos momentos la fabricación de barras de combustible y las operaciones de montaje de los Elementos Combustibles que a continuación se desarrollan.

Fabricación de Barras de Combustible

La barra de combustible, representada en la Fig. VII, está formada por los siguientes componentes:

1. Tubo de zircaloy.
2. Tapón inferior.
3. Tapón superior.
4. Pastillas de UO_2 .
5. Muelle

Las pastillas de UO_2 , en la cantidad indicada en las especificaciones del contrato, son introducidas en los tubos de zircaloy con el tapón superior soldado. A continuación se introduce el muelle y posteriormente se coloca el tapón superior.

La siguiente operación consiste en soldar el tapón superior al tubo de zircaloy para conseguir la estanqueidad requerida.

Las barras de combustible para los reactores de agua de presión van presurizadas con He a una presión previamente definida, con objeto de compensar en parte los esfuerzos a los que están sometidos, debido a las altas presiones existentes en el reactor. Esta operación se realiza durante la operación de soldadura del tapón superior (caso BWR), o en una etapa posterior llamada «de presurización y sellado» (caso PWR).

Por último la barra de combustible es sometida a los controles de calidad indicados a continuación:

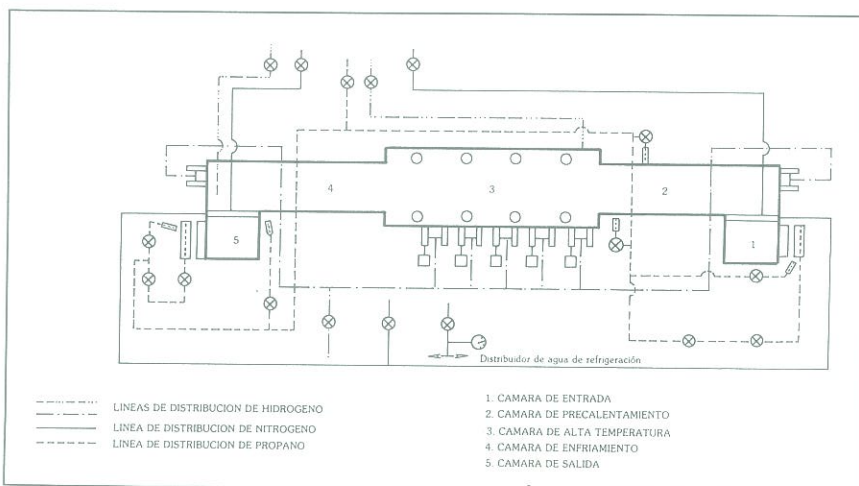
- Inspección radiográfica.
- Inspección fluoroscópica.
- Detección de fugas.
- Exploración Gamma (comprobación del enriquecimiento).
- Inspección visual y dimensional

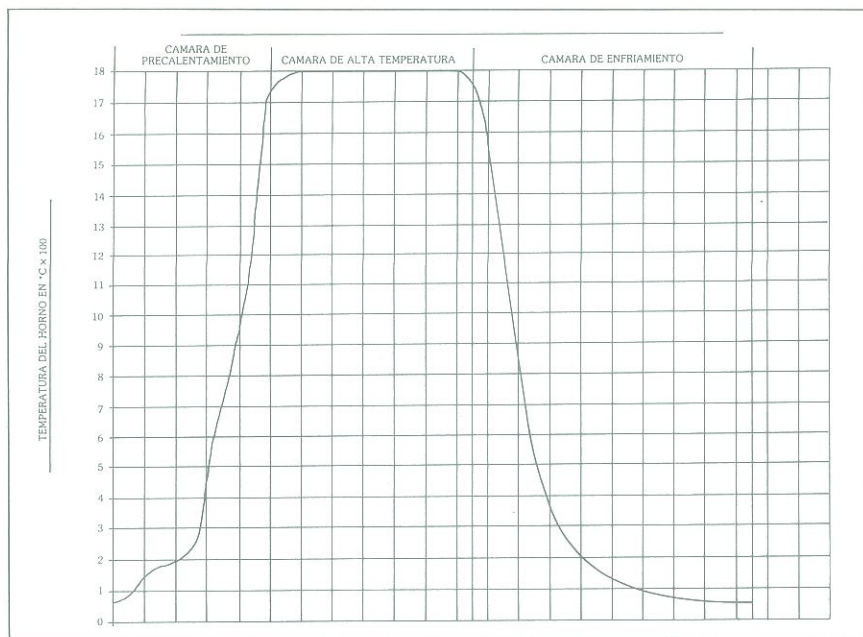
Las características exigidas a la barra de combustible son las siguientes:

- Características exigidas a la soldadura:

- Poros 0,35 mm. de diámetro.
- Penetración de la soldadura mayor que la pared del tubo.
- Penetración de la soldadura en el

F VI Esquema de un horno de sinterizado.





F VII Perfil de temperatura del horno de sinterizado.

taladro del tapón superior mayor de 1,5 mm.

- Incremento del diámetro exterior del tubo menor de 0,1 mm.
- Superficie de la soldadura limpia.
- Mantenimiento del espesor de la pared del tubo.
- Longitud de la barra según especificación.
- Estanqueidad.
- Enriquecimiento según contrato.
- Longitud de la columna de combustible según especificación.

Montaje Final

Debido a su diferente constitución se establece una diferencia entre los Elementos Combustibles del tipo PWR y los de BWR.

ELEMENTO COMBUSTIBLE TIPO PWR

En primer lugar se construye un esqueleto-soporte utilizando los tubos guía, el tubo de instrumentación, las rejillas y el cabezal inferior, uniéndose entre sí por expansiones mecánicas formadas entre los

manguitos de las rejillas y los propios tubos guía.

A continuación se insertan las barras de combustible y se monta el cabezal superior, uniéndolo a los tubos guía y al de instrumentación, por soldadura.

Los Elementos Combustibles, así constituidos se embalan en recipientes especiales para su transporte.

ELEMENTO COMBUSTIBLE TIPO BWR

Este tipo de elemento está constituido por el conjunto de barras de combustible, con dos barras centrales (barras de agua), con fijaciones mecánicas especiales, para asegurar el posicionamiento de las rejillas espaciadoras.

Algunas de las barras de combustible tienen los tapones roscados y actúan como tirantes de sujeción para los cabezales. Estas barras están roscadas al cabezal inferior y unidas al superior mediante tuercas y arandelas de seguridad.

El proceso de montaje es el siguiente: Las barras de combustible se limpian con un disolvente y se colocan los mue-

lles en el extremo superior de cada una de ellas, a continuación, se montan las rejillas espaciadoras sobre la barra segmentada fijándose en su posición correcta sobre cada segmento. Luego se procede al montaje de las barras de combustible y del cabezal inferior, para lo cual se une el cabezal a la barra segmentada (barra de agua), se colocan las barras de combustible en las rejillas soporte y se fijan las barras de unión al cabezal inferior. Finalmente, se coloca el cabezal superior sobre las barras de unión y se fijan las tuercas y orejetas de sujeción.

Superada la prueba de detección de fugas, los conjuntos se embalan en recipientes especiales, para su transporte.

Las características exigidas al Elemento Combustible son principalmente:

- Visuales según patrones.
- Dimensionales según los planos de diseño.
- Verticalidad.
- Separación entre las barras de combustible.

Descripción del equipo

FABRICACION DE BARRAS DE COMBUSTIBLE

El equipo básico consta de:

- Equipo para la carga de pastillas en los tubos.
- Posicionador de barras.
- Transportador de barras.
- Taponador de barras.
- Sistema para la soldadura automática tipo TIG de los tapones a la barra.
- Sistema para la presurización interior de la barra y sellado del tapón.

En el área de Control de Calidad de barras existe el equipo siguiente:

- Sistema industrial de Rayos X.
- Sistema de fluoroscopia.
- Sistema para detectar fugas de helio.
- Equipo explorador gamma.
- Mesa de inspección de granito.

MONTAJE FINAL

Elementos Combustibles tipo PWR

El equipo básico consta de:

- Util para montaje de esqueleto.
- Util de expansión.
- Util para el soporte de barras.
- Util soporte de esqueleto.
- Util para el montaje de barras.
- Equipo para la inspección de la alineación.
- Equipo para la inspección de la verticalidad.
- Pozos de inspección.
- Tanques de lavado.
- Polipastos.
- Equipo de soldadura.
- Mesa de granito para inspección.
- Herramientas y útiles especiales.

Elementos Combustibles tipo BWR

El equipo consta de:

- Mesa auxiliar para situación de componentes.
- Util para montaje de componentes.
- Pozo de inspección.
- Herramientas y útiles espaciados.

F VIII Sección de la operación de rectificado.

