Actividades para el mantenimiento de la turbina: planificación, ejecución y evaluación de resultados de las inspecciones

J. Azcue, M. Á. Sánchez y M. Álvaro

El artículo abordará los aspectos más significativos acerca de cómo Tecnatom lleva a cabo el trabajo de mantenimiento de turbinas, tanto desde el punto de vista de la propia inspección como de las tareas previas y posteriores a ella. Así, serán tratadas cuestiones relativas al Manual de Inspección en Servicio (MISI) y a la base de datos de inspección, WEB ISI. Estas herramientas son fundamentales para planificar los trabajos en campo y servirán como guía para ejecutar, posteriormente, las inspecciones de turbina en las diferentes centrales. Tras dicha introducción se describirán los equipos de inspección y las técnicas, utilizados por Tecnatom. Finalmente, el artículo contendrá una pequeña mención sobre los estudios de gestión de vida y análisis de integridad de la turbina que se pueden realizar, así como sobre la implicación en su operación segura que de ellos se deriva. En definitiva, la intención es ofrecer un enfoque global del tema que se trata, el trabajo de mantenimiento de turbina, de modo que el lector pueda hacerse una idea del proceso en su totalidad.

The article will cover the most significant aspects of how Tecnatom carry out the turbine maintenance work, both from the point of view of the inspection itself as the pre-and post tasks associated. Thus, the issues that will be part of the article are the Manual Inspection Service (MISI) and the inspection database , ISI WEB . These tools are essential for planning field work and serve as a guide to run later turbine inspections in different plants. Following this introduction the inspection teams and the techniques used by Tecnatom will be described. Finally, the article will contain a small mention about management studies of life and integrity analysis of the turbine that can be performed, as well as involvement in its safe operation that is derived from them. Ultimately, the intention is to provide a comprehensive approach to the issue in question, the turbine maintenance work, so that the reader can get an idea of the whole process.

El objetivo fundamental de las actividades de inspección es garantizar la integridad física y estructural de los sistemas y componentes de las instalaciones nucleares. Para ello, se deben estudiar las áreas más críticas, los fenómenos degradatorios que les puedan afectar y las técnicas de vigilancia que nos permitan determinar la existencia de posibles degradaciones y su alcance. De esta manera, es necesario y en muchos casos obligatorio por el organismo regulador, la implantación de un plan de inspección que implica la elaboración de un Manual de Inspección, la realización de los ensayos no destructivos y las pruebas recogidos en éste y la evaluación de los resultados. Para gestionar los planes de inspección, es necesario disponer de herramientas que nos ayuden tanto en la planificación y gestión de la inspección, como en la documentación de los ensayos y en su posterior evaluación y toma de decisiones.

El proceso de inspección consta de las siguientes actividades:

- Preparación de la inspección. Definición del alcance.
- Programación de áreas de inspección y de las técnicas aplicables.
- Ejecución de la inspección y documentación de los resultados.
- Análisis de resultados y toma de decisiones.

PREPARACIÓN DE LA INSPECCIÓN. DEFINICIÓN DEL ALCANCE

El alcance de la inspección se fija en base al Manual de Inspección, incluyendo las recomendaciones del personal de mantenimiento así como con la información disponible tanto de los datos históricos como de la experiencia operativa.

JUAN AZCUE
es responsable de los sistemas de ayuda a la gestión de las inspecciones del mercado nuclear, térmico e industrial.

MIGUEL ÁNGEL SÁNCHEZ
es ingeniero industrial con 5 años de experiencia en el campo de los Ensayos no destructivos para diversos componentes de las centrales nucleares y otras instalaciones industriales.

MARTA ÁLVARO
es ingeniero analista con más de 20 años de experiencia en el campo de los Estudios de Integridad y Mecánica de Fractura de distintos componentes de las centrales nucleares.

PROGRAMACIÓN DE LAS ÁREAS DE INSPECCIÓN Y DE LAS TÉCNICAS APLICABLES

Una vez seleccionado el alcance, se programan en el sistema WEB ISI las áreas que van a ser inspeccionadas de manera que, por un lado se pueda hacer un seguimiento del proceso, y por otro se disponga en una base de datos de todos los resultados de la inspección.

EJECUCIÓN DE LA INSPECCIÓN Y DOCUMENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

Según el alcance definido y acordado con la central, los inspectores realizan los trabajos de inspección y documentan los resultados en la base de datos.

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y TOMA DE DECISIONES

A partir de la información disponible y mediante el uso del módulo de Gestión de Vida de la WEB ISI, así como de las evaluaciones realizadas por mecánica de fractura, se evalúa la criticidad de los posibles defectos que se hayan reportado en las inspecciones, y se toman las decisiones necesarias para garantizar la integridad estructural de los componentes.

Tecnatom, desarrolla los Manuales de Inspección en Servicio (MISI) para las centrales nucleares así como los Manuales de Inspección de Turbina. Dependiendo de la planta, el alcance relativo a la inspección de la turbina se recoge en el Manual de Inspección en Servicio o en un Manual de Inspección de la Turbina de Vapor. En estos manuales se incluye la información relativa a las áreas de inspección, técnicas de inspección, alcance y frecuencia así como los posibles fenómenos degradatorios que puedan aparecer en esas áreas. Esta información se recoge en diferentes tablas y en los propios planos, que incluyen representadas las áreas de inspección. De esta manera se facilita la gestión de la inspección así como el proceso de la misma llevado a cabo por los inspectores.

La gestión de las inspecciones recogidas en el Manual de Inspección, se realiza desde el sistema de ayuda a la gestión de las inspecciones, denominado WEB ISI. Esta herramienta ha sido desarrollada por Tecnatom y permite disponer de todos los datos relativos al proceso de inspección. Incluye entre otros, las áreas de inspección, la información asociada al área (planos, croquis, etc.), los planes de inspección así como su seguimiento, los resultados de la inspección y la generación de informes relativos al proceso de inspección.

Figura 1. Módulos de la WEB ISI.

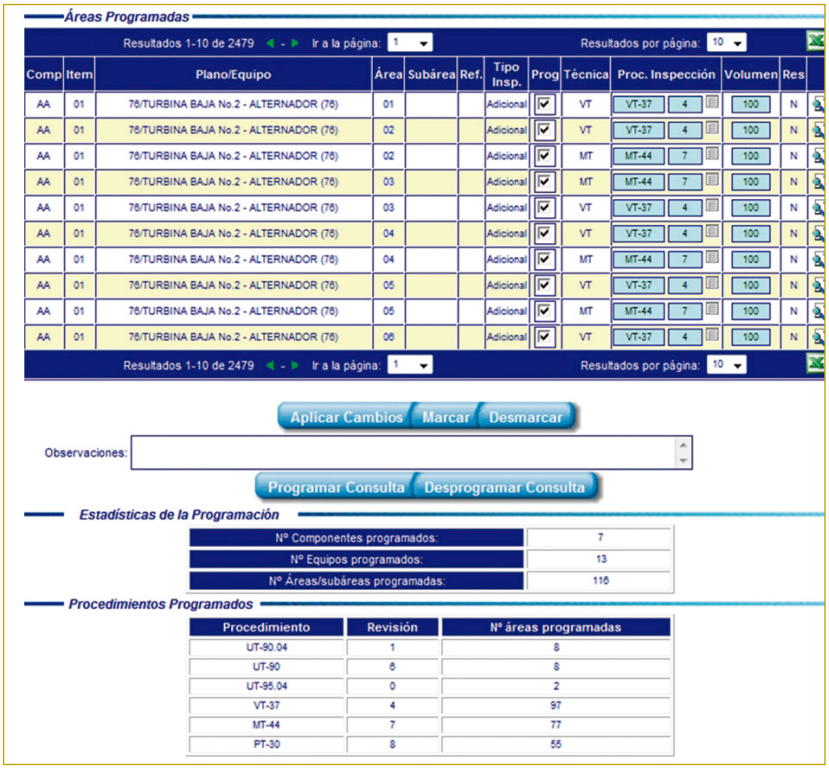

Figura 2. Alcance de la inspección. WEB ISI

La WEB ISI incorpora los siguientes módulos para gestionar, documentar y evaluar los resultados de las inspecciones (Figura 1):

- Normativa
- Ensayos No Destructivos
- Turbina
- Erosión Corrosión
- Válvulas
- Soportes
- Gestión de Vida

La programación de la inspección se realiza directamente sobre la WEB ISI, seleccionando las áreas a inspeccionar de acuerdo al procedimiento de inspección correspondiente.

El sistema permite, de una manera fácil y rápida, conocer el alcance de la inspección (Figura 2). Cada área de inspección se documenta en los formatos de inspección que son generados por la WEB ISI y que se cargan de manera automática en el sistema. De esta manera los diferentes usuarios del sistema pueden consultar *online* los resultados de la inspección.

El sistema dispone de un módulo específico de Gestión de Vida, desarrollado para evaluar la criticidad de los defectos hallados durante el proceso de inspección. Este módulo permite realizar una categorización de los defectos y en el caso de disponer de un Manual de Evaluación de Indicaciones, poder evaluar su influencia en la integridad estructural del componente.

Dentro de la política de desarrollo de Tecnatom, se van incorporando nuevos módulos al sistema así como nuevos sistemas que nos permitan mejorar la gestión del proceso de inspección. En este sentido cabe destacar el nuevo desarrollo para realizar un

Figura 3: Consulta de resultados. WEB ISI

seguimiento del proceso integral de la recarga, denominado Centro de Control de Recargas (CCR). Este sistema tiene los siguientes objetivos:

- Mejorar la eficiencia y seguridad de las paradas.
- Mejorar el flujo de información relativo a la gestión de parada.
- Actualizar de forma *online* la información generada.
- Mejorar la supervisión de los trabajos de control y gestión de las paradas.

Este sistema junto con la WEB ISI, nos permite realizar el seguimiento del proceso de inspección de la planta y conocer en cada momento qué actividades se han realizado, las actividades pendientes de realizar, consultar los resultados del proceso de inspección y evaluarlos (Figura 3).

Según lo comentado anteriormente, el objetivo fundamental de las actividades de inspección de turbina y en general de todos y cada uno de los componentes que se encuentren funcionando o próximos a hacerlo en cualquier industria, es el de garantizar la integridad física y estructural de los sistemas y componentes. A tal efecto, los diversos componentes que conforman una turbina son inspeccionados mediante diferentes técnicas de ensayos no destructivos, siempre dependiendo del alcance reflejado en el plan de inspección, a fin de conocer el estado estructural en que se encuentran y si es éste es aceptable y por tanto seguro, ponerlos en servicio o continuar con su operación en servicio. Estos trabajos pueden llevarse a cabo tanto en turbinas de vapor, como en turbinas de gas o diesel, y para ello pueden emplearse equipos de inspección manual o bien equipos automáticos.

Las principales técnicas de ensayos no destructivos que se utilizan habitualmente para la inspección de componentes de turbina son las siguientes: inspección visual, por líquidos penetrantes, por partículas magnéticas, por corrientes inducidas, por radiografía o inspección por la técnica de ultrasonidos. Existen diferentes alternativas para la aplicación de todas ellas, y todas ellas servirán como vía para determinar qué indicaciones de defecto se desprenden de su aplicación en campo sobre los distintos componentes. En función de la zona del componente que se vaya a inspeccionar, se determina la técnica de ensayos destructivos más conveniente.

Así, se emplearán líquidos penetrantes, inspección visual, partículas magnéticas o corrientes inducidas cuando lo que se pretenda sea detectar discontinuidades superficiales, y por el contrario ultrasonidos o radiografía si lo que se busca son discontinuidades en el volumen de la pieza y no en su superficie. Como base para este artículo, pondremos el foco en la técnica de ultrasonidos, que resulta muy versátil como herramienta de inspección, ya que puede abarcar gran número de componentes y servirse de distintos métodos para su aplicación.

Los ultrasonidos, utilizados no sólo en la industria nuclear sino en cualquier ámbito industrial que requiera inspecciones periódicas de sus componentes, siguen en constante evolución y por ello pueden llegar cada vez a mayor número de áreas susceptibles de ser inspeccionadas. En el caso particular de la turbina,

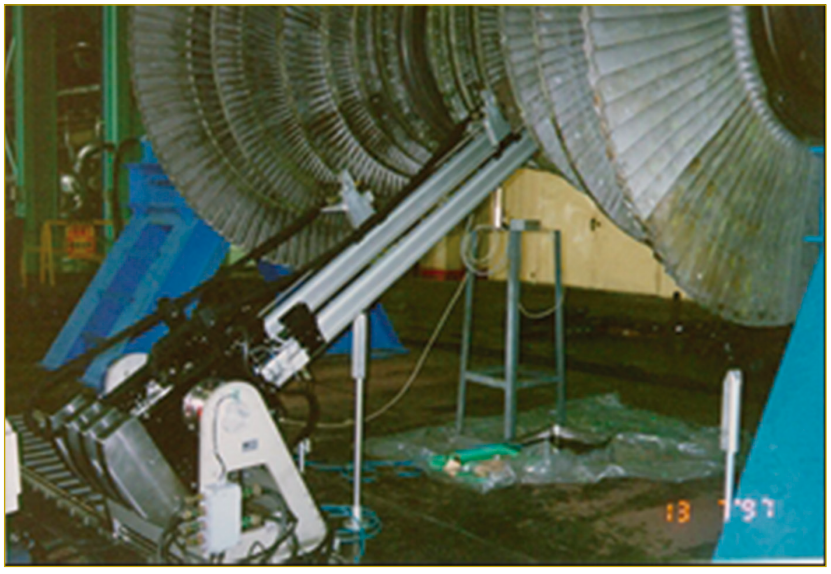

Figura 4: Inspección de discos de turbina con equipo mecánico SUID.

son de uso los ultrasonidos manuales para aquellos componentes de menor tamaño, áreas de componente menos extensas o bien zonas de fácil acceso. Esta técnica es llevada a la práctica por un operador de ensayos no destructivos cualificado para dicha técnica según la norma aplicable. Sin embrago, cuando se trata de componentes grandes o zonas difícilmente accesibles, cobra importancia la aplicación de ultrasonidos de manera automática gracias a equipos mecánicos especialmente diseñados y fabricados para ello.

Así, podemos encontrar una amplia gama de inspecciones automáticas realizables en áreas de turbina tales como ejes de rotores, discos de rotores, pernos de cierre de turbina o anillos de retención (Figura 4). Dentro de las inspecciones por ultrasonidos llevadas a cabo por medio de equipos mecánicos, pueden utilizarse diversas técnicas, como la convencional de pulso-eco o la técnica de *phased-array*, y además, dependiendo de las características del equipo en cuestión, existe la posibilidad de combinar la inspección ultrasónica con otras técnicas de ensayos no destructivos como corrientes inducidas o examen visual.

Una vez se ha realizado la inspección ultrasónica de cualquier componente de turbina ya sea de forma manual o automática, es generada toda una serie de documentación asociada a aquellas áreas que han sido inspeccionadas, y dentro de ella unos registros de inspección con el objetivo de detectar discontinuidades en el material que pudieran constituir, en un principio, el indicio de un defecto (grietas, porosidad, picaduras, etc…) existente en el volumen examinado. Estos registros y su posterior evaluación e interpretación, constituyen en sí mismos la base de una inspección en un componente dado.

El éxito de todo trabajo de inspección está fundamentado en una buena interpretación de los resultados y es ésta la única forma de determinar si un componente cumple los requisitos establecidos para seguir funcionando, o si bien es necesario repararlo o que sea sustituido por otro (Figura 5).

En resumen, el proceso que Tecnatom sigue para todo trabajo de inspección en turbina, podría definirse con los siguientes pasos:

- Planificación de la inspección en base al plan y a los manuales de inspección.
- Selección de la tecnología más apropiada para cada área de inspección. Uso de equipos manuales/automáticos.
- Puesta a punto de los equipos de inspección.
- Uso de las técnicas de ensayos no destructivos, sobre los diferentes componentes, gracias a profesionales cualificados para ello.
- Interpretación y análisis de los resultados obtenidos.
- Toma de decisiones.

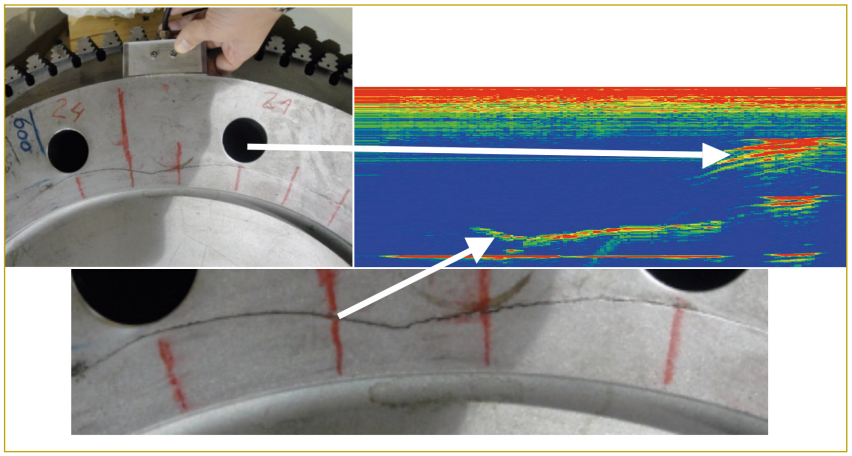

Figura 5. Registro de indicaciones, interpretación de taladros y grietas.

Todo ello con el único objetivo de garantizar la seguridad de los componentes, de la instalación y por su puesto también de las personas que en ellas operan.

Como resultado de las inspecciones periódicas que se realizan en las turbinas, es probable que se reporten indicaciones de defecto en las distintas zonas inspeccionadas. La mayoría de estas indicaciones pueden clasificarse como arañazos o pequeñas imperfecciones del material. Sin embargo, cuando por su situación y dimensiones, una indicación de defecto se considera de carácter severo es necesario realizar una evaluación por Mecánica de Fractura (MF) para estimar su influencia en la integridad de la turbina y recomendar a la central un periodo de operación que garantice el funcionamiento seguro de la misma, dentro de unos márgenes aceptables.

Además de realizar la evaluación por MF de los defectos reportados, Tecnatom lleva a cabo de manera global, un análisis de integridad de la turbina que incluye, desde las propias inspecciones por END, y un estudio metalográfico y microestructural de sus materiales, hasta la simulación, por medio de un código de elementos finitos, de sus condiciones de operación para conocer las tensiones presentes en la misma. Para poder llevar a cabo la simulación es necesario disponer de toda la documentación sobre la geometría, materiales, condiciones físicas a las que funciona, historial de las horas de operación, ciclos de carga acumulados, y de todas aquellas incidencias relativas a la operación (sobre velocidad, elevadas temperaturas, vibraciones, fallos o malfuncionamientos, etc...) o a la integridad física de la

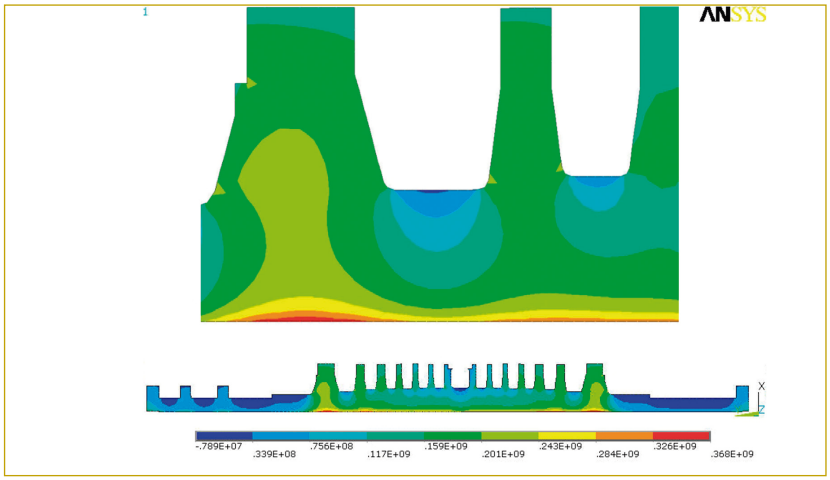

Figura 6. Distribución de la tensión circunferencial (MPa) en el estado estacionario.

turbina (resultados de inspecciones realizadas, presencia de piezas rotas, partes reparadas o sustituidas, presencia de erosión, corrosión, etc...) que hubieran podido modificar sus propiedades mecánicas originales o hubiesen introducido tensiones residuales en la misma.

Una vez disponible toda la información sobre la turbina, se realiza por medio del código de elementos finitos ANSYS, un modelo que refleje lo más fielmente posible la geometría de la misma. En dicho modelo se introducen las propiedades mecánico-físicas de los materiales y se imponen las condiciones de contorno adecuadas para simular la operación de la turbina (incluyendo las fuerzas centrífugas ejercidas por los álabes móviles sobre los encastres).

Estas condiciones han de ser facilitadas por la central nuclear o instalación eléctrica, en la que esté funcionando la turbina. Generalmente con disponer de los balances térmicos de la turbina a distintas cargas, y conocer la evolución temporal de los parámetros más influyentes (caudal de vapor, presión y temperatura del vapor y velocidad de rotación) durante las maniobras de arranque de la máquina es suficiente para poder simular dicho transitorio y el estado estacionario de la turbina al 100 %. Si se realizan pruebas de sobre velocidad, es necesario disponer también del porcentaje de esta aplicado.

Para cada transitorio de operación se realiza un análisis térmico-tensional con el código ANSYS para calcular las distribuciones de temperaturas y de tensiones en la turbina. Las tensiones que se obtienen son la combinación de las tensiones de origen térmico y las de origen mecánico propiamente dichas (Figura 6). Estas tensiones son las que se utilizarán para la evaluación por mecánica de fractura de las posibles indicaciones de defecto que se hubiesen reportado tras la inspección.

Si no se han reportado indicaciones de defecto que puedan influir en la integridad de la turbina, se pueden utilizar dichas tensiones para evaluar por MF defectos hipotéticos (defectos no reales) situados en las zonas más críticas de la turbina desde el punto de vista de las tensiones y de la resistencia de materiales.

Tanto si el defecto es real como hipotético, la mecánica de la fractura dispone de las herramientas matemáticas necesarias para poder calcular el tamaño máximo, o tamaño crítico del mismo, a partir del cual su crecimiento puede convertirse en inestable poniendo en riesgo la integridad del componente. Una vez determinado dicho tamaño crítico, el siguiente paso en la evaluación consiste en analizar los posibles fenómenos que pueden degradar el material y provocar el crecimiento del defecto. De la experiencia en la industria se sabe que los principales fenómenos a considerar en las turbinas son la fatiga a bajos ciclos (LCF), la corrosión bajo tensión (SCC) y la fluencia (*creep*). Dependiendo de la zona en la que se localice el defecto, de las condiciones de operación de la turbina y de su régimen de arranques y paradas, un fenómeno u otro será el principal responsable del crecimiento del mismo.

Se define la vida remanente de la turbina como el periodo, bien en horas de funcionamiento, bien en ciclos de carga, que tardará el defecto reportado en alcanzar su tamaño crítico. Cuando se hacen evaluaciones de defectos hipotéticos se asume para ellos un tamaño inicial igual al error de precisión (margen de incertidumbre) del equipo de ultrasonidos utilizado en la inspección. Lógicamente la vida remanente no es de aplicación directa para la central, por el elevado riesgo que conlleva permitir la operación de un componente dañado hasta el límite de la resistencia del material.

Existen diferentes criterios a la hora de recomendar el periodo máximo de operación, antes de la siguiente inspección, de una turbina en la que se haya reportado una o varias indicaciones de defecto. Prácticamente cada fabricante de turbinas tiene su propio criterio al respecto y finalmente es decisión de la propia central, aceptar o no dicho criterio. Básicamente el tiempo de operación que se recomienda tiene que garantizar la integridad de la turbina y su funcionamiento seguro considerando la presencia del defecto en el material. En caso de defectos hipotéticos, no reales, dicho tiempo de operación se recomienda igualmente, para asegurar que, incluso aunque haya defectos en la turbina que no se han podido detectar por las técnicas de UT usadas, la integridad del material y por lo tanto de la turbina no se verá gravemente afectada por ellos.