



Francisco VERDERA ROSELL es Ingeniero Industrial por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona (1974) y Diplomado en Ingeniería Nuclear por el Instituto de Estudios Nucleares (1975). En 1974 ingresa en ENHER, siendo responsable del Grupo Nuclear y Combustible de la Jefatura Técnica en el proyecto CN Vandellós II, cargo que ocupó hasta septiembre de 1986, fecha en la que pasó a llevar la Jefatura de la Ingeniería de Apoyo a la Explotación.



Antonio BRUNET ICART, Ingeniero Industrial por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona, con la Especialidad Técnicas Energéticas y Diplomado en Tecnología del Petróleo y Petroquímica. Ingresa en 1971 en Cross, S. A., en el Departamento de Desarrollos, interviniendo en el Diseño y Puesta en Marcha de plantas de disolventes clorados y abonos complejos. En 1975 se incorpora en ENHER para el proyecto de Vandellós II, desplazándose a USA para el diseño de la Ingeniería Básica. Durante la fase de desarrollo fue el responsable del Diseño Mecánico de la Central. En el período 1986-88 se responsabilizó de la Ingeniería de Apoyo a la Puesta en Marcha. En la actualidad es el responsable del Soporte Técnico en Central y de la Ingeniería de Sistemas dentro de los Servicios Técnicos

DISEÑO Y COMPORTAMIENTO DE LOS SISTEMAS

F. VERDERA - A. BRUNET

Vandellós II tiene como central de referencia a Ascó II, siendo las modificaciones que se han desarrollado en el proyecto de Vandellós II las siguientes:

- Mayor potencia térmica aproximadamente 4%.
- Modelo de bombas del primario de Vandellós 100 D en vez de 93 D de Ascó.
- Generadores de vapor modelo F en

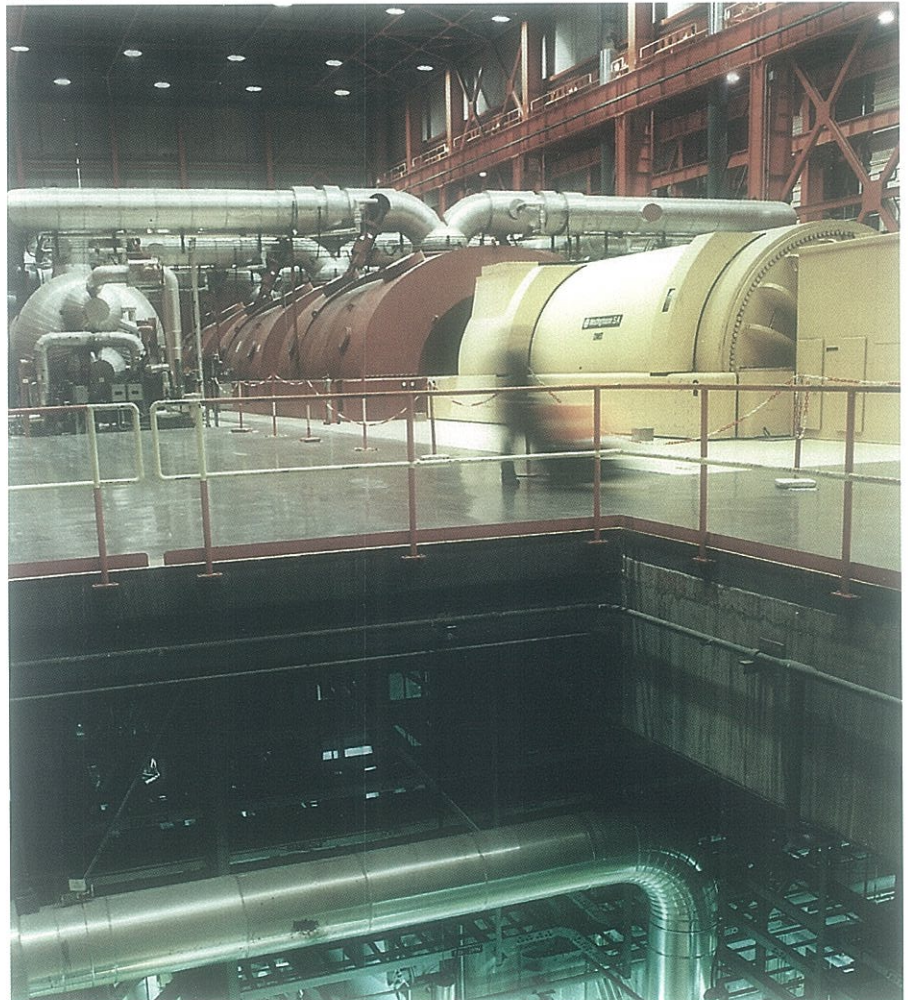
vez del modelo D.

- Sistema de ordenador integrado que soporta:

- Sistema de vigilancia de parámetros de seguridad (SPDS).
- Sistema de indicación de estados inoperables.

- Centro de Apoyo Técnico.
- Indicación de nivel de la vasija.
- Diseño sísmico y ambiental siguiendo la IEEE-323/74 y IEEE-344/75.

Turbinas



- Evaluación de riesgo realizados en paralelo con el diseño.

- Sismo dos sobre uno.
- Efecto chorro y efecto látigo.
- Inundaciones.
- Fuego.

Todo ello completado y documentado mediante paseos (walk downs).

- Capacidad de llegar a la Parada Fría mediante sistemas de seguridad.

- Aplicación del criterio de fuga antes de rotura en las tuberías del primario.

- Eliminación del tanque de inyección de boro. En el BOP, las modificaciones más importantes son:

- Eliminación del cobre del secundario.
- Condensador con tubos de titanio con doble placa presurizada con agua desmineralizada.

- Purga de los Generadores de Vapor (3,7%) con recuperación térmica, filtro electromagnético y lechos catiónicos y aniónicos, retornando el agua al condensador.

- Sistema de agua de circulación con 6 bombas (8 m³/seg. cada una) interconectadas, pudiendo trabajar con 4, 5 y 6 bombas.

- Separadores de humedad de alta eficacia en el escape de la turbina de Alta Presión.

- Minimización del consumo de agua en el secundario para evitar la entrada de contaminantes, reciclando todas las purgas de los sistemas (filtrando y disionizándolos). La degasificación se realiza justo antes de entrar en los tan-

ques de aporte del primario y del condensado.

- Edificio de tratamiento de desechos radiactivos (sólidos, líquidos y gases de almacenamiento) separado del Bloque de Producción.

El presente artículo se centrará en el análisis después de 5 años de funcionamiento de las modificaciones que más han incidido en los resultados operativos de la central.

INTRODUCCION

Vandellós inició el diseño con un secundario típico de los años 70, que consistía básicamente (ver Fig. II) en una turbina de alta presión, dos recalentadores/separadores de humedad (MSR's) con el separador de humedad (Chevrans) de acero al carbono y el recalentador de cupro níquel aleado, una turbina con tres cuerpos de baja presión, un condensador de tubos de Cu/Ni 90-10 de un solo paso, cuatro calentadores de baja presión en cada uno de los tres trenes en paralelo y dos calentadores de alta presión en cada uno de los dos trenes en paralelo, todos con tubos de inoxidable.

La experiencia de otras centrales y el inicio de la problemática del "dentting" nos llevó a un cambio radical en la concepción de los materiales, por lo que se decidieron los siguientes cambios:

- Condensador con tubos de titanio y doble placa presurizada con agua desmineralizada, siendo la placa tubular en contacto con el agua de mar de bronce-aluminio. Se diseñó aplicando la concepción del condensador "cero fugas".

- Mantener los calentadores tanto de alta como de baja con tubos de inoxidable.

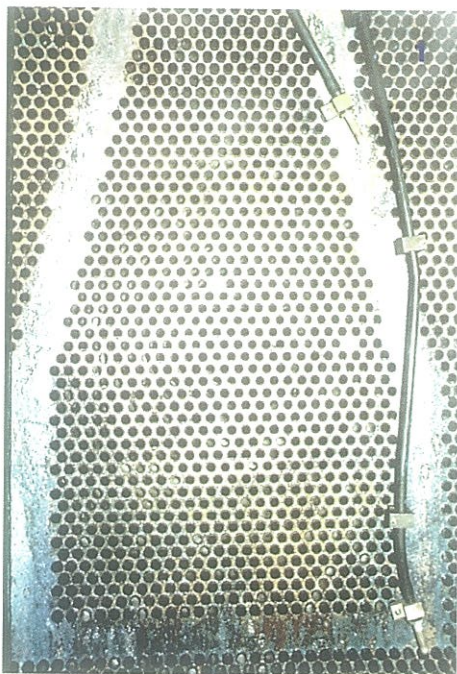
- Cambio del material de los tubos de los recalentadores a inoxidable ferrítico.

- Cambio de los Generadores de Vapor del modelo D al modelo F con los tubos de Inconel 600 con tratamiento térmico.

También se mejoró la capacidad de drenaje de los separadores de humedad internos al Generador de Vapor.

- Se decidió la no instalación de desmineralización del condensado apoyándose en el diseño de un condensador "cero fugas" y al mismo tiempo se aumentó la capacidad de la purga de los Generadores de Vapor del 1% a un 3,7%, reciclandose la energía a un nivel de 160 °C y reciclandose al condensador el agua, previo tratamiento de la misma mediante filtro electromagnético y resinas intercambiadoras de iones.

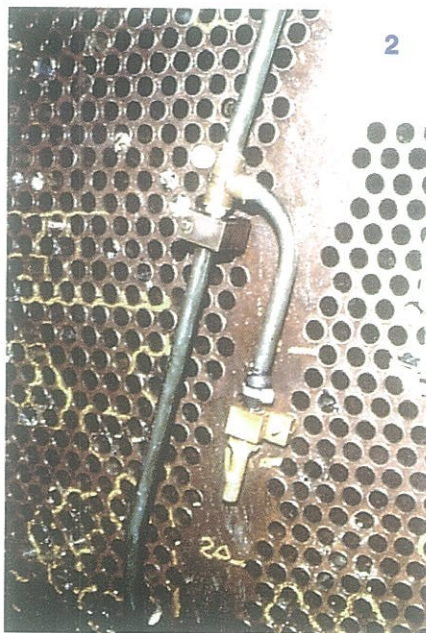
Posteriormente a los cambios anteriores empezó a surgir toda la problemática de la erosión-corrosión, ante este fenómeno, Vandellós optó por instalar unos separadores de alta eficacia en



FI 1 y 2- Placa del condensador y electrodos de referencia de la protección catódica.

3 - Emisores. Anodos de titanio platinado.

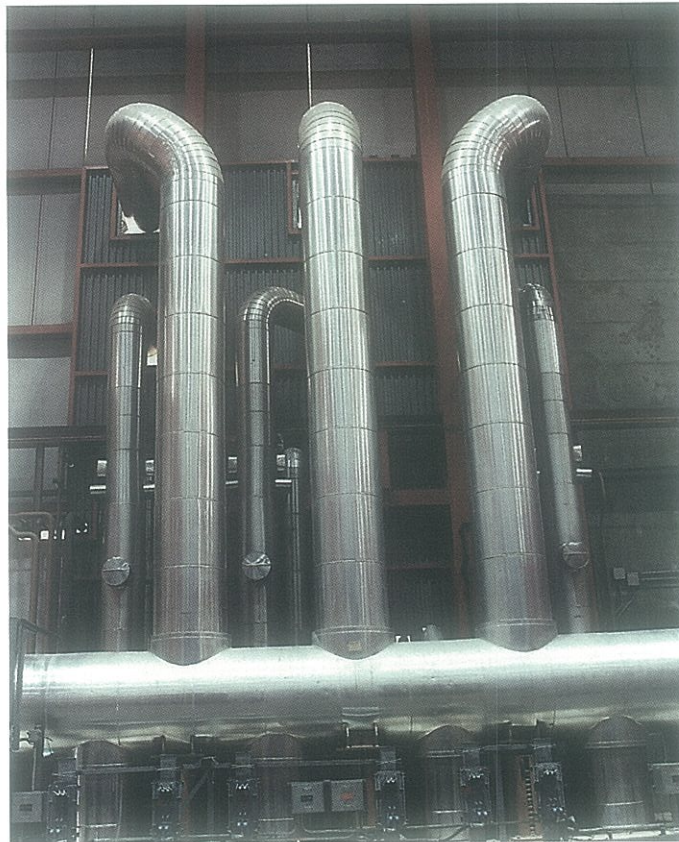
4 - Lado vapor del condensador. Instalación de pinzas antivibratorias.



el escape de la turbina de alta presión, a fin de reducir a un nivel inferior al 1% la humedad residual en el vapor que pasa por las tuberías de conexión de la turbina de alta con los MSR's ("Cross-Under"). Esta decisión permitía no tener que cambiar ni el material del "Cross-Under" ni el material de los Chevrons de los MSR, que han permanecido de acero al carbono. Al mismo tiempo, teniendo en cuenta la separación de humedad conseguida de forma combinada en este nuevo separador y los separadores de Chevrons ya existentes, se preveía aumentar en unos 7 Mw eléctricos la potencia bruta.

Asimismo para poder optimizar la potencia eléctrica neta se interconectaron las seis bombas de agua de circulación de forma que se adaptase el caudal de dicho sistema a la temperatura del agua de mar.

En este artículo se analizará la experiencia y resultados obtenidos después de la operación, durante más



Vapor principal y agua de alimentación.

de cinco años, con las modificaciones anteriormente descritas.

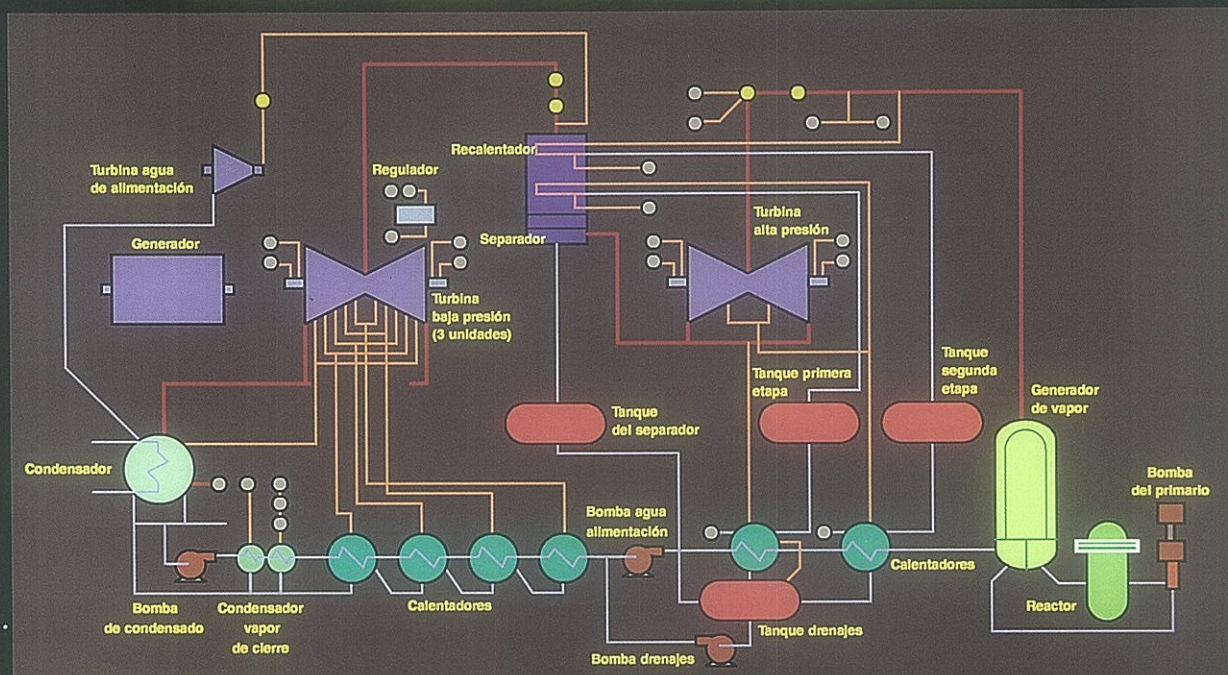
Hay que tener en cuenta que estos cambios fueron introducidos a lo largo del diseño y construcción de la central y algunos de ellos lo fueron en condiciones muy parecidas a las de una central en operación, por lo que entendemos que nuestra experiencia es perfectamente válida para las centrales que estén en esta situación. A continuación pasamos a analizar sucintamente el resultado de las anteriores modificaciones, en el rendimiento térmico de ciclo y en el comportamiento mecánico de los equipos que su introducción quería mejorar.

MEJORAS EN EL RENDIMIENTO TERMICO

El balance garantizado por W era de 982.028 KW, a una presión del vapor a la entrada de las válvulas de control y parada de 934 Psia (65,4 kg/cm²) y 536, 4° F (280,2° C), con un vacío en

FII

BALANCE TERMICO PARA 100% DE CARGA MAXIMA



PERFORMANCE

REACTOR CORE THERMAL OUTPUT	2.775 MWT
REACTOR COOLANT PUMP THERMAL INPUT	10 MWT
NUCLEAR STEAM SUPPLY THERMAL OUTPUT	2.785 MWT
TURBINE GENERATOR OUTPUT	982.028 KW
PLANT AUXILIARY POWER	
NET STATION OUTPUT	
GROSS TURBINE CYCLE HEAT RATE	9.677 BTU/KW HR
NET STATION CYCLE HEAT RATE	

TURBINE NAMEPLATE: 982.028 KW 934 PSIA 536.4° F 2.0 IN. HG. A TC 6 F-44° LSB

GENERATOR NAMEPLATE: 1.092.000 KVA 0.90 PF 21.000 VOLTS 75# H₂

GROSS TURBINE CYCLE HEAT RATE - 9.677 BTU/KWHR

BASED ON W HEATBALANCE AC 284-4.129 OF SEP. 22. 1976

el condensador de 2" Hg (688 mm cda), con cero purga en el Generador de Vapor, un factor de potencia de 0,9 y con una presión de hidrógeno de refrigeración del alternador de 75 Psia (5,25 kg/cm²). El rendimiento térmico bruto resultante del balance garantizaba de 9.677 Btu/Kwh (2.439 Kcal/Kwh).

La repercusión en el rendimiento térmico de las modificaciones realizadas en el secundario es la siguiente:

- Las mejoras introducidas en los separadores de humedad internos al Generador de Vapor han mejorado sustancialmente la humedad del vapor producido por el G.V., pasando de 0,25% a 0,04%, y con aumento de presión en la entrada de las válvulas de admisión de la turbina, que ha pasado de 934 Psia (65,4 kg/cm²) a 967 Psia (67,69 kg/cm²).

Estas modificaciones implican una mejora aproximada del rendimiento, que significa un aumento de 1 Mwe en la potencia bruta.

- Se diseñó el condensador para obtener un vacío de 1,4" Hg (490 mm cda) en las condiciones de temperatura media (16-17° C) del agua de mar en vez de a 2" Hg, ya que a 1,4" Hg se establece teóricamente el equilibrio entre el incremento de la pérdida de carga del vapor al pasar a través de las turbinas y el incremento de potencia producido al disponerse de un mayor salto entálpico. Por este concepto obtenemos un incremento de potencia que depende de la temperatura del agua de

mar, pero que se puede cifrar en un máximo de unos 11 Mwe (ver curvas de comportamiento condensador en la figura III).

- La instalación de los separadores de humedad de alta eficacia en los escapes de la turbina de alta presión mejoran la separación mecánica del agua, pasando de una eficacia del 83,4% a 98,3%, lo que ha representado un incremento en el rendimiento del ciclo de 9 Mwe.

La potencia máxima esperada de la central con estas modificaciones era de: $982 + 1 + 11 + 9 = 1.003$ Mwe.

En febrero de 1992 se realizó una prueba de funcionamiento durante 100 h, lográndose licenciar 1.004 Mw de potencia eléctrica bruta de la central de Vandellós II, lo que representa un rendimiento térmico bruto de 9.465 Btu/Kwh (2.386 Kcal/Kwh).

De lo indicado anteriormente se puede concluir que Vandellós II, con la incorporación de las anteriores modificaciones en su ciclo básico, ha obtenido un beneficio de unos 20 Mwe por mejoras, única y exclusivamente, en el rendimiento del secundario.

Creemos interesante recalcar que en líneas generales la incorporación de mejoras en el ciclo térmico tienen un carácter sinérgico, o sea, que a su vez representan mejoras en la operabilidad y buen funcionamiento de los sistemas.

COMPORTAMIENTO MECANICO DE LOS EQUIPOS

Separadores de humedad de alta eficacia

Los separadores de humedad de alta eficacia, instalados en el escape de la turbina de alta presión, después de más de cinco años de operación, no han presentado ningún tipo de problema. Las tuberías del "Cross-Under" y los Chevrons de los MSR de W presentan muy ligeros signos de erosión-corrosión de magnitud despreciable, simples manchas más brillantes que el resto de la tubería. Este resultado nos ha permitido el pasar a inspeccionar estas tuberías y equipos con una frecuencia quinquenal. Hasta la cuarta recarga (abril 1992) se inspeccionaron anualmente.

Condensador

El condensador de Vandellós fue uno de los primeros condensadores diseñados con tubos de titanio, por lo

que no se aprovecharon todas las ventajas del titanio; de hecho se diseñó en muchos conceptos como un condensador de Cu/Ni. Asimismo en el momento del diseño no se disponía de grandes placas bimetálicas de titanio, por lo que la placa tubular se diseñó con bronce-aluminio.

Posteriormente se introdujo el concepto de diseño "cero fugas". En este momento (1976) se empezó a discutir la no conveniencia de la instalación de desmineralizadores de condensado por su riesgo potencial de entrada de contaminantes químicos a los G.V. y por el alto coste de instalación.

La concepción de condensador "cero fugas" era la contrapartida a los defensores de la desmineralización del condensador, que partían de la base de que los condensadores siempre fugaban.

El concepto cero fugas implicó:

- Tubos de un material inerte al agua de mar (titanio).

- Placa tubular soldada o doble placa.

- Interconexión de cajas de condensador con posibilidad de aislar parte del mismo en operación para detectar y tapar la posible fuga.

- Instalación de sistemas de detección que permiten diferenciar un haz tubular de otro haz tubular del condensador y de esta manera eliminar la fuga aislando el haz.

- Construir el condensador con el máximo cuidado prácticamente como si fuese un equipo clase.

- Incrementar la capacidad de la purga de los Generadores de Vapor de manera de poder manejar una fuga no detectable que en su momento evaluaríamos en 1,5 l/h de agua de mar.

Dado que la distancia entre placas soportes de los tubos del condensador (800 y 930 mm) no cumplían con las recomendaciones posteriores de EPRI, para evitar la vibración fluidelástica de los mismos, procedimos a realizar un estudio de presiones dinámicas en el condensador en distintas situaciones de funcionamiento del mismo.

De este estudio se concluyó con la necesidad de arriostrar los tubos periféricos superiores de los haces tubulares, mediante pinzas antivibratorias situadas en la mitad de la luz entre placas soporte, las cuales se instalaron con posterioridad a la Operación Comercial (figura I.4). Estas pinzas nos permiten mantener el criterio de aislamiento individual de un haz del condensador, sin tener que reducir carga de la central.

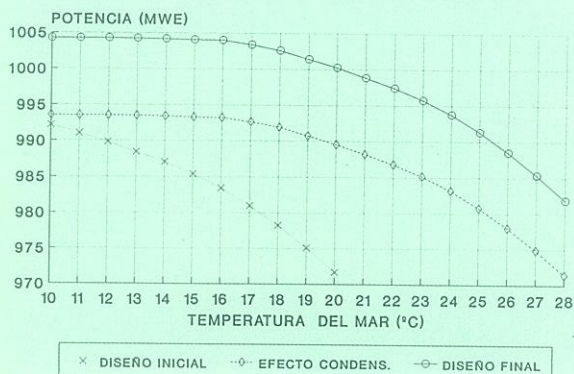
En enero del 92, debido a una fuerte avalancha de algas, se nos bloquearon las rejillas captadoras de bolas del Tap-prog en posición cerrada, con una elevada pérdida de carga a través de ellas por su taponamiento por algas. Se tuvo que aislar, una a una, las cajas de agua para permitir la apertura de dichas rejillas. Después de la inspección realizada, en la parte exterior de los tubos del condensador, no se detectó ningún indicio de que hubieran sufrido

TI EROSION-CORROSION Áreas medidas en cada recarga

Nº de Recarga	Fecha	Elementos medidos	Duración ciclo	Horas acumuladas
PSI	feb. 87	275	—	—
1ª Recarga	agosto 89	230	11.100	11.100
2ª Recarga	abril 90	222	5.500	16.600
3ª Recarga	mayo 91	94	7.745	24.345
4ª Recarga	abril 92	110	7.500	31.845
5ª Recarga	abril 93	100	7.600	39.445

F III

CURVAS TEORICAS DE POTENCIA EN FUNCION DE LA TEMPERATURA DEL MAR



ninguna vibración, por lo que podemos asumir que las pinzas antivibratorias trabajaron correctamente.

El resultado operativo del condensador durante estos años de funcionamiento puede concluirse en lo siguiente:

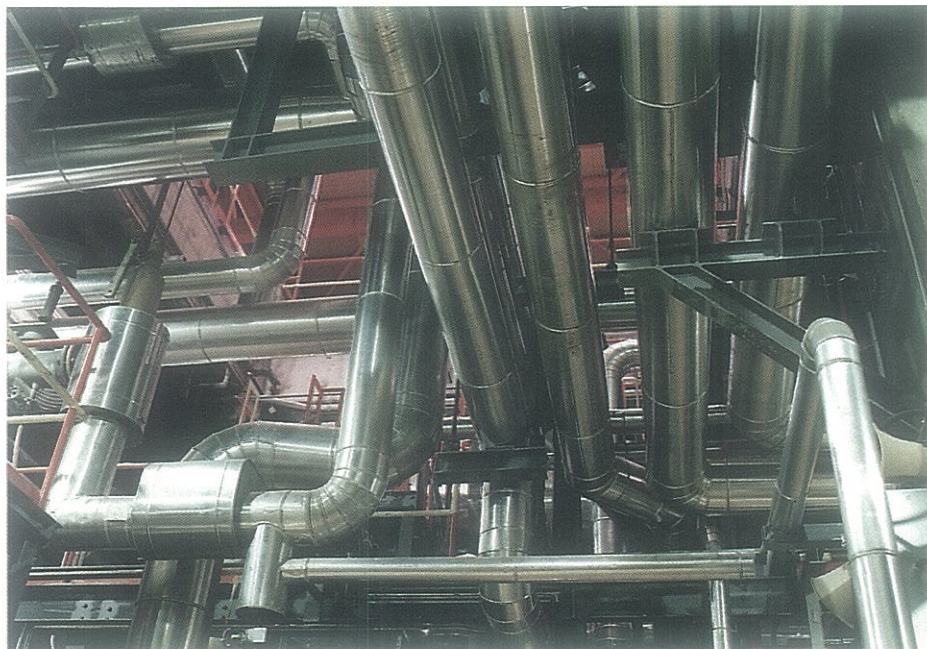
- No se ha experimentado ninguna fuga.
- El nivel de desgasificación es muy elevado, alcanzándose niveles menores de 2 ppb de oxígeno, en el agua de condensado.
- En las inspecciones, lado exterior de los tubos, efectuadas hasta ahora, no se ha observado ninguna erosión en los mismos (este problema lo han tenido en Ringhals y EDF).
- Durante la puesta en marcha de la central se observó un acoplamiento galvánico entre el titanio y la placa tubular, que provocó una desaluminación de la misma, formándose cráteres de profundidad de hasta 10 mm. Instalamos una protección catódica por corriente impresa que ha detenido completamente el proceso de corrosión anterior (figura I.1 a I.3).
- Los niveles de vacío máximo alcanzados son de unos 400 mm cda.

Generadores de Vapor

La conjunción de trabajar en el secundario a elevados pH ($9,6 \pm 9,8$) y una elevada purga (>1%) ha conllevado que el volumen medio de lodos extraídos de los Generadores de Vapor, durante el Sludge Lancing, sea pequeño (del orden de los 40 kg/GV-año, en esta última recarga ha sido de 20 kg/GV-año).

Debido a poderse recuperar térmicamente la purga de los Generadores de Vapor, la pérdida energética que implica la elevada capacidad de la misma (1% nominal y 3,7% máxima) es perfectamente asumible, siendo teóricamente de 1,3 Mw y 4,8 Mw, respectivamente; sin embargo, estos valores teóricos no concuerdan con los resultados reales en planta, ya que variando el caudal de la purga no se observa prácticamente ninguna variación de potencia en la central, por lo que se deduce que se producen pequeñas variaciones en la dinámica de los Generadores de Vapor que compensan la pérdida indicada en los cálculos teóricos.

Hasta el momento no se ha observado ningún fenómeno de estrés-corrosión; sólo hemos tenido pérdidas de espesor por erosión en la zona de contacto de las barras antivibratorias, situadas en la parte superior del haz tubular. Dado que este fenómeno no tendía a estabilizarse, se tomó la decisión de sustituirlas por otro tipo de barras expandibles, las cuales se instalaron durante la cuarta recarga. La experiencia de este tipo de barras antivibratorias, en las centrales que las tienen instaladas, permite esperar una detención total del fenómeno. La inspección realizada en la quinta recarga (abril 1993) ha confirmado plenamente estas expectativas, ya que no se ha encontrado ningún indicio adicional de erosión.



Turbinas

En la cuarta recarga se inspeccionaron la turbina de alta presión y un cuerpo de la turbina de baja presión.

El estado del rotor y estator de la turbina de alta presión era muy bueno, no presentando ningún signo de erosión-corrosión, ni grietas producidas por estrés-corrosión. Durante el ciclo 91-92 teníamos una fuga de vapor en el cierre lado generador. Como consecuencia se procedió a sustituir dichos cierres por otros de acero inoxidable, eliminando la fuga en el ciclo 92-93.

El estado del rotor y estator de la turbina de baja presión era asimismo correcto. De todas maneras, y a pesar de este buen resultado, si tenemos en cuenta las estadísticas de centrales en funcionamiento, no se puede asegurar que no existirán problemas en un próximo futuro. Sin embargo, dado el aspecto de los alabes y del rotor, creemos que el fenómeno de estrés-corrosión cracking en los discos de máximo riesgo, si seguimos con el mismo nivel de control químico del secundario, caso de que apareciera, lo sería a bastante más largo plazo.

Tuberías

Desde el inicio de la operación de la central se está realizando un seguimiento de la evolución del espesor de las tuberías, en algunas áreas seleccionadas del secundario, tanto en zonas de régimen monofásico como en bifásico. Para ello, antes del arranque, se determinaron, teniendo en cuenta los factores de riesgo de erosión-corrosión (alta velocidad, pH relativo bajo, $130^\circ\text{C} < 180^\circ\text{C}$, flujo mixto, etc.) y mediante la fórmula de Keller, las áreas de máximo riesgo.

Al conjunto de áreas así seleccionadas se le añadieron unas cuantas, que sin ser de máximo riesgo fueran representativas de otras condiciones termohidráulicas, a fin de que sirvieran de referencia, así como de contraste de la teoría.

De los resultados obtenidos se observa en general sólo una ligera tasa de erosión-corrosión, que si bien nos ha permitido eliminar un número importante de áreas a seguir, así como el establecer una mayor periodicidad en las mediciones, nos obliga a mantener la vigilancia de forma sistemática en las áreas de mayor riesgo.

Existe una concentración de la problemática de la erosión-corrosión, en la parte monofásica del sistema de bombas de drenaje y aspiración e impulsión de las bombas de agua de alimentación a G.V., que posiblemente nos obligará, a medio plazo, a cambiar los codos y tes de estos tramos a material P-22.

En la tabla I se puede observar la evolución del número de áreas medidas en cada recarga.

CONCLUSION

A la vista de lo expuesto se puede concluir que en Vandellós II, tanto la operación de la central, como el diseño de los sistemas y de los equipos fundamentales que los componen, es muy satisfactorio, por lo que no preveemos a corto y medio plazo grandes cambios en los mismos.

Para poder mantener las condiciones del diseño se requiere un seguimiento y control exhaustivo de los equipos y sistemas básicos de la central, reforzando al máximo la interrelación entre operación e ingeniería, a fin de analizar adecuadamente las tendencias de comportamiento, así como las experiencias operativas propias y ajenas que permitan introducir en la central todas aquellas modificaciones y mejoras que de forma integrada lograrán que Vandellós siga manteniendo sus niveles actuales.