

EL DISEÑO DE CENTRAL NUCLEAR IRIS

(INTERNATIONAL REACTOR, INNOVATE AND SECURE)

M. D. CARELLI - J. COBIÁN

El concepto IRIS consiste en un reactor de agua ligera que presenta una configuración modular y un sistema primario integral. Actualmente, un consorcio internacional de 20 participantes, liderado por Westinghouse/BNFL, está realizando este desarrollo que se inició en el año 1999 en respuesta a una iniciativa de la Sección de Investigación (NERI) del Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE). En este nuevo diseño se persigue el cumplimiento de los cuatro requisitos básicos de los sistemas de la Generación IV: mejora de la seguridad, mejora de la economía, baja susceptibilidad a la proliferación nuclear, y minimización de la cantidad de residuos generados. Sus características principales son: potencia de pequeña a media (100-335 Mwe/módulo); núcleo de vida larga sin necesidad de reubicación ó recarga del combustible (5 a 10 años); mantenimiento optimizado con intervalos entre paradas para reparación de al menos 4 años; diseño compacto simplificado con la vasija primaria albergando en su interior a los generadores de vapor, presionador y bombas; diseño inherentemente seguro donde muchos accidentes son eliminados por el diseño, haciendo innecesaria la incorporación de salvaguardias tecnológicas que los mitiguen (el accidente de pérdida de refrigerante y la pérdida de agua de alimentación dejan de tener la importancia que tenían en otros diseños); y coste total estimado de generación eléctrica competitivo con otras opciones de energía. IRIS es uno de los 4 nuevos diseños de reactores que están siendo revisados por la NRC. Actualmente se prevee la consecución de la certificación de diseño para el año 2008 y la puesta en funcionamiento para el año 2012 si todo se desarrolla según lo previsto. La cordedad de estos intervalos se debe al hecho de que este nuevo diseño se basa en tecnología probada, no requiriéndose el desarrollo de tecnología nueva.

IRIS (International Reactor Innovative and Secure) is a novel light water reactor with a modular, integral primary system configuration. This concept, initially developed in response to the first NERI solicitation, is now being pursued by an international consortium of 20 participants from seven countries. IRIS is designed to satisfy the four key requirements for Generation IV systems: enhanced safety, improved economics, proliferation resistance and waste minimization. Its main features are: small-to-medium power (100-335 MWe/module); long life core (5 to 10 years) without shuffling or refueling; optimized maintenance with repair shutdown intervals of at least four years; simplified compact design with the primary vessel housing steam generators, pressurizer and pumps; "safety by design" where accidents are positively eliminated by design rather than engineering to cope with their consequences; loss of coolant accidents of any size and loss of flow accidents are eliminated as major safety concerns; estimated power generation total cost is projected to be competitive with other power options.

IRIS is one of four new reactor designs currently under NRC review. Projected schedule calls for design certification by 2008 and being ready for deployment by 2012 or later. This rather short schedule is made possible by the fact that IRIS is based on proven light water technology and new technology development is not required.

INTRODUCCIÓN

El proyecto IRIS nace en respuesta a una iniciativa del NERI que a mediados del año 1999 selecciona una propuesta de un grupo formado por Westinghouse y tres universidades, para el desarrollo de un reactor nuclear modular de baja a media potencia, que tiene como objetivo satisfacer los requisitos de no susceptibilidad a la proliferación, de seguridad, de reducción de costes, y de reducción de residuos, de la cuarta generación del Departamento de Energía de Los Estados Unidos.

Las soluciones propuestas para el diseño han requerido un alto grado de creatividad al objeto de mejorar estos

cuatro requisitos simultáneamente por darse a priori entre ellos algunas contraposiciones. Las opciones de diseño seleccionadas a la vez de mejorar los requisitos mencionados, tienen un impacto positivo en la reducción de costes.

En la Tabla I se ilustra la relación existente entre las características de diseño de IRIS y los requisitos fundamentales de cuarta generación.

PATROCINIO Y PARTICIPACIÓN

Frente a la economía de escala que las centrales grandes ofrecen, el reactor IRIS presenta las ventajas de ser más sencillo de construir y de operar. Además, se presta a un proceso de fabricación en serie a bajo costo por unidad, cuya viabilidad requiere un mercado global.

Al objeto de conseguir una gran aceptación para este nuevo proyecto, se ha concebido su desarrollo con una amplia participación internacional. De esta forma se asegura la debida consideración de las normativas, necesidades y sensibilidades multinacionales. El consorcio de desarrollo del IRIS cuenta actualmente con 20 participantes

Tabla I

Características de diseño de IRIS frente a requisitos del DOE

Características	Requisitos			
	Resistencia baja a la Proliferación	Seguridad	Competitividad	Pocos Residuos
Diseño Modular			X	
Larga Vida del Núcleo	X		X	X
Quemado largo		X	X	
Primario Integrado	X	X	X	X
Alta fracción de Circulación Natural		X		
Cont. alta presión; eliminación de calor dentro de la vasija	X	X		
Mantenimiento Optimizado	X		X	

pertenecientes a 9 países. En la tabla número II se proporciona una lista de los participantes en este programa, mostrándose también sus áreas de responsabilidad dentro del proyecto.

En abril del 2002, se aceptó la solicitud de Argentina para unirse al consor-

cio, estando actualmente discutiéndose el alcance.

DOE está patrocinando el programa IRIS a través de un programa de subvenciones que cubre el período entre Septiembre de 1999 y Agosto del 2002.

DESCRIPCIÓN DEL CONCEPTO

El IRIS es un reactor modular de agua ligera basado en una tecnología plenamente probada que sirve de medio para la incorporación de innovaciones de diseño que presentan grandes beneficios. El hecho de que no se requieran nuevos desarrollos de tecnología permite asegurar su disponibilidad para principio de la próxima década. La potencia prevista para cada módulo está en el rango de 100 a 335 Mwe. Se pueden diseñar centrales IRIS en tamaños que van de algunos cientos a algunos miles de Mwe.

Las características principales del IRIS son: diseño modular, sistema primario integral, disposición integral de la vasija del reactor, aplicación del concepto seguridad por diseño, contención de alta presión, núcleo de vida larga, mantenimiento optimizado, y competitividad económica.

NEUTRÓNICA

Al objeto de cumplir con el requisito del DOE de mostrar baja susceptibili-

Tabla II

Miembros del Consorcio IRIS

Miembro	Función			Alcance
	Ingeniería	Suministro	Desarrollo	
Westinghouse, USA	*		*	Coordinación, Liderazgo, Interfaces, Licenciamiento
Politécnico de Milán			*	Generadores Vapor, Núcleo, Termohidráulica, BOP
MIT			*	Termohidráulica, Seguridad, Geometría del Combustible
Berkeley			*	Neutrónica del Núcleo
Japan Atomic Power Co.	*		*	Mantenimiento, Experiencia Operativa
Mitsubishi Heavy Indust.	*	*	*	Generadores de Vapor, Modularización
BNFL	*	*	*	Combustible y su Ciclo, Evaluación Económica
Tokio Inst. of Technology			*	Termohidráulica, Combustible, PSA
Bechtel	*	*	*	BOP, Construcción, Costos
Universidad de Pisa			*	Contención, Transitorios
Ansaldo	*	*	*	Generadores de Vapor, Sistemas del Reactor
Instituto de Estudios Nucleares (Mexico)			*	Neutrónica
NUCLEP (Brasil)	*	*		Contención, Vasija, Presión.
ENSA	*	*		Vasija, Generadores de Vapor, Internos Reactor
Oak Ridge	*		*	Evaluación costos, Núcleo Seguridad, Pruebas,
Nuclear Energy Commission (Brasil)	*		*	Transitorios, Análisis Estructural, Ensayos
Universidad de Tennessee (asociado)			*	Modularización, Transportabilidad
Univer. de Ohio (asoc.)			*	Monitor de Potencia

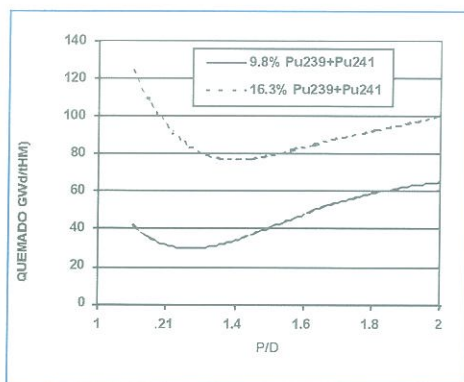
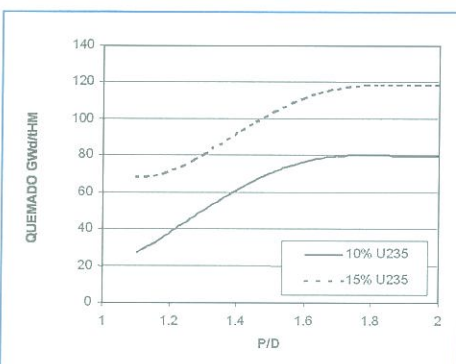


Figura 1a. Enrejados muy estrechos o muy anchos generan combustible descargado de alto quemado. (descarga para $K_{inf} = 1.075$). Combustible MOX

Figura 1b. Enrejados muy estrechos o muy anchos generan combustible descargado de alto quemado. (descarga para $K_{inf} = 1.075$). Combustible UO₂.



dad a la proliferación, se ha seleccionado un diseño de núcleo de alta duración. Los parámetros que determinan la baja susceptibilidad a la proliferación son la larga duración de los ciclos (entre 4 y 8 años), la mínima cantidad de residuos producida, y la selección del combustible (uranio de enriquecimiento inferior al 20% de U 235, ó plutonio con 40-60% de Pu 239).

En principio, tal como se indica en la figura 1a, para combustible MOX se podría obtener ciclo largo/alto quemado, bien con un espectro duro y enrejado compacto (distancia entre ejes de varillas contiguas de combustible dividida por el diámetro igual a 1.1 ó inferior), ó con un enrejado abierto y gran moderación (distancia entre ejes de varillas contiguas de combustible dividida por el diámetro igual a 1.7 ó superior). Para combustible UO₂ es preferible un enrejado abierto (figura 1b). La configuración elegida es la de enrejado abierto porque es la que produce coeficientes negativos de reactividad (especialmente de huecos) en todo el ciclo y requiere menos contenido fisionable. Una evaluación preliminar ha permitido concluir que tanto UO₂ como MOX con un 10% de enriqueci-

Tabla 1.			
Parámetros para la Moderación Variable			
	NUCLEO INICIAL	NUCLEO FUTURO UO ₂	NUCLEO FUTURO MOX
Combustible	UO ₂ <5% fisionable	UO ₂ >5% fisionable	MOX >5% fisionable
Contenido fisionable	4.95%	~8%	~10%
Vida del núcleo	4-5 años	~8 años	~8 años
Diametro pastillas	0.366"	0.340"	0.296"
Diametro ext.vaina	0.423"	0.395"	0.348"
Paso rejilla	0.5922"	0.5922"	0.5922"
P/d	1.4	1.5	1.7
V_m/V_i	2.0	2.5	3.7

miento pueden proporcionar ciclos de 8 a 10 años para valores del cociente entre distancia de ejes y el diámetro de la varilla de aproximadamente 1.7 combustible (MOX) y 1.5 (combustible UO₂). El diseño IRIS permite utilizar ambos tipos de combustible indistintamente. Aunque el UO₂ es la referencia principal desde este punto de vista, los participantes internacionales se inclinan más por MOX. Al objeto de prevenir la susceptibilidad a la proliferación con la alternativa MOX, se considera la utilización de Pu obtenido de combustible extraído en reactores, con un alto grado de quemado (≥ 45000 MWd/tU).

La ventaja de utilizar un espectro bien termalizado es que se consume una fracción grande (hasta el 60%) de la carga inicial de plutonio, y que por lo tanto el combustible descargado tendrá una fracción de material residual fisionable significativamente más pequeña que la del combustible descargado en los modelos de reactores de agua ligera actualmente en funcionamiento.

MODERACIÓN VARIABLE

La configuración inicial del núcleo utiliza combustible de tecnología actual de UO₂ y con un enriquecimiento de 4.95%, con capacidad para proporcionar una duración de la vida del núcleo de 4 años. Para conseguir un ciclo de 8 años se necesitan enriquecimientos más altos de UO₂ ó MOX (en el rango 7-10 %). Los enriquecimientos altos de UO₂ y MOX requieren un cociente alto de V_m/V_c para hacer una utilización más eficiente del combustible. El valor actual previsto para V_m/V_c es alrededor de 2. IRIS proporciona margen operativo adicional con relación a los diseños actuales de centrales en funcionamiento, debido al reducido

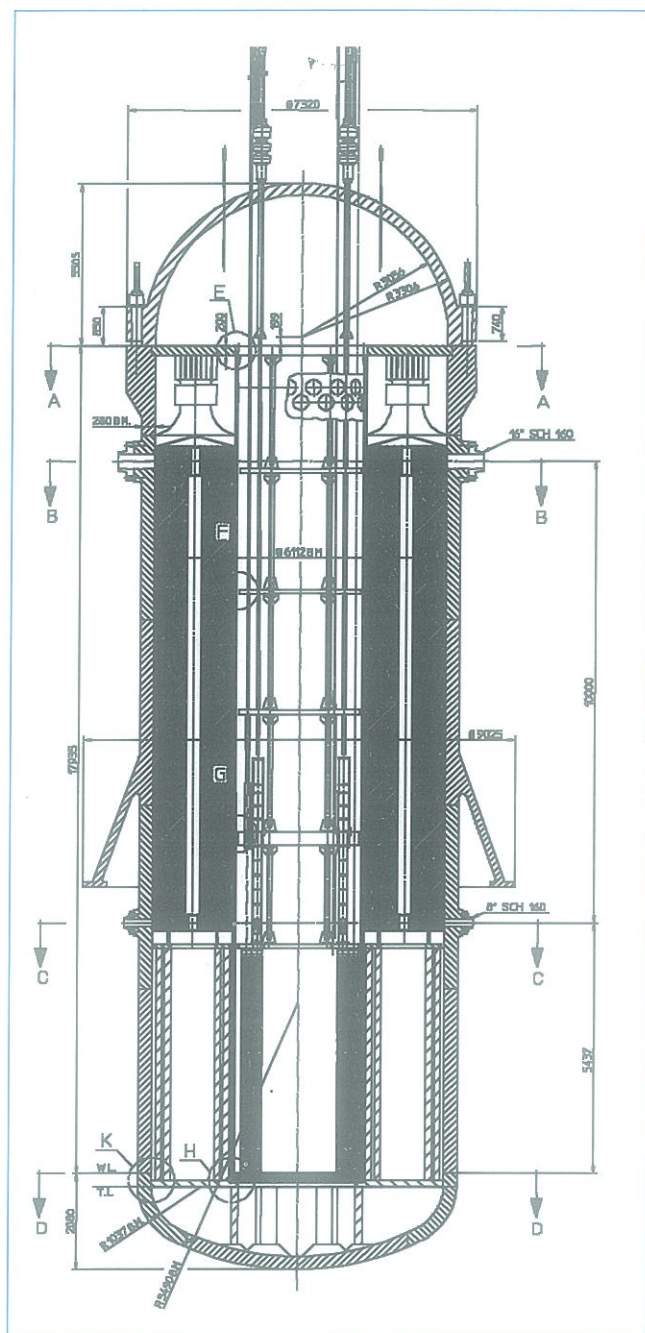
valor medio del valor de calor lineal generado (sobre 4 kw/pie).

En la tabla 1 se proporcionan los parámetros del combustible incluyendo los del primer núcleo y los de recargas futuras. Para cada tipo de combustible se han seleccionado unos parámetros que a la vez proporcionen la moderación adecuada, y sean geoméricamente compatibles con el diseño. El primer núcleo utilizará un enriquecimiento de 4.95% de UO₂. Las recargas utilizarán combustible de mayor enriquecimiento y podrán proporcionar ciclos más largos. A esta estrategia se la conoce como moderación variable.

CONFIGURACIÓN

La solución propuesta para satisfacer los requisitos de una mejora de la seguridad, de la reducción de los costes, y de la reducción de la susceptibilidad a la proliferación nuclear, ha consistido en el desarrollo de una vasija integrada que alberga en su interior al núcleo, estructuras soportes, barrilete, estructuras internas superiores, guías y líneas de accionamiento de las barras de control, generadores de vapor, presionador, calentadores, rociado, y bombas principales (véase la figura 2). Este tipo de disposición elimina la necesidad de generadores de vapor y presionador separados, de tuberías de interconexión, y de soportes. El tamaño previsto de vasija, de ~22 metros de altura, y ~6.7 metros de diámetro exterior está dentro de las capacidades de fabricación actuales.

El núcleo del reactor esta alojado en la parte baja de la vasija, estando la soldadura del fondo inferior situada por debajo de la entrada del núcleo. El reactor de 1,000 MWt tiene 89 conjuntos de combustible que se encuentran dentro de un barrilete de 2.6 metros de altura. Cada conjunto, de 15x15 vari-



llas de combustible situadas en enrejado cuadrado. Cada conjunto de combustible tendrá 20 barras de control y un solo tubo para instrumentación.

La altura activa del núcleo es de 4.28 metros con un plenum para gas de fisión, de 0.46 metros de altura. Se ha encontrado que los beneficios de una mayor seguridad y de una más larga vida del núcleo compensan la penalización en costos de la vasija y de otras estructuras asociados a una densidad de potencia del núcleo. Por ello se ha establecido un objetivo de una

potencia linear media de 130 W/cm, que es la que corresponde al objetivo de quemado de 40-45,000 MWd/tU for 4.95% UO₂ fuel, and 80-100,000 MWd/tHM for UO₂ and MOX fuel with 8-10% fissile content. Este valor de la potencia linear media es alrededor de 2/3 del de un reactor convencional PWR.

SEGURIDAD POR DISEÑO

IRIS, al tener los generadores de vapor, las bombas principales, y el presionador dentro de la vasija interior carece de tuberías exteriores grandes evitándose así la posibilidad de Accidentes de Pérdida de Refrigerante (LOCAs) grandes. Además la disposición de los generadores de vapor a alto nivel favorece la circulación natural.

Otro aspecto importante del diseño de vasija integral es que la colocación de los generadores de vapor periféricamente en configuración anular para permitir fácil mantenimiento y recarga del núcleo, deja libre un espacio abierto extendiéndose 10 metros por encima del núcleo. Este espacio puede acomodar los mecanismos de accionamiento de las barras de control. Esta disposición impedirá en forma automática el accidente de inserción de reactividad originado por la expulsión de una barra de control, ya que los sistemas de control están situados enteramente dentro de la cabeza del reactor.

Tabla III.

IRIS: Seguridad por el Diseño

Características de Diseño	Implicación de Seguridad	Accidente	Conclusión
Configuración Integral	Sin lazos	LOCAs grandes	Eliminado
Vasija alta con Generadores de Vapor elevados	Accionamientos de las barras de control dentro de la vasija	Insertión de reactividad por expulsión de una barra de control	Puede eliminarse
	Alto Grado de circulación natural	Pérdidas de caudal	Alta circulación natural mitiga consecuencias y reduce la inercia requerida de la bomba principal
Baja pérdida de carga. múltiples bombas	Caudal por encima del límite del LEN en caso de pérdida súbita de una Bomba	Rotor agarrotado o rotura del eje	Consecuencias reducidas-daño al núcleo
Gran inventario de agua dentro de la vasija	Evolución lenta de los transitorios. Ayuda a mantener el núcleo cubierto	LOCAs pequeño- medio	El núcleo permanece cubierto sin inyección de seguridad.
Contención pequeña, y de presión mayor	Fuerza de expulsión reducida a través de las aberturas en el primario	LOCAs pequeño- medio	El núcleo permanece cubierto sin inyección de seguridad.
Eliminación de calor dentro de la vasija	Evolución lenta de los transitorios. Ayuda a mantener el núcleo cubierto	LOCAs pequeño- medio	El núcleo permanece cubierto sin inyección de seguridad
Sistema de alta presión del generador de vapor	La presión del primario no puede sobrepasar a la del secundario	Rotura de tubos en el generador de vapor	Consecuencias reducidas. Se termina por aislamiento automático simple
	No se requieren válvulas de seguridad en el generador de vapor	Rotura de líneas de vapor y alimentación	Probabilidad reducida, consecuencias reducidas
Núcleo de larga vida	No hay recarga parcial	Accidentes de recarga	Probabilidad reducida

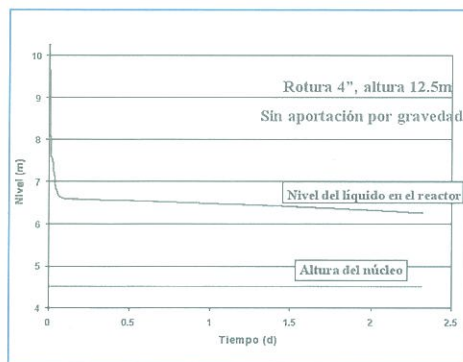


Figura 3. El Núcleo IRIS Permanece más de 2 Metros bajo el Nivel del Agua dos Días después del peor pequeño LOCA Postulado.

refrigerante a través de la rotura, y en última instancia reduciéndose su pérdida. Esto se consigue a través de: 1º) una presión alta en la contención, la cual implica una presión alta en la descarga del LOCA, 2º) un sistema eficiente de eliminación de calor en el interior de la vasija lo que reduce la presión aguas arriba de la rotura. El diseño de vasija integral permite reducir el tamaño de la contención a un diámetro mitad del de un PWR convencional comparable. De esta forma, para la misma tensión en las paredes, la contención esférica de IRIS puede ad-

Table IV.

Resolución de los Accidentes Clase IV en IRIS

Accidente	Resolución
1. Rotura grande de una línea de vapor	No evaluado todavía
2. Rotura grande de línea de alimentación	No evaluado todavía
3. Rotor agarrotado en una bomba principal	Eliminado o degradado
4. Rotura del eje de una Bomba principal	Eliminado o degradado
5. Espectro de la eyección de un RCCA	Puede eliminarse
6. Rotura de tubos de un Generador de Vapor	No evaluado todavía
7. LOCA grande	Eliminado
8. Accidentes de manejo de combustible	Probabilidad reducida

mitir una presión cuatro veces mayor que la contención cilíndrica en un reactor convencional. La eliminación de calor dentro de la vasija se realiza a través de los generadores de vapor múltiples. El gran inventario de agua dentro de la vasija hace que la evolución de los transitorios LOCA sea más lenta.

Finalmente, la vasija del reactor está colocada dentro de una cavidad abierta que se extiende axialmente por encima de la parte más alta del núcleo para recoger el líquido descargado o condensado en el interior de la contención. La cavidad, por lo tanto, en caso de LOCA inundará y llenará la vasija

del reactor terminando cualquier LOCA que suceda por debajo de o a la elevación del núcleo. Ello asegurará que la parte exterior de la vasija del reactor esté suficientemente refrigerada para impedir la fusión de la vasija en caso de que un accidente severo postulado tenga lugar.

Se ha analizado la situación de los LOCA para roturas de 1, 2, y 4 pulgadas a varias alturas: parte baja de la vasija, encima del núcleo, dentro y fuera de la cavidad, y a una altura de 12.5 m del fondo de la vasija. En todos los casos el núcleo permaneció en situación segura bajo el agua sin la necesidad de ninguna intervención. En la fi-

gura 3 se ilustra como 2.5 días después del inicio del transitorio, la parte alta del núcleo permanece bajo dos metros de agua, sin que haya habido ninguna aportación de los sistemas de seguridad.

En la Tabla IV se describen los accidentes clase IV examinados durante el licenciamiento del AP600, y la forma en la que han sido resueltos en IRIS. La seguridad por diseño de IRIS elimina de consideración el 60% de las faltas limitativas de clase del AP600. En el momento actual solo se han mirado en detalle los LOCAs y los Accidentes de Pérdida de Caudal (LOFAs), y se han evaluado la eyección de una barra de control, y accidentes de la recarga. El resto de los accidentes tradicionalmente importantes serán evaluados bajo el enfoque de seguridad por diseño.

CONSIDERACIONES ECONÓMICAS

Aunque los diseños actuales de centrales nucleares no son económicamente competitivos a escala de 100-335 Mwe, el concepto IRIS presenta una serie de características que pueden redundar en reducciones de costos que compensen el efecto del tamaño. Estas características son las siguientes:

Circuito primario integrado, que elimina los lazos de tubería, y las vasijas de generadores de vapor y presionador. La colocación de los componentes del sistema primario en una vasija única requiere una contención más compacta y menos cara. Se puede decir que la utilización de un sistema primario integrado sitúa los costos de capital a un nivel inferior al de los PWRs grandes actualmente en funcionamiento. El tamaño óptimo de IRIS cuando se tienen en cuenta las limitaciones existentes en el proceso de fabricación de la vasija es de 335 Mwe.

Más alto nivel de seguridad al introducir el concepto ya explicado de seguridad por el diseño. Esto permite eliminar sistemas activos y pasivos, así como la doble utilización de algunos componentes como por ejemplo los generadores de vapor que tienen funciones de operación y de seguridad, lo que tiene un efecto muy positivo en la reducción de los costos de capital.

La construcción en serie, la estandarización, y la modularización que también redundan en un ahorro importante de los costos de capital.

La reducción de los residuos generados redundan en una reducción de los

costos del ciclo de combustible.

El mayor factor de capacidad debido a la más larga vida del núcleo y al mantenimiento on-line que también contribuye a la competitividad del diseño.

El tiempo de construcción reducido que redundan en la reducción de los intereses a pagar por la propiedad, y del riesgo financiero que implica el proyecto.

Se da también una reducción de los costes de producción y de mantenimiento debido a la baja frecuencia de paradas, y de los del ciclo del combustible debido al mayor quemado, que resulta de la operación a una potencia media lineal más baja.

Se estima que el reactor IRIS para los tamaños de 150 Mwe y 335 Mwe resultará competitivo en el mercado actual.

EXPLOTACIÓN COMERCIAL

A continuación se dan las fechas clave en el desarrollo de IRIS.

- Evaluación de los parámetros fundamentales técnicos/económicos (completada ya)
- Diseño conceptual y estimación preliminar de costos (completada ya)
- Diseño preliminar (final del 2002)

La decisión sobre si proceder o no a la comercialización o no, está prevista para finales del año 2002. En caso de que esta sea positiva se prevén los siguientes hitos:

- Finalización del Informe de Seguridad (2006)
- Obtención de la Certificación de Diseño (2008)
- Finalización del programa First of a kind. (2012)

Puesto que el diseño IRIS se fundamenta en tecnología probada, no se considera necesario la realización de una central piloto o de un prototipo. Al igual que fué considerado en el AP 600, en el caso de IRIS la primera central de su clase será la primera que se construya para operar.

CONCLUSIONES

Se trata por lo tanto de un desarrollo que recoge una larguísima experiencia de diseño y operación de centrales PWR, que ha despertado un gran interés y apoyo internacional, y que ha sido acogido muy positivamente por las compañías eléctricas. Además, está motivando al mundo universitario, que lo está apoyando a través de programas de investigación.



Mario D. CARELLI, es Ph.D. en Ingeniería Nuclear por la Universidad de Pisa. Es fellow de la American Nuclear Society, y editor asociado de la revista técnica *Hydraulic Research*. Es autor de más de 150 artículos y ha desarrollado 6 patentes. Actualmente es jefe del departamento de Ciencia y Tecnología de Westinghouse con responsabilidad sobre el programa IRIS. En el pasado ha ocupado la jefatura de los departamentos de investigación y desarrollo de reactores de metal líquido, de reactores de fusión, de eliminación de residuos, y de ciclos combinados avanzados de gas/vapor.



José COBIAN, es Dr. Ingeniero Industrial por la ETSII 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. Es autor de más de 50 artículos técnicos.