

NUEVAS APLICACIONES DE LOS UT ARRAY. INSPECCIÓN DE LOS ENCASTRES DE LOS ROTORES DE ALTA PRESIÓN DESDE EL TALADRO CENTRAL

La experiencia ha demostrado que los agrietamientos en álabes y en los rotores de turbinas de vapor, representa una de las problemáticas que obligan a las centrales de generación eléctrica que los sufren, a dedicar importantes inversiones para su solución, así como representa un elevado riesgo para la operabilidad de la máquina.

El presente artículo presenta las problemáticas que afectan a los rotores de alta y media presión (HP/IP) en la zona de encastre de álabes y el desarrollo realizado por Tecnatom, S.A. del sistema SI-RENA para la inspección de las mencionadas áreas.

INTRODUCCIÓN

Los rotores de turbinas de vapor y en particular los rotores de alta y media presión (HP/IP), se ven afectados por diversos mecanismos que pueden generar agrietamientos en las zonas de encastre de los álabes así como en los propios álabes. Entre éstos mecanismos los más comúnmente conocidos son los siguientes :

- Altos esfuerzos de origen térmico y/o mecánico
 - Fatiga (bajos ciclos)
 - Fluencia (zonas alta temperatura)
 - Corrosión-tensión.
- Vibraciones en álabes
 - Fatiga/fretting (altos ciclos)

En función del diseño del encastre y raíz de los álabes, la zona y los esfuerzos a que se encuentra sometido el rotor y las condiciones de operación de la central, las anteriores áreas presentan un mayor o menor riesgo de agrietamiento por los mecanismos anteriores.

El desarrollo realizado, se ha centrado concretamente sobre la problemática que afecta a dos tipos de encastres en rotores de HP/IP de diseño Mitsubishi existentes en diversas centrales térmicas de 350 Mw en España. Los tipos de encastres estudiados son :

- Encastres circunferenciales tipo T con tapón de cierre (T-Slot), en zonas de alta temperatura y presión. Coronas correspondientes a las etapas 1 y 2 de alta presión (HP).
- Encastres axiales de entrada lateral tipo abeto (tree stepple) en zona de alta temperatura.

Coronas correspondientes a las etapas 10 y 11 de media presión (IP).

En los encastres tipo "T-Slot", los agrietamientos se suelen generar en las esquinas de los planos de apriete del álabe con crecimiento hacia el exterior del rotor, en la zona del tapón de cierre y

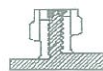
F I- Encastres circunferenciales tipo T-Slot



A) Grietas en el cuerpo del encastre que se forman en las zonas de mayores tensiones. Se generan en la superficie interior del encastre creciendo hacia la superficie exterior del rotor.



B) Grietas en la base del encastre. Se forman en la superficie del encastre y crecen hacia el interior del rotor.



C) Grietas en el Slot de cierre. Se generan en la superficie exterior del Rotor con dirección radial-axial a la rosca, tal como se aprecia en las dos vistas.



F II- Encastres axiales de entrada lateral, tipo abeto (Tree-Stepple)

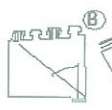
A) Grietas que se generan en el fondo y a lo largo de los dientes de sierra del encastre, creciendo hacia su interior.



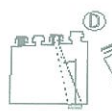
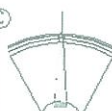
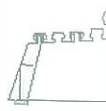
B) Grietas que se generan en el fondo del encastre y crecen hacia el interior del rotor.



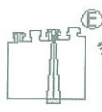
C) Grietas que se generan en la zona de confluencia entre el fondo del encastre y el exterior del rotor.

**F III- Técnica de examen de los encastres tipo T-Slot**

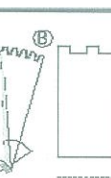
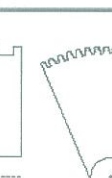
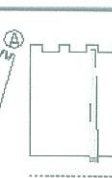
Con array de 45°



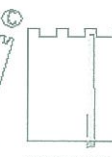
Con array de 15°



Con array de 0°

F IV- Técnica de examen de los encastres tipo Tree-Stepple

Array de 60° (No se hace)



Array de 0°

en menor grado en las bases del alojamiento (figura I).

En los encastres tipo abeto "tree stepple" con entrada axial, los agrietamientos se producen en

la zona de los dientes (hooks) de ajuste con crecimiento transversal entre estos puntos de ajuste, en menor medida se conocen agrietamientos en las bases entre encastres sucesivos, (figura II).

Se debe mencionar que el presente desarrollo se aplica a las mencionadas zonas de encastre de álabes en el rotor y no a los propios álabes que deben ser inspeccionados por otros métodos.

ESTADO DEL ARTE, CARACTERÍSTICAS DEL DESARROLLO

Las anteriores zonas de los rotores presentan una serie de problemas intrínsecos al propio diseño y a la geometría del rotor, que dificultan de forma importante la inspección y la localización de los posibles defectos, por lo que los fabricantes en numerosos casos, recomendaban la extracción de un número determinado de álabes, en una serie de coronas, con el fin de tener acceso a las zonas interiores de los encastres, así como para la inspección de las raíces de los propios álabes.

Normalmente este tipo de actuación lleva consigo una serie de dificultades asociadas al método y que se pueden resumir en:

- La extracción de álabes lleva asociada la destrucción de éstos, previo corte de las bandas de refuerzo y necesariamente su sustitución por nuevos álabes una vez finalizada la inspección por métodos visuales y superficiales por partículas magnéticas y/o líquidos penetrantes.

- Obviamente, por cuestiones económicas y de plazo, este método se suele aplicar a un número limitado de álabes y coronas, normalmente a dos sectores por etapa o corona (aproximadamente 15 % por corona) y a dos coronas de cada zona HP o IP. Con todo esto implica la destrucción y sustitución de aproximadamente 50 álabes por rotor.

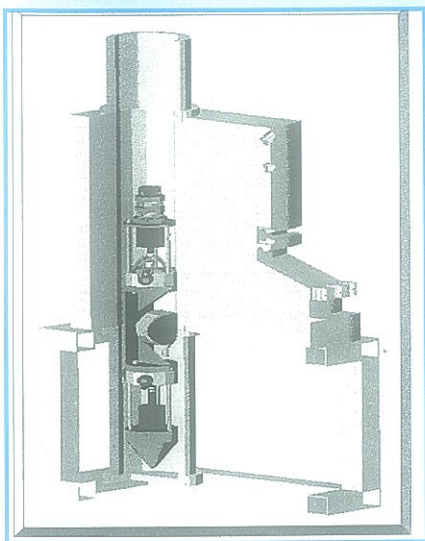
- Además de las anteriores dificultades del método en el caso de detectar algún tipo de defecto, se debería continuar destruyendo álabes. En los encastres de tipo T, en el caso de la existencia de defectos, el método permitiría conocerlos en longitud de arco, pero no en su profundidad hacia el interior del cuerpo del rotor.

Conocida por Tecnatom la mencionada recomendación a una serie de rotores de centrales españolas, se decidió priorizar el proyecto de I+D, para la aplicación de técnicas ultrasónicas para la inspección de las zonas de encastre de álabes en rotores de turbina de acuerdo al estado del arte actual, denominando al proyecto "Sistema de Inspección Robotizado de Encastres con tecnología Array" (SIRENA).

A priori la aplicación de la técnica ultrasónica con respecto a las técnicas anteriormente citadas presenta las siguientes ventajas:

- No es necesario la extracción de álabes y por tanto la fabricación expresa de nuevos álabes. Únicamente habría que destruir uno de los tapones de acceso al bore del rotor de forma similar a como se realiza en las inspecciones "Boresonic".

F V- Esquema del sistema SIRENA sobre maqueta



- Se puede inspeccionar el 100% de la etapa seleccionada, frente a los dos sectores anteriores, así mismo no es necesario limitar el número de etapas a inspeccionar.
- Los tiempos de inspección para la técnica ultrasónica y por tanto los costes asociados son muy inferiores, a los necesarios para el anterior método.
- La técnica ultrasónica permite para defectos ≥ 2 mm. en profundidad determinar su posición y dimensionamiento (profundidad-longitud).

Sin embargo y debido a la geometría del rotor, se tuvieron que superar una serie de dificultades para la aplicación del método ultrasónico, tales como :

- La geometría del rotor en las zonas de los encastres, hace inaccesible la inspección manual desde la superficie exterior del mismo.
- La inspección desde la superficie interior del bore supone las siguientes dificultades:
 - Grandes espesores a efectos de recorrido del haz ultrasónico desde el bore a la zona de los encastres.
 - Necesidad de la utilización de un manipulador complejo, para la situación de los palpadores en el interior del bore y su giro en los 360° del rotor.
 - Limitación en el tamaño del manipulador y de los palpadores.
 - La diferencia en diámetro entre las diferentes etapas, así como el pequeño tamaño de defecto a detectar, implica el trabajar con palpadores de foco variable. La incidencia desde y sobre superficies cilíndricas, presentan importantes problemas de distorsión y aberraciones del foco.
- El empleo de los anteriores elementos, implica el uso de complejos sistemas de control y adquisición de datos, así mismo la interpretación y evaluación de los resultados, necesita disponer de personal experto en estos sistemas.

El desarrollo del proyecto SIRENA se ha realizado de forma multidisciplinar, participando diferentes grupos de trabajo, tales como el de desarrollo UT de I+D, diseño mecánico y electrónico, grupo de análisis de señales, así como la colaboración de la Empresa Nacional Bazan, de la Central Térmica de Anllares y las empresas NDT System e Imasonic de Francia.

Las fases principales del proyecto han sido :

- I. Puesta a punto y adecuación de la electrónica array existente. Definición de las leyes focales utilizando del programa de simulación ASTUS, (figuras III y IV).
- II. Definición de las técnicas de examen y definición de las especificaciones para la fabricación de los palpadores focalizados tipo array, realizados bajo encargo.
- III. Diseño y fabricación de la maqueta de validación.
- IV. Modificación del manipulador Boresonic, diseño y fabricación de los módulos de inspección, así como todo el utillaje necesario para el giro y sistema estanco del rotor.
- V. Definición de los parámetros de inspección,

para el sistema de adquisición SUMIAD, III así como del sistema de evaluación MASERA.

VI. Pruebas y verificación del sistema en laboratorio sobre la maqueta de validación (figura VI).

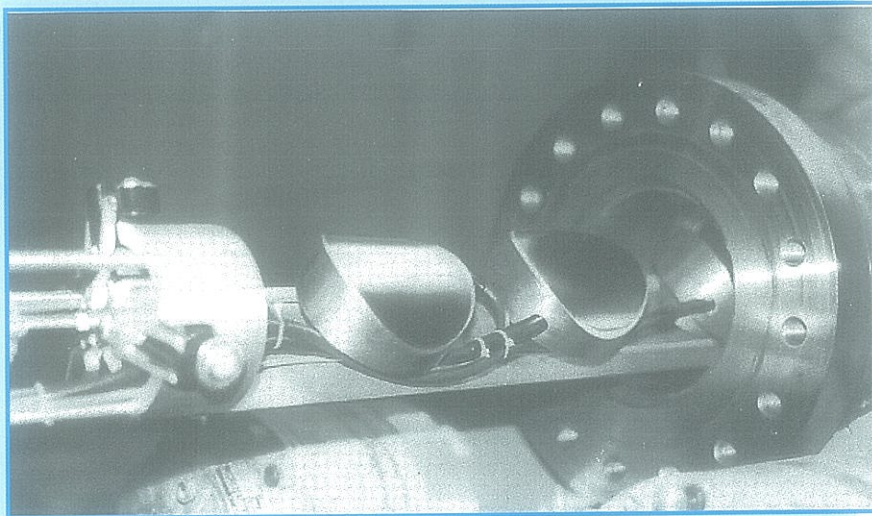
VII. Validación en condiciones reales en campo sobre el rotor de HP/IP de la Central Térmica de Anllares durante la pasada revisión de la turbina en Mayo de 1996.

CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA S.I.R.E.N.A.

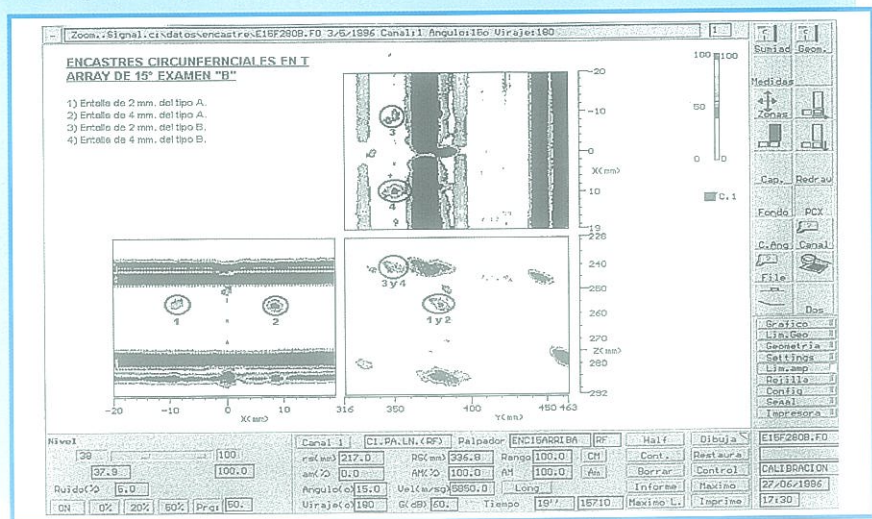
CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA ARRAY

- Se dispone de tres (3) Palpadores array, de anillos circulares de foco variable, fabricados en material piezo-composite de $\varnothing 100$ mm. curvados según una superficie de Fermat, para trabajar con técnica de inmersión, evitando distorsiones para incidencia del haz en piezas cilíndricas.
- Focalización variable a diferentes profundidades, entre 200 y 400 mm. de recorrido del sonido con un foco de $\varnothing 12$ mm. en la zona de inte

F VI- Vista del sistema SIRENA durante el examen piloto de validación en el rotor de HP/IP de la Central Térmica de Anllares



F VII- Ejemplo de plot con procesado gráfico de resultados



- Uso de diferentes ondas y ángulos de incidencia, 0°, 15°, y 45°
- Umbral de detección ≥ 2 mm. en profundidad.
- Electrónica array de 16 canales, combinada con programa ASTUS de simulación del haz ultrasónico por modificación de las leyes focales.

CARACTERÍSTICAS DEL MANIPULADOR

- Manipulador Boresonic, con capacidad para rotores de hasta 10 mt. de longitud, combinado con caballetes viradores electrohidráulicos para el giro del rotor.
- Módulos portapalpadores para uno o tres palpadores, con autocentrado neumático adaptable entre 130 y 175 mm. $\varnothing$ del bore.
- Control automático del sistema, mediante el controlador SIRICO-PC y codificación de giro y avance.

CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN

- Sistema multicanal de adquisición digital SUMIAD-III desarrollado por Tecnomat, que dispone de las siguientes herramientas de trabajo.
 - Adquisición completa del A-Scan o RF.
 - Visualización on-line de pantallas tipo A,B,C o D Scan.
 - Ayudas de eco-dinámico, scroll, etc.
 - Almacenamiento de datos on-line en disco óptico de 1,5 Gbt.
- Reconstrucción gráfica de resultados con sistema MASERA que permite:
 - Representación geometría con estudio de ondas y cambios de modo.
 - Filtros por amplitud/recorrido
 - Recortes por profundidades, zoom, etc.

En la figura VI se incluye un ejemplo de los plots de resultados.

VALIDACIÓN E IMPLANTACIÓN

Dada la compleja geometría del componente a inspeccionar, se debió diseñar y fabricar una maqueta que, con dimensiones reales representase fielmente el mecanizado de los encastres y las condiciones del bore y espesor del rotor. Para ello fue necesario un laborioso plan de fabricación, realizado en las instalaciones de la factoría de turbinas de la E.N. Bazan en Ferrol (Coruña) y posteriormente en los propios talleres de Tecnomat, para la implantación de los reflectores geométricos mediante entallas por electroerosión, que permitiesen verificar la bondad y exactitud de la técnica ultrasónica. La maqueta de validación se ha realizado sobre el diseño de un rotor de HP/IP Mitsubishi correspondiente a un tipo de CCTT de 350 Mw., dispone de doble encastre tipo T con slot de cierre, de coronas 1 y 2, así como (8) encastres de entrada axial tipo tree-stepple, correspondiente a una corona 10 de IP. Sobre estos encastres se han implantado numerosas entallas por EDM, con profundidades de 2, 3 y 4 mm., y un ancho

de 0,2 mm. El bore de acceso se ha mecanizado a $\varnothing$ 150 mm.

La fase de validación en laboratorio, consistió en numerosas pruebas para la integración del sistema y para la verificación de los distintos parámetros de examen. Estas pruebas se realizaron con el módulo de pruebas monopalpador, montado en posición vertical sobre una cuba de ensayos en inmersión, empleando como manipulador un puente X-Y.

Para la realización del proyecto y fundamentalmente para la fase final de validación-implantación, se contó con la inestimable colaboración de la Agrupación Central Térmica de Anllares (Unión E. Fenosa-Endesa), que con su apoyo desde el inicio, permitió llevar a cabo el proyecto y puso a disposición de este, el rotor de HP/IP para el ensayo piloto de validación.

Durante la revisión del turbogruppo de Mayo de 1996, se desplazó a la C.T. Anllares todo el sistema SIRENA y se realizó un examen completo en condiciones reales, verificándose la correcta operación del sistema, entre otras comprobaciones se realizaron las siguientes:

- Verificación de la correlación entre las señales adquiridas en la maqueta y las reales sobre los encastres del rotor, en este caso fue importante definir las señales debidas a la presencia de los álabes.
- Comprobación de la integración entre el movimiento axial del manipulador y el control de giro de los rodillos viradores, así como la comprobación del sistema estanco de inmersión parcial para el módulo de palpadores.
- Verificación de los plazos de montaje, logística y ejecución de cara a establecer los plazos para las futuras inspecciones en servicio del sistema SIRENA.

Finalmente y con el fin de realizar una mejor implantación del sistema, se mantuvieron diferentes reuniones con Mitsubishi Heavy Industries, para contar con su opinión técnica, de cara a implantar el sistema SIRENA como ensayo sustitutivo de los anteriormente recomendados, que requerían la extracción de álabes, teniendo en la actualidad la conformidad en cuanto a la inspección ultrasónica de las áreas de encastres de álabes.

CONCLUSIONES

Sobre el "Sistema para la inspección robotizada de encastres con técnicas array" S.I.R.E.N.A. cuyo desarrollo se ha expuesto, se pueden considerar las siguientes conclusiones:

- Permite disponer de un método realmente "No destructivo" para la inspección de los tipos de encastres de álabes definidos, en rotores de turbina.
- Aumenta significativamente el alcance y los niveles de inspección.
- La técnica ultrasónica empleada se encuentra en el nivel más alto del "estado del arte" y permite el posicionado y dimensionamiento de los posibles defectos, así como disponer de resultados gráficos permanentes.

• El sistema SIRENA frente a los métodos convencionales disminuye de forma importante los plazos y costes asociados en la inspección de los encastres de álabes.

• Con un estudio previo de las leyes focales, el sistema SIRENA es aplicable a un gran número de rotores de alta presión, y en algunos tipos de rotores de baja presión.



Francisco GODÍNEZ DUMONT es el Jefe de Proyecto del sistema de inspección ASIRENA®, habiendo participado en otros proyectos de desarrollo para inspecciones de NDE, realizados en Tecnomat desde 1991.

Desde 1990 trabaja en Tecnomat como Jefe de Campo en inspecciones de Turbogrupos, habiendo participado también en otras inspecciones en servicios tales como vasijas, tuberías, toberas, generadores de vapor, etc., tanto en plantas nucleares como térmicas. Es Licenciado en Ciencias Físicas y Nivel II in varias Técnicas de NDE que incluye la de ultrasonidos entre otras.



Carlos ARRIETA MARTÍNEZ es actualmente en Tecnomat, Jefe de la Unidad de Inspección de Turbogrupos, habiendo participado como Jefe de Campo en numerosas inspecciones de NDE tanto PSI como ISI en Plantas Nucleares y Térmicas.

Es Ingeniero Técnico Industrial y Nivel III en diversas técnicas de NDE que incluyen la técnica de ultrasonidos entre otras.