

EMILIO CASADO FLORES - ALEJANDRO MERINO TEILLET

AUMENTO DE POTENCIA ELÉCTRICA DE UNA CENTRAL NUCLEAR. REVALUACIÓN DE SISTEMAS Y EQUIPOS

RAZONES PARA EL AUMENTO DE POTENCIA ELÉCTRICA Y COMO LLEVARLO A CABO

El diseño conservador con el que en general se han proyectado los equipos y componentes de las centrales nucleares, unido a un mayor refinamiento y capacidad de los métodos de cálculos actuales, permiten que con una inversión moderada y manteniendo los márgenes de seguridad, abordar el aumento de la potencia eléctrica a producir.

Para llevarlo a cabo el camino a seguir, estructurado en fases de menor a mayor complejidad técnica es la siguiente:

FASE 1: Optimización del ciclo del BOP y disminución de los consumos internos.

FASE 2: Mejora del rendimiento térmico de los equipos más significativos.

FASE 3: Aumento de la potencia térmica.

OPTIMIZACIÓN DEL CICLO DEL BOP Y DISMINUCIÓN DE LOS CONSUMOS INTERNOS

Entre las actividades que pueden llevarse a cabo en esta fase, están:

- Medir el Balance Térmico diario por más de un método para ajustarse lo más posible al 100%. Para ello es fundamental la inspección y limpieza periódica de los medidores de caudal de agua de alimentación (FW).
- En plantas PWR cuyos GV's produzcan una presión elevada que haga que las válvulas de

control de turbina tengan un estrangulamiento mayor del 2%, reducirla bajando la temperatura media del primario hasta que el margen de control de las válvulas sea como máximo el 2%.

- Comprobar fugas al condensador de líneas del ciclo del BOP por válvulas, orificios restrictivos (ROs) o purgadores.

En el caso de ROs, especialmente en líneas de vapor principal y extracción MS y EX, comprobar su diseño, pues a menudo se han dimensionado para drenar el condensado formado en los arranques mientras que en operación normal al ser el condensado formado mucho menor, están descargando vapor.

En estos casos es aconsejable instalar purgadores.

- Equilibrar hidráulicamente todos los sistemas para funcionar con el mínimo número de bombas necesario.

- En el sistema de agua de circulación, estudiar a partir de que temperatura del agua (fundamentalmente los meses de invierno) puede pararse 1 bomba sin que disminuyan los MW producidos.

- Analizar la ganancia de control de las turbobombas y grado de estrangulamiento de las válvulas de control de FW, cuando existan.

Ajustar dicha ganancia para que las válvulas de control se posicionen en $\approx 70\%$ de apertura como máximo al 100% de potencia.

- Analizar los niveles de operación y venteos de los calentadores del BOP.

Ajustarlos en cada calentador para que no pro-

duzcan un subenfriamiento del drenaje mayor que el de diseño.

- Comprobar si los MSR mantienen la eficiencia de separación de humedad del diseño original.

Si estos equipos están insuficientemente instrumentados puede llevarse a cabo una prueba en la que en pasos sucesivos, quitando de servicio momentáneamente los recalentadores se puede determinar indirectamente la eficiencia de separación de humedad.

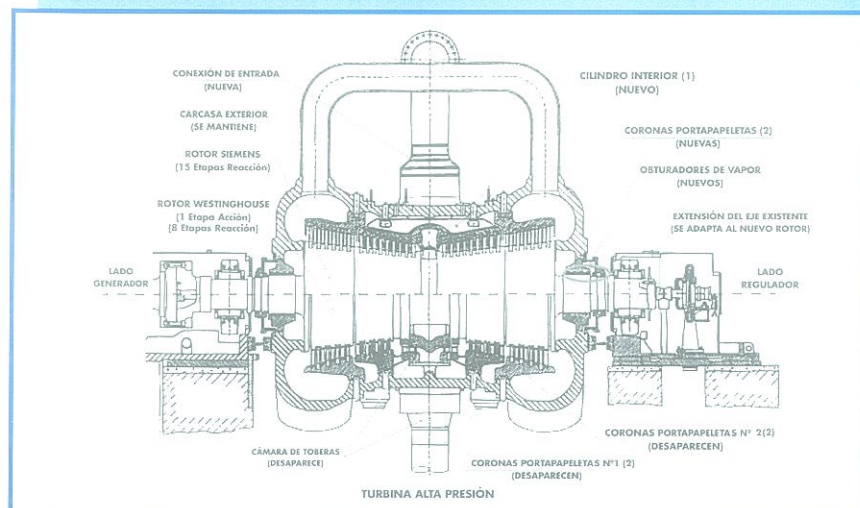
- Si no lo tienen, analizar la conveniencia de instalar aislamiento térmico no degradable en las líneas de extracción a los calentadores 1, 2, 3 y 4 del ciclo, en su recorrido dentro del condensador.

- En ciclos en los que las bombas de drenaje de calentadores (HD) aspiren directamente del calentador, sin tanque intermedio, ajustar el nivel para que el drenaje no salga excesivamente subenfriado.

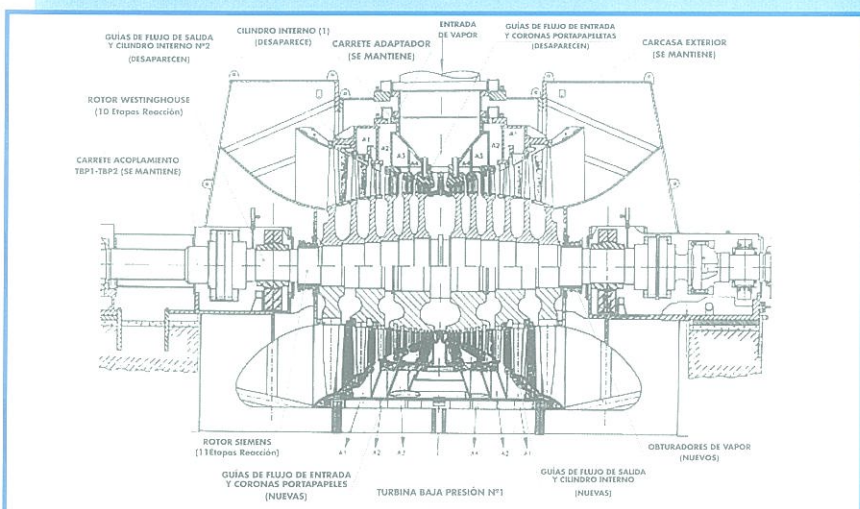
- Recuperación térmica de la purga de los GV's en las centrales PWR, poniendo como sistema de refrigeración de la misma el de condensado, o llevando la purga a un tanque de vaporización y el vapor del mismo a la extracción de los calentadores.

Para llevar a cabo las actividades descritas es imprescindible contar con un programa de cálculo de balance térmico, que modelice el ciclo secundario lo más detalladamente posible, siendo conveniente tener cada tren de calentadores y MSR's por separado, aunque el modelo resulte más grande.

F I - Modificaciones en turbina de alta presión



F II - Modificaciones en turbina de baja presión



MEJORA DEL RENDIMIENTO TÉRMICO DE LOS EQUIPOS MÁS SIGNIFICATIVOS

En esta fase, se requiere la modificación parcial o total de equipos del BOP, en la que se debe tener en cuenta el futuro aumento de potencia térmica que se describe en el cuarto punto.

Entre los equipos a analizar y como consecuencia modificar parcialmente o sustituir por otros nuevos, están:

- Condensador
- Turbina
- MSR's
- Generadores de Vapor (Central PWR)

MODIFICACIONES EN EL CONDENSADOR

Desde el punto de vista de mejorar el rendimiento se debe conseguir, en el espacio disponible, una mayor disposición de tubos que aumenten la superficie de transferencia y disminuya la ΔP por el lado del agua de refrigeración.

Esto se traduce en mejores vacíos, para la misma temperatura de entrada de agua, que con el condensador sin modificar.

Como mejoras adicionalmente se deben de conseguir:

- Nuevo material de los tubos (titanio o acero inoxidable).
- Rediseño de las entradas de las líneas de vapor y drenajes dentro del condensador.

MODIFICACIONES EN LA TURBINA

Desde el punto de vista de rendimiento y en el espacio disponible se modifican las turbinas de AP y BP para mejorar la eficiencia de sus escalones, disminuir las pérdidas y en definitiva producir más MW. En la figura I y II, se representan las modificaciones a realizar en alta y baja presión para mejorar su rendimiento.

Entre los cambios de diseño más significativos en estos equipos, están:

- Rendimiento de la entrada de vapor a la turbina de AP eliminando la cámara de toberas.
- Rediseño de las coronas portapaletas.
- Aumento del número de etapas del rotor.
- Rediseño del escape de la turbina de baja.
- Nuevos cierres de vapor para disminuir las pérdidas de vapor de sellado.

- Nuevo diseño del perfil de los álabes (más aerodinámico).

MODIFICACIONES EN LOS MSR's

En estos equipos, previo a su modificación debe de confirmarse que mantienen la eficiencia de separación de humedad de su diseño original, como se apunta en Optimización del ciclo del BOP.

Para ello puede llevarse a cabo una prueba en los mismos en la que con la instrumentación de planta pueden determinarse de manera indirecta su eficiencia, quitando de servicio momentáneamente el recalentador de alta y después el de baja.

Confirmado lo anterior, puede mejorarse el rendimiento de los MSR's, sustituyendo los haces de los recalentadores, si son de contorno rectangular, por otros de contorno circular o poligonal, que llenen con mayor número de tubos, el espacio vacío que dentro de los MSR's existe con los haces de contorno rectangular.

MODIFICACIONES EN LOS GV's

Estos equipos pueden modificarse parcialmente, sustituyendo el haz tubular o ir a una mejora mayor sustituyéndolos completamente.

Entre los cambios de diseño más significativos que incorporan los nuevos GV's, están:

- Nuevo haz tubular con tubos de un material menos sensible a los ataques conocidos de corrosión y con mayor número de tubos.
 - Mejor distribución de la entrada de agua de alimentación, minimizando los posibles golpes de ariete por condensaciones de vapor.
 - Mejor diseño de la toma de purga del fondo de los GV's
 - Menor pérdida de carga global por el lado secundario entre la entrada de FW y salida del MS.
- En definitiva los nuevos GV's para la misma carga térmica producen mayor presión de vapor.

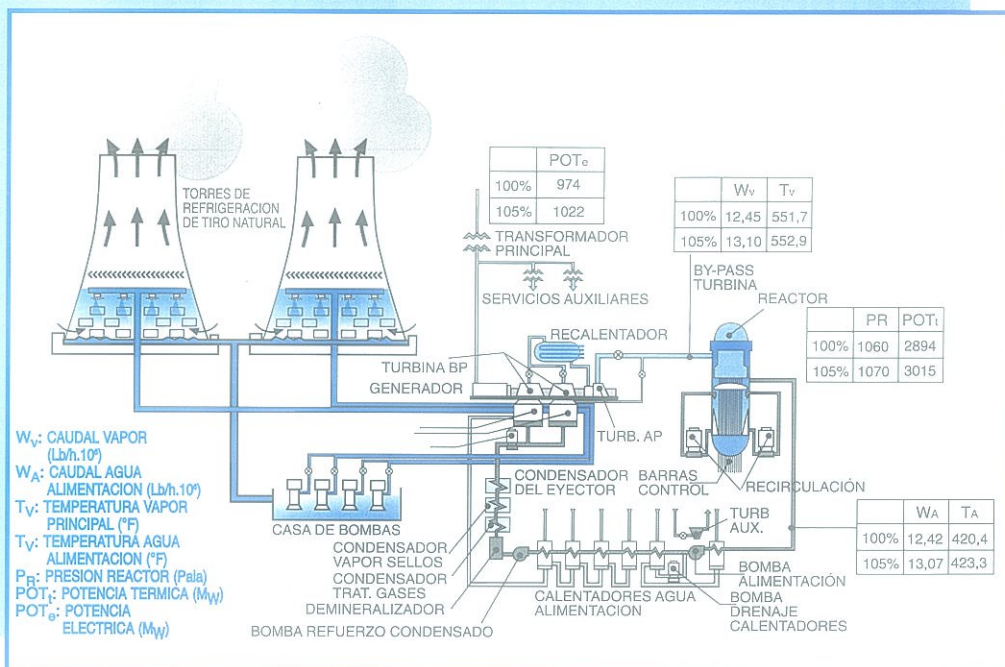
AUMENTO DE POTENCIA TÉRMICA

Esta tercera fase para conseguir el aumento de potencia eléctrica consiste en aumentar la potencia térmica nominal del reactor y por lo tanto la potencia cedida al ciclo.

Este aumento de potencia térmica se basa entre otras en las siguientes consideraciones:

- La mayor parte de las centrales fueron originalmente diseñadas y construidas para unos márgenes de potencia de hasta el 5% sobre la nominal.
- La mejora de los códigos de cálculo utilizados, con resultados contrastados incluso con el comportamiento de las centrales e hipótesis más realistas, permite disponer de unos márgenes adicionales, respecto a los previstos inicialmente.
- Los nuevos diseños de combustible permiten un incremento del margen entre los valores del análisis de diseño y los límites de seguridad.
- Mantenimiento de los márgenes del 2% adicional sobre la potencia final de diseño, de acuerdo con el requerimiento de la Guía

F III - Comparación de los parámetros fundamentales entre el 100% y 105% para una central BWR



Reguladora 1.49, manteniendo los márgenes de seguridad licenciados.

- Los programas de Aumento de Potencia Térmica ya se vienen desarrollando desde hace años fundamentalmente en EEUU, donde los suministradores principales han presentado programas genéricos aplicables a sus reactores ante la NRC, a fin de justificar aumentos de hasta el 120% de su potencia original.

- Mediante los programas genéricos los suministradores principales establecen una metodología en cuanto al alcance y profundidad de los estudios y análisis de seguridad que cada central deberá presentar en sus informes individuales.

- La NRC ha indicado su posicionamiento sobre algunos de los programas genéricos de los suministradores principales y estima un período entorno a los 18 meses el requerido para la evaluación de los informes individuales de cada central.

- Evitar en lo posible la modificación de los equipos y componentes de la planta, manteniéndolos dentro de las condiciones de diseño, utilizando para ello los márgenes reales disponibles.

- Los costes por MWe instalado derivados de la implantación de programas de aumento de potencia térmica, son competitivos con los costes de otras centrales de generación eléctrica convencionales.

ETAPAS Y ORGANIZACIONES IMPLICADAS EN EL AUMENTO DE POTENCIA

Las etapas para llevar a cabo un programa de Aumento de Potencia Térmica son:

Estudio de Viabilidad

A fin de evaluar el aumento de potencia posible y sus implicaciones, tanto desde el punto de vista de rentabilidad económica, como en lo concerniente a las nuevas condiciones de operación de la planta el estudio de viabilidad deberá plantearse bajo dos escenarios distintos, que pueden marcar los escalones de aumento de potencia futuro:

I) Utilización de márgenes disponibles
Determinación del margen disponible de la instalación que para su implantación no requiera prácticamente ninguna modificación en equipos, sistemas y componentes, está determinada una nueva potencia fácilmente obtenible y a un precio muy reducido.

II) Capacidad máxima de la planta.
Consiste en realizar un estudio de la capacidad máxima de la instalación, aunque la obtención de dicha potencia implique la necesidad de modificaciones o sustituciones en equipos o sistemas.

El límite de la capacidad máxima, en ocasiones no viene dado por el reactor en si mismo o sus

sistemas asociados, si no porque pueden requerirse sustituciones de equipos del BOP que no justifiquen unas grandes inversiones para pequeños incrementos de potencia adicionales.

Como resultado de los análisis y cálculos realizados para el estudio de viabilidad, se podrán determinar los umbrales de potencia a tener en cuenta en actuaciones de la planta no directamente relacionados con el aumento de potencia, como son los derivados de modificaciones o sustituciones requeridas en equipos significativos como Turbinas de Vapor de Alta y Baja Presión, Generadores de Vapor, Separadores de Humedad y Recalentadores, Calentadores de Agua de Alimentación y Condensador, entre otros, en los que al realizar las correspondientes especificaciones para sustitución hay que tener en cuenta los previsible umbrales que potencia con los que deberán de ser compatibles.

Además de tener en cuenta la potencia térmica previsible de los equipos anteriormente indicados y relacionados con el ciclo, también es necesario su consideración para programas de mejora, como el aumento de capacidad de almacenamiento de elementos de combustible gastado, tanto para la determinación de la distancia entre centros de las celdas y grados de enriquecimiento del boro de los nuevos bastidores como para la evaluación de la capacidad de refrigeración de las piscinas de combustible. Los participantes en las distintas fases del Aumento de Potencia son fundamentalmente:

- **Empresas Eléctricas:** Establecen los requisitos, coordinan las actividades e implantan las modificaciones derivadas del aumento de potencia.

- **Suministradores Principales:** Incluyendo en primer lugar al suministrador del NSSS o suministrador principal, quien determinará las posibles limitaciones de su reactor en particular y suministrará los requisitos de interfase pa-

ra la reevaluación del resto de la planta. Por su parte los suministradores de equipos como Turbina, Generador, etc. evaluarán la capacidad de sus equipos y si para el margen de potencia puesto como objetivo, se requieren modificaciones de los mismos.

- **Empresas de Ingeniería:** Realizan los correspondientes estudios de viabilidad y de detalle, análisis de sistemas y especificación de nuevos equipos o modificaciones de los existentes.

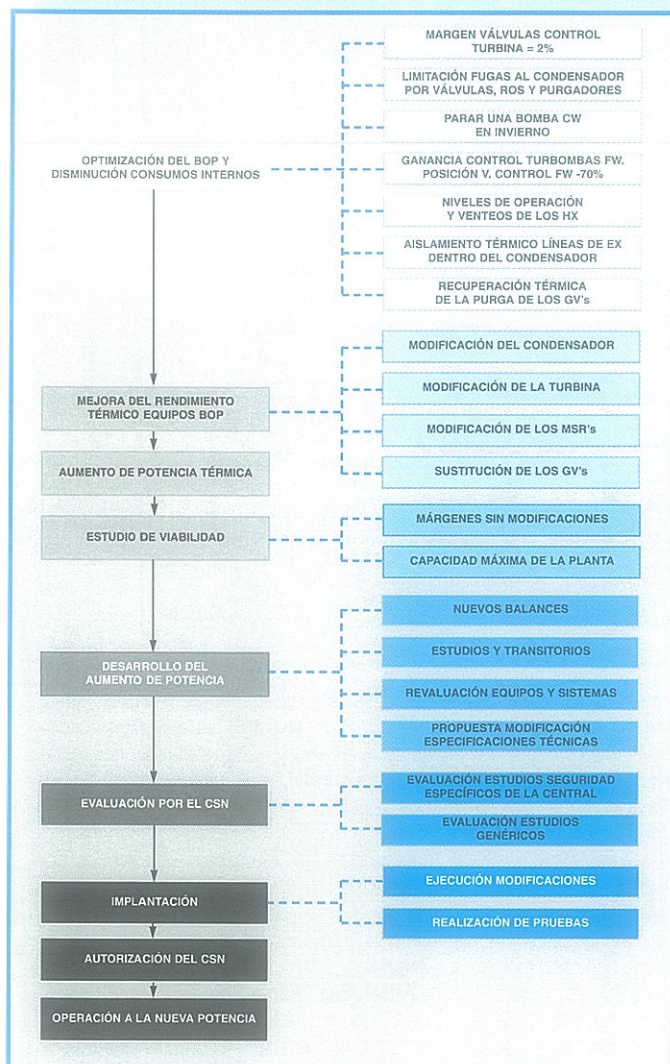
- **Autoridad Reguladora:** Evaluará el programa de aumento de potencia específico de cada central y los correspondientes estudios de seguridad.

Desarrollo del Aumento de Potencia

Realización de los estudios de ingeniería específicos tanto por el Suministrador Principal como por la ingeniería, entre cuyas actividades se incluyen:

- Nuevo balance térmico de vasija.
- Nuevos balances térmicos del ciclo de turbina.
- Análisis del impacto sobre combustible.
- Análisis de transitorios en contención.
- Análisis de accidentes de pérdida de refrigerante, rotura de tuberías (LOCA).
- Análisis radiológico para determinación de las consecuencias radiológicas al exterior.
- Evaluación del impacto sobre cualificación ambiental.
- Revaluación completa de los análisis de los sistemas NSSS, (Sistemas de Evacuación de Calor Residual, Sistema de Inyección, Sistema de Enfriamiento de Núcleo, Capacidad del Sumidero Final de Calor, etc. ...).
- Revaluación completa de los sistemas del ciclo y sus equipos.
- Revaluación de la capacidad del foco frío (río, lago, torres).

F IV- Etapas aumento de potencia



- Revaluación de los sistemas eléctricos con consideración especial en el generador.
- Revaluación de los sistemas de control y modificación de posibles puntos de tarado.
- Revaluación de los sistemas auxiliares, entre las que se incluyen los sistemas de refrigeración de componentes, sistemas de HVAC y el resto de sistemas de la central.
- Elaboración de las especificaciones de los nuevos equipos o modificaciones de los existentes.
- Desarrollo de la ingeniería de las modificaciones de planta, puntos de tarado, modificaciones de sistemas y propuesta de modificación de Especificaciones Técnicas de Funcionamiento.
- Solicitud al CSN del aumento de potencia específico.

Implantación del Aumento de Potencia

Una vez evaluado por el CSN y concedida la correspondiente autorización, se abordará la última etapa consistente en la implantación de:

- Modificaciones de planta, que se deban realizar para sustitución de equipos u otros cam-

bios necesarios.

- Realización de las pruebas nucleares, eléctricas y de rendimiento, solicitándose la autorización de operación a la nueva potencia al CSN e implantación de las nuevas Especificaciones Técnicas de Funcionamiento.

Particularidades del Aumento de Potencia

El aumento de potencia térmica según se trate de un reactor BWR o PWR tiene unas particularidades derivadas de su propio principio de funcionamiento.

En una central BWR y en función del Mapa de Operación aplicable, el incremento de potencia se lleva a cabo aumentando básicamente el caudal a través del núcleo, incrementando para ello el caudal de recirculación de operación normal. Este incremento no requiere generalmente el modificar el caudal máximo de recirculación licenciado.

Asociado al aumento de potencia en ocasiones es necesario elevar ligeramente la presión en la cabeza de la vasija, a fin de tener un margen adecuado en las válvulas de control de turbina. El resto de los parámetros básicos obtenidos del Balance Térmico (Figura III), caudales de vapor y agua de alimentación, se incrementan en prácticamente la misma proporción que la potencia del reactor.

Para una central PWR el incremento de potencia, al existir un caudal fijo en el primario se tiene que llevar a cabo aumentando la diferencia de temperaturas entre las ramas frías y calientes.

CONCLUSIONES

- Los beneficios que se derivan de un programa de aumento de potencia no son sólo de rentabilidad económica, sino que constituyen una puesta a punto del proyecto de la instalación con la consiguiente actualización y revisión en profundidad.

Es así mismo un revitalizador para el conjunto de las organizaciones participantes, suministradores, ingenierías, operación, mantenimiento e incluso de Autoridades Reguladoras que eva-

luarán y en su caso aprobarán el aumento de potencia.

- Un programa de aumento de potencia debe ser amplio en sus planteamientos y aunque los objetivos cercanos de incremento puedan ser inferiores a los máximos analizados por el suministrador principal, no deberán comprometerse posibles futuros incrementos, de tal forma que una implantación del aumento de potencia por escalones es una medida a considerar, siendo la práctica habitual en un gran número de centrales en el mundo.



Emilio CASADO FLORES es Ingeniero Industrial por la ETSII de Madrid, año 1972.

Trabaja para Empresarios Agrupados desde 1974.

De 1972 a 1974 trabajó en el campo del refinado del petróleo y desde 1974 en el campo nuclear.

Ha sido Jefe de Proyecto Mecánico en el Safety Evaluation Program de C.N. José Cabrera y actualmente es Jefe de Proyecto Mecánico de C.N. Almaraz.



Alejandro MERINO TEILLET es Ingeniero Industrial por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid (ETSII-UPM). Trabaja para Empresarios Agrupados desde 1981, habiendo participado entre otros en el desarrollo de la Ingeniería Mecánica y de Sistemas de los Proyectos de C.N. Cofrentes, C.N. Valdecaballeros, Servidumbres de los Bancos de Control EPC, ISF y EAP para Ariane 5 y Proyecto de Mecanización de Empresarios Agrupados. Desde 1999 es Jefe de Proyecto Mecánico para C.N. Cofrentes