

PEBBLE BED MODULAR REACTOR

F. HEVIA - J. SLABBER

El Gobierno sudafricano ha aprobado, en Octubre de 2004, la iniciativa para completar el desarrollo y comercialización del Reactor Modular de Lecho de Bolas (pebble bed modular reactor, PBMR) de tecnología nacional.

El objetivo que ha fijado el Gobierno es el de llegar a alcanzar en la República de Sudafrica una producción eléctrica de 4.000 a 5.000 Mwe basada en el uso de la tecnología del PBMR. Este objetivo se traduce en la necesidad de construir entre 25 a 30 módulos del PBMR con una potencia unitaria de 165 MWe.

Se pretende con ello incrementar la diversificación de la producción y reducir las emisiones contaminantes.

Como primer paso, se iniciará en 2007 la construcción, en el emplazamiento de la actual Central de Koeberg, de un reactor prototipo PBMR de demostración. De acuerdo con el programa previsto dicho reactor estará listo para arrancar en 2010.

Se estima que el primer reactor PBMR inicie su operación comercial en 2013.

En preparación de lo anterior, a finales de 2004, se firmaron los principales contratos para soportar la siguiente fase del Proyecto.

En lo relativo al sistema de potencia, MHI (Japón) ha recibido un contrato para la siguiente fase de diseño y desarrollo del turboalternador y del conjunto del core barrel del reactor. Dos compañías españolas, Empresarios Agrupados y ENSA fueron contratadas durante la primera fase del Proyecto para desarrollar e integrar el diseño de los componentes que constituyen el circuito primario de retención de presión y actualmente se encargan de la revisión técnica de la nueva configuración del sistema primario y la fabricabilidad de sus componentes así como de la aplicación del concepto de Fuga Previa a la Rotura (Leak Before Break) del circuito primario. Las soluciones para el diseño y construcción de las tuberías de protección térmica del circuito primario corren a cargo de EHR (Alemania).

En Noviembre de 2004 se inició la construcción en Pendilaba de una instalación a escala real del circuito de helio que permitirá probar los componentes del prototipo.

The South African government has accepted, in October 2004, a proposal to develop and market the country's pebble bed modular reactor (PBMR) technology.

The objective stated by the Government is producing in South Africa 4000 to 5000 MWe of power using PBMR technology. These objectives will require between 25 and 30 PBMR modules with 165 MWe output.

Supporting diversification of supply and avoiding of greenhouse emissions are the main concern of this effort.

The construction of a demonstration reactor at Koeberg site will start in 2007 and, in accordance with the current schedule, it will be completed by 2010.

The first commercial PBMR Plant will start its operation by 2013.

The major contracts for the next phase of the Project have been placed at the end of 2004.

With regard to the Main Power System, MHI (Japan), has been contracted for the next phase of design and development of the turbo

generator system and the core barrel assembly. Two Spanish companies, Empresarios Agrupados and ENSA were contracted during the first stage of the Project to provide the design of the components that constitute the Primary Pressure Boundary and now they are providing technical review of the Power Conversion Unit configuration and manufacturability and Leak Before Break concept application. Gas Cycle Pipe System Solutions are being provided by MHR of Germany.

The construction of a full scale helium test facility at Pendilaba started in November 2004. This facility will allow the testing of the prototype helium cycle components.

BASES DE DISEÑO DEL PBMR

El sistema de conversión de potencia del PBMR es un circuito directo de helio a alta temperatura que incluye la turbina de gas, dos etapas de compresión y el reactor refrigerado por helio.

Este lazo es un ciclo Bryton con en-

friamiento intermedio y recuperación, con dos etapas de compresión y un reactor como fuente de calor cuyo núcleo está moderado por grafito.

El gas helio como medio refrigerante transfiere el calor del núcleo al sistema de conversión de potencia.

El combustible del reactor PBMR está formado por granos (kernels) de dióxido de uranio enriquecido embebidos en esferas de grafito (ver la Figura 1).

Cada grano de combustible está cubierto por cuatro capas concéntricas de distintos materiales. La capa interna es de carbono poroso al objeto de alojar los productos gaseosos de la fisión sin experimentar un incremento de la presión interna. Las siguientes capas son de carbono pirrolítico y carburo de silicio (altamente refractario) respectivamente y la última capa de carbono pirrolítico. Estas tres capas externas y en particular la capa de carburo de silicio crean una barrera estanca frente a los productos de fisión. Esto, además de confinar el combustible de uranio y los productos de fisión le da al grano de combustible recubierto la

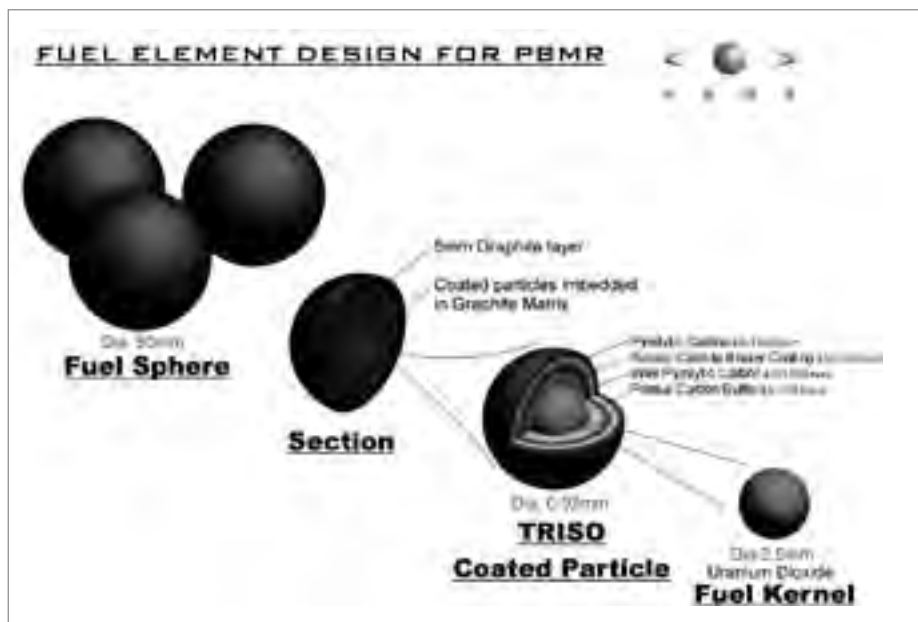


Figura 1. Esquema del combustible del reactor PBMR.

capacidad para soportar su propia presión y actuar como contención lo que resulta fundamental para aportar una seguridad excepcional.

Una masa predeterminada de dichos granos de combustible recubiertos, que tienen aproximadamente 1 mm de diámetro, es embebida en una esfera de grafito de 50 mm de diámetro que a su vez es cubierta con una capa de grafito de 5 mm de espesor. La masa de grafito de esta esfera actúa como moderador y la capa externa protege al conjunto de la abrasión y otros daños mecánicos.

Este diseño de elemento combustible ha probado su capacidad para resistir por largos periodos las condiciones de operación del PBMR en los reactores alemanes AVR y THTR, habiéndose probado en estos durante 20 años.

Desde el punto de vista de la seguridad intrínseca, esta solución "encapsulada" crea una barrera eficaz frente al escape de actividad (nucleidos radioactivos producidos por la fisión) durante las condiciones de operación normal y las condiciones anormales postuladas.

El diseño esférico de los elementos combustibles y la ventaja de la recarga de los mismos durante la operación asegura la homogeneidad neutrónica del núcleo así como bajas temperaturas durante operación normal y alterada.

LA EVOLUCIÓN DEL DISEÑO DEL PBMR

En un principio, el equipo humano

que diseñó el PBMR desarrolló una central de 268 MWt, que se describe más adelante y que sirve de base de referencia para una discusión posterior sobre las últimas mejoras de diseño.

EL REACTOR

El reactor se compone de la vasija a presión del mismo y de sus internos, que consisten en el barrilete del núcleo, las estructuras de grafito y las unidades de control de reactividad.

En el diseño de referencia de 268 MWt, la vasija a presión del reactor tenía aproximadamente 6,2m de diámetro y 20,5m de altura, y estaba fabricada de acero forjado con un espesor de pared que variaba entre 120 mm y 220 mm. Una tapa embridada del diámetro correspondiente a la parte cilíndrica de la vasija permitía la instalación y extracción de los internos del reactor.

El reactor tenía un barrilete interno del núcleo construido en acero, con un diámetro interior de 5,8 m y un espesor de pared de 50 mm. Dicho barrilete servía a su vez de soporte del reflector de grafito y del blindaje térmico de carbono. El espesor radial combinado de grafito y carbono era de 1m. El reflector de grafito tenía 35 taladros verticales para el alojamiento de las unidades de control de reactividad. El volumen dentro del reflector de grafito —la cavidad del núcleo— tenía un diámetro de 3,5m y una altura efectiva de 8,5m.

El núcleo está constituido por las bolas de combustible y una columna

reflectora central dinámica de bolas de grafito. Dicha columna reflectora central dinámica tenía un diámetro nominal de 1,75 m.

EL SISTEMA PRINCIPAL DE POTENCIA

El diseño del sistema principal de potencia consistía en la unidad del reactor acoplada al sistema de conversión de potencia. La potencia se controlaba, principalmente, variando el caudal másico del refrigerante a través del sistema de conversión de potencia, mientras se mantenían constantes las diferencias de temperatura a través del núcleo y los componentes de conversión de potencia.

El refrigerante a alta temperatura proveniente del núcleo accionaba los dos turbocompresores verticales y el turbogenerador vertical de potencia —el llamado sistema de tres ejes. El refrigerante circulaba desde la turbina de potencia por el lado primario de un recuperador, pasaba a través de los enfriadores y compresores, y después fluía por el lado secundario del recuperador donde se precalentaba antes de volver a entrar en el núcleo.

EL NÚCLEO DEL REACTOR

El diseño del núcleo del reactor de 268 MWt consistía en aproximadamente 333.000 elementos de combustible y 110.000 esferas de grafito en la zona del reflector central. Cada elemento de combustible contenía 9g de uranio con un enriquecimiento de aproximadamente 8,1%. La previsión de quemado de este diseño era aproximadamente de 80 GWd/tU.

El núcleo tenía 18 barras de control. De estas barras de control, nueve se usaban para el control de reactividad durante fluctuaciones de carga, y las nueve restantes se usaban para la parada del reactor. El reactor fue diseñado para disponer de una capacidad de seguimiento de carga dentro del rango 100-40-100%. Las nueve barras de control compensaban la reducción de la reactividad por efecto del envenenamiento por xenon durante la operación de seguimiento de carga.

Se utilizaba un sistema de parada independiente y diverso para la parada fría del reactor. Este sistema utilizaba pequeñas esferas de absorción que se metían en 17 taladros en el reflector. Estas esferas se extraían mediante un sistema de transporte de helio.

EL SISTEMA DE CARGA DE COMBUSTIBLE

Se utilizaba un sistema de carga y descarga de bolas de grafito y combustible en línea que permitía la operación continua sin necesidad de paradas de recarga. La descarga de combustible se hacía desde el fondo de la vasija del reactor, de modo parecido al método empleado en los reactores alemanes de este tipo. En el diseño del reactor de 268 MWt, se utilizaba una única canalización de descarga. Un dispositivo de descarga del núcleo segregaba las bolas de combustible y grafito, a las que posteriormente se les ensayaban sus características como combustible o grafito y su grado de quemado. El combustible reutilizable era devuelto al núcleo anular a través de nueve tubos de carga equidistantes, y las bolas de grafito eran devueltas al centro del núcleo a través de un tubo al efecto. Dichos tubos penetraban el fondo de la vasija del reactor y discurrían hacia arriba en el espacio entre el barrilete del núcleo y la vasija a presión del reactor. Las tasas de flujo de las bolas de combustible y grafito fueron determinadas para adecuarlas a un reflector central de bolas de grafito y un anillo de combustible de las dimensiones previstas. El combustible gastado se canalizaba hasta los depósitos de almacenamiento de combustible irradiado.

MODIFICACIONES DEL NÚCLEO Y AUMENTO DE POTENCIA NOMINAL

La decisión inicial de implantar el diseño del reflector central dinámico se basaba en unos conocimientos incompletos del comportamiento bajo irradiación de las estructuras de grafito del núcleo. A medida que se comprendía mejor el comportamiento del grafito, era evidente que el diseño de las estructuras del núcleo tenía que contar con un posible reemplazo, a media vida, de la capa reflectora contigua al núcleo activo. Este conocimiento permitió la investigación de una columna central fija para remplazar las bolas de grafito que se movían por el centro del núcleo.

Las condiciones de contorno para estas investigaciones fueron las que se indican a continuación:

- La presión del sistema se tenía que aumentar hasta un máximo de 9,0 MPa
- El diámetro interior de la vasija a presión del reactor debería quedar igual que para el diseño de referencia de 268 MWt

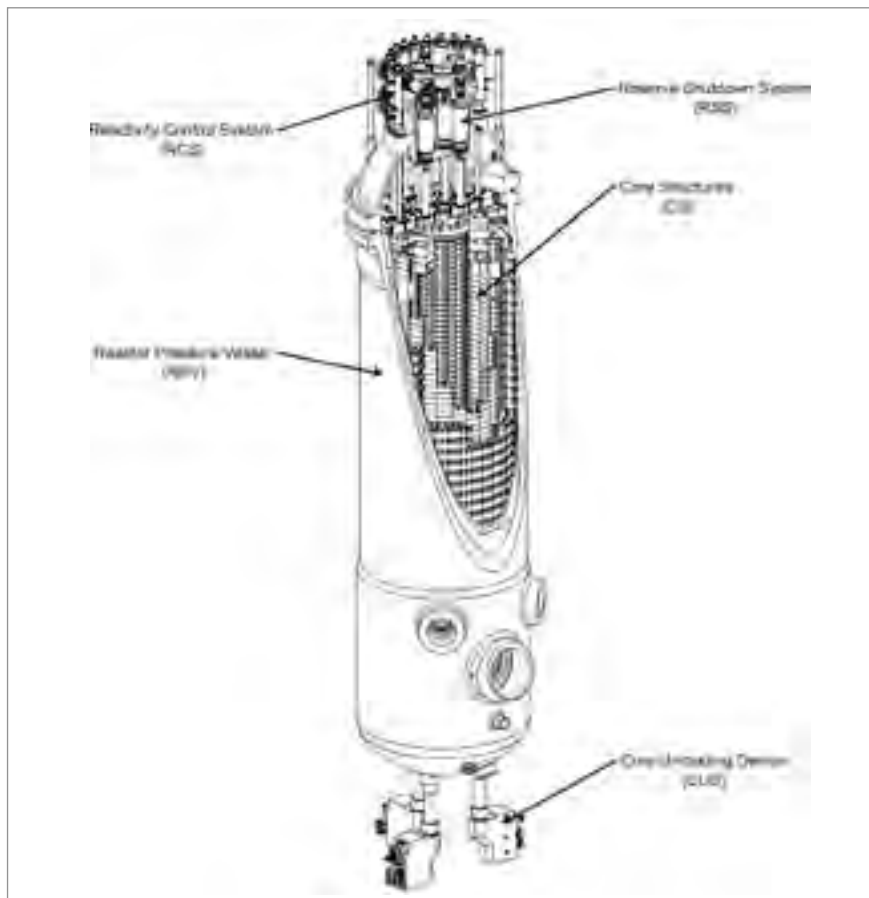


Figura 2. Esquema de la unidad del reactor para el diseño de 400 MWt con reflector central fijo.

- El espesor del reflector lateral y del blindaje térmico no debería ser menor de 0,9m
- La longitud del núcleo podría aumentarse a un valor holgado con respecto a la respuesta a las oscilaciones de xenon, y la caída de presión por el núcleo anular no debería exceder los 300 kPa a la tasa máxima de flujo de refrigerante
- La temperatura máxima de operación del combustible no debería exceder los 1.130 °C

Esta investigación resultó en un ciclo de conversión de potencia de las siguientes características:

- Un diámetro exterior del núcleo de 3,7 m, y un reflector central fijo con un diámetro de 2,0 m y una altura nominal efectiva de 11m
- Una potencia térmica del núcleo de 400 MWt
- Un caudal de refrigerante de 185 kg/s resultando en una caída total de presión del núcleo de 291 kPa. Una temperatura de salida del reactor de 900 °C
- Una temperatura de entrada al reactor por debajo de 500 °C

- Una presión de 9.0 MPa en el colector de la unidad de conversión de potencia
- Una relación global de compresión de 3.2.

Otra ventaja para la física del núcleo que se extrajo del uso de un reflector central sólido fue la posibilidad de incluir elementos de control de reactividad en el reflector central. El sistema de parada de reserva fue reubicado en el reflector central fijo y se aumentó el número de barras de control en el reflector exterior. Esto resultó en una capacidad de parada superior comparado con el diseño inicial.

La figura 2 contiene un esquema de la unidad del reactor para el diseño de 400 MWt con reflector central fijo.

REDISEÑO DE LA UNIDAD DE CONVERSIÓN DE POTENCIA; UCP

Las revisiones del diseño se intensificaron durante la fase de diseño básico. Durante estas revisiones se encontraron unas complejidades en el diseño de la UCP de tres ejes que debían eliminarse en lo posible.

Un ejemplo era el tamaño y núme-

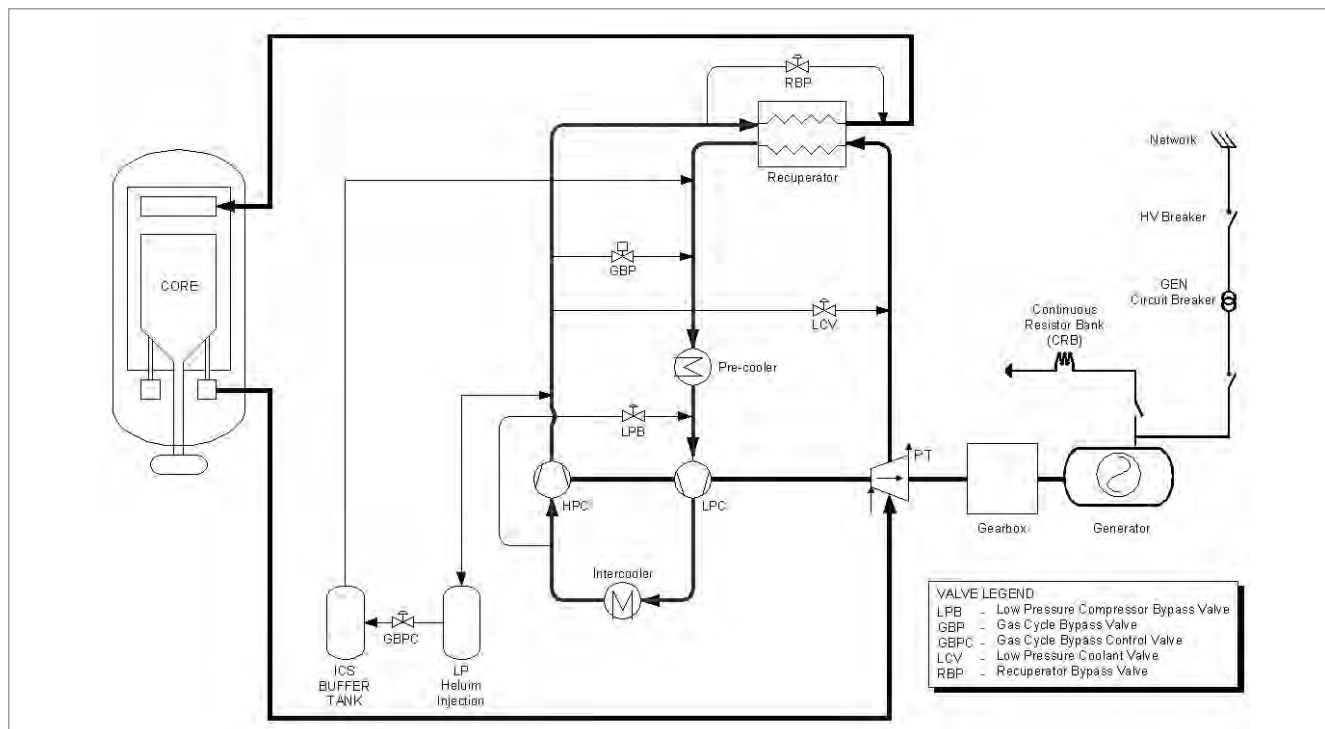


Figura 3. Esquema de la nueva configuración de la UCP.

ro de penetraciones necesarias en la envolvente a presión de la UCP para alimentar los cojinetes magnéticos en la turbomaquinaria. El gran número de penetraciones aumentaba la complejidad de la fabricación y el costo final de la envolvente a presión, y aumentaba el riesgo de fuga del helio durante la operación. Otro ejemplo era la posibilidad de una operación inestable tras un suceso en la cual el generador no siga la demanda de potencia y fallen las válvulas de derivación.

VENTAJAS DEL REDISEÑO

Con el apoyo y cooperación de Mitsubishi Heavy Industries (MHI), se decidió rediseñar la UCP con un solo eje horizontal de turbina-compresor. La potencia del turbogenerador se ha aumentado a 165 Mwe y el rendimiento neto de ciclo es el 41,2%. Este cambio de diseño ofreció las siguientes ventajas adicionales:

- Tecnología probada para la turbina de gas
- Coste reducido de los equipos de la turbomaquina
- Muchas menos exigencias de investigación y desarrollo, y por tanto menos riesgo en su desarrollo
- Diseño sísmico mejorado
- Separación de las carcasas de compresor y turbina, empleando dos sellos de gas seco entre carcasa y eje y

simplificando el mantenimiento

- El uso de cojinetes ya probados, lubricados con aceite en lugar de cojinetes electromagnéticos
- El empleo de una caja de transmisión mecánica, permitiendo una velocidad más alta, un tamaño de turbomaquinaria más pequeño, y simplificando la conversión de la operación de 50 Hz a 60 Hz
- La eliminación del sistema de inyección de gas para arranque, dado que este ciclo Brayton se puede arrancar empleando el generador como motor
- Permite orientar el turbogenerador en una nueva dirección de manera que, en caso de fallo de álabe o de cualquier parte del rotor la trayectoria de los misiles generados no se dirija hacia la unidad del reactor
- La eliminación de la envolvente a presión de aproximadamente 1000 penetraciones para los cojinetes electromagnéticos
- La eliminación de las operaciones potencialmente inestables del turbogenerador durante ciertos sucesos de disparo
- Sistemas de control más sencillos
- Mayor facilidad de equilibrado de las fuerzas de empuje en el eje
- Eliminación de la gran carga resistiva requerida para mantener carga durante el disparo
- Un mantenimiento simplificado,

muy parecido al de los sistemas de la turbina de gas de combustión

- La separación entre el recinto del turbogenerador y el resto de los componentes de la UCP, y la separación entre los componentes principales de la UCP
- La eliminación de los medios especiales de equilibrado de rotor, permitiendo unas prácticas de puesta en servicio convencionales

La figura 3 a continuación contiene un esquema mostrando la configuración nueva de la UCP, y la figura 4 muestra la disposición física de la nueva UCP.

EL PROYECTO NGNP, MÁS ALLÁ DEL PBMR DE DEMONSTRACIÓN

PBMR Pty Ltd se ha incorporado a un consorcio establecido en los EE.UU. y liderado por Westinghouse. Los miembros principales de dicho consorcio incluyen Sargent & Lundy, Air Products and Chemicals, y Bell Company. El consorcio ha expresado su interés y compromiso de participar en el proyecto Next Generation Nuclear Plant (NGNP) (Próxima Generación de Centrales Nucleares) del Departamento de Energía (DoE) de los EE.UU. en el Laboratorio Nacional de Idaho (INL). La propuesta del PBMR para el proyecto NGNP cuenta además con el apoyo

del gobierno Sudafricano.

PBMR Pty Ltd ha desarrollado un diseño conceptual para la configuración del proyecto NGNP, de acuerdo con las previsiones establecidas en el documento de requisitos y funciones de alto nivel del proyecto NGNP, editado por el DoE en septiembre 2003. En dos ocasiones diferentes, PBMR Pty Ltd ha presentado esta configuración conceptual junto con la filosofía de diseño principal de la tecnología del lecho de bolas al grupo de revisión técnica independiente (ITRG).

Se llevaron a cabo los cálculos preliminares de dimensionado para el uso del PBMR como fuente de calor para el proyecto NGNP. El diseño para definir este nuevo uso preveía la extracción de 50 MWt tomados de la tubería de salida del reactor, mediante un cambiador de paso único, y aportando el resto del balance térmico a la Unidad de Conversión de Potencia.

CERTIFICACIÓN DEL DISEÑO EN EEUU

Su idoneidad para los mercados mundiales es un objetivo principal del diseño del PBMR. Un paso clave para cumplir este objetivo es su desarrollo para el mercado estadounidense. Hoy en día, es inverosímil que una empresa eléctrica estadounidense compre una central sin el certificado de diseño de la US Nuclear Regulatory Comisión (NRC). Por consiguiente, en febrero de 2004, PBMR Pty Ltd presentó a la NRC una solicitud formal para comenzar el proceso de certificación de diseño. En noviembre 2004, se celebró una reunión inicial preparatoria. PBMR Pty Ltd prevé el otorgamiento de la certificación de diseño a finales del año 2011.

NUEVO PARTICIPANTE

Hoy en día, el PBMR es el programa de reactores avanzados comerciales más grande en curso en todo el mundo. PBMR Pty Ltd es un nuevo participante en el colectivo de suministradores de reactores, con el compromiso de entrega de la planta de demostración a su cliente de lanzamiento sudafricano, Eskom, en el año 2010 y con pedidos para hasta 30 unidades más durante la siguiente década. El PBMR también estará listo y disponible en otros mercados después del año 2010.

El diseño modular del PBMR (dos módulos o más por central) proporciona una seguridad pasiva inherente, una construcción modular, configuraciones de rendimiento flexibles, y una

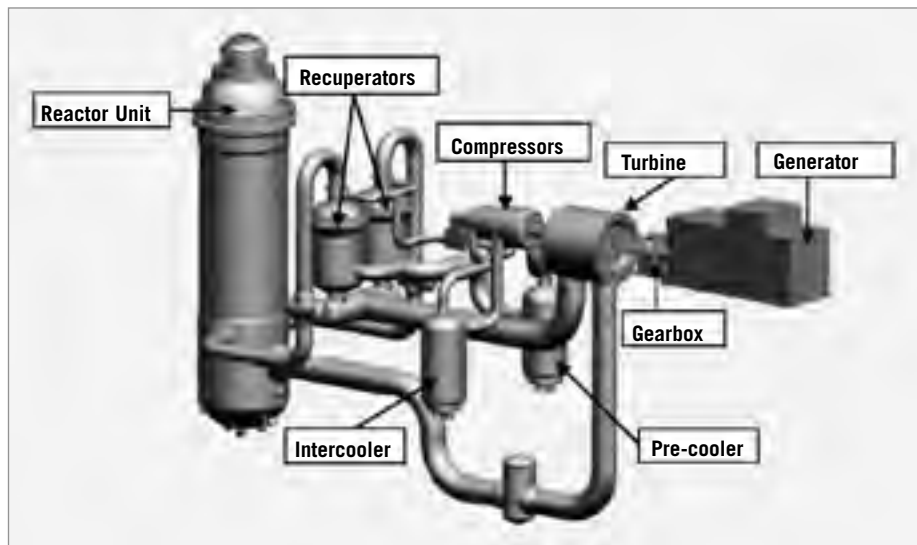


Figura 4. Disposición física de la nueva UCP.

economía competitiva, especialmente en las potencias de nivel intermedio (300 — 700 MWe).

El PBMR es una central comercial, primera de un tipo con características que posibilitan el cumplimiento a corto plazo con los requisitos específicos de los reactores de la IV generación.

También se adapta fácilmente para su uso en la iniciativa NGNP como fuente de calor para la planta de demostración de producción de hidrógeno prevista en el INL, así como para otras aplicaciones de procesos de calor/coproducto en todo el mundo.



Fernando HEVIA RUPÉREZ.
EMPRESARIOS AGRUPADOS

Es Ingeniero Industrial por la Escuela Técnica Superior de Madrid. 33 años de ejercicio profesional en la Industria y la Ingeniería. En GHESA desde 1973 desempeñando distintas tareas y cargos en el Departamento Mecánico de Empresarios Agrupados (EEAA). Actualmente es Director adjunto del Departamento Mecánico de EEAA. Responsable en EEAA de diferentes áreas técnicas, entre ellas el área de Ingeniería de Gestión de Vida. Gerente de los Proyectos de Gestión de Vida dentro de EEAA, entre ellos el de Ingeniería del PBMR (Sudáfrica) Miembro del Steering Committee del Network de la European Commission para Ageing Materials and Evaluation Studies.



Johan SLABBER.
(PBMR PTY Ltd.; Republic of South Africa)

Bachelor of Science (Ingeniería Eléctrica), Stellenbosch University (República de Sudáfrica). Doctor of Science (Ingeniería Mecánica), Universidad de Pretoria. De 1964 a 1987, Atomic Energy Board en diferentes responsabilidades relacionadas con la Ingeniería y Desarrollo de Reactores. De 1987 a 1989, Director General de la Ingeniería de Reactores del Atomic Energy Board. De 1989 a 1994, Jefe de la Ingeniería de Sistemas de Integración of Systems Technology (IST). De 1994 a 1999, Departamento de Salvaguardias de la OIEA (Viena) De 1999 al presente, Consultor Senior en el área nuclear de PBMR (proprietary) LTD.