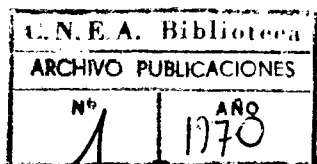


INGENIERIA DE REACTORES



Grandes componentes de centrales nucleares

Las técnicas involucradas en el proyecto, construcción y operación de reactores nucleares se agrupan bajo la común denominación de ingeniería de reactores, y su desarrollo ha sido paralelo con el logrado en el mundo, a través de casi dos décadas, en los reactores de potencia para la generación de energía eléctrica, hasta haber alcanzado la presente etapa de operación comercial.

La Ingeniería de reactores comprende muy diversos aspectos de la ingeniería clásica, además de los específicos de la parte nuclear.

Así por ejemplo:

La aplicación de la teoría de reactores en el análisis y evaluación de un reactor de potencia, en operación es llevada a cabo por quienes se ha dado en llamar ingeniero en neutrónica. Los problemas con que tratan se vinculan con el balance neutrónico en el núcleo del reactor, la evolución en el tiempo de la reactividad del mismo, la distribución del flujo de neutrones en

el reactor, y la elaboración de los programas de recambio de elementos combustibles tendientes a lograr el máximo grado de quemado de los mismos.

Otro aspecto específico dentro de la ingeniería de reactores, es la del control, que vinculada estrechamente al concepto físico de la cinética del reactor, permite efectuar el análisis de su comportamiento dinámico en todas las circunstancias por que pueda atravesar durante su operación normal o en casos de perturbación.

El estudio termodinámico del núcleo de un reactor es otra de las disciplinas específicas que vinculada con la neutrónica, tiene por objeto el análisis térmico del mismo tendiente a determinar las condiciones de operación que permita extraer la máxima potencia del reactor, compatible con la integridad física de los elementos combustibles y componentes del núcleo, aún en casos de perturbación u ocurrencia de accidentes

La instrumentación nuclear, que durante la operación de un reactor proporciona la información referente al núcleo del reactor, como magnitud y distribución del flujo neutrónico y temperatura en forma radial y axial, es otro de los aspectos específicos, como es también el relacionado con la seguridad radiológica que comprende el cálculo de los blindajes biológico y los niveles de radiación en distintas partes del edificio del reactor, para posibilitar o determinar el tiempo de permanencia de los operadores en diversas zonas.

Con referencia a los muy diversos aspectos tecnológicos de los reactores de potencia, el proyecto y fabricación de sus grandes componentes, los que deben reunir condiciones de máxima calidad y confiabilidad, es uno de los más significativos y a él se hará referencia.

Al definir el esquema operativo de una central núcleo eléctrica se indican en principio las funciones que cum-

plen los así llamados grandes componentes:

1. — El calor es generado dentro del reactor por la fisión del combustible nuclear, en los elementos combustibles. El conjunto de estos últimos constituyen el núcleo del reactor, que está alojado dentro de un recipiente, de presión.

2. — El refrigerante, mediante circulación forzada en circuito cerrado, a través de bombas centrífugas transporta el calor así generado, hasta los generadores de vapor (reactores PWR).

3. — En el lado secundario de los mismos, el agua natural es vaporizada para accionar en forma directa el turbogenerador.

4. — El refrigerante reingresa en el núcleo del reactor para repetir el ciclo.

El logro de la competitividad económica de las centrales nucleares, ha sido posible gracias al desarrollo de la tecnología de fabricación de los grandes componentes, (recipientes de presión, generadores de vapor y bombas centrífugas) y al paulatino incremento de su tamaño.

A modo de ejemplo basta indicar que la central comercial prototipo con reactor de agua a presión, que opera desde 1960, tiene una potencia del orden de 200 MWe. En la actualidad, hay varias centrales de este tipo en construcción, con potencias que oscilan entre 1000 y 1200 MWe.

El logro de estas elevadas potencias dentro de los marcos y normas de seguridad que caracterizan a una central nuclear, hace que los componentes principales de la misma deban satisfacer exigentes requerimientos.

Se hará referencia a los siguientes componentes:

1. — Recipiente de presión.
2. — Generadores de vapor.
3. — Bombas de recirculación.

RECIPIENTE DE PRESION

Es de geometría cilíndrica y construido en acero. Su función es alojar el núcleo del reactor, compuesto por los elementos combustibles, las barras de control dispuestas entre los mismos, y la estructura interna de soporte del conjunto citado.

Su diámetro interno queda determinado por:

1. — El diámetro del núcleo, impuesto a su vez por la física neutrónica, y que además de los elementos combustibles comprende una corona periférica de reflector.

2. — El espesor correspondiente al blindaje térmico y neutrónico que se interpone entre el núcleo y la pared del recipiente de presión a fin de reducir el flujo neutrónico integrado sobre la misma durante la operación del reactor. La vida útil del reactor dependerá de este flujo integrado, que afecta las propiedades mecánicas de los materiales.

3. — El recinto anular comprendido entre el blindaje térmico y la pared del recipiente de presión, por el cual retorna el refrigerante en forma descendente desde el generador de vapor hasta la parte inferior del núcleo.

El cuerpo del recipiente de presión tiene su parte inferior en forma de casquete semiesférico, y su parte superior en forma de brida, en la que se fijan los prisioneros para sujetar la tapa, también en forma de casquete semiesférico.

En dicha brida están ubicadas las penetraciones para la salida y la entrada del refrigerante.

El diseño y construcción de estos recipientes se efectúa según la sección III del código ASME, en el que se establece:

1. — Cálculo detallado y clasificación de todas las tensiones, primarias, secundarias, y transitorias.

2. — Cálculo de las tensiones térmicas, fijando los valores permisibles para las mismas.

3. — Consideración de fallas por fatiga, mediante curvas de diseño basadas en datos experimentales.

4. — Coeficientes para las tensiones de diseño según se consideren los valores de resistencia a la tracción o límites de fluencia a temperatura ambiente o a temperatura de diseño.

Los aceros empleados en la construcción de recipientes son al Mn-Mo de baja aleación, que en los espesores usados permiten obtener por temple estructuras mixtas martensita bainita con las siguientes propiedades mecánicas:

T_r min: 56.3 Kg/mm²

T_r min: 35,2 ..

Los tamaños de los recipientes (del orden de 5 m de diámetro) y las presiones de trabajo, (del orden de 150 kg/cm²) conducen a espesores de pared del orden de 200 a 250 mm para los reactores de agua a presión.

El delicado proceso de soldadura en estos espesores, y el ensayo no destructivo de las mismas, han significado en muchos casos un atraso apreciable en cuanto a los plazos previstos para su fabricación. Contribuye a ello también el peso de los recipientes (del orden de 300 a 350 toneladas), lo que requiere para su manipulación equipos y dispositivos muy especiales.

Para mejorar las propiedades a la corrosión, los recipientes de presión se plaquean interiormente con material austenítico, mediante técnicas basadas en la deposición por fusión eléctrica.

GENERADORES DE VAPOR

Los reactores de agua a presión, utilizan generadores de vapor del tipo de tubos en

U dispuestos verticalmente, dentro de los cuales circula el refrigerante que transporta el calor generado en el núcleo. Dicho calor es transferido al secundario, donde el agua que inunda el manejo de tubos, se transforma en vapor saturado.

Mediante secadores, su contenido de humedad es reducido por debajo del 0,5 %, dentro de los mismos generadores, fluyendo en estas condiciones directamente a la turbina.

Este componente ha sufrido una marcada evolución, en cuanto a su capacidad de transferencia calórica mediante el aumento de su tamaño.

Las primeras centrales nucleares, comerciales de un rango de potencia de 300 MWe, disponen de dos circuitos (loops) de refrigeración, cada uno de los cuales transfiere del orden de 500 MW térmicos, produciendo de 800 a 900 toneladas de vapor saturado por hora. Con esta capacidad, se han construido también centrales PWR con cuatro loops, en rangos de potencia de 600 MWe.

En la actualidad son varias las centrales de este tipo en construcción, que teniendo cuatro loops, son de una potencia del orden de los 1200 MWe, lo que implica que la capacidad de transferencia calórica de los generadores de vapor se ha duplicado, alcanzando valores de alrededor de 1000 MW térmicos por generador.

Los requerimientos que deben satisfacer estos componentes son muy exigentes, no solo por la función que cumplen, sino también porque en ellos de establece la frontera entre el refrigerante del circuito primario, radiactivo, y el circuito secundario. Es por ello que la estanqueidad exige-

da entre ambos, es del orden 10⁻⁵ Torr.litro/seg.

La presión de trabajo del circuito primario en un reactor PWR es de alrededor de 150 atm mientras la presión del vapor en el secundario es del orden de 60 atm. Cualquier fuga de refrigerante hacia el secundario, lo tornaría radiactivo, con los consiguientes inconvenientes para el personal de operadores y mantenimiento.

Esta exigencia obliga a aplicar técnicas muy especiales en la fijación de los tubos a la placa-tubo, los que van mandrilados y posteriormente soldados.

Rigurosos ensayos de estanqueidad permiten verificar el logro de los valores especificados.

Un generador de vapor para 500 MW térmicos pesa alrededor de 150 ton, tiene una altura de unos 15 m, y unos 4000 tubos en U, lo que significa realizar 8000 orificios e igual cantidad de mandrilados y soldaduras entre los tubos y la placa. Esta última tiene un diámetro del orden de 3 m y un espesor de 600 mm.

En caso de rotura de uno de los tubos durante la operación de la central, es necesario obturar ambos extremos del mismo.

Los problemas hidro y termo dinámicos que se presentan en un generador de este tipo, son varios.

Las elevadas velocidades con que circula el refrigerante por el interior de los tubos, producen vibraciones importantes que conducen a la fatiga del material, así como también los ciclos térmicos y de presión a que serán sometidos los componentes del circuito primario durante la vida útil de la central.

Estos operan a modo de amortiguadores térmicos entre la turbina y el reactor, por lo que, en casos de variaciones de carga, o de emergencia, como la desconexión rápida de la turbina o el corte imprevisto del reactor, quedan sometidos a gradientes térmicos y de presión, que son

tenidos en cuenta en el diseño.

Así por ejemplo, una parada normal de la central, significará variaciones de temperatura del orden 50° C/h, y se estima el número de paradas en 500.

El número de veces que el generador puede ser sometido a variaciones de potencia del 10 al 110 % de lo nominal, a razón del 5 % por minuto, puede llegar a 14.000. En cambio, si las variaciones son de solo 20 %, puede alcanzar hasta 4 x 10⁶.

La variación de los parámetros en juego para cada uno de los casos mencionados, y el análisis de los sometimientos mecánicos que ello significa, constituyen el marco de diseño de un generador.

No por más simples, menos importantes, son los separadores de humedad, o secadores de vapor. Están dispuestos en la parte superior de la cámara del secundario, distribuidos generalmente en dos o más etapas.

A pesar de que existen distintos tipos, están constituidos normalmente por placas que forman un pasaje laberíntico que es atravesado por el vapor que fluye hacia la turbina. El contenido final de humedad es del orden del 0,25 por ciento.

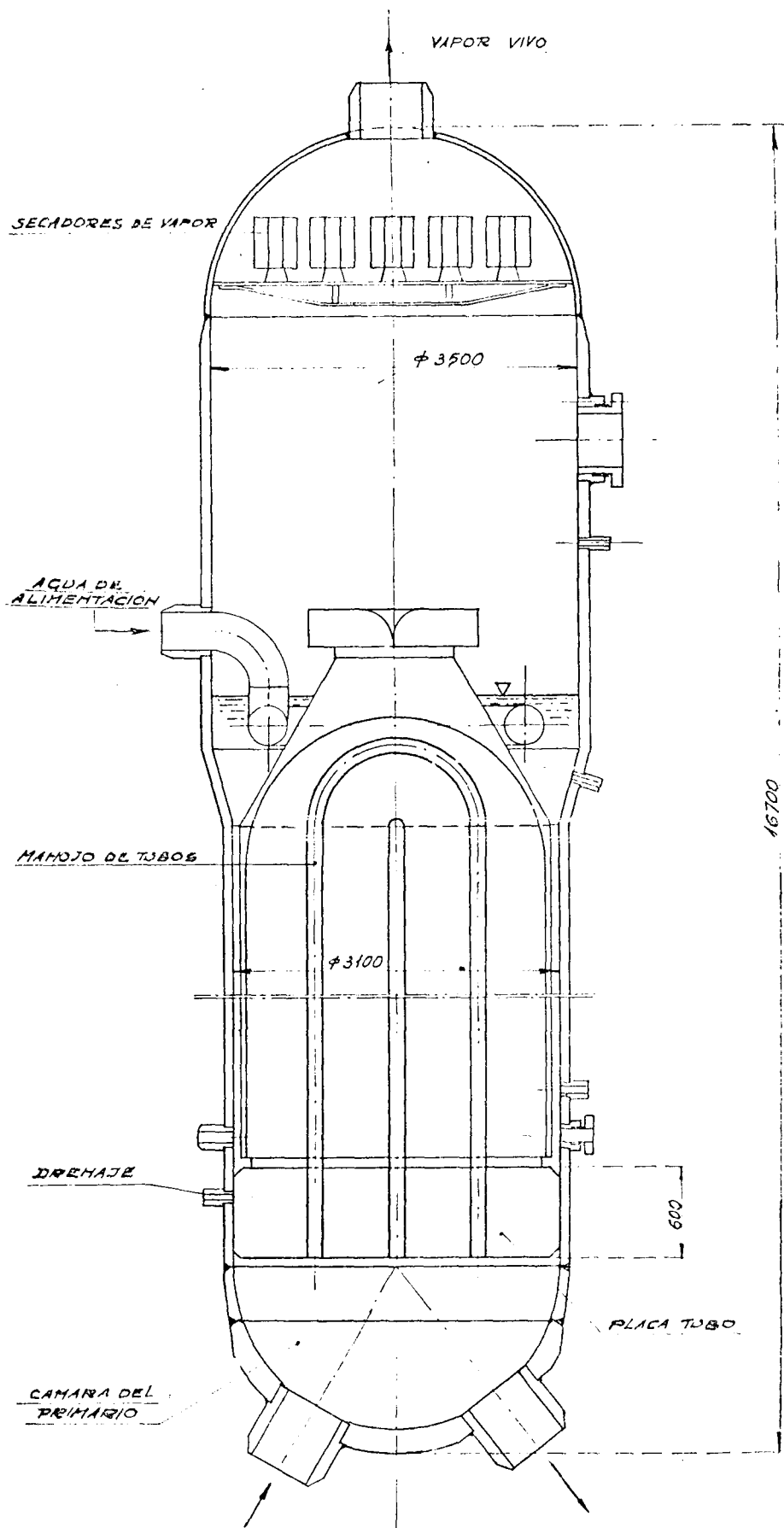
El control de este valor es riguroso, dado que de él depende, no solo la eficiencia de la turbina, sino también la integridad de sus álabes.

Un contenido mayor de humedad provoca rápidamente el deterioro de los mismos por erosión.

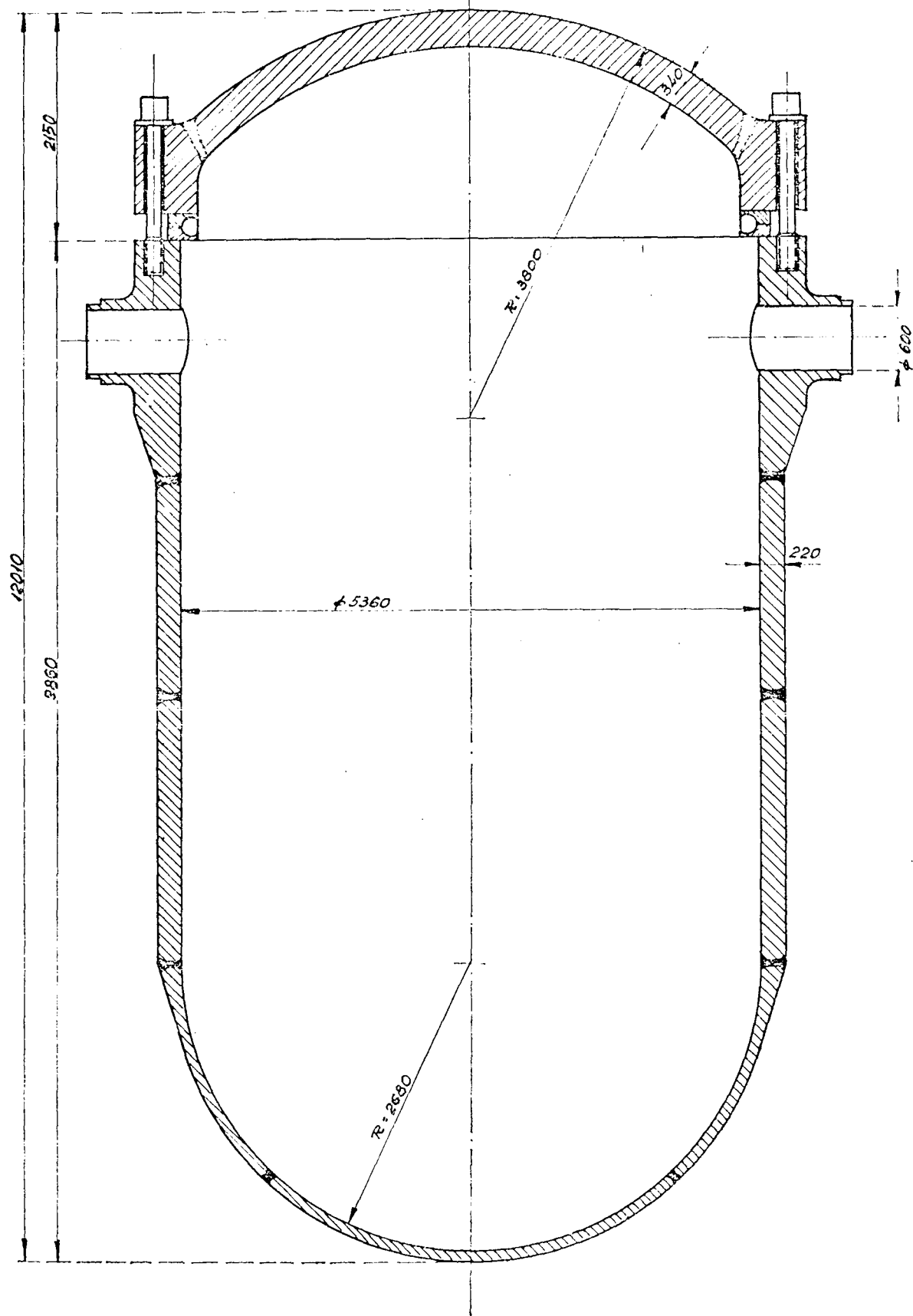
En la selección del material de los tubos, predomina el criterio de la resistencia a la corrosión bajo tensión, siendo los más empleados el Inconel 600 y el Incoloy 800.

BOMBAS PRINCIPALES DE REFRIGERACION:

Se requiere una por cada loop del circuito primario, y su función es la de recircular el agua de refrigeración entre



Generador de vapor de centrales con reactor del tipo PWR.



Dimensiones principales del recipiente de presión de la Central Nuclear de Atucha.

el reactor y el generador de vapor.

La pérdida de carga en dicho circuito es del orden de 90 m. de columna de agua, para caudales de 10.000 t/h, siendo la temperatura de alrededor de 300° C. Como ya se mencionó, la presión del sistema oscila en las 150 at., La potencia requerida para el accionamiento de cada bomba es del orden de 5 MW.

Estas condiciones de operación, la radiactividad del fluido, y el hecho de ser el único gran componente sujeto a movimiento rotativo en la instalación nuclear, una bomba principal de refrigeración puede calificarse como un componente crítico, desde el punto de vista de la disponibilidad de una central nuclear.

Debe reunir en consecuencia, condiciones de máxima confiabilidad y mínimo mantenimiento.

Una falla en cualquier parte de una bomba principal será motivo de una parada no prevista de la central, o de su operación a menor potencia que la nominal, con la consiguiente penalidad económica.

Una simple operación como sería ajustar una tuerca, puede significar un día o aún más de parada, ya que habrá previamente que enfriar el loop y esperar hasta que el nivel de radiación se reduzca a niveles compatibles con la posibilidad de que el personal de mantenimiento tenga acceso al componente.

Desde el punto de vista hidráulico, estas bombas no presentan dificultades, dada la gran experiencia acumulada previamente en bombas centrífugas de tipo convencional, los extremos requerimientos de estanqueidad, para impedir el pasaje al ambiente del

líquido radioactivo del circuito primario, han sido satisfechos de diversa forma.

En los primeros reactores de agua a presión, se adoptó como solución a este problema, el uso de bombas blindadas, en las que tanto el motor como las partes de la bomba, quedan encerrados en una carcasa totalmente estanca resistente a la presión de trabajo.

El estator queda también blindado por medio de un cilindro, generalmente de inco-nel y 0.5 mm de espesor de pared, quedando el motor sumergido en agua.

Esta disposición, sin embargo, reduce la eficiencia del motor por las pérdidas debidas a corriente Eddy.

En este tipo de bomba, los cojinetes son refrigerados por agua y consisten generalmente de grafito impregnado en resinas artificiales.

Si bien esta solución resultó altamente adecuada mientras la capacidad y potencia de las bombas se mantuvieron dentro de los límites tecnológicos y económicos (hasta 1000 Kw), la necesidad de disponer de capacidades de circulación siempre crecientes, motivó el desarrollo de bombas con eje sellados, los que suelen denominarse de "pérdida controlada".

Pueden citarse como razones principales del cambio del tipo de bombas, las siguientes:

- 1.—El costo de las bombas con eje sellado es menos que el de las blindadas.
- 2.—Su eficiencia es del 10 al 15 % (96 % contra 84 %) mayor que las de las blindadas. Este aumento crece en importancia con el aumento de la capacidad de la bomba.
- 3.—El mantenimiento de las bombas de eje sellado puede ser realizado in situ, mientras que las blindadas deben ser desmontadas.
- 4.—Las bombas de eje sellado permiten el agregado de un volante con el objeto de aumentar la iner-

cia del conjunto con el objeto de prolongar la circulación del refrigerante después de una parada imprevista y reducir los efectos del transiente térmico.

Un sello de pérdida controlada", constituye una barrera entre el fluido que circula a alta presión y temperatura por la bomba, y el ambiente, exterior a la misma, donde se encuentra el motor.

Dicha barrera debe extenderse y sellar en toda la periferia del eje de la bomba, tanto en condiciones de velocidad normal de rotación como de detención.

Existen distintos tipos de sellos, los que deben satisfacer las siguientes condiciones especiales:

- a) Permitir una pérdida muy reducida, o prácticamente nula, posibilitando la recuperación y adecuado tratamiento del fluido perdido.
- b) En caso de falla, permitir la recuperación del agua del circuito primario que escape por el sello.
- c) Tiempos cortos de desarme y recambio en el caso de deterioro de un sello.

"Un sello de pérdida controlada un anillo solidario al eje de la bomba, enfrentado a otro similar solidario a la carcasa de tal manera que el único lugar de escurrimiento del agua, es el espacio comprendido entre las dos caras enfrentadas de los discos, uno de los cuales se mueve con el eje.

Desde el exterior, y en sentido contrario al escurrimiento del agua proveniente de la bomba, se inyecta agua a mayor presión, que fluye, en parte al interior de aquella y el resto, se colecta para ser nuevamente inyectada.

La diferencia entre los sellos, consiste en el tipo de contacto que existe entre el anillo rotante y el fijo, y para cada uno de los casos, los materiales requeridos.

El más comúnmente utilizado para operación normal es el denominado sello hidrostá-

tico. En este caso los discos no están en contacto, siendo la separación entre sus caras del orden de 10u. Al no existir rozamiento, no están sometidos a desgaste, y tienen la ventaja de producir muy baja fricción, limitada únicamente a la viscosidad de la película del fluido.

Suelen utilizarse uno o más de estos sellos en serie, a lo largo del eje.

Aunque no estén sometidos a desgaste, las caras de los discos se revisten de materiales duros tales como óxido de cromo, carburo de tungsteno, u óxido de aluminio.

Como última etapa de sellado para el caso de falla de los sellos normales, se suelen utilizar "sellos mecánicos" en los que las caras de los anillos están en permanente contacto. En este caso, el anillo rozante es de grafito.

Las permanentes condiciones de operación del sello hidrostático con distancia entre discos de 10, obliga a realizar un cuidadoso y elaborado diseño mecánico de todo el conjunto.

El diámetro del eje de la bomba por ejemplo, se dimensiona teniendo en cuenta criterio de rigidez, lo que con-

duce a diámetros mayores que si se dimensionara de acuerdo con los esfuerzos de torque. Cualquier vibración en el eje puede alterar la luz entre anillos produciendo su rozamiento y consecuente deterioro.

Este tipo de sellado obliga asimismo, a proceder con extremo cuidado en las operaciones de puesta en marcha y detención de las bombas.

Por último hay que mencionar que el sistema de inyección no implica una complejidad adicional, ya que es necesario disponer de tal sistema para otros fines vinculados con la operación del reactor.