

GUÍA GENÉRICA DE GE PARA EL AUMENTO DE POTENCIA EN REACTORES DE AGUA EN EBULLICIÓN

INTRODUCCIÓN

A finales de los 80, el aumento de potencia de las centrales nucleares se empezó a considerar como una de las opciones más ventajosas desde el punto de vista de la capacidad de generación de las empresas eléctricas. Desde entonces, la demanda de la ingeniería y licenciamiento del aumento de potencia se ha extendido a nivel mundial y para todos los diseños de reactor.

Un aumento de potencia eléctrica se consigue fundamentalmente, aparte de las posibles mejoras del rendimiento térmico o eléctrico, por el aumento del caudal de vapor al grupo turbogenerador (T-G). La mayoría de las centrales nucleares fueron diseñadas originalmente con una capacidad, tanto de los equipos como de los sistemas, para acomodar caudales de vapor de hasta un 5% superior al valor nominal de diseño original.

Además, las continuas mejoras en las técnicas analíticas (códigos de ordenador), basadas en hipótesis y modelos más realistas, la realimentación por la experiencia operativa y las mejoras en los diseños de combustible han permitido un aumento significativo de los márgenes respecto de los límites de seguridad. Este aumento de los márgenes disponibles, junto con el exceso de capacidad de los equipos y sistemas de la central permiten un potencial aumento de potencia, que en el caso de los reactores de agua en ebullición (BWRs) puede oscilar en-

tre un 5 y un 20% de la potencia térmica original sin modificaciones excesivas del sistema nuclear de generación de vapor (NSSS), grupo T-G, ni en el conjunto del ciclo termodinámico de la central (BOP).

Algunas plantas BWR ya han sido autorizadas por su correspondiente comisión reguladora (NRC) a aumentar su potencia térmica por encima del nivel originalmente licenciado, tal y como se indica en la Tabla I. Más aún, y tal como se ha indicado anteriormente, existe un elevado número de BWRs con capacidad y márgenes suficientes para aumentar la potencia térmica hasta un 20% sin excesivas modificaciones en el NSSS, T-G y BOP, como se muestra en la Tabla II.

General Electric (GE) ha desarrollado una guía genérica para facilitar tanto a las empresas eléctricas, como a las respectivas NRCs la preparación, revisión y aprobación de los aumentos de potencia térmica en BWRs (ver Referencia 1). El propósito de este artículo es presentar los aspectos fundamentales de dicha guía, de aplicación en los futuros aumentos de potencia de los BWRs españoles: Cofrentes y Garoña.

ESTRATEGIA PARA ALCANZAR MAYORES POTENCIAS TÉRMICAS

La estrategia básica para aumentar la potencia térmica de un BWRs consiste en elevar la línea superior del mapa de operación del

mapa potencia/caudal, manteniendo las líneas de barras/caudal actualmente existentes, tal y como se presenta en la Figura 1. Por tanto, no se pretende con carácter genérico ampliar la ventana de caudal más allá de la licenciada para plantas similares, con objeto de simplificar el proceso de evaluación y licencia. De ser necesaria una expansión adicional del mapa de operación, con objeto de mantener o ampliar la flexibilidad operativa, sería preciso aumentar el alcance de los análisis considerados en esta guía genérica.

La operación a una mayor potencia térmica puede suponer, en general, un ligero aumento de la presión de la cúpula de la vasija, para mantener una presión de entrada a turbina adecuada para las necesidades del sistema de control de presión y la capacidad de caudal de la turbina, debido a la mayor pérdida de carga en las líneas de vapor. Caso de tener que aumentar la presión de operación, el punto de consigna del scram

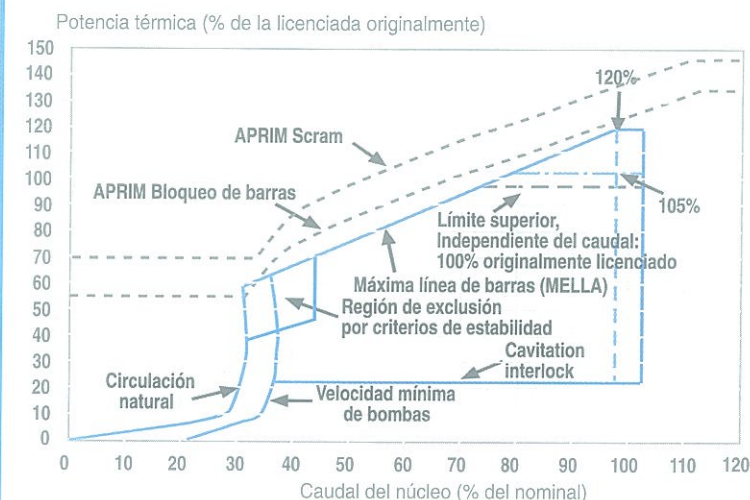
Tabla I
CENTRALES BWR DE DISEÑO GE ACTUALMENTE LICENCIADAS CON UN AUMENTO DE POTENCIA

Línea de producto	Planta	Aumento de potencia (%)
BWR/1	GKN	40
	Big Rock Point	10
BWR/2	Nine Mile Point 1	20
	Oyster Creek	20
BWR/3	Dresden 2/3	5
	Quad Cities	5
	Monticello	5
	Millstone	5
	Pillgrim	5
	Garoña	5
BWR/4	Duane Arnold	5
	KKM (Muhleberg)	5
BWR/6	Cofrentes	2
	KKL (Leibstadt)	5

Tabla II
ESTUDIOS DE VIABILIDAD EN CURSO O COMPLETADOS PARA
AUMENTOS DE POTENCIA

Línea de producto	Planta	Aumento de potencia (%)
BWR/3	Monticello	10
	Pilgrim	15
	Garofa	10
BWR/4	Hatch 1/2	5
	Browns Ferry 1/2/3	5
	Fitzpatrick	5
	Brunswick 1/2	15
	KKM	10
	Ferri 2	5
	Susquehanna 1/2	5
BWR/5	Tokai-2	10
	Nine Mile Point 2	5
	WNP-2 (Handford 2)	5
BWR/6	Cofrentes	15
	KKL (Leibstadt)	15

FI - Estrategia de aumento de potencia térmica en BWRs



por alta presión y los tarados de las válvulas de alivio/seguridad se deberán aumentar para mantener los márgenes de seguridad y operación adecuados sin perjudicar la disponibilidad del reactor por paradas innecesarias.

PROCESO GLOBAL PARA EL AUMENTO DE POTENCIA TÉRMICA

Las tareas necesarias para la realización de un proyecto de aumento de potencia se dividen en 3 fases principales, que se esbozan a continuación:

Estudio de viabilidad (Fase 1)

El estudio de viabilidad permite a la empresa eléctrica evaluar el coste global del proyecto frente a la ganancia obtenida en potencia eléctrica neta. En esta fase es cuando se toman las decisiones preliminares sobre las condiciones de operación al nuevo nivel de potencia. Los análisis principales y la revisión de los equipos y sistemas se difiere para la siguiente fase; sin embargo se realizan las evaluaciones necesarias para determinar qué modificaciones se requieren. Tal y como se indicó en la introducción esta evaluación es sencilla para aumentos de potencia hasta el 5%, ya que casi todas las plantas fueron diseñadas con ese margen adicional. En cualquier caso el funcionamiento real de los equipos y sistemas se tiene en cuenta para poder confirmar que existe un margen de diseño, operación y seguridad suficiente al nuevo nivel de potencia.

Ingeniería y licenciamiento (Fase 2)

El grueso de las evaluaciones se realiza en esta segunda fase y se documentan en sus correspondientes evaluaciones de ingeniería y licencia.

Todos los aspectos afectados por el aumento

de potencia térmica son tenidos en cuenta. La operación de la planta se evalúa para un ciclo de combustible de referencia, representativo de las condiciones esperadas al nuevo nivel de potencia, de forma análoga a lo que se hizo para el Estudio Final de Seguridad (EFS) original. La evaluación de ingeniería identificará cualquier modificación requerida en los componentes, equipos o sistemas del reactor para permitir la operación a la nueva potencia.

En el informe de licencia se incluirá un resumen y conclusiones de las evaluaciones de ingeniería realizadas, así como se revisarán todos los aspectos relacionados con la seguridad de la operación en las nuevas condiciones, decididas en la fase de viabilidad. Dicho informe de licencia se ajustará a un formato preestablecido y especificado en la Referencia 1. Cualquier desviación respecto de la guía genérica deberá ser explícitamente justificado. Así mismo deberá incluir la evaluación de que no existe ningún riesgo significativo y la verificación del cumplimiento de todas las guías reguladoras y criterios generales de diseño.

Además, el informe de licencia deberá acompañarse de la propuesta de cambio de las Especificaciones de Funcionamiento (ETF). En su forma final ambos documentos cubrirán un futuro ciclo de referencia (o serie de ciclos) en el que se prevé operar al nuevo nivel de potencia. Los límites de operación dependientes de ciclo se establecerán, en general, por separado, conforme al proceso habitual del licenciamiento de recargas, documentándose en su correspondiente Evaluación de Seguridad de la Recarga (ESR) y en el informe de límites de operación del núcleo (COLR), habitualmente incorporado a la ESR en España.

Implantación (Fase 3)

En esta fase final, la empresa eléctrica incorpora los cambios necesarios a los componen-

tes, equipos, sistemas, códigos y procedimientos, necesarios para alcanzar el nivel de potencia propuesto. La mayor parte del trabajo se completará durante la parada (o paradas) de recarga del combustible que precede al aumento(s) de potencia (según sea en una o varias etapas). Se comprobará la operación real y realizarán las pruebas necesarias al nuevo nivel de potencia, una vez recibida la correspondiente aprobación de los organismos competentes.

ALCANCE DE LOS ANÁLISIS DE LICENCIA

En general, los análisis de licencia incluirán una revisión detallada de todos los aspectos del diseño de la planta y su operación relacionados con los requisitos reguladores aplicables, comportamiento de equipos, condiciones de operación real frente a la prevista y las evaluaciones de transitorios y accidentes. En la medida de lo posible se hará referencia a los estudios genéricos incluidos en la Referencia 1.

Se incluirá una revisión de los sistemas y componentes del NSSS y del BOP, así como otros no directamente relacionados con el nivel de potencia. Además se tendrá en cuenta las consideraciones de impacto ambiental.

En lo que resta se destacan los principales aspectos que es necesario analizar para el proceso de licencia de un aumento de potencia térmica de un BWR.

Condiciones de operación del reactor

Los parámetros termo-hidráulicos de operación del reactor a la nueva potencia se generan en base a la capacidad del grupo T-G y los correspondientes balances térmicos consistentes con el nuevo caudal de vapor. Las condiciones se establecerán de forma realista, aunque con valores envolventes para los análisis posteriores. En la Figura II se indican las condiciones típicas de

operación del NSSS para un aumento de potencia de un 20%.

Mapa de operación potencia/caudal

Tal y como se ha indicado con anterioridad, el mapa de operación permanecerá en general inalterado, salvo por la extensión de la línea de máxima potencia, manteniendo las vigentes líneas de barras. El aumento de potencia se hará mediante un aumento del caudal a lo largo de la máxima línea de carga licenciada hasta alcanzar el nivel de potencia deseado, tal y como se representa en la Figura I. No se pondrán en general, extensiones adicionales del mapa de operación.

Análisis de transitorios y accidentes

Se revisarán y evaluarán los transitorios y accidentes incluidos en el EFS aplicable. En caso necesario se reanalizarán los sucesos limitantes para verificar el cumplimiento de los requisitos de licencia. Se emplearán códigos aprobados y las hipótesis y alcance de los análisis será consistente con las actuales bases de licencia, incluyendo los distintos modos de operación (por ejemplo la operación con un sólo lazo de recirculación -SLO-).

En la Tabla III se resumen las principales efectos del aumento de potencia térmica en la respuesta frente a transitorios y accidentes.

Análisis de LOCA

Se realizará un análisis de LOCA para demostrar que los requisitos del 10CFR50.46 se siguen cumpliendo al nuevo nivel de potencia. Se considerará un espectro representativo de roturas y se incluirán todas las opciones de operación incorporadas en las ETF vigentes hasta ese momento (pe. SLO). Los límites de operación se confirmarán o reajustarán para los combustibles aplicables en el momento de introducir el aumento de potencia.

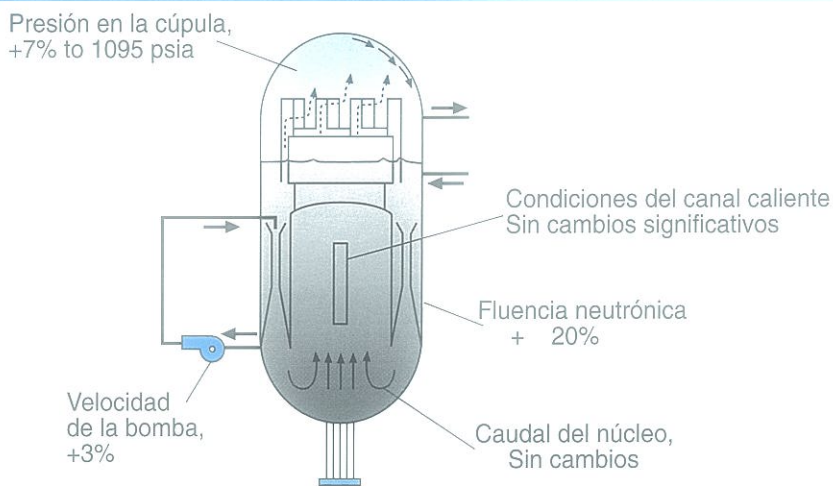
Análisis de Transitorios

Se realizará una revisión completa del análisis de transitorios del EFS y de la última ESR para evaluar qué transitorios se pueden ver afectados por el aumento de potencia. Para cada una de las categorías en las que se clasifican los transitorios del EFS (Sucesos con sobrepresión, con disminución de la temperatura del refrigerante, disminución o aumento de caudal de refrigerante...) se evaluarán los sucesos más limitantes en las peores condiciones de operación para garantizar el cumplimiento de todos los límites. Como en el caso del LOCA, se tendrán en cuenta todos los modos y flexibilidades de operación vigentes en ese momento (por ejemplo SLO, equipos fuera de servicio, etc.).

Estabilidad

Se evaluará el impacto de las nuevas condicio-

F II- Impacto de un aumento del 20% en la potencia térmica de un BWR en las condiciones de operación del NSSS



nes respecto del cumplimiento del criterio general de estabilidad del reactor.

Con el planteamiento general propuesto para los aumentos de potencia, donde no se propone la ampliación del mapa de operación por encima de la línea de carga actual, no se requiere un análisis de estabilidad, ya que las soluciones a largo plazo propuestas por el grupo de propietarios BWR (BWROG) cubren las condiciones límite para la estabilidad que se producen en la región de bajo caudal y máxima potencia de dicho mapa. Caso de desear una extensión adicional de la línea de carga, por encima de la considerada en la guía, será preciso un reanálisis para verificar que el nuevo mapa propuesto tiene márgenes de estabilidad adecuados.

Impacto radiológico

Se evaluarán las consecuencias radiológicas derivadas de la operación a mayor potencia, verificando el cumplimiento de los requisitos reguladores. Dicha evaluación cubrirá el efecto en: el termino fuente, dosis al exterior, habitabilidad de la sala de control y accidentes, tal y como se describe en el EFS.

Impacto en los componentes del NSSS

Se revisará el impacto de la mayor potencia térmica, así como sus consiguientes aumentos de temperatura, presión y caudales en los componentes y sistemas del NSSS, tanto desde el punto de vista operativo, como de seguridad. Dicha revisión incluirá los siguientes aspectos:

- Evaluación estructural de la vasija, sus toberas y sus componentes internos
- Análisis hidráulico del núcleo del reactor: Distribuciones de caudal por elementos, caudales de derivación, fracciones de huecos y pérdida de carga
- Evaluación de las vibraciones en los internos de la vasija.
- Evaluación del cumplimiento del criterio de sobrepresión de la vasija (código ASME)

- Evaluación de la resistencia a la fractura de la vasija -tenacidad- (fragilización por la fluencia)
- Evaluación tanto de la eficacia como de las cargas dinámicas de los separadores y secadores de vapor
- Evaluación estructural, estática y dinámica, de las tuberías del NSSS (líneas de vapor, de recirculación)

Análisis de sistemas del NSSS

Se realizarán análisis o evaluaciones de los diversos sistemas del NSSS para verificar la capacidad de operación en las nuevas condiciones y que se cumplen los requisitos apropiados de diseño y licencia. Entre los sistemas más importantes se consideran los siguientes:

- Instrumentación
- Recirculación
- Control
- Extracción del calor residual
- Control líquido de reserva (SLCS)
- Limpieza del agua del reactor
- Inyección a alta presión (HPCI) y/o Condensador de aislamiento (RCIC)
- Alivio de presión (SRV) y descompresión automática (ADS)

Combustible y Núcleo

Se realizarán los análisis necesarios (estudios de ciclos, incluyendo diseño del combustible y del núcleo) para evaluar los márgenes de operación del núcleo al nuevo nivel de potencia. Para acomodar el aumento de potencia, manteniendo la longitud del ciclo actual, se emplearán mayores fracciones de recarga y/o enriquecimientos superiores, según criterios técnico-económicos, y garantizando en todo caso el cumplimiento de los márgenes térmicos y de reactividad requeridos.

En función del aumento de potencia térmica deseado se considerará la conveniencia de cambiar el diseño de combustible, para minimizar el coste del ciclo de combustible, manteniendo los márgenes de operación actuales.

Evaluación del impacto ambiental

Se realizarán las evaluaciones necesarias para demostrar que el aumento de potencia no tiene un impacto adverso en el medio ambiente (tierra, agua, aire o recursos naturales), y que el plan de protección medioambiental de la central permite la operación continuada de la planta al nuevo nivel de potencia.

Sistemas del ciclo termodinámico de la central (BOP)

También se realizarán revisiones detalladas de la capacidad de los diferentes sistemas y componentes del BOP, que garanticen que la central puede suministrar con márgenes suficientes la nueva potencia. Entre los principales sistemas del BOP a considerar se encuentran:

- Grupo T-G
- Contención
- Agua de alimentación y condensado
- Condensador y Refrigeración normal y de emergencia de la central
- Agua de circulación p torre de refrigeración
- Eléctrico
- Generadores Diesel de emergencia, Grupos M-G y baterías
- Piscina de combustible gastado
- Residuos
- Tuberías

Otros aspectos

Adicionalmente se deberán considerar los siguientes aspectos:

- Protección contra incendios (10CFR50 Apéndice R)
- Calificación medioambiental de equipos
- Procedimientos de emergencia
- Requisitos de parada y durante la recarga de combustible
- Entrenamiento de operadores
- Vida útil de la central
- Pérdida total de suministro eléctrico ("blackout")
- Roturas de líneas de alta energía
- Pruebas
- Bancos de datos del computador de procesos

CONCLUSIONES

En este artículo se han esbozado los conceptos fundamentales de la guía genérica elaborada por GE para los aumentos de potencia térmica en BWRs (Referencia 1). Dicha guía proporciona una metodología completa, rigurosa y realista para poder acometer un proyecto de aumento de potencia con totales garantías de éxito. Dicha metodología se basa en la utilización de códigos, procedimientos, hipótesis y cálculos ge-

néricos previamente aprobados por el organismo regulador competente. En particular la USNRC ha aprobado la guía de GE para aumentos de potencia hasta un 5% (ver Referencia 2) y está pendiente de aprobar la extensión de la guía para aumentos de hasta un 20% en la potencia térmica, siguiendo la misma filosofía aquí descrita.

La guía ha sido transmitida al Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y está siendo revisada dentro de la aplicación propuesta por Iberdrola para aumentar la potencia térmica de Cofrentes hasta un 4.2% del valor licenciado originalmente. Se considera, por tanto de plena aplicación en España, tanto para la propuesta actual y probables extensiones futuras de Cofrentes, como las potenciales de Garoña.

REFERENCIAS

1. "Generic Guidelines for General Electric Boiling Water Reactor Power Uprate Licensing Topical Report", NEDO-31897, February 1992.



Juan José PEÑA AGUADO es Ingeniero Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid. Fue investigador, durante dos años, en el Instituto de Fusión de la UPM.

En 1984 se incorporó a ENUSA, donde desempeñó el cargo de Ingeniero de Termo-Hidráulica y Seguridad en el área PWR hasta 1987, participando en el proyecto OECD-LOFT como Jefe del Grupo de Trabajo en España para los análisis termo-hidráulicos y de daño al núcleo del experimento LP-FP-2.

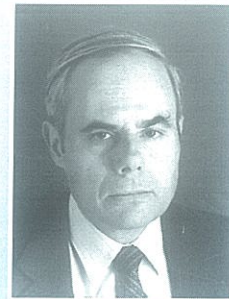
Desde 1988, es Jefe del Grupo de Diseño del Núcleo BWR, encargándose de la dirección técnica de las actividades de Ingeniería Nuclear y Licenciamiento de las Recargas y Servicios para centrales BWR españolas y, más recientemente, con la constitución de GENUSA, para otros BWR europeos.

Ha publicado diversos artículos, ponencias e informes, tanto en la SNE, de la que es socio desde 1982, como en otros foros internacionales.

Tabla III
IMPACTO DEL AUMENTO DE POTENCIA TÉRMICA EN LA RESPUESTA FRENTE A TRANSITORIOS Y ACCIDENTES

- La estrategia propuesta en la guía genérica para la realización del aumento de potencia minimiza el impacto en los transitorios y accidentes.
- El impacto en LOCA es despreciable debido a amplios márgenes que proporciona la metodología de análisis SAFER/GESTR
- La respuesta a transitorios del elemento caliente no se ve modificada tanto por el mantenimiento de los picos radiales de potencia asociados al típicamente necesario mayor tamaño de recarga, como por el aumento del subenfriamiento que se produce durante los transitorios de sobrepresión, habitualmente limitantes.
- El impacto radiológico es proporcional o ligeramente inferior al aumento de potencia.
- El aumento de caudal de vapor afecta a las capacidades de alivio de las SRVs y a la respuesta frente a ATWS.
- El previsible aumento de la presión de operación afecta a las cargas dinámicas de la contención.
- El aumento de potencia térmica afecta a los márgenes de temperatura máxima de la piscina de supresión.

2. Letter from W.T. Russel (USNRC) to P.W. Marriott (GE), "Staff Position Concerning General Electric Boiling Water Reactor Power Uprate Program (TAC No. 79384)", September 30, 1991



Jaime SEGARRA CULILLA es Doctor Ingeniero Industrial por la ETSII de Barcelona, desde 1965. Siguió cursos de Física e Ingeniería Nuclear y Electrónica en la Junta de Energía Nuclear. Impartió clases en la Cátedra de Ingeniería Nuclear de la ETSII de Barcelona (1961-1964). Curso, asimismo, estudios de Administración de Empresas, para postgraduados en España y Suiza y ha publicado diversos libros y artículos sobre temas de Matemática Básica, Física y relacionados con Centrales Térmicas y Nucleares.

Comenzó a prestar sus servicios en IGE-Spain en 1964 y pasó posteriormente a General Electric Technical Services Company, donde ha desempeñado diversos cargos. Desde septiembre de 1996, combina sus responsabilidades de Director de Energía Nuclear para España en GE International Inc., con las de Director de Marketing en GENUSA.

Es miembro del Colegio de Ingenieros Industriales de Madrid y de la SNE desde su fundación, habiendo desempeñado funciones en la Junta Directiva de esta Sociedad durante el plazo máximo de cuatro años permitido por los Estatutos. Igualmente, es miembro del Consejo de Dirección del Foro de la Industria Nuclear Española y de la AIIM. También ha formado parte de diversos Comités de IRANOR y la AECC.

W. MARQUINO,
Power Uprate Design Engineer-GENE

H.X. HOANG,
Power Uprate Project Manager-GENE