

AP-600 DISEÑADO Y LICENCIADO, AP-1000 PREPARADO PARA EL LICENCIAMIENTO

J. WINTERS - J. COBIÁN

En diciembre de 1999, la Nuclear Regulatory Commission (NRC) de los Estados Unidos otorgó la Certificación de Diseño del AP-600. Se trata del único diseño de reactor nuclear licenciado, que utiliza tecnología pasiva de seguridad. La empresa Westinghouse reconoció en dicho momento que el costo estimado del kilowatio hora del AP-600 no era competitivo en el mercado norteamericano. Por este motivo, Westinghouse, al frente de un grupo internacional de entidades acometió el desarrollo del AP-1000. Tomando como punto de partida el diseño del AP-600 certificado por la NRC, se han realizado las modificaciones pertinentes para obtener una potencia de 1000 Mw. Las huellas del AP-1000 y del AP-600 son idénticas, y los sistemas auxiliares no han experimentado cambios. La introducción de cambios sencillos en los sistemas de seguridad del AP600 permite acomodar el aumento de potencia a AP1000, sin sacrificar ni el diseño ni los márgenes de seguridad. Así, por ejemplo, al no existir bombas de seguridad en el diseño del AP600, se ha conseguido el aumento de caudal requerido aumentando el tamaño de las tuberías, y los volúmenes adicionales de agua necesarios aumentando el tamaño de los tanques. Se puede decir que una buena parte del AP1000 es una réplica del AP600, por lo que el diseño de detalle de dicha parte se encuentra ya hecho.

In December 1999, the Nuclear Regulatory Commission granted Design Certification to the AP600. It is the only nuclear reactor design using passive safety technology licensed anywhere in the world. Westinghouse recognized that the current cost estimate for the AP600 was not competitive in the U.S. market. It therefore embarked on the development of the AP1000. With the AP600 design certified by the NRC as a starting point, a minimum number of changes have been made to realize a significant increase in power to 1000 Mw.. Simple changes in the safety-related systems from AP600 to AP1000 allow accommodation of higher plant power without sacrificing design and safety margins. Since there are no safety-related pumps, increased flow was achieved by increasing pipe size. Additional water volumes were achieved by increasing tank sizes. These increases were made while keeping the plant footprint and auxiliary systems unchanged. This ensures that the designs of other systems are not affected by layout changes. Note that detail design of a significant portion of AP600 is complete. Enforcing a rigorous "no unnecessary change policy" makes that portion of the detail design of AP1000 also complete.

INTRODUCCIÓN

En diciembre de 1999, la Nuclear Regulatory Commission (NRC) de los Estados Unidos otorgó la Certificación de Diseño del AP-600. Se trata del único diseño de reactor nuclear licenciado, que utiliza tecnología pasiva de seguridad. Westinghouse, empresa promotora del diseño, reconoció entonces que la creciente reducción del precio del kilowatio hora en el mercado de los Estados Unidos situaba al AP-600 en una situación poco competitiva por lo que acometió el desarrollo del AP-1000 aplicando la economía de escala a los diseños pasivos.

Tomando como punto de partida el diseño del AP600 certificado por la NRC, se han introducido un número mínimo de cambios para escalar la potencia a 1000 Mwe.

El AP1000 al igual que el AP600 incorpora sistemas pasivos de inyección, de eliminación de calor residual, y de refrigeración de la contención. Estos sistemas pasivos cumplen con los criterios de la NRC relativos a fallo único, a temas de seguridad no resueltos y genéricos, y a las lecciones aprendidas de TMI.

La incorporación de sistemas pasivos, unida a la utilización de componentes altamente experimentados, no solo ha redundado en una mejora de la aceptación pública, sino que ha permitido una gran simplificación de la central. La simplificación de los sistemas combinada con los amplios márgenes operativos, permite reducir en gran medida las acciones requeridas por el operador en caso de accidente.

Los sistemas pasivos utilizan solamente fuerzas naturales como la grave-

dad, la circulación natural, y el gas comprimido para efectuar su acción. No se requieren bombas, ventiladores, generadores diesel, enfriadores, o maquinaria rotatoria, lo que elimina la necesidad de suministro eléctrico en los sistemas de seguridad. Un número mínimo de válvulas con fallo en la posición segura, alinean a los sistemas de seguridad pasiva. Estas válvulas necesitan suministro eléctrico para mantenerse en la posición cerrada. La pérdida del suministro eléctrico las permite abrir alineándose para realizar su función de seguridad. La fuerza que produce su apertura proviene de muelles, gas comprimido, o baterías.

La realización de cambios sencillos en los sistemas de seguridad del AP600 permiten acomodar el aumento de potencia a AP1000, sin sacrificar ni el diseño ni los márgenes de seguridad. Al no existir bombas de seguridad en el diseño del AP600, el aumento de caudal requerido se ha conseguido aumentando el tamaño de las tuberías. Los volúmenes adicionales de agua que eran necesarios se han conseguido aumentando el tamaño de los tanques. Se puede decir que una buena parte del AP1000 es una réplica del AP600 y que por lo tanto el diseño de detalle de dicha parte se encuentra ya hecho.

EQUIPOS PRINCIPALES

Los diseños AP600 y AP1000 utilizan una tecnología ampliamente probada. El sistema del Refrigerante del

reactor consta de dos circuitos de transmisión de calor por los que se hace circular el refrigerante, cada uno con un generador de vapor, dos bombas principales, una rama caliente y dos ramas frías. El sistema incluye también un presionador y las tuberías de interconexión, y las válvulas e instrumentación necesaria para el control de la operación, y para la actuación de las salvaguardias tecnológicas.

Los sistemas de suministro de vapor nuclear (NSSS) están situados en la contención. Todos los equipos relacionados con la seguridad están situados o en la contención o en edificio auxiliar. Ambos edificios se encuentran sobre una misma losa la cual se encuentra cualificada sísmicamente. Todos los componentes principales han sido probados en centrales en operación en condiciones semejantes de caudal, temperatura, excepto por la bomba principal del AP1000, que es una extensión de la del AP600.

DISEÑO DEL REACTOR

Aunque el núcleo, la vasija del reactor, y los internos del AP600 y del AP1000 son distintos entre sí, permanecen esencialmente idénticos a los de las centrales convencionales de agua a presión de Westinghouse. La vasija de ambos es la misma que la de un modelo estándar de Westinghouse de tres lazos teniendo las toberas situadas en función de sus dos lazos. Los internos son también estándar presentando solamente modificaciones menores. Así por ejemplo las rejillas son de Zircaloy, las toberas superiores son desmontables, y el núcleo incorpora características para la consecución de un alto quemado.

El AP600 tiene 145 conjuntos de 17x17 de combustible constituyendo un núcleo de baja densidad de potencia. El núcleo del AP1000 tiene 157 conjuntos de combustible de 17x17, siendo su densidad de potencia mayor que la del AP600. El combustible del AP600 tiene 12 pies como la mayor parte de los reactores de Westinghouse. El del AP1000 tiene 14 pies de longitud como el de Doel 3 y Tihange 4. Ambos tienen más de un 15% de margen en el límite de ebullición nucleada (LEN) para caso de accidente de pérdida de refrigerante.

El diámetro de ambas vasijas es el mismo. Al tener el combustible del AP1000 0.61 metros (dos pies) más de largo ha habido que elevar la altura de las toberas de la vasija en 0.45 metros (18 pulgadas). Los equipos de manejo de combustible, y el conjunto integrado de la cabeza son también, en con-

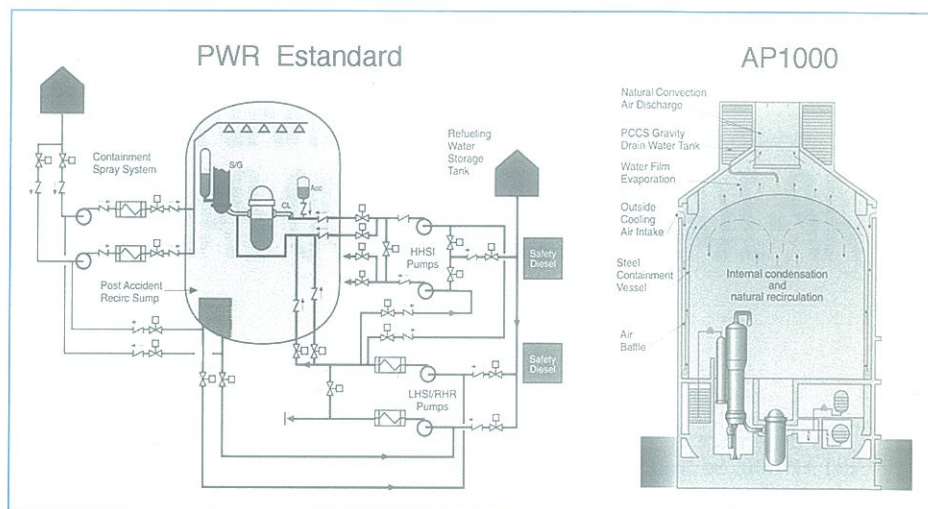


Figura 1. Volúmenes del AP1000 y de una Central Estandar.

secuencia algo más largos. La piscina de almacenamiento de combustible gastado es algo más profunda en el AP1000 para poder acomodar los conjuntos de combustible más largos. No ha hecho falta sin embargo, cambios de diseño estructural con relación a la del AP 600.

El diseño del núcleo del AP600 permite ciclos de recarga de 18 ó 24 meses. El del AP1000 solo permite ciclos de 18 meses. Ambos tienen como mínimo un 90% de factor de capacidad (aproximadamente 658 días de plena potencia por ciclo), y no requieren venenos consumibles excepto en el primer ciclo de operación. La certificación de diseño del AP600 se basa en un ciclo de 2 años.

Ambos diseños utilizan barras de control de bajo valor (barras grises), para efectuar el seguimiento de carga diario sin la necesidad de efectuar cambios de concentración en el boro disuelto.

GENERADORES DE VAPOR

El AP600 y AP1000 utilizan respectivamente los modelos de generador de vapor Delta-75, y Delta-125 respectivamente. Estos últimos, aunque mayores a los primeros, caben en la contención del AP600. Ambos pertenecen a la tecnología del modelo F, que es la más reciente de Westinghouse. Los generadores de vapor modelo F instalados están demostrando un alto grado de fiabilidad debida a las mejoras que estos modelos incorporan, entre las cuales podemos destacar el expansionado de los grupos en las placas soporte, la utilización del acero inoxidable como material para las placas soporte, la utilización del inconel 690 como material para los tubos, la incorpora-

ción de barras antivibratorias resistentes al desgaste, y las mejoras introducidas en los separadores de humedad.

BOMBAS DE REFRIGERANTE DEL REACTOR

En ambos diseños se utilizan bombas motorizadas encapsuladas para circular el refrigerante del reactor a través del núcleo, tuberías y generadores de vapor. Cada generador de vapor incorpora dos bombas que están acopladas a la cabeza canal. Generador de vapor y bombas comparten los soportes estructurales. La simplificación que experimentan los soportes facilita los accesos para el mantenimiento.

Las bombas encapsuladas se han utilizado durante varias décadas en centrales térmicas convencionales con excelentes resultados, siendo la posición invertida la que ha proporcionado mayor fiabilidad en la operación.

A la hora de determinar la potencia de los motores de las bombas principales del AP1000 ha habido que tener en cuenta la menor densidad del agua a la temperatura de operación que tiene este diseño con respecto al AP600. Esto permite incrementar el caudal del refrigerante al nivel requerido con solamente un pequeño incremento de la potencia de funcionamiento de la bomba.

Los sistemas de fluidos auxiliares que soportan la operación de una bomba motorizada encapsulada son más sencillos que los que requieren una bomba sellada en el eje. La integración de la succión de la bomba en la parte baja de la cabeza canal del generador de vapor elimina el crossover de la tubería primaria, reduce la pérdida de carga del lazo, e impide que el núcleo se descubra durante un accidente de pérdida pequeña del refrigerante.

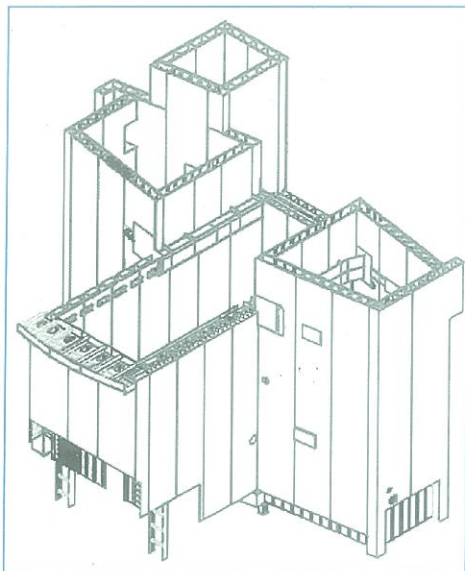


Figura 2. Módulo Estructural.

PRESIONADOR

El presionador del AP600 es esencialmente el del diseño de Westinghouse utilizado en unas 70 centrales en operación. Tiene, sin embargo, un volumen de 45.30 metros cúbicos (1600 pies cúbicos), un 30% mayor que el normalmente utilizado en una central estandar de potencia semejante. El mayor tamaño del presionador aumenta los márgenes de operación y elimina la necesidad de actuación de las válvulas de alivio, mejorando por lo tanto la fiabilidad de la central, y disminuyendo así la probabilidad de disparo.

El presionador del AP1000 tiene un volumen de 59.50 metros cúbicos (2100 pies cúbicos). El mayor volumen respecto al del AP600 se ha conseguido aumentando la longitud. El diámetro se ha mantenido el mismo que el del AP600 al objeto de poder utilizar el mismo diseño de soportes y tuberías anexas. El presionador del AP1000 tiene los mismo márgenes operativos que los del AP600.

Los calentadores de ambos presionadores son idénticos entre si y a su vez idénticos a los de los diseños estandar de Westinghouse, acoplándose al presionador de la misma forma.

LA CONTENCIÓN

La contención, idéntica en ambos casos, tiene 39,12 m de diámetro y consiste en tres secciones anulares, una cabeza inferior y una cabeza superior, todas ellas de chapa metálica de acero conformadas previamente en fábrica y enviadas al emplazamiento para su ensamblaje e instalación mediante la utilización de una grúa de gran capaci-

dad. La sección anular mayor incluye el soporte de la grúa polar y pesa aproximadamente 658 Toneladas métricas. Cada una de las cabezas pesa aproximadamente 500 Toneladas métricas.

Los anillos de la contención constan de varios submódulos fabricados en talleres exteriores a la central nuclear y ensamblados al anillo en el área de la central previamente a su instalación en la posición definitiva. 12 de estos submódulos constituyen una plataforma circular de acceso de 360°, y facilitan la distribución de servicios como la electricidad, aire acondicionado, calefacción e instrumentación dentro de la contención por encima del nivel de operación. En las figuras 1 y 3 puede observarse la disposición de la contención del AP-600 y del AP-1000.

MÓDULOS ESTRUCTURALES

Los módulos simplifican la construcción de las estructuras de hormigón armado. Cada módulo está compuesto por unos 40 submódulos. Los módulos de la pared se forman a partir de submódulos estructurales que pueden tener unas dimensiones de 3.7 m x 3.7 m de sección por 25 m de longitud y que pueden ser transportados a planta en camión. Un submódulo típico pesa unas 10 Toneladas métricas, pero puede llegar a pesar hasta 73 Toneladas.

Una vez completado el módulo se le coloca en su posición definitiva utilizando una gran grúa y las estructuras huecas de la pared se llenan de hormigón.

Existen también muchos módulos de equipo, tuberías y válvulas. En muchos casos, la situación y orientación del equipo está dictado por consideraciones de modularización. El rutado de la tubería a través de la central, está pensado para ser fabricado en el exterior de la central con objeto de minimizar la duración del programa de construcción.

En la figura 2 se ilustra un módulo estructural.

SISTEMAS PASIVOS DE SEGURIDAD

Los sistemas pasivos proporcionan las funciones de seguridad y protegen la inversión del equipo. Establecen y mantienen la refrigeración del núcleo y de la contención indefinidamente, sin la necesidad de intervención del operador, o de la actuación de la corriente eléctrica. Los sistemas pasivos están diseñados para cumplir el criterio de fallo único y su frecuencia de fusión del núcleo cumple por un amplio margen con los criterios de los órganos reguladores. Los sistemas pasivos son significativamente mas sencillos que los sistemas de seguridad convencionales. Tienen menos componentes, y requieren menos pruebas y mantenimiento. Tienen un 30 por ciento de válvulas menos que los sistemas de seguridad convencionales y no tienen bombas.

Los sistemas pasivos de seguridad no requieren tantos sistemas activos de apoyo como los sistemas activos de seguridad (suministro eléctrico,

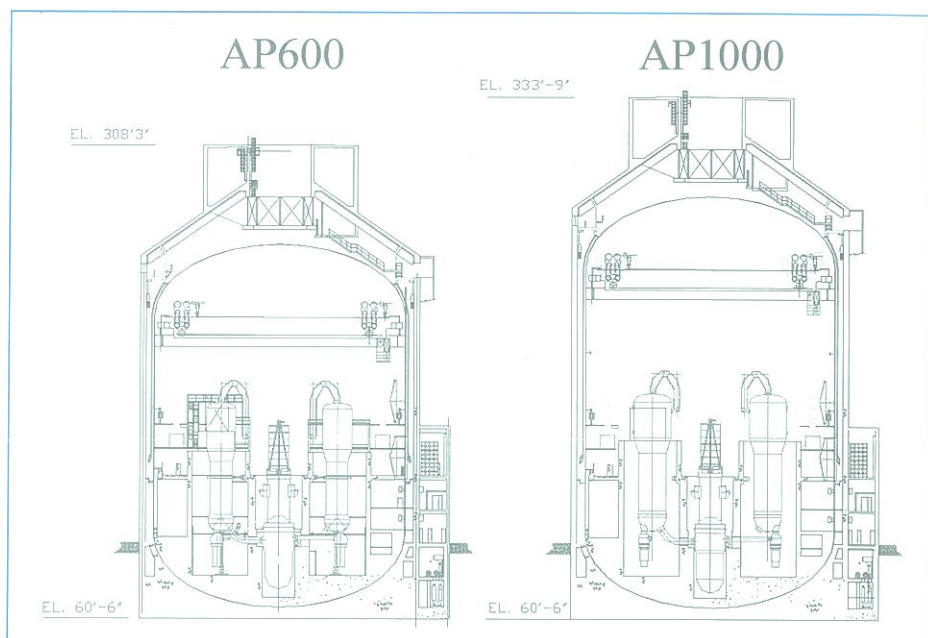


Figura 3. Disposición General del AP600/AP1000.

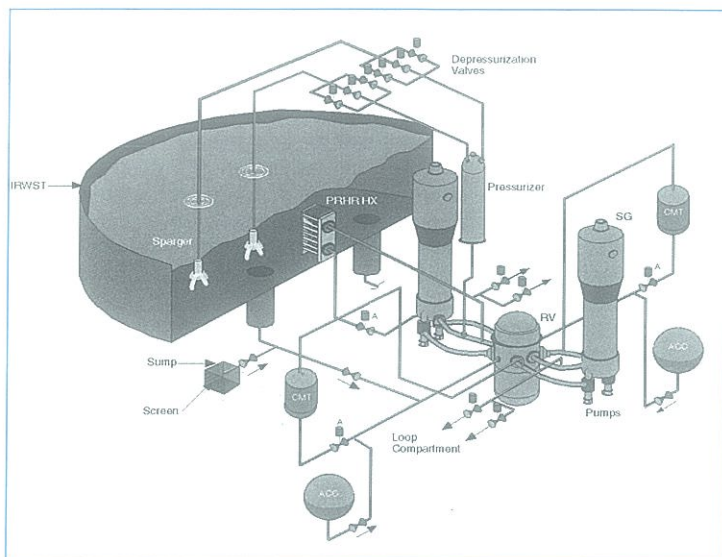


Figura 4. Sistema Pasivo de Refrigeración del Núcleo.

calefacción y ventilación, agua de refrigeración, y los edificios sísmicos asociados para soportar estos sistemas). Así por ejemplo los sistemas de soporte del diesel no son de seguridad, y el sistema de agua de servicios esenciales y sus torres de refrigeración de seguridad son reemplazados con un sistema de refrigeración de agua de servicios que no es de seguridad.

A continuación se describen los sistemas pasivos de seguridad del AP600 y del AP1000.

Sistema Pasivo de Refrigeración de Emergencia del Núcleo (PSREN) (figura 4)

Protege a la central contra rupturas del sistema primario de varios tamaños y en diferentes sitios. Proporciona las funciones de eliminación de calor residual, de inyección de seguridad, y de despresurización. Incluso para roturas de 20 centímetros (8 pulgadas) de las líneas de inyección de la vasija, el núcleo no llega a descubrirse en ninguno de los dos modelos (AP600, AP1000). En el caso de una rotura doble en guillotina de la tubería del primario, el PSREN refrigera el núcleo manteniéndose siempre un margen de 440°C en el AP600, y de 371°C en el AP1000 por debajo de los límites de aceptación.

Inyección de Seguridad y Depresurización

El PSREN utiliza 3 fuentes de agua para mantener la refrigeración del núcleo a través de la inyección: los tanques de agua de aportación, los acumuladores y el tanque de agua de recarga. Estas fuentes de agua están conectadas

directamente a la vasija a través de tuberías, para evitar que se derrame en caso de roturas grandes.

El tanque de recarga, situado encima de los lazos del primario, proporciona por gravedad la inyección a largo plazo. Puesto que el tanque de recarga está diseñado para presión atmosférica, al objeto de que pueda entrar en funcionamiento se re-

quiere que tenga lugar previamente la despresurización del reactor. Esta tiene lugar de forma lenta y controlada en cuatro etapas hasta llegar al valor de 1.88 Kilogramos/centímetro cuadrado (12 psig), momento en el cual la presión de agua del tanque de recarga supera la presión sumada del primario y de la pérdida de carga de las líneas, iniciándose la inyección. Las líneas de inyección poseen unas válvulas de no retorno para impedir que fluya el agua del reactor al tanque. Al objeto de mantener márgenes similares de seguridad en el AP600 y AP1000 para accidentes que requieren inyección, se han aumentado de tamaño algunas líneas del AP1000. Se ha aumentado también el tamaño de los tanques de agua de aportación en el AP1000 en la medida de lo posible sin que se tenga que rediseñar el recinto donde se encuentran.

Sistema Pasivo de Eliminación de Calor Residual (SPECR) (figura 4)

El SPECR incluye un cambiador de calor del 100% de capacidad. Está conectado con el sistema primario a través de las líneas de entrada y salida del lazo 1. El SPECR protege a la central frente a transitorios que afectan a los sistemas de agua de alimentación, y de vapor del Generador de Vapor y en particular la pérdida de agua de alimentación y la rotura de las líneas de agua de alimentación y de vapor.

Sin necesidad de cambiar el diseño de las tuberías y el "layout" del cambiador de calor, se han hecho un poco más largos los tramos horizontales, y se han añadido algunos tubos dentro de las posibilidades que ofrece la placa tubular, obteniéndose un sistema de capacidad 100% para el AP1000.

El tanque de recarga hace también de sumidero de calor para el cambiador de calor pasivo. El tanque de recarga absorbe el calor residual durante más de una hora antes de que empiece a hervir, momento en el cual el vapor pasa a la contención. El vapor se condensa entonces en las paredes de acero y cae por gravedad en el tanque de recarga. Puesto que el cambiador de calor pasivo, y el sistema pasivo de refrigeración de la contención proporcionan la eliminación de calor indefinidamente, no se requiere ninguna acción del operador. El nivel de agua normal en el tanque de recarga ha sido elevado convenientemente para el AP1000 al objeto de no tener que cambiar la estructura.

Sistema Pasivo de Refrigeración de la Contención (SPRC)(figura 5)

El Sistema Pasivo de Refrigeración de la Contención proporciona el sumidero de calor final. El SPRC refrigera la contención después de un accidente, de forma que la presión de diseño no se exceda y de que la presión en la contención se reduzca rápidamente. La superficie de acero de la contención proporciona la superficie de transmisión de calor que elimina el calor de dentro de la contención y lo transfiere a la atmósfera. El calor se elimina de la superficie de la contención por un proceso de circulación natural de aire. En situación de accidente la circulación del aire se suplementa por la evaporación de agua. El agua cae por gravedad a la superficie exterior de la contención desde un tanque situado encima del edificio pantalla de la contención.

El edificio de contención del AP1000 tiene el mismo diámetro que el AP600 pero la altura ha sido incrementada para proporcionar mas volumen libre. Este volumen adicional unido a la utilización de un material diferente para la chapa de la contención proporcionan un margen adicional con respecto a la presión de diseño.

Los análisis de seguridad muestran que ambos modelos presentan una bajísima frecuencia de grandes emisiones radiactivas en caso de daño al núcleo.

El sistema pasivo de refrigeración de la contención, funcionando en su modo de circulación por aire (sin aportación de agua) mantiene a la contención por debajo de la presión de fallo. Contribuye también a mantener la presión por debajo de los valores de fallo, la baja probabilidad de accidente LOCA fuera de la contención y la mejora del aislamiento de la contención.

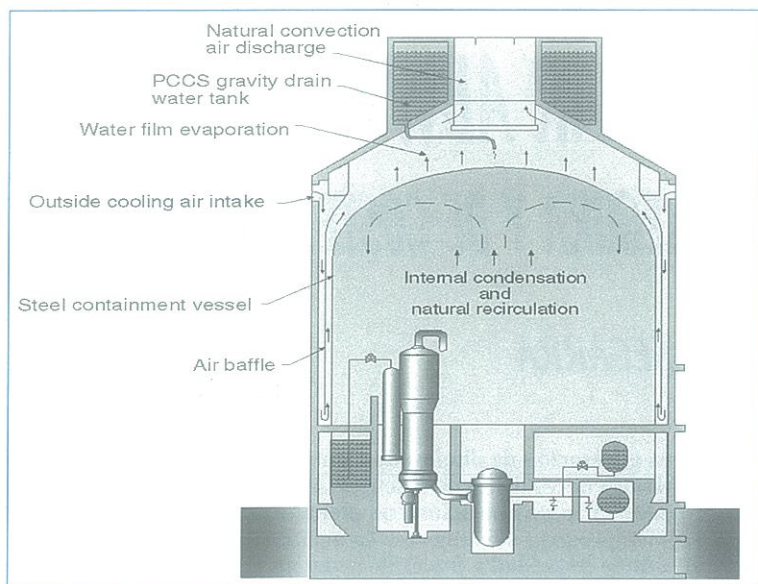


Figura 4. Sistema Pasivo de Refrigeración del Núcleo.

Habitabilidad de la sala de control principal.

El sistema de habitabilidad de la sala de control proporciona aire fresco, refrigeración y presión a la Sala de Control en caso de accidente. Se inicia automáticamente al recibir una señal de alta radiación en la Sala de Control, momento en el que se aísla el camino de la ventilación normal y se inicia la presurización. Una vez que se activa el sistema, su funcionamiento es totalmente pasivo. El suministro de aire del sistema está contenido en un conjunto de tanques de almacenaje de aire comprimido. En ambos modelos AP600 y AP1000 el sistema es idéntico.

Aislamiento de Contención

El aislamiento de la contención de las centrales pasivas está más perfeccionado que en las centrales nucleares convencionales. Por un lado el número total de penetraciones es mucho menor. Por otro, el número de penetraciones que está normalmente abierto es un 60% inferior. Además, no se requiere tener penetraciones abiertas para permitir las funciones post accidente, ya que por ejemplo las bombas encapsuladas no requieren inyección a sellos, y los sistemas pasivos de eliminación de calor residual y de inyección de seguridad están enteramente situados dentro de la contención.

Mitigación de accidentes a largo plazo

La mitigación de accidentes a largo plazo en los AP600, y AP1000, tiene lugar sin necesidad de acción del operador, ni soporte de las fuentes de ener-

gía eléctrica. En caso de un accidente límite de base de diseño, el inventario de refrigerante es suficiente para realizar las funciones de refrigeración y de boración en la fase de recirculación del núcleo, durante un período de 30 días aun asumiendo la fuga postulada en el diseño de la contención.

Costo y Programa

El AP600 está desarrollado utilizando técnica de diseño en 3 dimensiones que utilizan una base de datos, que va registrando en una lista maestra de equipos, toda pieza o parte utilizada en el diseño. Esta lista sirve de base para el cálculo del costo.

BNFL ha encargado un estudio de costo en el que se concluye que el costo total de la energía eléctrica incluyendo la amortización del capital inicial, la operación, el mantenimiento y el combustible es aproximadamente de 4.10 KWh.

El modelo permite también evaluar la duración del programa de construcción, comprobándose que para el AP600 los 36 meses entre el primer hormigón y la carga de combustible es razonable.

Licenciamiento

En junio de 1992 se enviaron a la Nuclear Regulatory Commission los informes de seguridad y de evaluación de riesgos del AP600, obteniéndose la aprobación final del diseño en Septiembre de 1998, y la certificación del diseño en diciembre de 1999.

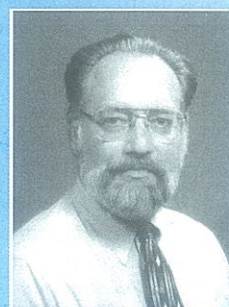
Actualmente, Westinghouse ha acordado con la NRC los términos de un proceso de licenciamiento encaminado a la concesión de la certificación de diseño del AP1000.

Basada en este acuerdo Westinghouse enviará la solicitud para la certificación de diseño a mediados del año en curso. El proceso se centrará en el licenciamiento de las diferencias, lo cual permitirá reducir considerable-

mente su duración, considerando que el 82% del informe de seguridad del AP600 y del AP1000 son idénticos.

CONCLUSIÓN

El paso evolutivo del AP600 al AP1000 con los mínimos cambios que ello conlleva, permite conseguir un modelo que estará en condiciones de competir en el mercado de la energía eléctrica al estimarse que el costo de su Kilowatio hora estará en el entorno de los 3 centavos de \$ por Kwh.



James W. WINTERS es graduado en ingeniería mecánica por la Universidad de Utah, y en ingeniería de reactores nucleares por Betis, y tiene las certificaciones profesionales en ingeniería y dirección de proyectos del estado de Pensilvania. Lleva 26 años con Westinghouse en áreas de integración de diseño y dirección de proyecto para el desarrollo de reactores nucleares navales, espaciales, comerciales de agua ligera, y refrigerados por metal líquido. Durante 17 años ha sido director de proyectos relativos a ingeniería de planta, ingeniería de sistemas, integración de diseño, programa de pruebas, y coordinación de subcontratistas, entre otros.



José COBIÁN es Dr. Ingeniero Industrial por la ETSI de Madrid, y Ph.D. en Ingeniería Nuclear por la Universidad de Northwestern. Actualmente es advisory engineer en Westinghouse Technology Services. Lleva 26 años con W habiendo desempeñado en el pasado las jefaturas de Seguridad Nuclear, Ingeniería, e Ingeniería de Apoyo a la Central Nuclear de Almaraz.