



Carlos FERNANDEZ PALOMERO es Físico por la Universidad de Madrid y graduado en Ingeniería Nuclear por la ISNSE por la Universidad de Chicago (USA). Se inició en el campo profesional en 1954, en la JEN, trabajando en detección de radiaciones, ingeniería de reactores experimentales, dirigiendo el proyecto y construcción de los reactores experimentales ARGOS y ARBI. Posteriormente trabaja en el proyecto DON y a principios de 1967 entra en HIFRENSA, para hacerse cargo de la contratación y formación de personal de explotación. En 1973 es nombrado Director adjunto y en 1977 Director de la Central.



Joaquín PEREZ PALLARES es Ingeniero Industrial por la ETSIIB desde el año 1966, especialidad Técnicas Energéticas. Ingresó como Ingeniero en la Sociedad HIFRENSA en 1967 y desde entonces ocupó cargos en los Servicios de Operación y Control Técnico. Actualmente es el responsable de la Jefatura del Servicio de Control Técnico.

COMPORTAMIENTO DEL GENERADOR DE VAPOR

C. FERNANDEZ – J. PEREZ

INTRODUCCION

El reactor de la Central Nuclear de Vandellós I (CNV) dispone de un generador de vapor (GV) monotubular a circulación forzada, construido con aceros blandos (poco aleados), al igual que el de la central de referencia SLA 1 y 2, en Francia, o como también pudiera ser el caso de las centrales del Reino Unido de Oldbury y Wylfa. En todos estos generadores de vapor se ha manifestado un fenómeno de erosión-corrosión.

La erosión-corrosión es un deterioro al que está sometido el tipo de acero al que nos hemos referido, por estar expuesto a regímenes turbulentos acuosos, en el intervalo de temperatura entre 100 y 250 °C.

En el caso de CNV este fenómeno comenzó a aparecer en el año 1975, cuando se llevaban alrededor de ochocientos días equivalentes a plena potencia (DEPP). Entre los años 1975 a 1980 comienza a estudiarse intensamente este tipo de fenómenos, ya que es al principio de la década de los setenta cuando en todas las instalaciones mencionadas tienen lugar los primeros efectos constatados.

El fenómeno de erosión-corrosión (e-c), comienza por una oxidación a consecuencia del oxígeno libre en el agua en contacto con el metal base.



Con pH suficientemente alto se produce $\text{Fe}(\text{OH})_2$, el cual a temperaturas por encima de los 60 ó 70 da lugar a



La capa de magnetita es una protección para el posterior seguimiento de la oxidación; en contrapartida, puede generarse una disolución de la capa de protección en agua con bajo índice de pH por fenómenos de turbulencia, que se favorece por penetración de pequeñas gotas de agua en la protección de óxido. Esto tiene lugar fundamentalmente allí donde existe una gran velo-

cidad (zona alta de vaporización —el máximo suele suceder con títulos del 70 % en vapor—). El contenido de alcalinizante en el agua depende de la sustancia empleada a través del coeficiente de partición.

La no existencia de metales nobles, como pudiera ser el Cr, en la aleación de acero, impide la formación de óxidos mucho más estables y de baja solubilidad.

Al desaparecer la capa de magnetita por disolución, el fenómeno de oxidación continúa en el metal base.

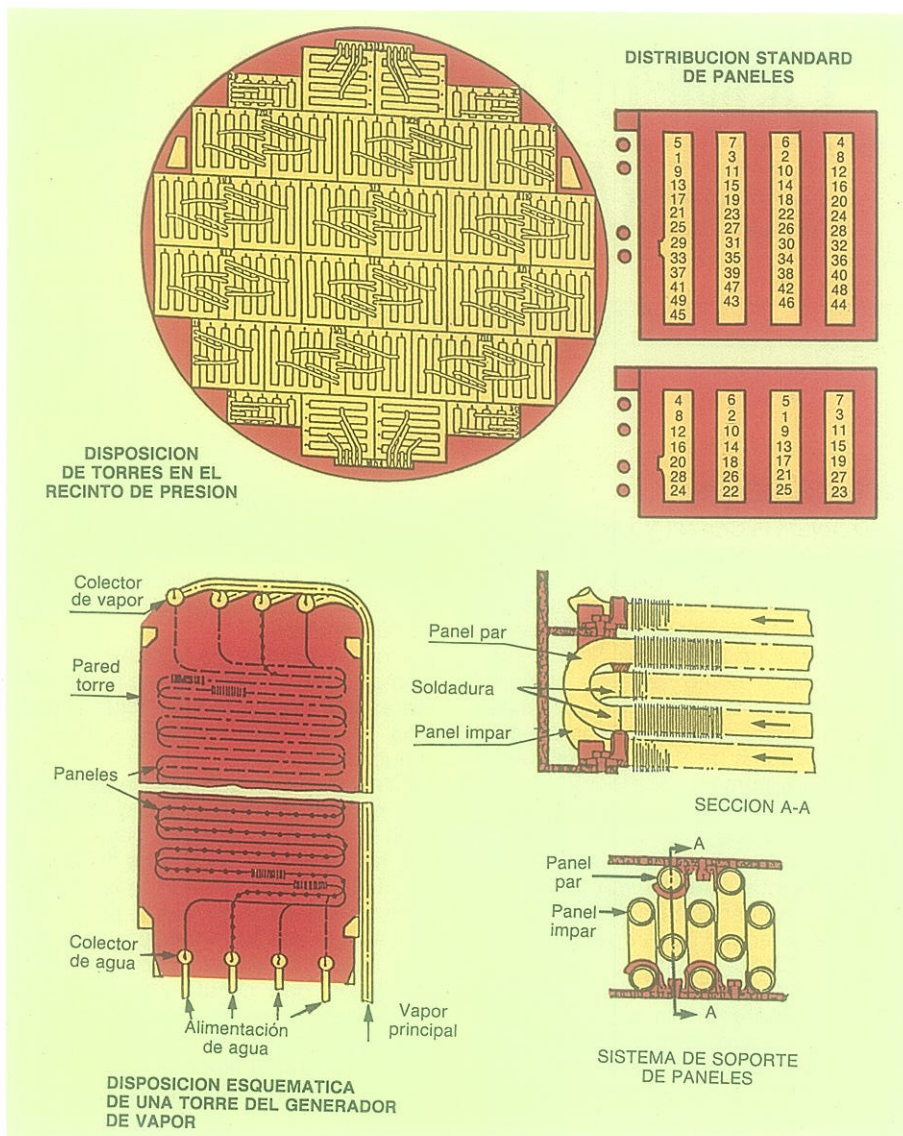
No hay que confundir este fenómeno con la cavitación, en donde la desaparición de la capa de óxido tiene lugar por simple efecto mecánico, pero éste requiere velocidades mucho mayores del fluido que circula por los tubos. Los fenómenos de erosión-corrosión dependen, pues, de factores como:

- Velocidad del fluido.
- Cambios de dirección del mismo con fuerte impacto en la protección de óxido (tubos en U, o tubos a 90°).
- Temperatura del fluido, ya que la disolución de la magnetita tiene lugar su máximo entre 170 a 200 °C.
- Contenido aniónico del fluido (Cl^- , $\text{SO}_4^{=}$).
- Material de la aleación, con ausencia de metales nobles, como Cr, Ni, Mo...
- Grado de alcalinización del agua que impacta sobre las capas de óxido ya formadas.

La imposibilidad de acceder a los puntos o zonas donde se producen los fallos o fugas, o el de proceder al cambio parcial o total de componentes o materiales, hacen que todo el esfuerzo para paliar la influencia de fenómenos de erosión-corrosión se dirijan en el siguiente cuádruple sentido:

- variación de condiciones dinámicas,
- variación de zonas de influencia,
- mejora en la calidad del fluido,
- utilización de los alcalinizantes más idóneos.

Para valorar la influencia que producen los cambios que paulatinamente se han



F I Disposición esquemática de una torre del generador de vapor

ido incorporando a la instalación, únicamente disponemos de dos métodos: uno, obviamente, es el seguimiento del ritmo de fugas frente DEPP; el segundo es la observación de desgastes en ciertas zonas de torres mediante procedimientos radiogammagráficos. Si bien en todas las instalaciones pueden surgir algunas diferencias de comportamiento entre los diferentes circuitos, en el caso de CNV este fenómeno ha sido muy significativo y posteriormente será comentado.

ESQUEMA DESCRIPTIVO DEL GENERADOR DE VAPOR Y CIRCUITO SECUNDARIO

La totalidad del generador de vapor de la CNV está constituido por 1.386 paneles o serpentines distribuidos en cuatro circuitos independientes, cada uno de los cuales constituye de por sí

un generador de vapor (GV). Cada circuito tiene una única alimentación en agua y dos salidas de vapor; dos de los cuatro GV alimentan una turbina de los dos generadores principales existentes, y cada GV alimenta también una turbina auxiliar ligada a una soplante (circulación de CO₂ interno en el recinto de presión).

Cada panel está compuesto de 85 tubos horizontales aleteados de dos metros de longitud aproximadamente, terminados en codos 180°, que conectan cada tubo al siguiente.

El tubo está construido de acero al carbono con la composición que se indica en la tabla I.

T I

C 0,12 - 0,18 %	P < 0,04 %
S < 0,04 %	Co < 0,03 %
Si 0,1 - 0,36 %	Mn 0,47 - 0,73 %
Cu < 0,15 %	S + P < 0,07 %

El diámetro interno del tubo es de 30 mm y el espesor de pared de 3,8 mm (Figura I).

El comportamiento de paneles frente a los efectos de la e-c depende de la localización de las soldaduras entre tubos horizontales, en el sentido de que éstas se encuentren antes o después en la dirección del fluido. Las soldaduras se hicieron eléctricamente y el perfil aproximado de las mismas aparece en la Figura II.

Dentro del recinto de presión los paneles del GV se distribuyen en 30 torres, 26 con 49 paneles (3 × 12 + 1 × 13), y 4 con 28 paneles (4 × 7).

Dependiendo de su localización en cada torre, los paneles se dividen en dos categorías, paneles pares (en los que coincide el tener la soldadura antes del codo en el sentido de circulación del fluido) PP, y paneles impares PI (la soldadura después del codo); en cada GV el número de PP y PI que existe es el que se muestra en la tabla II.

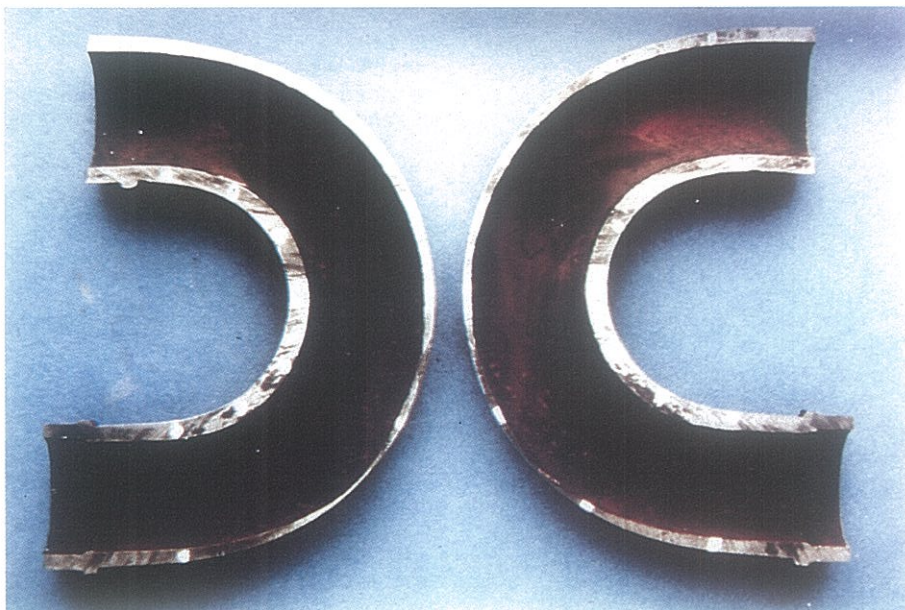
T II

GV	PP	PI	TP
1	180	166	346
2	172	175	347
3	144	203	347
4	184	163	346
Total	680	706	1.386

Cada GV se alimenta con 575 Th⁻¹ a plena carga; desde cada condensador principal, el agua pasa por un tratamiento continuo al 100 %, de resinas aniónicas catiónicas en proporción volumétrica 2:1. Desde el tratamiento el agua se dirige a un depósito de desgasificación y entra en cada generador de vapor mediante dos bombas de alimentación en paralelo. El vapor sale del GV a 390 °C y entre 33 y 35 bars. La evaporación tiene lugar entre 240 a 250°. El 15 % del vapor se deriva hacia las turbosoplantes (circuitos auxiliares) y el resto a las turbinas principales asociadas con cada generador eléctrico de producción bruta 250 MW.

REPARTICION DE FUGAS DE CAMBIADOR

La repartición de las fugas de cambiador por número de paneles aislados queda reflejada en las tablas siguientes, en donde en la primera aparecen cronológicamente hasta finales del mes de abril 1987, y en la segunda por GV. Todas ellas corresponden a paneles pares con la excepción de una, que tuvo lugar en el cuarto de GV 2, torre 14, que se presentó en un panel impar.



F II Formación de magnetita en la parte interna de los tubos del generador de vapor (en la ilustración, micrografía de un codo de torre 28, cuarto 2).

T III						
Año	Fuga por GV				Total fugas	DEPP
	1	2	3	4		
1975	4	3	0	0	7	961
1976	3	1	0	3	7	1.249
1977	0	1	1	0	2	1.535
1978	0	4 (*)	0	0	4	1.816
1979	0	2	1	0	3	2.089
1980	1	3	0	1	5	2.379
1981	4	8	2	0	14	2.643
1982	2	6	1	0	9	2.910
1983	4	5	1	1	11	3.180
1984	6	3	2	1	12	3.437
1985	2	2	1	1	6	3.703
1986	1	1	0	0	2	3.974
1987					0	(**)

(*) Una corresponde a PI.

(**) Finales de abril 87.

T IV				
Fugas por GV				Total fugas
1	2	3	4	
27	39	9	7	82

En la figura III aparece la distribución de fugas por GV.

En la figura IV aparece una representación de un modelo estadístico de Weibull en donde se hace una distribución en porcentaje para paneles pares de los cuartos 1, 2, 3 y 4 por separado frente DEPP, que nos permite estimar el número de fugas previsible a un determinado momento en los dos semigeneradores de vapor.

El porcentaje de paneles eliminados por fuga sobre el total de 1.386, hasta

el momento es de 5,92 %; en los GV 1 y 2 (teniendo sólo en cuenta a los PP) es de 18,7 % y en GV 3 y 4, el 4,87 %. Otro procedimiento que nos ha permitido evaluar la evolución del efecto de la e-c sobre los codos de paneles (el único lugar donde se ha manifestado) es el de observar en paradas programadas de la planta, el espesor de los mismos mediante procedimientos gammagráficos. No hay en general una fácil accesibilidad a dichos codos excepto en casos excepcionales en algunas torres.

Desde 1976 se aprovechó el acceso natural que existe entre la parte baja de torres a la parte alta, que coincide con una pared de la torre 27. Sobre esta pared se procedió a hacer una serie de ventanas (12) que permitirían ir

observando los espesores de codos. Posteriormente se crearon otros accesos a las torres 28 y 19 (todas ellas torres periféricas del cambiador) y pudimos ampliar nuestra zona de observación. Además, en la torre 19, se llegó a acceder a un codo dañado que previamente había sido aislado su panel correspondiente. Este codo fue objeto de un estudio específico en el Central Electricity Research Laboratory (CEGB) de Surrey (R. U.). Esto nos permitió observar 172 codos correspondientes a 32 PP y 30 PI. En la figura 5 aparecen cronológicamente los resultados obtenidos en la torre 27, en donde cada valor corresponde al valor medio de espesor de codos, en tanto por ciento, para cada nivel transversal de la torre.

Se constatan dos comportamientos muy diferenciados de los GV:

Los GV 1 y 2 han sufrido un daño que a "grosso modo" puede valorarse un factor cuatro superior, al 3 y 4 (18,7 % frente a 4,8 de PP).

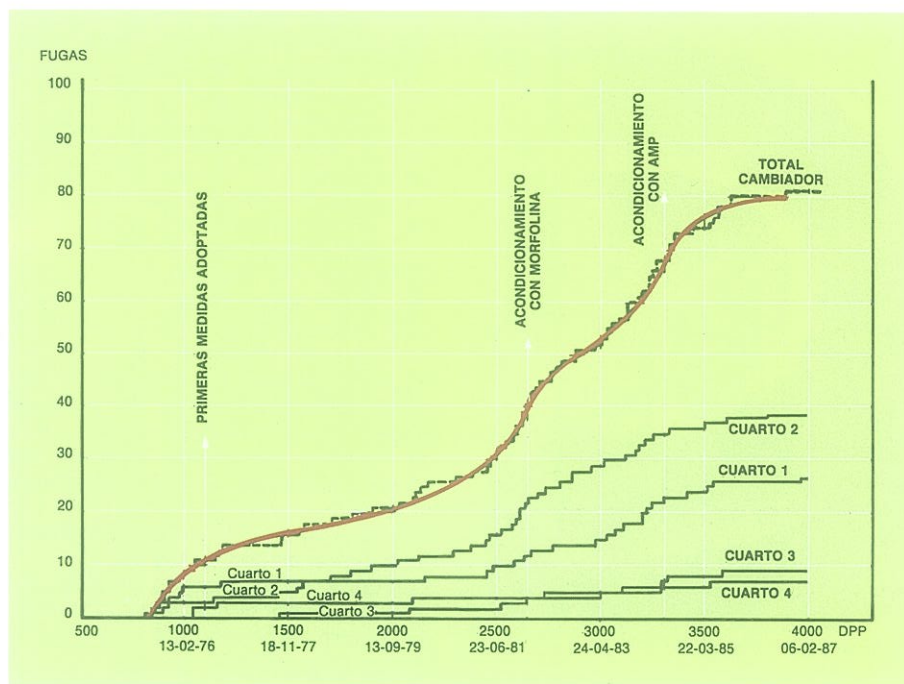
Las torres cuyos paneles fueron fabricados por un suministrador dieron lugar a número de fallos aproximadamente el doble de otro fabricante (16,5 % frente a 8,2 % de PP).

El primer efecto corresponde a una causa atribuible a la química del agua durante los cinco primeros años de funcionamiento (no detectable al principio a través de los procedimientos de medida en servicio) que permiten suponer una fuga intermitente de Cl^- (pese al tratamiento continuo) del orden de 10 a 15 ppb durante períodos relativamente largos. A ello contribuyó un paso de agua contaminada con agua de mar que llegaba a los pozos que contienen las envolturas de las bombas de extracción del grupo 1 (alimentado por GV 1 y 2, y cuya situación está más próxima al mar) y que en el año 1977 se observaron con poros u orificios a través de los cuales penetraba el agente contaminante (el mayor número de fugas en el condensador del GP1 puede haber también contribuido).

En cuanto al segundo comportamiento, se supone que en el proceso de unión por soldadura, los ajustes de máquina no fueron idénticos para los dos fabricantes, dando lugar a desiguales resaltes o defectos internos en la superficie interior del tubo anterior o posterior al codo (PP, PI).

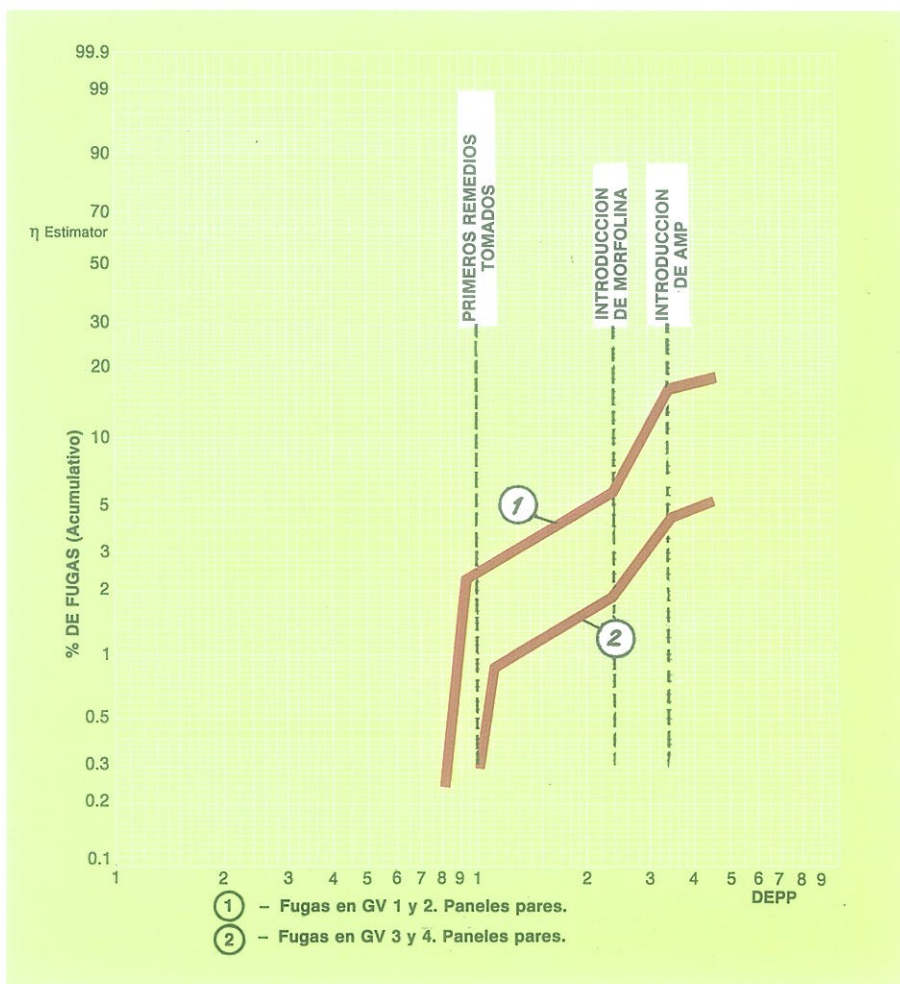
COMO SON Y COMO SE DETECTAN LAS FUGAS DEL CAMBIADOR

La fuga aparece en la parte inferior del codo de unión entre dos cañas o tubos horizontales, a un ángulo entre 40 a 45°, coincidiendo con el eje del tubo inferior. El orificio en el codo suele ser de pequeño diámetro, entre 0,5 a 1



F III Evolución de fugas en cada cuarto de cambiador en función de los días equivalentes a plena potencia

F IV Representación de Weibull



mm, y el espesor de material alrededor del orificio es de aproximadamente 0,1 mm. En la parte interna del tubo se observa un fino depósito de magnetita en el semi-codo inferior, característico de los fenómenos de e-c de aspecto escalopeado negruzco, que se debilita en la zona de impacto de las gotas de agua.

La fuga empieza a manifestarse a través de un aumento de humedad en el fluido de circulación del circuito primario (CO_2) que se encuentra en vigilancia permanente en funcionamiento (valor normal de humedad: < 50 vpm). Por disminución de presión en los cuatro GV, se consigue invertir la fuga, y por presencia de CO_2 en agua a través de medidas de pH puede evidenciarse en qué generador se encuentra. Un posterior análisis de torre por torre, nos permite aislar del lado agua y vapor el cuarto de torre implicado. Por último, en una parada programada y a través de un procedimiento no destructivo, ideado y desarrollado en CNV, podemos conocer el panel incriminado y se hace una determinación de la altura a la cual se ha producido la fuga. La mayor parte de las fugas se encuentran en la antigua zona de vaporización y corresponden al desarrollo del fenómeno anterior al año 1977.

MEDIDAS TOMADAS PARA PALIAR LOS EFECTOS DE LA E-C

A partir del momento de la detección de las primeras fugas, y los consiguientes estudios realizados, se fueron adoptando las medidas correctoras siguientes:

1976. Limitación del caudal de agua al 85 % del valor nominal, lo que, consecuentemente, supuso un descenso de potencia de la central en un 15 %. Aumento de la inyección de amoníaco hasta alcanzar un pH, primero de 9,3 y posteriormente 9,4 y 9,5.

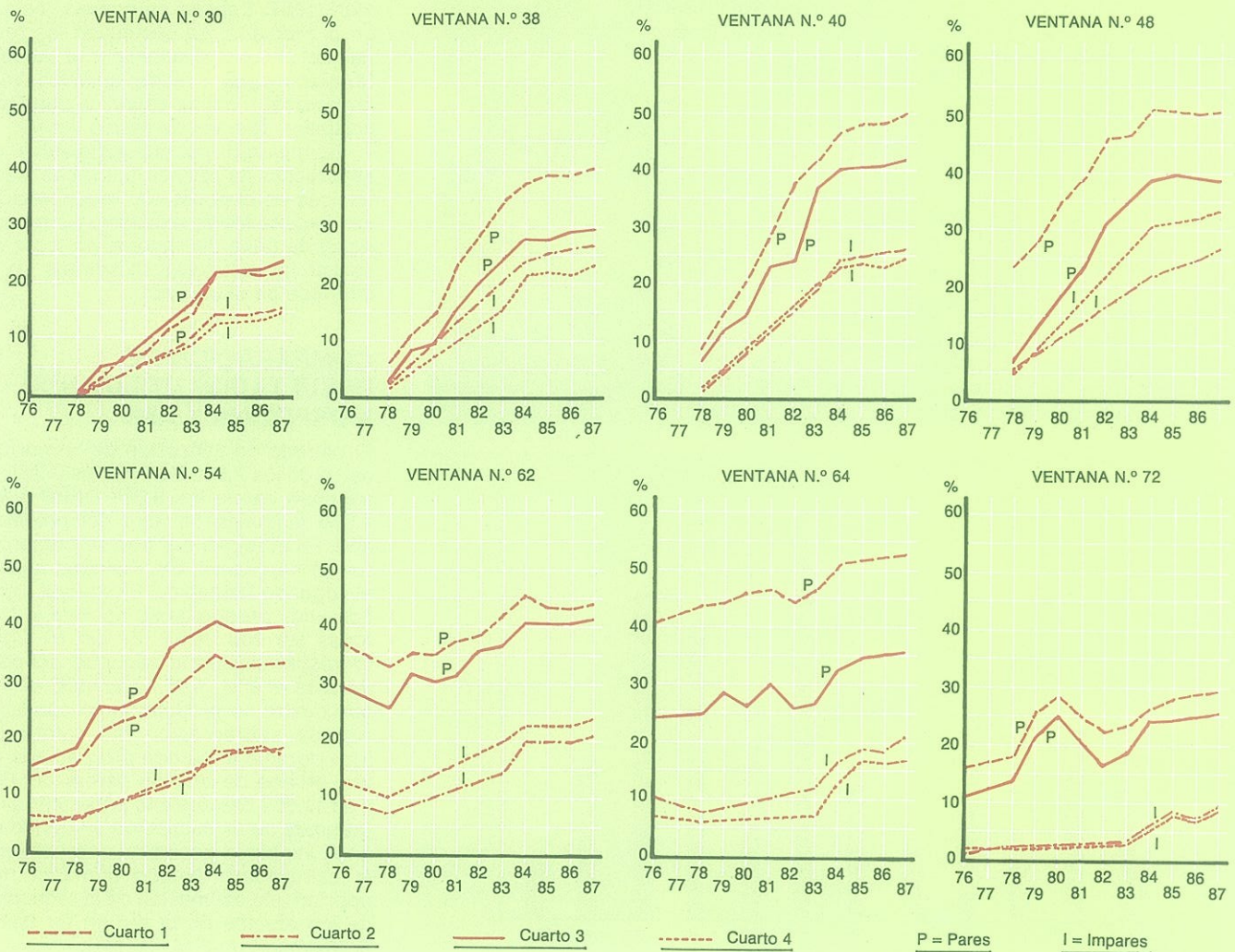
Aumento de la presión de vapor, salida GV de 33 a 34-35 bars, para aumentar la densidad y así disminuir su velocidad.

Aumentar la circulación de gas para la misma potencia, con lo cual aumenta la temperatura de CO_2 salida cambiador, aumenta la temperatura de calentamiento del agua, empezando antes la vaporización, y así se procede a trabajar, para máximo desgaste (título vapor: 70 %), en una zona inferior del cambiador.

1981. Cambio de alcalinizante en los GV 1 y 2 (diciembre): se sustituye el amoníaco por morfina.

1982. Cambio a morfina en los GV, 3 y 4. Todos los circuitos principales y auxiliares pasan a acondicionarse con morfina, con una dosificación en prin-

TORRE 27



F V Evolución de la pared de los codos en el cambiador principal (Desgaste porcentual medido en la zona de erosión)

cipio de 5 ppm, y posteriormente de 6 a 7 ppm.

Modificar la alimentación de PP y PI, con la misma alimentación (idéntica disminución global: 15 %), pero distribuyéndola de forma que en los primeros la circulación sea de un 80 %, y en los segundos de un 90 %, con lo cual aumentábamos la penalización en los paneles que tenían más desgaste y contrariamente en los de menos desgaste. Esto pudo hacerse a nivel de los diafragmas ajustables existentes en cada una de las entradas de cada GV en cada torre.

1984. Después de la parada programada, a comienzos de agosto, se sustituyó la morfina por el AMP (Amino-Metil-Propanol), dosificando en principio a unos 7 ppm.

1985. Se aumenta la dosificación de AMP hasta 8 a 9 ppm.

En la parada programada se procedió

a hacer un equilibrado de gas para las diferentes torres del GV, de acuerdo con la capacidad de intercambio existente; en los diez años de constatación del fenómeno, se habían producido sensibles deficiencias entre torres, de forma que algunas tenían hasta 6 a 7 paneles fuera de servicio, en tanto que otros tenían uno o ningún papel aislado (defectos soldadura de paneles).

Después de la parada programada se eliminó totalmente la hidracina.

1986. A comienzos de este año aumentamos la dosis de AMP hasta 10 ppm.

PRINCIPALES MEJORAS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO CONTINUO

1984/1985. Se hizo una paulatina sustitución de la resina aniónica en todos

los filtros de los circuitos principales, por otra nueva del mismo tipo.

– En los circuitos auxiliares se instaló el "triobed" (sistema Duolite), con lo cual se sustituyeron ambas resinas (aniónica/catiónica) y se introdujo resina inerte.

– Se eliminó el proceso de contralavado de resinas a la finalización del ciclo normal, con lo que se redujo el tiempo de utilización de filtros (circuito principal). Este proceso de contralavado se había introducido en 1981-1982.

– En el tratamiento continuo, normalmente se trabaja con dos filtros y el tercero está en espera para sustituir a uno de los dos en funcionamiento, una vez agotado. Actualmente, el que está en espera se pone en servicio, con lo cual se pasa a trabajar con tres filtros en lugar de dos, salvo sólo en los intervalos de transferencias hacia el poste de regeneración. Esto hace mejorar

T V

	Salida lecho	Alimenta- ción GV	Vapor	Conden- sador
Condensador-Cation 20 °C (μs/cm)	-	0,11	0,4	0,3
Condensador espec. 20 °C (μs/cm)	0,08	11,0	-	-
pH 20 °C	-	9,9	-	9,9
Fe (total) (ppb)	-	0,5	0,5	-
Cu (ppb)	0,5	-	-	3 a 10
* Na ⁺ (ppb)	0,5	-	-	0,5
Si (ppb)	1	-	-	1
Cl ⁻ (ppb)	0,5	0,5	0,5	0,5
SO ₄ ²⁻ (ppb)	1,5	1,5	1	1
** Acidos orgánicos (ppb)	-	-	10	10
O ₂ (ppb)	-	4	-	15

* Con lechos saturados (AMP) da valores entre 1 y 4 ppb.

** Los ácidos orgánicos detectados son: propiónico, fórmico e isobutírico. El valor de la tabla corresponde al total. Durante el arranque de la planta puede alcanzarse valores de 2 ppm.

la dinámica de intercambio y por ende aumentar la capacidad de retención iónica.

1986/1987. Estudio de nuevas resinas en el mercado: se sustituyen las resinas del circuito principal por el sistema "Ambersep", con resina aniónica "macroporosa" y resina catiónica tipo "gel" (inclusión además de resina inerte).

- Se mejoran los procedimientos de separación de resinas aniónicas y catiónicas en el puesto de regeneración, con levantamiento exclusivo y continuo desde la base del tanque, en lugar de utilizar los difusores existentes en la interfase de separación.

COMPARACION DE RESULTADOS UTILIZANDO MORFOLINA Y AMP

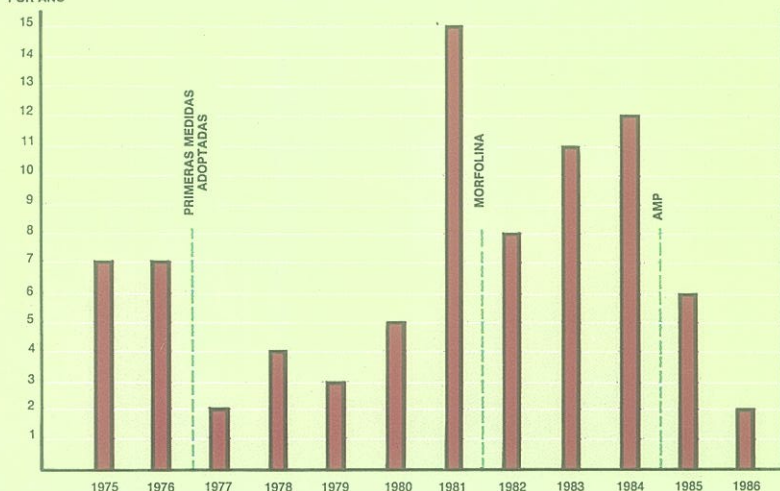
El periodo de utilización de la morfolina va de los 2.630 DEPP a los 3.321; el segundo desde los 3.321 DEPP a los 4.066 a finales de abril del presente año. En el primer periodo se presentaron 31 fugas en el GV, mientras que en el segundo ha habido 10, lo cual significa unas proporciones de 4.48 y 1.34 fugas por 100 DEPP. En las 10 fugas correspondientes al segundo periodo, durante el año 1985 hubo seis, de las que cuatro se produjeron en condiciones de sobrepresión del cambiador (dos durante la parada programada en una prueba de presión parcial del GV, y otras dos durante una parada no programada de la instalación en donde en unos instantes quedó en sobrepresión el cambiador). Ambos números nos aportan una estimación de la reducción de los efectos de la e-c en un factor aproximado de 3 (4.48:1.34).

En la figura VI aparece el número de fugas por año: puede verse que hay siempre una reducción, cada vez que se introdujeron cambios en la instalación, pero el más significativo tuvo lugar después de la incorporación del AMP.

CONDENSADORES PRINCIPALES

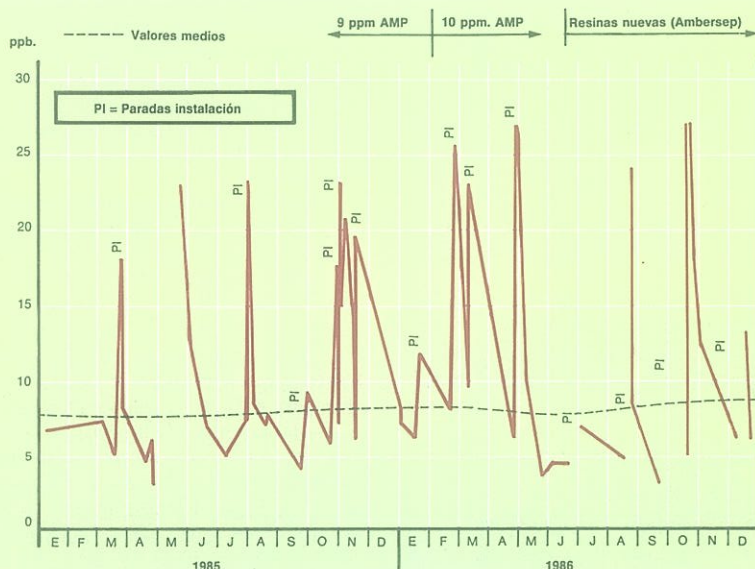
Otro importante efecto que ha tenido lugar en la incorporación del AMP se refiere a la corrosión en los tubos de los condensadores de las turbinas principales en la zona de extracción de gases incondensables. El tubo es de una aleación Cu, Zn, Al 76 %, 22 %, 2 %. Era habitual, en los tubos de esta zona, ir observando un paulatino deterioro, que no sólo se manifestaba a través del estudio de espesores mediante corrientes inducidas (inspección anual), sino a través de la eliminación sistemática de tubos entre dos paradas programadas; se ha pasado de un ritmo de 30 a 50, a dos o tres por año, o

FUGAS
POR AÑO



F VI Paneles aislados

F VII Contenido de Cu en el agua de extracción de los condensadores



incluso algo menor. No obstante, los ácidos orgánicos procedentes de cierta descomposición del AMP afectan a los tubos de manera más uniforme y general, de forma que en los análisis de agua de condensados se encuentra Cu en valores de 5 a 6 ppb (el efecto de disolución mediante ácidos orgánicos débiles tiene presencia en la totalidad del vapor).

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

El comportamiento del circuito agua-vapor desde la incorporación del AMP se recoge en diferentes tablas y gráficos, que tienen en cuenta las mejoras introducidas en cuanto a las resinas últimamente utilizadas, los procedimientos de regeneración de las mismas, y la variación dinámica de intercambio, al disminuir la velocidad de circulación de agua.

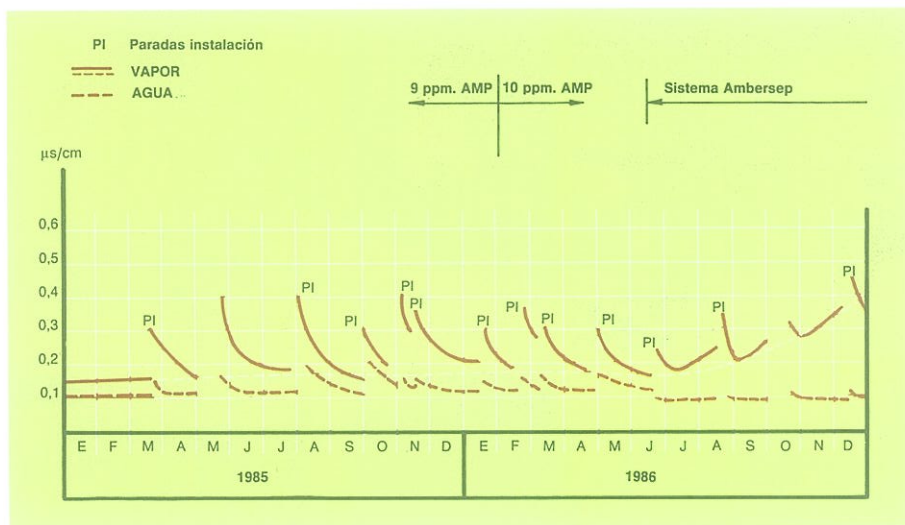
En la tabla V se dan diferentes valores de conductividad catiónica y específica en distintas partes del circuito agua-vapor, el pH del agua de entrada (dosificación AMP - 10 ppm) y diferentes contenidos iónicos típicos.

En la figura VII se encuentran los valores de Cu típicos para diferentes dosificaciones de AMP. Después de una parada, la concentración de Cu, durante unos dos días, puede alcanzar valores hasta de 15 a 20 ppb.

En la figura VIII aparece la conductividad catiónica del agua de alimentación, generalmente por debajo de $0,1 \mu\text{Scm}^{-1}$, desde junio 1986 y el vapor que ha ido gradualmente subiendo desde $0,2 \mu\text{Scm}^{-1}$ hasta un valor, actualmente muy estable, de aproximadamente $0,4 \mu\text{Scm}^{-1}$.

CONCLUSIONES

- La erosión-corrosión, que es un fenómeno inherente a aceros blandos sometidos a los efectos dinámicos de fluidos acuosos, comenzó tan pronto como la planta empezó a operar, y produjo efectos de desaparición de material superior del 70 %, en alrededor de unos 300 ó 400 codos, de los 11.600 existentes.
- La disminución en el número de fugas desde 1977 se debió al cambio de zona de vaporización. El desgaste siguió, aunque a menor ritmo, del orden de $0,2 \text{ mm.año}^{-1}$.
- La incorporación de la morfolina (inyectada a los máximos valores compatibles con el funcionamiento de la planta de tratamiento continuo) en sustitución del amoníaco, disminuyó momentáneamente el ritmo de la e-c, pero posteriormente volvió a au-



F VIII Conductividad catiónica; agua alimentación y salida de vapor de cambiador, 1985-1986.

mentar (el desarrollo del efecto de la e-c es lineal sobre el material, pero no igual en cada punto; su repercusión en fugas.año⁻¹ es de carácter exponencial).

- La introducción del AMP ha reducido muy significativamente el ritmo de fugas, y los desgastes constatados en codos a través de las inspecciones gammagráficas.
- Otra serie de medidas como uniformización de temperaturas de gas, las mejoras introducidas en el tratamiento continuo del agua de extracción y la nueva dinámica de funcionamiento de filtros, también han contribuido a paliar los efectos de la erosión-corrosión.

REFERENCIAS

- Informes Cambiador de Calor CNV - 9860 VA 252 - 272 - 283 - 295 - 309 - 322 - 338 - 348 - 355 - 362. 9866 VA 210.
- An evaluation of two-phase erosion-corrosion damage at Vandellos Nuclear Power Plant. C. F. Palomero - Pla - K. Garbett. Water chemistry 3. BNES. (1983).
- The examination o 180° return bend taken from the two-phase erosion-corrosion zone at CNV - K. Garbett - Sept. 1984 TPRD/L/2698/R84.
- Steam generator of Vandellos Nuclear Power Plant: Operational experience. Wintertur. Jan. 1987 - C. F. Palomero - Sulzer - AIEA meeting.

F IX Ejemplo de zona de erosión

