

DOMINIQUE J.J. DENIL

AUMENTOS DE POTENCIA EN CENTRALES. EL PLANTEAMIENTO DE WESTINGHOUSE

El aumento de potencia constituye uno de los medios mas efectivos, en cuanto a costes y tiempo de ejecución, de aumentar la producción de energía y mejorar la flexibilidad operativa. Como tal, se puede considerar como un medio de instalación de capacidad adicional, y por lo tanto como inversión de capital

Con un planteamiento sinérgico implementado y licenciado, las operaciones de la central se pueden gestionar en función de los objetivos estratégicos tanto a corto plazo como a largo plazo.

Los parámetros se pueden seleccionar tanto para contemplar las necesidades actuales, como para configurar las estrategias del futuro. Las decisiones sobre la gestión de operaciones se pueden adaptar a las necesidades específicas de la empresa explotadora tales como: maximizar la producción eléctrica, reducir las temperaturas de los generadores de vapor, operación con caudal primario degradado, taponamiento de tubos de los generadores de vapor, instalación o sustitución de manguitos, así como combinaciones de las mismas.

INTRODUCCIÓN

El análisis y licenciamiento iniciales de las centrales nucleares en operación hoy en día se realizaron para un solo conjunto de parámetros de la central a plena potencia. Normalmente la selección de parámetros para condiciones de operación a plena potencia se realizaba asignando la mayor parte del margen disponible a maximizar la producción eléctrica de la central. Como consecuencia, la licencia de la central, las especificaciones técnicas y la documentación de diseño, se especificaba la operación en esas condiciones de plena potencia utilizando totalmente la tecnología analítica y de hardware disponible en ese momento.

Conforme ha ido progresando la industria nuclear, se ha desarrollado en varias centrales el deseo y necesidad de cambiar los parámetros supuestos en un principio. En paralelo, se han dedicado esfuerzos al desarrollo de mejores tecnologías analíticas y de equipos que permitan un margen adicional. Las modificaciones típicas de los parámetros de operación a plena potencia de la central se realizan en forma de aumentos de potencia, como respuesta

a la necesidad de una mayor capacidad de generación o al deseo de alcanzar en unidades de diseño similar los mismos niveles de potencia y los mismos parámetros. En estos casos, es necesario evaluar y reanalizar los análisis de verificación de diseño para los sistemas SNGV, componentes y análisis de accidentes, según el caso, asignando una cantidad significativa de margen disponible para confirmar el continuo cumplimiento con los criterios de aceptación de la industria y organismos reguladores a mayores niveles de potencia. Luego es necesario hacer las correspondientes modificaciones de la licencia de la central para permitir la operación en las nuevas condiciones.

METODOLOGÍA DE WESTINGHOUSE

Una de las primeras preguntas que se plantean para proceder con los aumentos de potencia se refiere a los criterios de licenciamiento que la NRC exigirá a la central durante la implementación del aumento. Para resolver esta cuestión, Westinghouse preparó y presentó un informe genérico a la NRC en el año 1983. Las

bases de la metodología presentada fueron las siguientes:

1. Solo se deben revisar los aspectos relacionados con la potencia (p.e., LOCA-PCT esta relacionado con la potencia; los movimientos sísmicos no lo están).
2. Los criterios, códigos y estándares de licenciamiento actuales de la central siguen siendo aplicables (p.e., los criterios actuales para una central nueva no son aplicables).
3. Cualquier análisis se llevará a cabo con las técnicas analíticas aceptadas por la NRC en la actualidad. (No es posible repetir los análisis con los métodos antiguos y generalmente los evaluadores no están familiarizados con dichos métodos).

La NRC indicó que no publicaría un Informe de Evaluación de Seguridad (SER) sobre el informe genérico, puesto que proporcionaba una metodología en lugar de datos técnicos específicos. Sin embargo, la NRC ha aceptado este planteamiento y otorgado las modificaciones de licencia solicitadas. De hecho, desde 1983, Salem Unidad 1, North Anna Unidades 1 y 2, Callaway, Vogtle Unidades 1 y 2, Indian

Point Unidad 2, Turkey Point Unidades 3 y 4, Surry Unidades 1 y 2, y V.C. Summer han conseguido de la NRC modificaciones de licencia para un aumento de potencia utilizando la metodología expuesta en WCAP-102631.

Así, el planteamiento de Westinghouse ha sido siempre que los criterios, códigos y normas de licencia vigentes aplicables siguen siendo de aplicación en las condiciones de aumento de potencia. O sea, cualesquiera que sean los criterios que se aplican a la central en el día en que se solicita la modificación de aumento de potencia seguirán aplicándose en las condiciones de aumento de potencia.

En cuanto al enfoque de la revisión de todos los aspectos del diseño y operación que están impactados por el aumento de potencia nuclear, hay que destacar que los análisis y documentación generados para apoyar un aumento de potencia tienen que incorporar los parámetros de diseño previstos para las condiciones nuevas, incluyendo, además del propio aumento de potencia nuclear, las nuevas temperaturas de operación (o rango de las mismas), las variaciones en el caudal de diseño térmico, los niveles de taponamiento de tubos de los generadores de vapor, etc., según su aplicación al programa específico de aumento de potencia de la central.

De hecho, aunque solo unos pocos parámetros, por ejemplo potencia y temperatura media, se mencionan explícitamente en la licencia o Especificaciones Técnicas de una central, todos los parámetros asociados tienen que considerarse en los análisis afectados, para poder verificar que la central podrá operar en las condiciones de aumento de potencia, y que la aplicación del mismo no implicará temas de seguridad significativos según los cri-

terios que establece el 10CFR apartado 50.92(c).

AUMENTO DE POTENCIA Y ASIGNACIÓN DE MARGEN

En general, la asignación principal de márgenes es para aumentos de potencia nuclear de la central; el incentivo para dicha asignación es fundamentalmente económico. El aumento de potencia proporciona un incremento de generación eléctrica con una inversión de capital mínima. Este aumento de producción eléctrica se puede aprovechar para reemplazar otras formas de energía más caras, o se puede mantener en reserva para suministrar energía adicional durante situaciones de pico de demanda.

La utilización óptima de los márgenes constituye un factor importante a la hora de garantizar el éxito de cualquier sistema. Según va aumentando la complejidad de un sistema, es más difícil determinar si se ha optimizado la utilización de los márgenes para satisfacer el conjunto de los objetivos y necesidades económicas y no económicas. Para sistemas complejos como las centrales nucleares, es prácticamente imposible realizar de forma aislada cualquier modificación de equipo, software e incluso analítica, especialmente si se refiere a las características totales de rendimiento de la central. Para cada modificación propuesta, debe ser práctica normal revisar su impacto en todos los demás aspectos de la central y establecer un plan que permita una optimización del rendimiento desde el punto de vista de integración de sistemas. Si no se utiliza un planteamiento de integración de sistemas, se

podrían conseguir unas mejoras en ciertas áreas de la central a expensas de crear otros problemas en otras áreas de la misma. Por consiguiente el aumento de potencia debe ser realizado de forma sinérgica en cuanto a la asignación de margen; su objetivo es aprovechar el margen disponible, como medio para facilitar la flexibilidad operativa, tanto para cumplir con las necesidades específicas de la empresa explotadora como para convertir los márgenes disponibles en megavatios.

Es importante tener en cuenta que el margen disponible nunca será suficiente para acomodar todas las mejoras deseadas. Por lo tanto, es esencial priorizar la asignación del margen disponible y prever donde hace falta un margen adicional.

Además del aumento en el propio nivel de potencia, un programa de aumento de potencia típicamente puede llevarse a cabo en combinación con uno o varios de los siguientes aspectos:

- Sustitución de generadores de vapor - el cambio de los generadores de vapor existentes por unos de mayor tamaño puede proporcionar una mayor capacidad de aumento de potencia.
- Reducción de temperatura caliente - cuando una reducción de temperatura caliente acompaña el aumento de potencia, todas las temperaturas se reducen en consecuencia. El efecto neto del aumento de potencia en combinación con la reducción de temperatura caliente es la producción de mayor cantidad de MWe a temperaturas operativas inferiores, pero a una tasa térmica ligeramente superior.
- Mayores niveles de taponado de tubos

Tabla I
CENTRALES DE DISEÑO WESTINGHOUSE QUE HAN IMPLEMENTADO AUMENTOS DE POTENCIA
(DEL 2,2% AL 26,3%)

Central	Potencia inicial (MWt)	Potencia final (MWt)	¿Cuándo?
Yankee Rowe	485	600	Después de operación comercial
San Onofre 1	1210	1351	Durante diseño
Haddam Neck	1425	1800	Después de operación comercial
Point Beach 1	1395	1518	Durante diseño
R.E. Ginna	1320	1520	Después de operación comercial
Turkey Point 3 & 4	2100	2200	Durante diseño
H.B. Robinson 2	2200	2300	Después de operación comercial
D.C. Cook 2	3250	3403	Durante diseño/proceso de licencia
SENA	905	1040	Después de operación comercial
Beznau 1 y 2	952	1130	Durante diseño
Salem 1	3350	3423	Después de operación comercial (1986)
North Anna 1 y 2	2785	2905	Después de operación comercial (1986)
Callaway	3425	3579	Después de operación comercial (1988)
Ringhals 2	2440	2660	Después de operación comercial (1989) - RSG
Indian Point 2	2758	3083	Después de operación comercial (1990)
Vogtle 1 y 2	3425	3579	Después de operación comercial (1993)
Wolf Creek	3425	3579	Después de operación comercial (1993)
Tihange 1	2660	2875	Después de operación comercial (1995) - RSG
Surry 1 y 2	2441	2554	Después de operación comercial (1995)
V.C. Summer	2787	2912	Después de operación comercial (1996) - RSG
Turkey Point 3 y 4	2208	2308	Después de operación comercial (1996)

Tabla II
PROGRAMAS DE AUMENTO DE POTENCIA TERMINADOS O EN CURSO EN CENTRALES DE DISEÑO WESTINGHOUSE

Central	Aumento de MWt	Etapas
D.C. Cook 2 Point Beach 1 y 2	3425 → 3600 1518 → 1650	Presentada Solicitud de Modificación de Licencia Ingeniería Terminada (RSGs - Unidad 2) (Implementación prevista para primavera de 1998)
Shearon Harris	2787 → 2912	Ingeniería en Curso (RSGs) (Implementación prevista para el otoño de 2001)
Farley 1 y 2 Vandellós Unidad 2	2660 → 2785 2785 → 2910	Ingeniería Terminada Ingeniería en Curso (Implementación de Aumento de Potencia prevista para 1999)
Ascó I	2686 → 2912	Ingeniería en curso (Implementación de Aumento de Potencia prevista para 2000)
Ascó II	2686 → 2912	Ingeniería en curso (Implementación de Aumento de Potencia prevista para 1999)

de generadores de vapor - permite mejorar la flexibilidad de las condiciones de licenciamiento, obteniendo de los Organismos Reguladores una preaprobación para que no sea necesario ningún tiempo de camino crítico para la obtención de la aprobación de dichos Organismos para la vuelta a potencia después de taponar tubos de los generadores de vapor.

- Flexibilidad operativa - mejorando la capacidad de emplear:

- factores de pico más altos en el núcleo
- rangos de parámetros en lugar de valores específicos
- retardos de tiempos de arranque de bombas o generadores diesel de mayor duración
- intervalos de vigilancia de mayor duración
- mayores incertidumbres de instrumentos, así como tener en cuenta un mayor nivel de degradación funcional que el inicialmente previsto.

Estas capacidades han servido de ayuda a los operadores y al personal de mantenimiento, han reducido la actividad reguladora asociada con actualización de licencias para las condiciones operativas revisadas y han reducido los costes de O y M asociados.

- Coste del ciclo de combustible - la incorporación de diseños de combustible avanzados puede permitir un margen adicional sustancial para dar soporte a las varias etapas del aumento de potencia, por ejemplo aumento del margen de taponamiento de tubos de generadores de vapor, aumento de los factores de pico en núcleo y reducción de los niveles de fluencia en la vasija. Además, se produce una reducción real de los costes de combustible como consecuencia de mayores quemados y ciclos mas largos.

IMPLEMENTACIÓN DE UN PROYECTO DE AUMENTO DE POTENCIA

Hay que desarrollar un plan estratégico a largo plazo para poder estructurar un programa de aumento de potencia y asignar el margen disponible de forma óptima. En este sentido, el planteamiento sinérgico permite estimular la previsión y planificación a largo plazo, así como facilitar la identificación de áreas donde la generación/ desarrollo de márgenes es deseable.

Los beneficios del plan estratégico se materializarán en función de la mayor durabilidad de las bases de licenciamiento establecidas para el aumento de potencia.

El primer paso del proceso consiste en preparar una lista de los objetivos, necesidades y requisitos de la empresa explotadora. En esta lista, se pueden incluir elementos tales como necesidad de carga operando en base o en seguimiento de carga, se puede suponer cierto nivel de taponamiento de tubos de generadores de vapor, y se puede aprovechar la configuración de combustible existente, revisar el caudal del primario y el no realizar ninguna modificación significativa de equipo. Es necesaria una lista para ayudar en la asignación de márgenes e identificación de restricciones en el aumento de potencia. También es necesario recopilar un resumen de los límites del SNGV mas significativos y de los parámetros que tienen más impacto en estos límites. Una lista típica de límites del SNGV y parámetros significativos es la siguiente:

- Limite de presión del lado secundario
- Límites de temperatura caliente de la vasija
- Taponamiento de tubos de los generadores de vapor
- Caudal del primario
- Límites de FQ LOCA/FQ Nuclear
- Diseño/mejoras de combustible
- Integridad de la contención
- Instrumentación de la central
- Calorimétrico de la central
- Límites de Ebullición Nucleada (LEN)
- Flujo calorífico, distribuciones de potencia axial y radial y temperatura de entrada de la vasija del reactor
- Caudal volumétrico de la turbina
- Separadores de humedad de los SG's
- Equipos y sistemas

A partir de esta lista y de los requisitos previamente establecidos, es posible estimar el aumento de potencia potencial para el SNGV. Una vez elegidos los nuevos parámetros de operación, todos los sistemas y equipos se revisan de forma sistemática para evaluar su adecuación a las nuevas condiciones operativas. También se identifican los cambios en los equipos, si los hay. Una vez establecidos los márgenes de la central se llevan a cabo todos los trabajos analíticos necesarios para poder obtener el licenciamiento de las nuevas condiciones de operación.

En función de la complejidad del programa de aumento de potencia contemplado (p.e., si el aumento de potencia del núcleo está asociado o no con un cambio de combustible, sustitución de SGs, etc.), el plazo típico para la realización de todos los análisis necesarios y para la elaboración de la documentación de licenciamiento tendría una duración de 2 a 3 años.

En los EE.UU., las respuestas a las peticiones de modificación de licencia para los aumentos de potencia han sido muy positivas. De hecho, la NRC ha respaldado activamente los planes de las empresas eléctricas referentes a aumentos de potencia y mejoras de operación.

En Europa, la mayoría de los programas de aumento de potencia implementados en los últimos años se han realizado en combinación con la sustitución de generadores de vapor (Ringhals 2, Doel 3, Tihange 1).

En la Tabla I, se presenta la lista de PWRs suministrados por Westinghouse en los que se ha realizado un aumento de potencia del SNGV, sea en los EE.UU. o en Europa, mientras que en la Tabla II se relacionan los PWRs suministrados por Westinghouse en los que un programa de aumento de potencia esta en curso o en vías de licenciamiento.

DESARROLLO DEL CODIGO REALISTA PARA ANÁLISIS DE LOCA ("BEST ESTIMATE")

Para respaldar a las empresas explotadoras en su deseo de aumentar los márgenes con la posible aplicación de un aumento en la producción energética, Westinghouse y el Electric Power Research Institute (EPRI) han terminado recientemente el desarrollo de una metodología LOCA para implementar la norma revisada de Apéndice K, habiendo presentado esta metodología a la NRC para su revisión y aprobación, tal como se expone a continuación.

En el año 1988, la NRC revisó la normativa del ECCS contenida en el Apéndice K y la Sección 50.46 de 10CFR Parte 502, que rige el análisis del Accidente de Pérdida de Refrigerante (LOCA). La norma revisada permite el uso de modelos informáticos realistas para calcular el accidente de pérdida de refrigerante. Además, el nuevo reglamento permite el uso de estimaciones de alta probabilidad para la temperatura

pico de vaina (PCT), en lugar de estimaciones envolventes y conservadoras.

Antes de esta modificación, la normativa era un conjunto de reglas en las que se definían las hipótesis que había que hacer acerca de las condiciones iniciales de la central, y como modelar los distintos procesos físicos. Los análisis resultantes solían ser altamente conservadores a la hora de predecir el funcionamiento del ECCS, restringiendo enormemente la distribución de potencia del núcleo, los puntos de tarado y requisitos funcionales del ECCS, así como la vigilancia y realización de pruebas.

Debido a la naturaleza conservadora y preceptiva del Apéndice K, no inducía el desarrollo de códigos hacia modelos que podían producir resultados realistas. Las predicciones proporcionadas por los análisis no eran indicadores reales del comportamiento de la central durante un LOCA. Con el planteamiento realista, el desarrollo de códigos tiene como objetivo producir un código que puede predecir la respuesta "verdadera" de la central durante un accidente, junto con las incertidumbres propias del análisis. En las centrales en operación, el uso de modelos e hipótesis "best estimate" para predecir una respuesta realista suele mostrar que los límites operativos actuales son demasiado restrictivos. La relajación de estas restricciones puede mejorar el rendimiento económico de la central sin comprometer la seguridad.

Un poco después de la modificación de la normativa, la NRC publicó una guía reguladora³ y un compendio de investigaciones del ECCS⁴, patrocinando un programa para desarrollar un método estructurado para la evaluación de las incertidumbres que afectan a la temperatura pico de vaina para LOCA por rotura grande.

El método CSAU ("Code Scaling Applicability and Uncertainty") es una metodología minuciosa que requiere una documentación completa del código y sus modelos, una evaluación rigurosa frente a los datos de pruebas, la determinación de la incertidumbre del código y una evaluación de la extrapolación de los resultados del código y de sus modelos. Además, se realiza un análisis exhaustivo de la central y estudios de sensibilidad para determinar la temperatura pico de vaina resultante con todas las incertidumbres identificadas. El método CSAU ha establecido el estándar de licenciamiento con el que tienen que cumplir estos códigos.

Westinghouse seleccionó el código COBRA/TRAC⁶ como Código de referencia para los análisis de LOCA realista, e incorporó modelos adicionales. En WCOBRA/TRAC, se combinan ecuaciones multidimensionales bi-fásicas y tridimensionales utilizadas en la vasi-

Tabla III
CENTRALES DE DISEÑO WESTINGHOUSE CON ANÁLISIS DE LOCA CON WCOBRA/TRAC

Indian Point 2
North Anna Unidades 1 y 2
Sequoyah Unidades 1 y 2
V.C. Summer
Indian Point 3
Turkey Point Unidades 3 y 4
Ringhals Unidad 2
Haddam Neck
Joseph Farley Unidades 1 y 2
Point Beach Unidades 1 y 2

ja, con ecuaciones unidimensionales utilizadas en los lazos, para permitir una simulación completa y detallada de un PWR. La NRC había aprobado anteriormente un modelo de evaluación en el que se utiliza el WCOBRA/TRAC para analizar LOCAs de rotura grande para los PWRs equipados con inyección superior, siguiendo la metodología realista interina permitida por SECY-83-472. Westinghouse ha realizado mejoras adicionales en el código y la metodología para cumplir con la revisión de 10CFR50.46 y la Guía Reguladora 1.157. La metodología ha sido aprobada por la NRC para aplicaciones a PWRs de tres y cuatro lazos. Una ampliación de esta metodología a los PWRs equipados con inyección superior ha sido presentada recientemente a la NRC para su revisión y aprobación.

En la Tabla 3, se relacionan los PWRs suministrados por Westinghouse para los cuales se ha realizado un análisis de LOCA "Best Estimate" con WCOBRA/TRAC.

CONCLUSIÓN

En resumen, un aumento de potencia permite convertir los márgenes analíticos y de los equipos de la central en megavatios e ingresos. Es un proceso probado que permite resolver simultáneamente muchos de los problemas con los que se enfrenta la industria hoy en día. Es un método basado en el estado del arte para la optimización del rendimiento de la central, siendo un ejemplo fundamental de como un programa de asignación sistemática de márgenes puede lograr beneficios sinérgicos para la empresa explotadora.

Un amplio conocimiento de los tipos, usos e interacciones de márgenes es fundamental para la optimización del rendimiento de una central. Se puede aprovechar el margen para facilitar la flexibilidad operativa, lograr beneficios de costes del ciclo de combustible y realizar el aumento de potencia. Se puede generar margen mediante mejoras analíticas y de equipo, o puede ser reasignado desde varias áreas para resolver un problema específico. La mayoría de los márgenes SNGV no se excluyen entre sí. Una revisión de un parámetro normalmente im-

pacta otros aspectos del diseño. Finalmente, hay que destacar que el margen puede utilizarse para fines diferentes durante toda la vida de la central, en función de las necesidades y requisitos específicos de la misma.

REFERENCIAS

1. WCAP-10263, "A Review Plant for Upgrading the Licensed Power of a Pressurized Water Reactor Power Plant", Enero 1983, Westinghouse Clase 3.
2. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Emergency Core Cooling Systems; Revisions to Acceptance Criteria", Federal Register, 52, 41, Marzo 1988.
3. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Best Estimate Calculations of Emergency Core Cooling System Performance", Regulatory Guide 1.157, Mayo 1989.
4. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Compendium of ECCS Research for Realistic LOCA Analysis", 1988, NUREG-1230.
5. WILSON, et al., "Quantifying Reactor Safety Margins", NUREG/CR-5249, 1989.
6. THURGOOD, et al., "COBRA/TRAC - A Thermal-Hydraulics Code for Transient Analysis of Nuclear Reactor Vessels and Primary Coolant Systems, Equations and Constitutive Models", NUREG/CR-3046, Marzo 1985.



Dominique DENIL es Ingeniero Mecánico Civil graduada por la Facultad Polytechnique de Mons, Bélgica, y posgraduada en el Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Bélgica. Lleva trabajando para Westinghouse Energy Systems Europe desde 1983 en sus oficinas de Bruselas. Ha coordinado varios estudios de viabilidad de aumento de potencia así como varios proyectos de aumento de potencia en PWRs suministrados por Westinghouse en Europa (Beznau Unidades 1 & 2, Tihange Unidad 3, Ringhals Unidad 2). Recientemente ha coordinado el alcance de Westinghouse para los Estudios de Compatibilidad para la sustitución de los Generadores de Vapor en las Unidades de ASCO y ALMARAZ, y en la actualidad está coordinando los estudios de Westinghouse para un aumento de potencia del 4,5% en VANDELLOS II.