

DEFECTOS DE «FRETTING»: INSPECCIONES Y DESARROLLO DEL PROGRAMA CI-10

C. N. ALMARAZ

José HERVAS

Desde que se detectó, por primera vez, en la central nuclear sueca de Ringhals el problema de vibraciones existentes en los generadores de vapor modelo D3 de Westinghouse, hasta el pasado mes de junio en que se finalizó la implantación de la modificación requerida, la C. N. de Almaraz realizó cuatro inspecciones de los tubos de sus generadores de vapor para verificar que a la potencia limitada que se estaba operando no se produjeron degradaciones adicionales en dichos tubos. Paralelamente, al detectarse el problema, C. N. de Almaraz y Ascó encargaron a **TECNATOM** llevar adelante un programa de desarrollo (programa CI-10) con el fin de optimizar la caracterización de los defectos de «fretting».



José HERVAS GARCÍA, Ingeniero Naval, ingresó en TECNATOM en junio de 1976, actuando, desde esta fecha, como responsable del Grupo de Corrientes Inducidas de la Sección de Explotación, cuyo objetivo principal es la puesta a punto de las técnicas, métodos y programas de trabajo relativos a las inspecciones en servicio de los tubos de los generadores de vapor, condensadores y cambiadores de calor. En la actualidad es, asimismo, el representante de las empresas eléctricas españolas en el subcomité de ensayos no destructivos del Steam Generator Owners Group II (EPRI).

INTRODUCCION

En noviembre de 1981, y después de haber estado operando la central unos seis meses, la C. N. de Almaraz paró el reactor para realizar una inspección por corrientes inducidas de los tubos de sus generadores de vapor (GV). Esta decisión fue tomada como medida preventiva, habida cuenta la degradación que se había detectado en la central nuclear sueca de Ringhals, ya que sus generadores de vapor son del mismo modelo que los de la C. N. de Almaraz.

GENERADORES DE VAPOR MODELO D3 DE WESTINGHOUSE

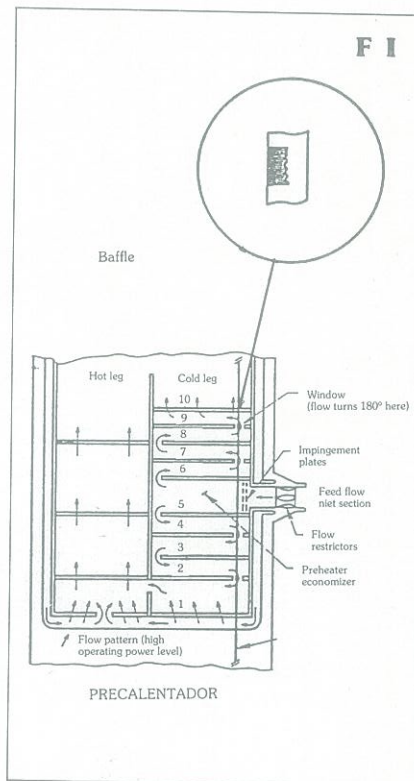
La serie D de los generadores de vapor de Westinghouse se caracteriza por tener la tobera de agua de alimentación principal situada en la parte inferior del generador de vapor y por disponer de un recalentador a la entrada del agua alimentación (ver fig. 1).

DEFECTOS POR FRETTING

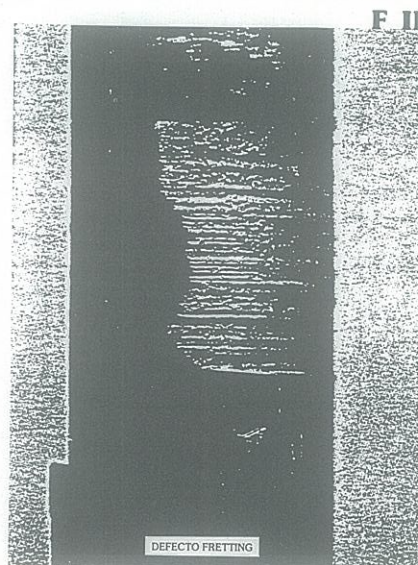
Los resultados de la inspección realizada en noviembre de 1981 en la C. N. de Almaraz confirmaron que se trataba de un defecto genérico del proyecto de la serie D3 de los generadores de vapor de Westinghouse, consistente en la vibración inducida en los tubos próximos a la placa deflectora en la zona de precalentamiento. La vibración da lugar al rozamiento de los tubos con las placas soporte (fenómeno del fretting), produciéndose el adelgazamiento de la pared de dichos tubos. En la fig. 2 se muestra un ejemplo de este tipo de defecto.

INSPECCIONES REALIZADAS EN LOS TUBOS DE LOS GENERADORES DE VAPOR DE LA C. N. DE ALMARAZ

Desde la primera inspección en noviembre de 1981 hasta la última efectuada el pasado mes de mayo, antes de realizar los trabajos de modificación del precalentador, la C. N. de Almaraz realizó las inspecciones a continuación indicadas, con objeto de verificar que a los niveles de potencia a los que estaba operando, la degradación adicional que se pudiera producir en los tubos (en el supuesto de que existiese) se mantenía por debajo de los valores de crecimiento calculados analíticamente y utilizados para el cálculo del límite de taponado de los tubos.

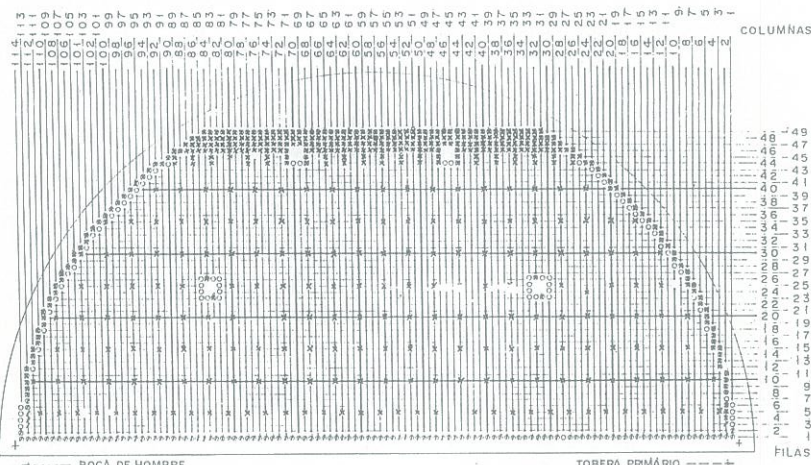


Fecha inspección	Horas operación (aprox.) desde la anterior inspec.	Potencia operación (aprox.)
Nov/81	—	100 %
Mar/82	1.500	50 %
Jul/82	2.000	50 %
May/83	4.000	50 %



F III

- TUBOS TAPONADOS
- x TUBOS INSPECCIONADOS EN TODA SU LONGITUD
- / TUBOS INSPECCIONADOS RAMA FRÍA



Efectivamente, los resultados de todas las inspecciones confirmaron los términos anteriores.

Además de las inspecciones de los tubos de las filas 49, 48 y 47 de cada generador de vapor (que es donde se localizan los tubos afectados por fretting), en cada inspección se realizaron programas más amplios, con el objeto de detectar en los tubos otros posibles daños, o precursores de futuros daños. En la fig. 3 se muestra un ejemplo del programa (aproximado) que se ha venido realizando en cada inspección para cada generador de vapor.

perspectiva global de cual ha sido la evolución de la técnica de las corrientes inducidas (para el fenómeno del fretting) desde la primera inspección realizada en noviembre de 1981 hasta la fecha, cuales han sido los logros del programa CI-10, dónde se está actualmente y qué se está haciendo.

La aparición del problema del fretting en los tubos de los generadores de vapor modelo D3 trajo, paralelamente, el problema de la caracterización mediante ensayos no destructivos de este tipo de defecto.

INSPECCION NOVIEMBRE 1981

Parece lógico, que el primer paso a poner de relieve, para dar esta perspectiva de evolución, es plantear cual fue la situación que se tenía una vez finalizada la primera inspección en noviembre de

EVOLUCION TECNICA DE LAS INSPECCIONES POR CORRIENTES INDUCIDAS

El objetivo fundamental que se persigue con el presente trabajo es dar una

1981, que se realizó de acuerdo con la técnica multifrecuencia/multiparámetro disponible en aquellos momentos.

Básicamente, el procedimiento empleado fue el siguiente:

Adquisición de datos

FRECUENCIAS Y METODOS

- Canal 1 - 550 KHz (diferencial)
- Canal 2 - 130 KHz (diferencial)
- Canal 3 - 220 KHz (diferencial)
- Canal 4 - 100 KHz (absoluto)

MEZCLAS

- Mezclador superior - (550 + 130) KHz (diferencial)
- Mezclador inferior - (550 + 200) KHz (diferencial)

TAMAÑO DE LAS BOBINAS,
0,59" SF O 0,61" SF
(SIN DISTINCION)

TUBO PATRON - TUBO ASME
(SEGUN FIG. 4)

Evaluación

Se siguió estrictamente el método de la fase, según requiere el código ASME para la información obtenida de acuerdo con el método diferencial.

Conviene aclarar que, una vez definido el procedimiento de inspección, la amplitud de las señales que se obtienen (tanto en el método diferencial como en el absoluto) es principalmente función del volumen de los defectos, además de otras variables, como pueden ser la situación del defecto, en cuanto a si se produce en la superficie interior o exterior y de la morfología del defecto.

Sobre la base, pues, de que los defectos se producen en la superficie exterior y la morfología puede estar bastante definida, se puede establecer que existe una determinada relación entre amplitudes y volúmenes.

Por otro lado, la fase de las señales está principalmente relacionada con la profundidad de los defectos, además de estar influenciada también por otras variables, tales como con la morfología, el propio volumen del defecto, y la situación del defecto en cuanto si se encuentra en la superficie interior o exterior.

Aclarado lo anterior, señalemos cual era el problema que planteaban los datos de la inspección de noviembre de 1981:

- Un gran porcentaje de las indicaciones existentes correspondían a señales con una relación amplitud de la señal/ruido (S/N) muy mala (inferior a 3).
- No existía una correlación lógica entre la fase y la amplitud de las señales. Es decir, para este tipo de defecto, al aumentar la profundidad, el volumen aumenta considerablemente y, por tanto, la fase y amplitud de las señales deben seguir una determinada ley lógica, cosa que no se daba en

F IV

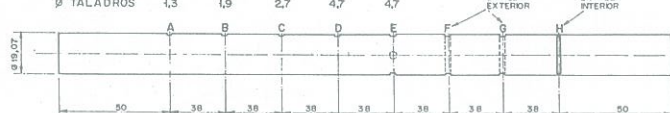
MEDIDA REAL DEFECTOS EN mm

A 1,16 B 0,90 C 0,70 D 0,48 E 0,23 F 0,25 G 0,14 H 0,38

% DE PARED DEFECTOS

100 76 60 41 19 12 12 33

Ø TALADROS 1,3 1,9 2,7 4,7 4,7



ENTALLAS EXTERIORES Fy G,
3,17 mm DE ANCHO.

ENTALLA INTERIOR H
1,69 mm DE ANCHO

NOTA TODOS LOS TALADROS EXTERIORES
SON DE FONDO PLANO.

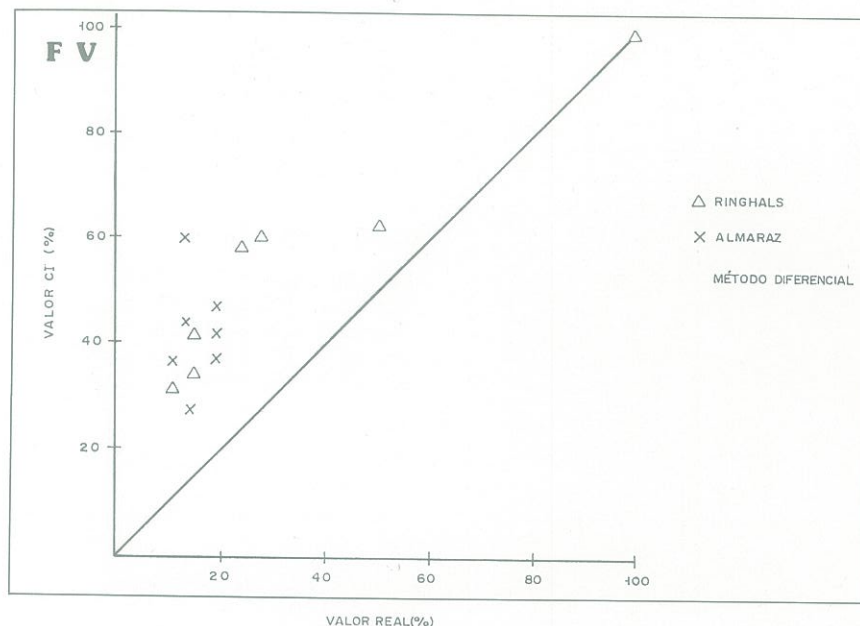
MATERIAL INCONEL 600

ESPESOR NOMINAL 1,09

Nº SERIE I-3

AS BUILT

DIBUJADO	ASME	T-3
COMPROBADO	1	
REVISIÓN	1	
APROBADO	28-4-82	
FECHA	28-4-82	
tecnatom, s.a.		
Nº		
HOJA		
ESCALA		



los registros existentes, en los cuales los defectos de mucha profundidad por su ángulo de fase, presentaban amplitudes muy pequeñas y, por tanto, indicando que se trataba de defectos de poco volumen.

Con objeto de estudiar metalográficamente los defectos y obtener la correlación entre los resultados c.i. de campo y los valores reales de los defectos, se extrajeron dos tubos de los generadores de vapor de la C. N. de Almaraz y otro tanto se hizo en la central sueca de Ringhals.

En la fig. 5 se muestra la correlación obtenida. Los valores reales de la profundidad de los defectos (medidos en laboratorio) están representados en el eje de abscisas y los valores obtenidos por corrientes inducidas en el eje de ordenadas. La gráfica muestra que los resultados obtenidos por corrientes inducidas fueron muy conservadores y que este conservadurismo era mayor para los defectos más pequeños; cosa lógica, ya que para defectos pequeños el volumen es pequeño, la amplitud de la señal debe ser pequeña y la distorsión producida por el ruido es mayor.

La conclusión final de la inspección fue que, debido al ruido existente, la fase de las señales, cuando la relación S/N es mala, está distorsionada caprichosamente y, por tanto, no es representativa de la profundidad de los defectos.

La situación que se planteó fue, que al aplicar estrictamente el método de la fase según establece el código ASME, se taponaron una serie de tubos innecesariamente.

PROGRAMA CI-10

Ante la situación planteada, C. N. de Almaraz y Ascó requirieron de **TECNATOM** que pusiese en marcha un programa de desarrollo encaminado a optimizar la caracterización de los defectos de fretting. Esfuerzos similares se iniciaron en otras centrales afectadas como, por ejemplo, Ringhals (Suecia) y McGuire (USA).

Los objetivos iniciales del programa CI-10 que se fijaron son los siguientes:

- Incrementar la relación señal/ruido.
- Optimizar la evaluación de los defectos.

tos, según el método de la fase (diferencial) y de la amplitud (absoluto).

Definir:

- El defecto mínimo detectable.
- El incremento de degradación mínimo detectable.
- El máximo error a considerar

Dado que las mejoras que se fueron consiguiendo con los distintos programas en desarrollo, de alguna forma se fueron incorporando a los procedimientos de campo, preferimos seguir el razonamiento de la evolución de las inspecciones para posteriormente comentar los logros del programa CI-10

INSPECCION DE MARZO DE 1982

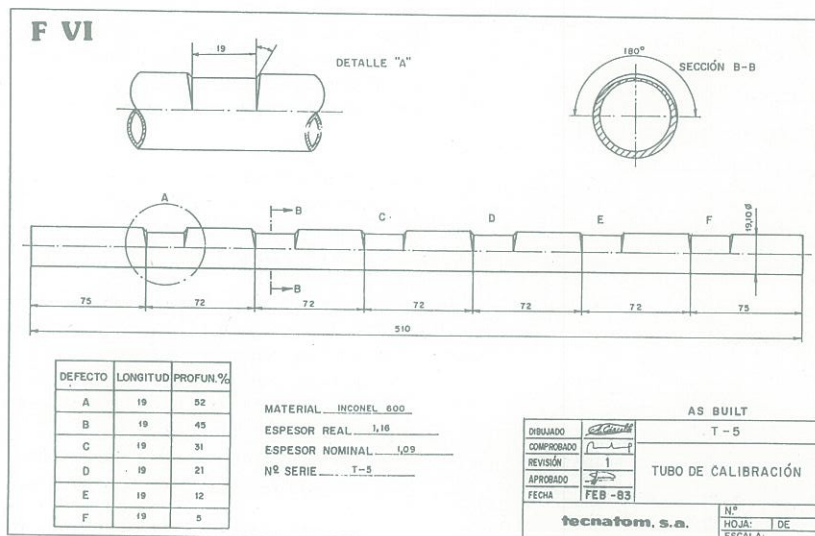
Sabido es, que el uso del método absoluto (método de la amplitud) es recomendado sobre el método diferencial (método de la fase) cuando los defectos que se tratan de evaluar no son defectos puntuales (bruscos), sino más bien defectos que suponen una variación gradual del espesor de pared del tubo (por ejemplo, defectos producidos en tubos de condensador por erosión por choque del vapor o defectos producidos por corrosión generalizada (wastage) en los tubos de los generadores de vapor). En el caso de los defectos de fretting, se está en una situación intermedia, en la que los defectos empiezan (y/o terminan) con una variación brusca, existiendo una longitud intermedia de variación más o menos gradual (dependiendo de cada caso), por lo que, en principio, ambos métodos podrían ser recomendables. Ahora bien, dado que el método absoluto lo que establece es una correlación de volúmenes entre el patrón de calibración y los defectos a evaluar, el éxito del empleo de este método en función de la similitud que exista entre las características de los defectos patrones y de los defectos que se evalúan. Para el presente caso, y dado que se conoce el fenómeno que ocasiona el desgaste en los tubos es, relativamente, simple fabricar tubos patrones que reproduzcan con bastante exactitud los defectos de los tubos.

Así, pues, y dado que en el procedimiento empleado en noviembre de 1981, el canal 3 (200 KHz diferencial) no producía ninguna información de utilidad y, por otra parte, la información del mezclador inferior (550 + 200) KHz era redundante con la del mezclador superior (550 + 130) KHz, se decidió cambiar la frecuencia y método del canal 3, quedando el procedimiento de la siguiente forma:

ADQUISICION DE DATOS

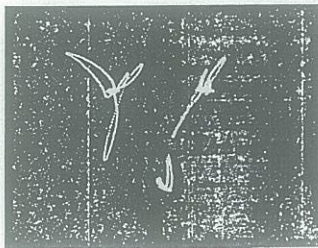
FRECUENCIA Y METODO

- Canal 1 - 550 KHz (diferencial)
- Canal 2 - 130 KHz (diferencial)
- Canal 3 - 300 KHz (absoluto)
- Canal 4 - 100 KHz (absoluto)

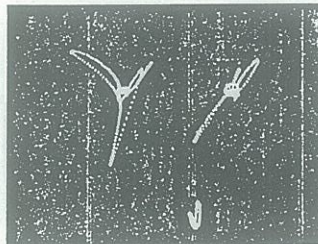
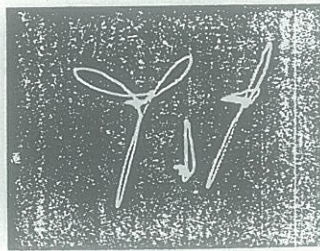


F VIII

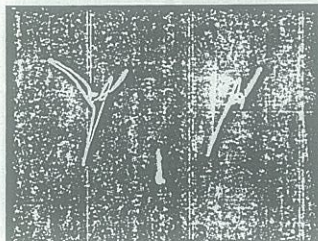
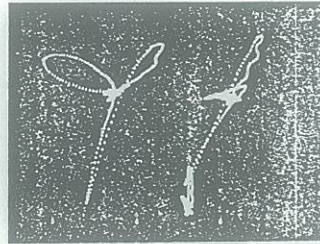
C.N. ALMARAZ I- G.V. Nº 1 TUBO R48, C60, SOPORTE 6º C.N. ALMARAZ I- G.V. Nº 1 TUBO R48, C53, SOPORTE 6º.



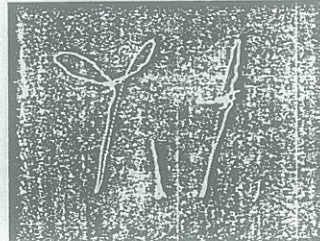
MARZO 1982



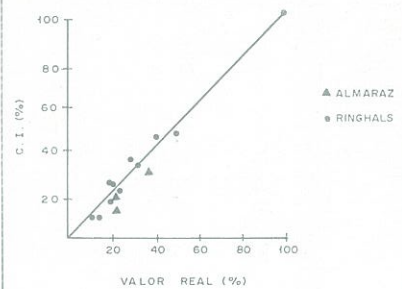
JULIO 1982



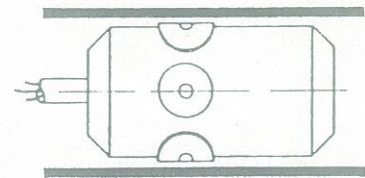
MAYO 1983



F VII



F X



BOBINA PUNTUAL (8 x 1)

MEZCLAS

Mezclador superior (550 + 130) KHz (diferencial)

Mezclador inferior (330 + 100) KHz (absoluto)

TAMAÑO DE LAS BOBINAS 0,59 SF

TUBO PATRON

ASME para método diferencial

SCAR para método absoluto (ver figura 6). Tubo patrón con defectos tipo fretting.

Evaluación

La evaluación se realizó básicamente con el método absoluto, y sólo se eva-

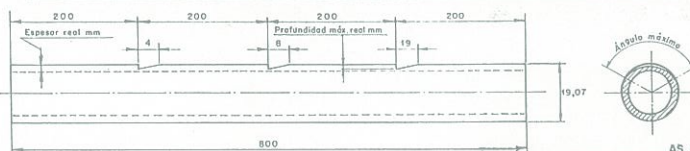
luaron por el método diferencial aquellas indicaciones que con el método absoluto daban valores superiores al 20 % (sólo siete indicaciones superaron este valor). De esta forma se consiguió eliminar, de una manera lógica, el tener que evaluar por el método de la fase indicaciones de pequeña amplitud (y, por tanto, de poco volumen y profundidad), ya que como hemos indicado anteriormente, para estas indicaciones, al estar distorsionada la fase, ésta no es representativa de la profundidad de los defectos.

La información en diferencial de las indicaciones mayores del 20 % en absoluto, sirvió para fijar la repetibilidad del ensayo respecto a la inspección en noviembre de 1981 y determinar que no se había producido ninguna degradación

F IX

DEFECTOS	A	B	C	D	E	F
Long. máx. mm	4	8	19	4	8	19
Ángulo máx. (°)	120°	120°	120°	180°	180°	180°

VALOR NOMINAL PÉRDIDA PARED %	TIPO DEFECTO											
	A		B		C		D		E		F	
	Prof. máx. real mm	% Perd. pared	Prof. máx. real mm	% Perd. pared	Prof. máx. real mm	% Perd. pared	Prof. máx. real mm	% Perd. pared	Prof. máx. real mm	% Perd. pared	Prof. máx. real mm	% Perd. pared
5 %	0,05	4	0,05	4	0,04	3	0,06	5	0,06	5	0,05	4
20 %	0,16	14	0,17	15	0,17	15	0,24	21	0,24	21	0,24	21
35 %	0,36	31	0,36	31	0,37	32	0,39	34	0,38	33	0,38	33
50 %	0,54	47	0,54	47	0,59	51	0,56	49	0,56	49	0,57	50
65 %	0,64	56	0,66	57	0,68	59	0,70	61	0,70	61	0,72	63



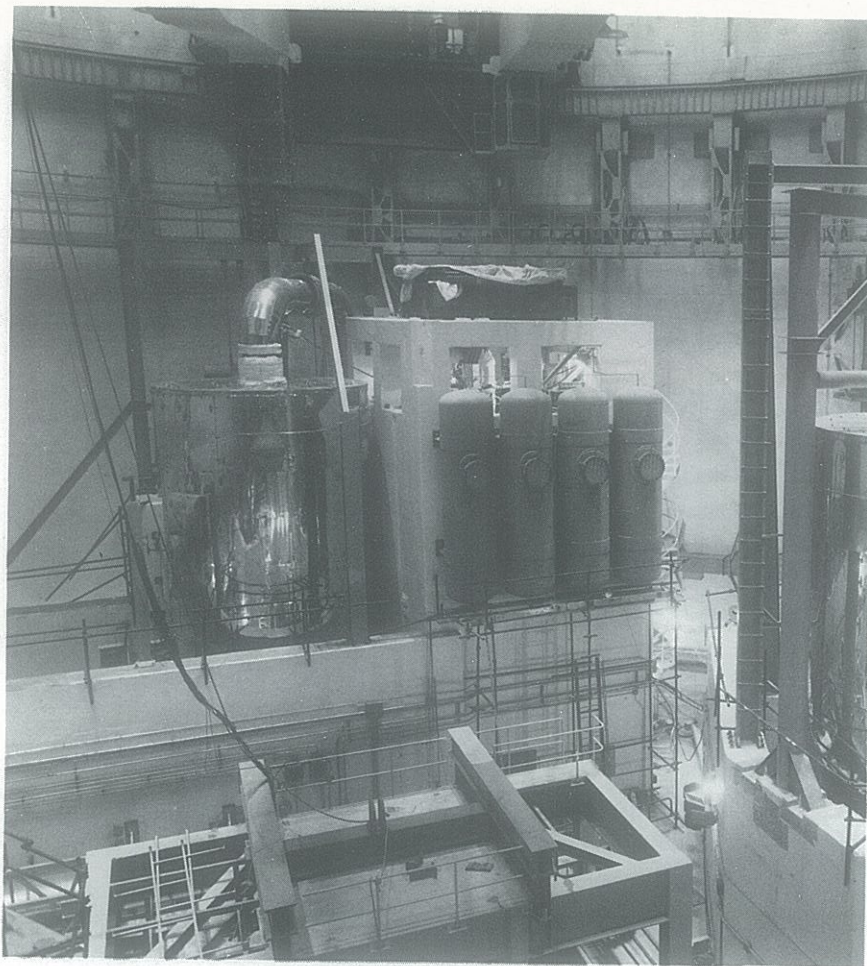
MATERIAL INCONEL 600
ESPESOR NOMINAL 1,99
ESPESOR REAL 1,15

AS BUILT

PROYECTO CI-10

tecnaform, s.a.

Nº HOJA: DE ESCALA:



Uno de los generadores de vapor y caseta del presionador.

adicional apreciable de los tubos después de operar 1.500 horas al 50 % de potencia.

Los trabajos de laboratorio mostraron, también, que se cometía un error no conservador del orden del 5 % por no haber utilizado placas soporte simuladas sobre los defectos del tubo SCAR, tal como se produce en la realidad. Se corrigieron los valores de campo y se incorporó este detalle al procedimiento que se utilizó en las siguientes inspecciones.

Después de esta inspección se extrajeron también dos tubos de cada una de las centrales de Almaraz y Ringhals para su examen y correlación de resultados. En la gráfica de la fig. 7 se muestran los resultados obtenidos y, como puede observarse, el error cometido al evaluar con el método absoluto está dentro del rango del $\pm 10\%$.

La conclusión de la inspección fue que, efectivamente, el método absoluto da valores más acordes con la realidad que el método diferencial, cuando se dispone de tubos patrones de calibración con defectos similares a los que se evalúan.

INSPECCIONES DE JULIO DE 1982 Y MAYO DE 1983

En estas sucesivas inspecciones se aplicó estrictamente el procedimiento de

marzo de 1982, con la variante ya mencionada de las placas soporte sobre los defectos de los tubos SCAR, y las bobinas que se han empleado ya en todas las inspecciones han sido las de 0,61" SF.

La calidad de los datos ha mejorado notablemente (por haberse reducido los ruidos) y la repetitibilidad del ensayo ha sido muy buena, como puede comprobarse en las fotos de la fig. 8 que corresponden a dos señales de las sucesivas inspecciones de marzo de 1982, julio de 1982 y mayo de 1983.

DESARROLLO DEL PROGRAMA CI-10

Como primer paso para el desarrollo del programa, se prepararon colecciones de tubos con defectos lo más similares posible a la realidad. Estos defectos se realizaron por electroerosión y en base a la información del estudio metalográfico de los tubos extraídos en la C. N. de Almaraz en noviembre de 1981.

A título de ejemplo, en la fig. 9 se muestra una de estas colecciones de defectos.

Mejora de la relación señal/ruido

Los trabajos realizados sobre el tema concluyeron que existen dos causas

principales que dan lugar a la existencia de ruidos en los datos que son:

El propio tubo

El ruido se produce cuando la superficie interior del tubo presenta ligeras ondulaciones (debidas al proceso de fabricación) dando lugar a pequeñas variaciones del diámetro interior del tubo.

La única forma de reducir este tipo de ruido es actuando sobre las frecuencias de inspección. Así, por ejemplo, la mezcla en diferencial (400 + 200) KHz es menos sensible a este ruido que la mezcla (550 + 130) KHz.

El sistema de adquisición de datos

Entendiendo por sistema de adquisición de datos el conjunto del equipo de corrientes inducidas, los cables, amplificadores de señal y la bobina de inspección, cuando este conjunto de elementos da lugar a un sistema total desequilibrado (electrónicamente hablando) se ha comprobado que los ruidos aumentan considerablemente.

La solución estriba, en una sustancial mejora de la calidad de fabricación de las bobinas y los cables, para conseguir que ambas ramas eléctricas, que forman parte del puente de medida del equipo de corrientes inducidas, estén totalmente compensadas.

Por otra parte, también se han realizado mejoras en los amplificadores de señal, buscando una respuesta de mayor precisión.

Resumiendo, el resultado final de todo el trabajo realizado es que se ha conseguido mejorar la calidad de todos los componentes del sistema de adquisición de datos y se ha reducido el ruido por esta causa en unas seis veces.

Por otro lado el utilizar el tamaño adecuado de bobina, y siempre el mismo tamaño (factor este muy poco tenido en cuenta anteriormente), consideramos es un factor importante para conseguir la máxima repetitibilidad de ensayo y de los resultados.

OPTIMIZACIÓN DE LA EVALUACIÓN DE LOS DEFECTOS SEGUN EL METODO DE LA FASE (DIFERENCIAL) Y AMPLITUD (ABSOLUTO)

Diferencial

Una evaluación pura según el método de la fase, sin utilizar la información de la amplitud de la indicación, consideramos que no es viable, ya que para pequeños defectos (< 20) nos encontra-

ríamos con la contraindicación de que estos defectos dan lugar a indicaciones, cuya fase puede representar defectos muy superiores, al estar ésta distorsionada de alguna manera por el ruido.

Así, pues, lo que se pretende es mejorar la evaluación de aquellas señales cuya relación señal/ruido sea muy buena (por lo menos superior a seis).

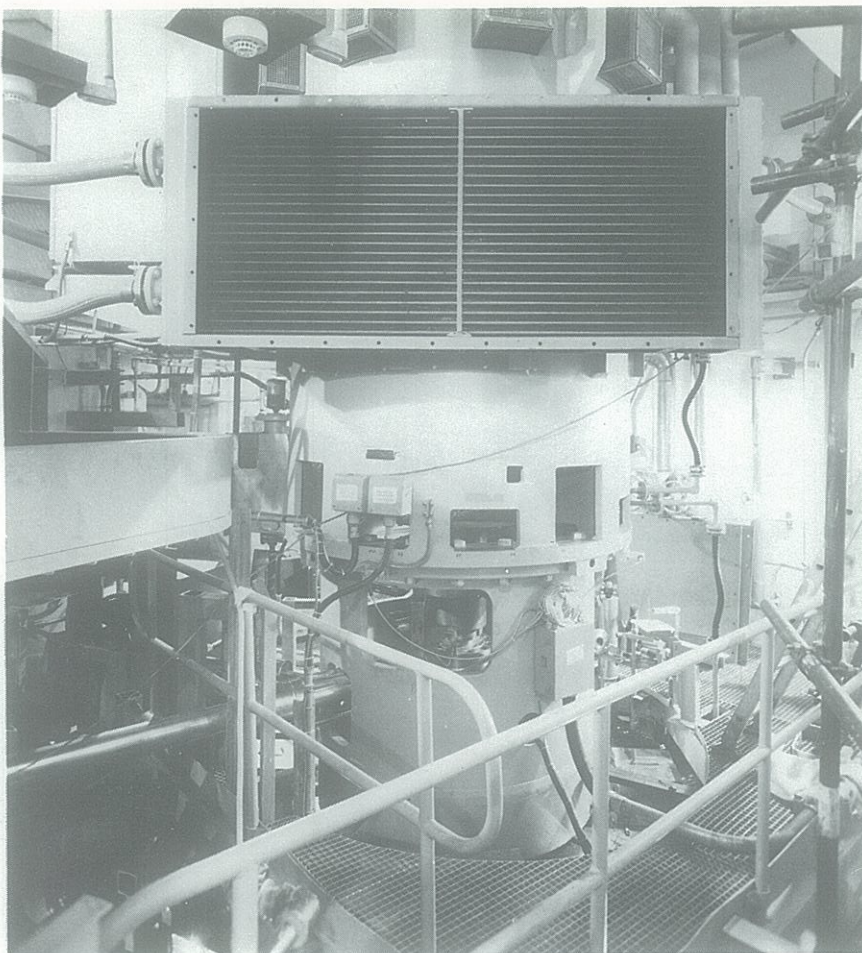
La situación actual de los resultados de campo señala que, aún para estas indicaciones, los valores que se obtienen son muy superiores a los que señala el método absoluto.

De los trabajos realizados hasta el momento se deduce que, posiblemente, el problema estriba en la propia calibración, al no ser el tubo ASME el más adecuado para obtener la relación fase-profundidad para evaluar defectos de fretting.

Método de la amplitud (absoluto)

Así, pues, la optimización del método requiere el conseguir más información sobre las características de los defectos de los tubos (dimensión circunferencial, axial y forma de los defectos) al objeto de poder seleccionar, en cada caso, el tubo de calibración que se debe utilizar en la evaluación.

Para conseguir esta información, se ha desarrollado un nuevo método de inspección utilizando bobinas pancake (puntuales) 8x1 (ver fig. 10, existen ocho bobinados en cada bobina). Con este nuevo sistema, cada bobinado (un bobinado cubre, aproximadamente, un arco de 45°) define el perfil del defecto según la generatriz del tubo que examina y, por tanto, el método nos permite conocer la forma del defecto que viene definida por los propios perfiles, la longitud axial, que se obtiene midiendo directamente sobre el registro gráfico (teniendo en cuenta la relación entre la velocidad de inspección y la velocidad del registro gráfico) y su dimensión circunferencial, que se obtiene en función del número de bobinados que detectan el defecto. En la fig. 11 se muestran un par de ejemplos de registros tipo obtenidos con este método. Puntualizamos que, con este método (actualmente), no se persigue obtener directamente la profundidad de los defectos, sino, más bien, obtener información adicional sobre los mismos para así, de esta forma, seleccionar (cuando sea necesario) más exactamente el patrón que se debe utilizar para la evaluación y obtención de la profundidad en cada caso según el método absoluto.



Motor de la bomba principal del bucle número 3.

Definir

- El defecto mínimo detectable
- El incremento de degradación mínimo detectable.
- El error máximo a considerar.

Aunque el programa CI-10 sobre estos tres puntos todavía no está finalizado, comentaré cual es la impresión manifestada en la reunión de expertos sobre el tema, que organizó el Steam Generator Owners Group los pasados días 28 y 29 de marzo en Charlotte.

En cuanto al defecto mínimo detectable se considera que se sitúa en torno al 10 %. El error máximo a considerar con el método absoluto (utilizado correctamente) es del orden del $\pm 10\%$ y las mayores discrepancias surgieron en cuanto al incremento de degradación adicional mínimo detectable, ya que para definir este valor hay que evaluar inicialmente el error por repetibilidad del ensayo.

CUAL ES LA SITUACION ACTUAL

La situación actual es que se dispone de un procedimiento de inspección válido, que la repetitibilidad de las inspecciones es buena (cosa que se comprueba con sólo mirar las fotografías de las señales en las sucesivas inspecciones) y

que, por tanto, se puede garantizar que si se produce un incremento de degradación (más allá de los márgenes de la repetitibilidad del ensayo) éste sería detectable.

QUE SE ESTA HACIENDO

En cuanto a qué se está haciendo podemos señalar, que en paralelo con los programas individuales que cada central involucrada en el asunto está realizando, el Steam Generator Owners Group II, SGOG II, (Asociación a la que pertenecen un elevado porcentaje de las empresas con centrales nucleares PWR), que funciona en estrecha relación con el Electric Power Research Institute (EPRI) ha considerado el problema de la caracterización del fretting como tema de trabajo prioritario para 1983. En estos momentos el SGOG II está actuando también como coordinador, con objeto de aglutinar los diferentes esfuerzos. En este sentido, **TECNATOM** ha presentado, en reuniones del SGOG II hasta la fecha, dos comunicaciones con el estado de avance del programa CI-10.

La idea que se tiene, es preparar antes de final de año un informe final, que recoja el estado de la técnica frente al problema de la caracterización de este tipo de defectos.