

EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE TURBINAS POR CONTROL DIMENSIONAL DE INTERNOS

F. MEDIAVILLA

Mantener la eficiencia térmica de las turbinas en un estado óptimo de funcionamiento durante la vida de operación de la planta es, de suma importancia con la situación actual de aumento del precio del combustible. Alcanzar este estado requiere llevar a cabo un programa de pruebas de rendimiento, realizar un adecuado análisis de los datos obtenidos y planificar una auditoría energética de la máquina durante las paradas periódicas de revisión de las turbinas.

Si del análisis de los datos obtenidos en las pruebas de rendimiento realizadas antes de la parada, se desprende que la eficiencia de la turbina se ha degradado, la auditoría energética, consistente en una inspección visual y en un control dimensional de sus internos, va a determinar y cuantificar, las causas de degradación como pueden ser: fugas en los cierres, holguras excesivas, daños por erosión por partículas sólidas, depósitos en los álabes y otros posibles problemas. La auditoría energética asigna la contribución de cada una de las anteriores pérdidas individuales al total de la degradación de la eficiencia. Esto nos permite establecer prioridades en la toma de decisiones de mantenimiento y evaluar la reparación o sustitución durante la parada de los distintos componentes.

Una vez que se han llevado a cabo las reparaciones en la turbina y durante su montaje, la auditoría energética predice las nuevas condiciones de entrada en servicio de la máquina, y por tanto, nos indica la efectividad de las reparaciones realizadas.

To maintain the optimum thermal performance in a high level throughout the life of the turbines requires a good testing program, proper analysis of the test data, and a steam path audit during turbine overhauls.

If from operating data analysis collected during the performance test before the outage shows that the efficiency of the turbine is coming down, the steam path audit, that is an internal inspection and a dimensional control of the internals, identify and quantify causes of performance degradation like: seal leakages, excessive clearances, solid particle erosion damages, blades deposits and other losses. The steam path audit assigns the heat rate penalties associated with each of these individual losses to the total degradation. This are used to make cost-effective maintenance decisions during the course of the overhaul.

After repairs, a closing steam path audit is conducted during the reassembly of the turbine in order to predict the return to service condition of the machine and to provide a quality control check on outage repairs.

EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE TURBINAS

Las turbinas son el alma de las centrales productoras de energía. Estas turbinas suelen funcionar durante prolongados periodos de tiempo, por lo que están diseñadas para prestar el máximo rendimiento durante miles de horas de trabajo ininterrumpido. Desgraciadamente, y como es lógico, los materiales que constituyen la turbina tienen unas características definidas, modificables hasta cierto punto, pero limitadas. Por otro lado, en la turbina pueden aparecer tensiones debidas a errores de montaje, imperfecciones en la fabricación de algún componente u otras causas que la hagan funcionar en unas condiciones que no son las idóneas. La consecuencia de ello, unido a condiciones de trabajo variables, suciedad, vibraciones, y muchos otros factores negativos, es la aparición de rozamientos, erosiones, desgastes y depósitos, que con el tiempo pueden desembocar en averías de gravedad variable.

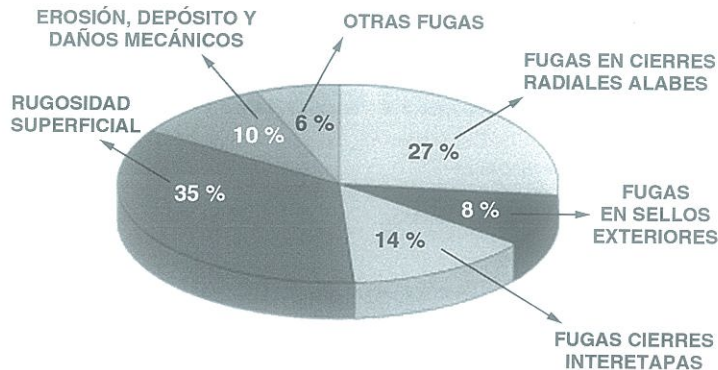
Como es de sentido común, no se espera a que la turbina sufra una avería que provoque su parada para realizar

una revisión a fondo. Toda esta maquinaria requiere de un conjunto de paradas programadas durante su vida de funcionamiento para realizar todo tipo de inspecciones, con el fin de reparar defectos, y por ende, prevenir posibles fallos en el futuro.

En la generación de energía es fundamental la posibilidad de trabajar a plena carga, sacando el máximo provecho a la instalación. Por supuesto, las averías siguen siendo sucesos a evitar por todos los medios, pero además, el rendimiento es un factor muy importante, es por esto que en una parada por inspección es necesario incluir, además del punto de vista de integridad de los materiales la valoración energética de la máquina. La degradación de la eficiencia durante el funcionamiento afectará enormemente a la rentabilidad de la turbina.

Las mismas causas que pueden provocar una avería de forma brusca, van minando poco a poco la eficiencia de la turbina, a velocidades muy variables, que dependen sobre todo del diseño de la misma y de sus condiciones de trabajo. Por norma general, tras un año de funcionamiento, una turbina ha sufrido, de media, una pérdida de más

LAS REDUCCIONES DE EFICIENCIA EN TURBINAS DE VAPOR DE DEBEN A:



del 0,5% en su eficiencia. Por lo tanto, es de suma importancia, durante la parada por mantenimiento de la turbina, tomar todas las medidas necesarias para que recupere el máximo de eficiencia, dentro de lo posible.

Es práctica común el hacer una auditoría energética antes y después de la parada, en la que se desmonta completamente la turbina, para comprobar la efectividad de las reparaciones en la recuperación de eficiencia y como referencia para futuras revisiones. Estas paradas se suceden con una periodicidad de entre 4 y 6 años, según indique el fabricante en función de las condiciones de trabajo, coincidiendo con unas pérdidas de eficiencia que pueden llegar al 5%.

De todas formas, la turbina nunca queda "como nueva". En las paradas no se pueden arreglar todos los desperfectos, bien porque no se detectan, o porque la posible recuperación de eficiencia no compensa el coste de su reparación, total o parcial. Como norma general, a partir de una degradación en el rendimiento del 5,23% antes de la parada, se suele llegar a una degradación del 1,7% respecto de la eficiencia del diseño. Es corriente que la máxima degradación se dé en la turbina de baja, y también en ella se suele dar la mayor recuperación tras la parada, alrededor de un 70%.

Durante una parada, en la que se procede a desmontar toda la turbina tras la auditoría energética, se comienza con una revisión de los elementos, intentando detectar los posibles defectos. Luego viene la reparación o sustitución de las partes afectadas, según el criterio del técnico responsable del mantenimiento y con la información suministrada por dicha auditoría. Él será quien decida los elementos a sustituir o reparar, y en ese caso, el tipo de reparación a efectuar. Acto seguido, se

procede a la limpieza de los componentes y retirada de depósitos acumulados durante la operación. Por último, y tras el montaje de la turbina, se procede a la auditoría energética para analizar las mejoras obtenidas durante el mantenimiento.

Los elementos más comunes que producen el deterioro, y que son detectados en una parada para mantenimiento, se pueden considerar los siguientes: la erosión por partículas sólidas, depósitos, incremento de holguras en cierres y daños mecánicos por materiales extraños.

La pérdida global de eficiencia es el resultado de una combinación de pérdidas fundamentales. En el camino del vapor en una turbina, estas causas fundamentales de pérdida son las siguientes:

- Cambio en la distribución de energía en la etapa como resultado de un cambio de áreas en álabes móviles y estacionarios frente a las de diseño.
- Pérdidas aerodinámicas causadas por un cambio en los perfiles de los álabes.
- Incremento de las pérdidas de fricción por rugosidad superficial.
- Incremento de las pérdidas por fuga debido al incremento de los huecos en cierres.

Existe una metodología de evaluación y de toma de medidas, denominada auditoría energética de turbinas, que sirve para identificar, cuantificar y corregir las causas de la degradación en la eficiencia de las turbinas. La metodología que incluye un soporte informático, sirve al ingeniero auditor como herramienta para hacer posible que recopilaran los datos obtenidos en el

terreno directamente, siguiendo un procedimiento de medida preestablecido y con obtención de resultados inmediatos de la auditoría.

Como resultado de diferentes auditorías realizadas en centrales térmicas se establece que el valor del combustible ahorrado tras la reparación de la turbina, utilizando este método, es como mínimo, el doble del coste de la reparación; por tanto, las auditorías energéticas sirven como ayuda a la toma de decisiones sobre la relación coste/beneficio en reparaciones.

Este método de análisis desarrolla las siguientes funciones:

- Examen y evaluación de turbinas de cualquier modelo y fabricante.
- Monitorización del estado de operación de la turbina y de los calentadores de agua.
- Muestra de su tendencia gráficamente y numéricamente.
- Anticipación a cambios en el camino del vapor mientras la unidad esta en operación.
- Posibilidad de ahorro económico durante las revisiones, aislando los problemas.
- Identificación y clasificación por orden de importancia de las reparaciones de forma rápida y efectiva, teniendo en cuenta el consiguiente beneficio económico.
- Evaluación económica de la reparación o sustitución de distintos elementos.
- Desarrollo de un control de calidad para verificar las acciones de mantenimiento tomadas durante la revisión.
- Determinación de la existencia de problemas en los arranques, que puedan ocasionar una disminución en el rendimiento de la unidad.
- Tras la reparación, proceso de los datos proporcionados por la auditoría energética tras la parada. Estimación del ahorro, o aumento de producción, conseguido con las reparaciones. Esto luego se puede comparar con los datos de la auditoría energética tras la puesta en marcha de nuevo de la turbina.

¿CÓMO FUNCIONA EL MÉTODO?

Ante todo, el programa que servirá como ayuda sobre el terreno al técnico debe conocer cómo es la turbina a analizar. Para ello, se ha de disponer de la siguiente información: balance térmico del ciclo, sección longitudinal de los diferentes cuerpos de la turbina y diagramas de huelgos de diseño en los diferentes cierres, cuyos datos se introducen en el programa. De esa forma, se crea un modelo geométrico de

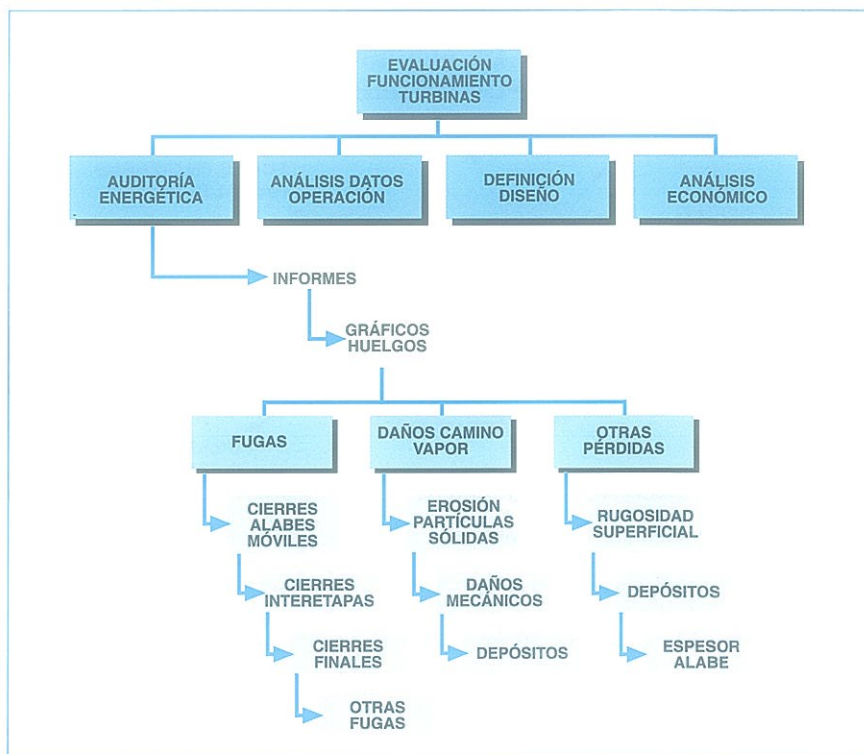
la turbina. En el caso de que ya se haya auditado una turbina del mismo modelo, este primer paso sería innecesario, al estar toda la información en la base de datos del programa. Eso sí, cualquier modificación haría necesario crear un nuevo modelo geométrico de la turbina.

Acto seguido, y antes de comenzar con la inspección, se ha de conocer la evolución en el funcionamiento de la turbina a lo largo del tiempo desde su última parada, o si es el caso, desde su puesta en funcionamiento. Analizando esta información se pueden adelantar los problemas que ha sufrido la turbina durante su funcionamiento y las causas que los han ocasionado. Por ejemplo, un descenso continuado y lento de la potencia en la turbina suele ser debido a un mal funcionamiento de la válvula de by-pass o un caudal incorrecto en el primario, debido posiblemente a depósitos en el mismo. De esta forma, se puede orientar la inspección y la búsqueda de fallos, antes incluso de la parada y desmontaje de la máquina, ahorrando mucho tiempo y dinero. La revisión se hará de forma completa, por supuesto, pero dedicando una especial atención a los problemas que hallan ocurrido, y a los que sea muy probable que ocurran en un futuro próximo.

Luego es preciso introducir los datos, obtenidos a medida que se realiza la inspección, para que este cree un modelo termodinámico informatizado del ciclo del vapor de la turbina. Estos datos son resultado de la toma de más de un millar de medidas entre rugosidades, espesores, profundidad de grietas y roturas, y demás datos que el programa procesa y evalúa según su importancia. En este aspecto hay que destacar la gran importancia de la precisión y del rigor en la toma de medidas, algo muy laborioso y complicado de conseguir sobre el terreno. De este modo se obtiene, de forma exacta, la distribución de todas las propiedades termodinámicas a lo largo de toda la turbina.

Una vez que se dispone de toda la información, el método nos permite hallar la pérdida de potencia y la degradación correspondiente a cada parte de la turbina, etapa a etapa, clasificando las causas de las pérdidas en nueve categorías distintas.

Se pueden organizar las deficiencias por tipo de pérdidas, por etapas, y para el total de la turbina. En función de estas, se realiza la clasificación de reparaciones a realizar, en coordinación con un sistema de evaluación económica. Esto consiste en analizar los beneficios proporcionados por el aumento de producción de energía que



genera cada reparación de forma independiente, en función del coste de dicha reparación.

Los problemas más comunes detectados en turbinas de vapor de centrales nucleares, después de años de funcionamiento, suelen ser las fugas internas, fugas en válvulas, y pérdidas importantes en la turbina de alta presión como consecuencia de depósitos, por ser la más sensible. Esta sensibilidad es debida a que en esta turbina es donde el espacio entre álabes es menor, por lo que la misma cantidad de depósitos puede provocar pérdidas mayores.

A la hora de realizar la evaluación energética, descomponemos el estudio en:

- Fugas de vapor
- Daños en el camino del vapor
- Pérdidas misceláneas

FUGAS DE VAPOR

El rozamiento de partes móviles con partes estacionarias en la turbina dará como resultado un incremento de huelgos y por tanto un incremento del vapor de fuga. El rozamiento de las pletinas en los cierres puede ser producido por altas vibraciones en el rotor, distorsiones térmicas en las partes estacionarias, inducción de agua etc.

La potencia mecánica se produce por el paso del vapor a través de los álabes móviles y estacionarios. El vapor que se derive de este paso produci-

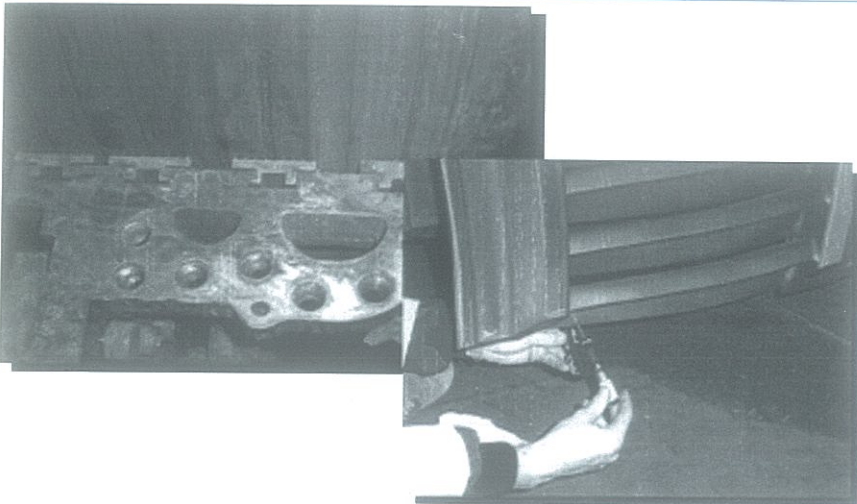
rá una disminución de la potencia. Las pérdidas por fugas se producen en las turbinas en cierres entre álabes estacionarios y rotor, cierres exteriores e interiores, cierres entre álabes móviles y carcasa y fugas diversas.

Con objeto de determinar la pérdida de eficiencia debido al incremento de huelgos, éstos deben ser medidos. La altura de las pletinas en los diversos cierres no se desgasta de forma uniforme alrededor de una circunferencia, la parte superior e inferior de los cierres a menudo rozan más que en los lados. Es por esto que en las auditorías energéticas, en cada etapa se determina el huelgo medio del cierre por la medida de la altura de los dientes en puntos distribuidos uniformemente sobre el cierre.

Dentro de los cálculos de fugas de vapor, se utiliza la fórmula de Martins, que relaciona el caudal de fuga en un cierre laberíntico como una función del coeficiente de flujo del tipo de cierre, del área de fuga y de las presiones y volúmenes específicos del vapor.

- Cierres entre álabes estacionarios y el rotor.

En este caso podemos recoger datos de cualquiera de los cuerpos que componen la turbina, generar informes, o ver los gráficos de huelgos. Para cada una de las etapas se analizan los huelgos medidos en la junta horizontal y el estado de los dientes que componen el cierre. Se pueden introducir hasta ocho



medidas de altura de pletinas alrededor de la circunferencia que compone la pletina de cierre. Basándose en todos estos datos, se calcula la media del huelgo medido en toda la circunferencia, las pérdidas en potencia y el cambio en el consumo específico para cada una de las etapas de la turbina.

- Cierres exteriores o interiores.

Se encuentran localizados al final de cada uno de los cuerpos, y al final de las carcassas. Su objetivo es el de evitar las fugas de vapor a través del eje en el caso de los cierres interiores, a la atmósfera en el caso de los cierres exteriores en la carcassa de alta, o la entrada de aire en el caso de cierres exteriores en la carcassa de baja. Los datos que se toman de los cierres exteriores e interiores se obtienen de forma similar a los datos de los cierres entre los álabes fijos y el motor. Se tienen en cuenta las magnitudes de los huelgos y la altura media de los dientes, medidas durante la revisión de la turbina. Los cálculos se realizan para cada sellado en cada uno de los cierres, exteriores e interiores. Las pérdidas en los cierres exteriores e interiores se evalúan, de forma independiente, para cada uno de los cuerpos de la turbina.

- Cierres entre álabes móviles y carcassa.

Los datos tomados para los cierres entre álabes móviles y carcassa son similares a los anteriores. Además, el técnico tiene la opción de cambiar el tipo de cierre encontrado durante la inspección. Por ejemplo, si durante la inspección se observa que en un cierre falta algún diente, o que algún diente está muy desgastado, a efectos de cálculo, el tipo de cierre será otro, ya que el tipo de cierre encontrado no se comporta como estaba concebido en un principio.

- Fugas diversas.

Dentro de esta categoría, y para poder estimar las pérdidas que suponen, se asignan aquellas fugas que no pueden clasificarse en las categorías anteriores. Por ejemplo, a través de la junta horizontal, o a través de otros mecanismos de sellado, como pueden ser las juntas de expansión.

Como esta categoría es la más amplia, la sección destinada a evaluar este tipo de fugas está capacitada para poder definir cualquier tipo de fugas. Una vez definida la fuente y el destino de la fuga, se estudia el resto de la información sobre la misma, que incluye sus dimensiones, el coeficiente de flujo de vapor esperado y el número de fugas de similares características. Los resultados de este estudio incluyen el caudal de fugas esperado para cada una de las fugas definidas, el impacto sobre la potencia perdida y el consumo específico para cada uno de los cuerpos y para toda la turbina.

DAÑOS EN EL CAMINO DEL VAPOR

Dentro de este apartado se incluyen los siguientes elementos:

- Erosión por partículas.

La erosión por partículas sólidas es un corte abrasivo sobre los componentes de la turbina, producidos por materiales extraños llevados por el vapor, principalmente pequeñas partículas de óxido que impactan sobre la superficie de los álabes, normalmente en las primeras etapas donde entra el vapor.

La erosión por partículas sólidas produce pérdidas en la eficiencia de la turbina debido a:

- Ángulo de entrada fuera de diseño en álabes móviles

- Pérdidas en el perfil de los álabes fijos y móviles
- Separación del caudal de los álabes fijos.
- Incremento en los bordes de escape afectados
- Incremento en la rugosidad superficial de los álabes de la turbina
- Incremento en los huelgos en pletinas de cierres álabes móvil-carcassa
- Partículas centrifugadas bajo las llantas de unión de álabes móviles.

Se pueden calcular los impactos que originan estas erosiones, basándose en el cambio de área sufrido en cada etapa. Para poder calcular este cambio de área, se usa una estimación basada en medir la profundidad y la altura del tipo de erosión causado en los álabes de la turbina.

Para estimar la erosión sufrida se observa cada una de las etapas. Los datos a investigar son una media de la altura radial y la profundidad de un determinado modelo tipo de erosión observado. El modelo tipo de erosión se clasifica según cuatro grados de severidad. Por otro lado, dentro de cada grado de severidad disponemos de seis tipos de erosión, según la geometría que presente.

- Daños mecánicos.

En este caso se evalúa el impacto producido por daños mecánicos que varían el área de paso del vapor en cada etapa. Esta variación puede llegar a ser importante, hasta el punto de aumentar la presión del vapor en un 5%, lo que daría la señal de alarma. La evaluación se realiza a partir del cambio en el área para cada tipo de daño.

Algunos ejemplos de daños mecánicos son:

- Objetos que puedan pasar a través de la turbina que causan daños en los álabes, pudiendo ser el daño abierto o cerrado.
- Objetos extraños bloqueando el paso de vapor a través de los álabes fijos.
- Álabes desprendidos.

Los datos son estudiados en porcentaje de cambio en el área de salida, tanto de los álabes fijos como móviles, y un coeficiente que indica el grado de severidad del daño observado.

- Depósitos.

Si algún material es depositado sobre el álabe, este acarreará una reducción en el área de paso del vapor. El objetivo de esta sección es evaluar la reducción en el área de paso del vapor

a través de los álabes, debido al aumento de estos depósitos. Los datos a tomar de la turbina abierta son el espesor de los depósitos en la cara cóncava y convexa del álabe, y el ancho de garganta en la base y en extremo del álabe.

Una vez tomadas todas las medidas necesarias para estudiar cada una de las secciones anteriores se pueden observar los resultados. Las pérdidas asignadas en la categoría de Daños en el Camino Preferencial del Vapor, están estrechamente ligadas a los cambios en el área de paso del vapor a través de la turbina. En los resultados se incluyen el impacto sobre el flujo de vapor a través de la turbina y la disminución en el rendimiento de las etapas de cada carcasa.

PÉRDIDAS MISCELÁNEAS

Dentro del apartado se integran las pérdidas que tienen influencia sobre el rendimiento de las etapas, pero que no se incluyen en las dos categorías anteriores. Estas pérdidas misceláneas pueden agruparse en cuatro grupos distintos:

- Rugosidad superficial.

Se evalúa el impacto de la degradación sufrida en la superficie de los álabes.

Se mide el estado superficial, usando para ello un rugosímetro, para las diferentes zonas del álabe. El programa calcula las pérdidas en el consumo específico y en la potencia de salida. Para calcular estas pérdidas, se debe estudiar el espesor de la capa límite del vapor sobre la superficie y la proyección de las rugosidades de la misma, usando la equivalencia con las rugosidades del diagrama de Nikuradse. Las pérdidas ocurrirán si las rugosidades alcanzan la capa límite del flujo del vapor, o sea, con números de Reynolds elevados.

Para calcular el deterioro en la eficiencia se utilizan las investigaciones realizadas por el Dr. V.T. Foster que relacionan el número de Reynolds con un factor básico de corrección. Conocido el acabado superficial original del álabe y el encontrado en la auditoría energética se determinan los factores de corrección debidas a pérdidas por fricción tanto para la condición del acabado superficial del álabe nuevo como para la rugosidad superficial actual del álabe a los depósitos. La pér-



dida de eficiencia del álabe se obtiene de la diferencia de los anteriores factores de corrección expresada en porcentaje.

La pérdida de eficiencia en el álabe se convierte en pérdida en la etapa mediante la distribución de la energía en la etapa sobre los álabes en función del grado de reacción

- Depósitos en llantas.

Se evalúan los depósitos situados debajo de la llanta que cubre los álabes móviles. Estos depósitos ocasionan una pequeña perturbación del flujo cerca del extremo del álabe, que se traduce en una pérdida de rendimiento. Para calcular las pérdidas que supone estos depósitos, se utilizan los valores de las profundidades de los depósitos. Estas pérdidas se calculan para cada etapa, para cada cuerpo y para la turbina entera.

- Espesor del borde de escape.

El borde de escape de los álabes estacionarios tiene normalmente un espesor de 0,4 a 0,8 milímetros de diseño, para limitar la separación del flujo. Sin embargo, las reparaciones realizadas durante las revisiones para corregir la erosión por partículas y daños por objetos extraños, dejan el espesor del borde de salida más grueso que el de diseño. Se evalúa la degradación en el rendimiento debido a un borde de escape más grueso en esta sección.

Con estos últimos datos se finaliza la evaluación energética. A continuación, se realiza la evaluación económica, analizando el coste de las pérdidas localizadas en la evaluación anterior. Esto se realiza basado en factores económicos que son exclusivos para cada turbina. En esta etapa, se pueden hacer pronósticos de ganancias adicionales debidas a una producción adicional de

energía. También se puede realizar una evaluación económica para cada una de las categorías de pérdidas analizadas en la evaluación energética.

Una vez con todos los datos disponibles, se pueden realizar informes mostrando datos como la potencia, consumo específico y caudal corregidos. Estos pueden ser comparados con los datos de diseño o con los datos de otra prueba de rendimiento.

CONCLUSIÓN

Mediante una auditoría energética, los técnicos pueden proporcionar al propietario de la instalación una serie de informes donde se reflejen las condiciones de la turbina etapa a etapa, antes y después de la parada por mantenimiento. Además, se dispondrá de un informe fotográfico completo, paso a paso, de los daños y las reparaciones. Esos informes proporcionan una valiosa información histórica, como también un detallado archivo de decisiones de mantenimiento.

Esta metodología es necesaria para determinar el coste/beneficio de las reparaciones en turbinas de la forma más rápida y efectiva, usando conocidos principios de diseño de turbinas de vapor.



Francisco MEDIAVILLA GARCÍA es Ingeniero Industrial, especialidad Técnicas Energéticas, por la E.S.I.I. de Bilbao. En 1981 inicia su actividad profesional en la construcción de la C.N. de Valdecaballeros para posteriormente continuar con la C.N. de Trillo con Empresarios Agrupados. En 1987 se incorpora a la empresa Tecnatom dentro de la división de pruebas. Es responsable de la unidad de laboratorios e instrumentación y de pruebas de rendimiento en ciclos térmicos y de pruebas HVAC en los sistemas de ventilación en CCNN.