

Estado de la técnica de turbinas a gas

Los estudios de mercado muestran que las turbinas a gas, y con ellas las centrales de ciclo combinado, ocupan actualmente el centro de interés en el sector de la producción de energía eléctrica. Las principales razones para ello son los bajos costes de inversión y de producción de la corriente eléctrica, la rapidez de construcción, la elevada disponibilidad y el bajo nivel de emisiones. El desarrollo de las turbinas a gas durante los últimos decenios constituye el fundamento para satisfacer las exigencias impuestas a estas máquinas, tanto las actuales como las que puedan aparecer en el futuro. Con las turbinas GT24 y GT26, ABB dispone de un concepto innovador y de las técnicas necesarias para alcanzar su objetivo en un futuro no lejano: rendimiento térmico del 60% satisfaciendo a la vez los requisitos impuestos a las emisiones.

La primera turbina industrial a gas de BBC entró en servicio en Neuchâtel, Suiza [1, 2]. Desde entonces la turbina a gas ha encontrado muchas aplicaciones, tanto en la producción de electricidad como en otros campos. En primer plano ha estado siempre el combustible más fácilmente disponible del momento, desde las aplicaciones para carga de base y de punta con fuel-oil pesado o ligero, o con gas de alto horno de baja potencia calorífica [3], hasta la actual explotación en carga de base con gas natural. Gracias a los esfuerzos innovadores de ingenieros y constructores, la turbina a gas ha demostrado plenamente durante los últimos 60 años su flexibilidad en cuanto al combustible.

La creciente privatización del suministro de energía eléctrica y la apertura del mercado de la energía en numerosos países han generado importantes cambios en el sector eléctrico. Más del 30% de las nuevas centrales son construidas por los llamados *Independent Power Producers* (IPP) en competencia con las compañías eléctricas.

Actualmente, el 35% de los 85 GW de potencia instalada al año se cubre con turbinas a gas. La puesta en funcionamiento de más reservas de gas natural ha provocado una evolución muy atractiva de los precios de este limpio portador de energía. Por razones económicas y ecológicas, las

turbinas a gas se utilizan con más y más frecuencia combinadas con turbinas a vapor en centrales de ciclo combinado, en unidades de cualquier dimensión o para acoplamiento calor-electricidad. La figura 1 muestra entre otras cosas el desarrollo del rendimiento térmico en las centrales de ciclo combinado. Otro aspecto importante es la gran reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) cuando se usa gas natural como combustible.

La sobrecapacidad actual de los fabricantes de turbinas a gas y la dura competencia por los nuevos mercados (en Asia y Europa) han hecho desplomarse los precios de las turbinas a gas y de las centrales de ciclo combinado, que han bajado cerca del 50% durante los últimos cuatro años. La consecuencia es que el diseño constructivo, la fabricación y el montaje de turbinas a gas para centrales de ciclo combinado, o de sus componentes, ha de hacerse globalmente pero con importante participación local, a buen precio y considerando muy en detalle las necesidades de la clientela [4].

Dr. Dilip K. Mukherjee

ABB Kraftwerke AG

Exigencias impuestas a las turbinas a gas

De las exigencias de mercado mencionadas se deducen los objetivos siguientes para los fabricantes de turbinas a gas:

- mayores unidades de bloques, es decir, aumento de la potencia unitaria y de la potencia específica;
- aumento de la disponibilidad y prolongación de la vida útil;
- menores inversiones iniciales y reducción de costes de mantenimiento;
- mejora del rendimiento global;
- reducción de la carga medioambiental.

Todos los fabricantes de turbinas a gas son muy conscientes de estas exigencias, impuestas por la clientela.

La figura 2 muestra las turbinas a gas suministradas actualmente por ABB. Las figuras 3 y 4 ilustran la mejora de disponibilidad de las turbinas a gas GT11N de ABB, o de centrales de ciclo combinado de ABB equipadas con turbinas a gas GT13E y GT13E2.

Turbinas a gas, técnicas básicas y componentes

Las actuales turbinas a gas de alta temperatura se caracterizan por disponer de quemadores mixtos con cámara de combustión anular y por los álabes directores regulables en los compresores. Los aspectos siguientes son fundamentales para el diseño, construcción y fabricación de componentes de las modernas turbinas a gas:

- orientación hacia los procesos de las turbinas a gas y combinados,
- aerodinámica y la llamada Computational Fluid Dynamic (CFD),
- concepto complejo de la transmisión de calor y de la refrigeración,
- combustión limpia,
- alta calidad de materiales y capas de protección,
- integridad mecánica de los componentes,
- moderno control de proceso, de regulaciones y de mandos,
- construcción robusta, de fácil fabricación, disposición adecuada para el mantenimiento de las instalaciones, sistemas auxiliares acreditados y perfeccionados permanentemente.

El aseguramiento de la calidad durante el diseño, construcción, fabricación, montaje y puesta en servicio exige aplicar procedimientos de trabajo orientados hacia la calidad, armonizando el diseño constructivo y la fabricación. Los progresos realizados por los fabricantes de turbinas a gas en este campo son ejemplares.

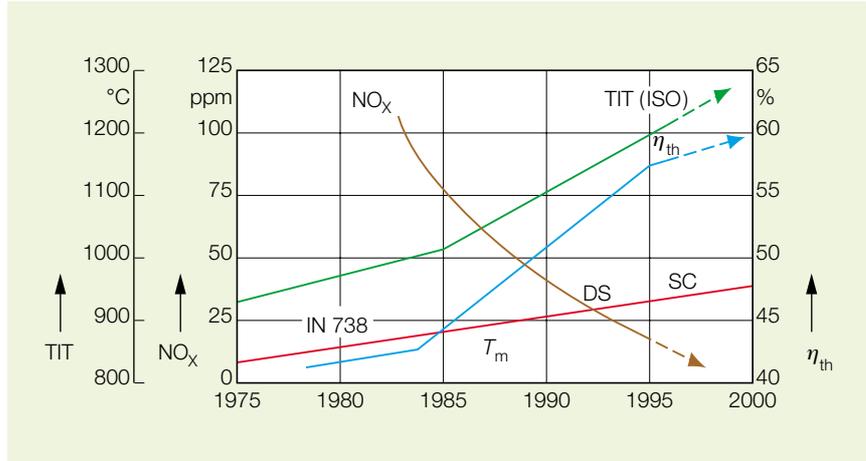
Para dimensionar las turbinas a gas se aplican programas de ordenador desarrollados y comprobados sistemáticamente. Hoy en día, los ensayos se realizan con modelos pero también con piezas originales. Además, los prototipos de turbinas a gas se ponen a prueba en bancos de ensayo propios o del cliente, empleándose gran cantidad de medios metrológicos.

A finales de 1996, ABB puso en servicio un nuevo centro de ensayos en Birr, Suiza, destinado a probar las turbinas GT26 y otras grandes turbinas a gas en curso de perfeccionamiento; un paso necesario, porque la clientela tiene cada vez menos posibilidades de realizar complejos ensayos de prototipos y los costes se incrementan sin cesar. Además, frecuentemente no es posible realizar importantes ensayos de detalle en las instalaciones del cliente para no perturbar la explotación.

Proceso de las turbinas a gas

El incremento de la potencia unitaria y del rendimiento se consigue trabajando sobre el proceso mismo de la turbina a gas y sobre los parámetros del mismo. Para la carga de base se considera de modo general la explotación combinada. En el proceso clásico de las turbinas a gas, el aumento de la potencia unitaria y del rendimiento se consigue a través del flujo de masa, de la temperatura de admisión de la turbina y de las correspondientes presiones.

La figura 1 ilustra de manera muy clara cómo ha aumentado la temperatura de entrada de las turbinas en el transcurso de los años, las temperaturas admisibles de los materiales y el rendimiento térmico de las centrales de ciclo combinado. Para conseguir con una turbina a gas un rendimiento térmico del 38%, o del 58% en una central de ciclo combinado, es condición ineludible incrementar fuertemente la temperatura de



Desarrollo de las centrales de ciclo combinado: temperatura de entrada (TIT), rendimiento térmico (η_{th}) y emisiones de NO_x (para gas natural), y temperatura admisible de los álabes (T_m)

TIT (ISO) Temperatura de entrada de las turbinas a gas según ISO

IN 738 Inconel 738, colada convencional de los álabes para turbinas a gas

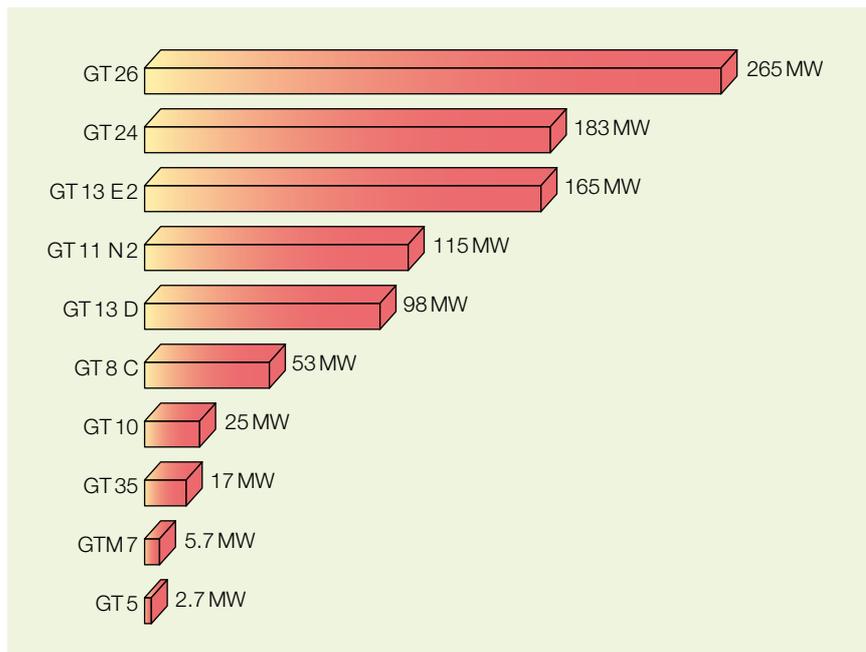
DS Solidificación orientada de los álabes para turbinas a gas

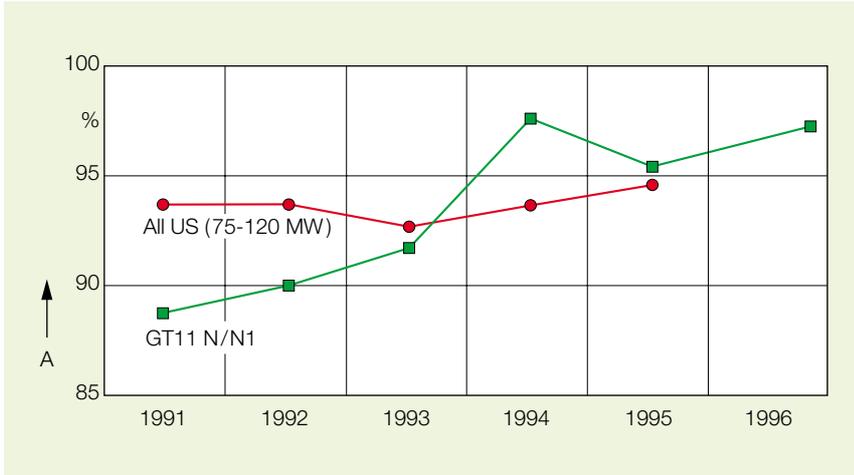
SC Tecnología monocristalina

combustión adecuando la refrigeración de aquellos componentes que conducen los gases de combustión. El mayor consumo de aire de refrigeración implica el riesgo de mayor emisiones de NO_x, puesto que se re-

duce el factor aire en la combustión primaria. En el proceso se aplican integralmente los avances de la aerodinámica, de la refrigeración, de los materiales y de la dinámica de fluidos asistida por ordenador.

Potencias nominales de las turbinas a gas ABB





Comparación de la disponibilidad (A) de las turbinas a gas GT11/N1 con máquinas equivalentes en Estados Unidos

3

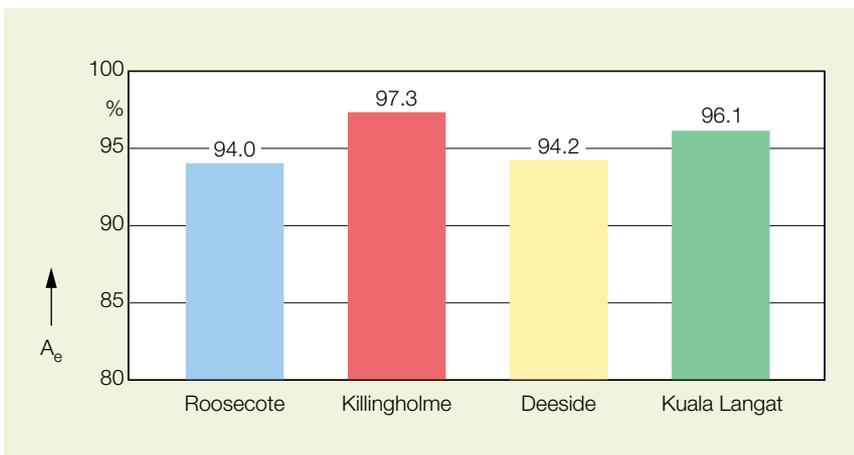
En las turbinas a gas GT24 y GT26, ABB aplica la técnica de combustión secuencial para alcanzar un rendimiento térmico del 38%, y en un futuro próximo del 40%, sin elevar notablemente la temperatura de entrada a la turbina a gas. Así se obtienen las ventajas siguientes:

- alta potencia específica y por tanto menor flujo másico de aire,
- bajas velocidades de punta del sistema de álabes, y por tanto menores tensiones mecánicas y térmicas,

- menor caudal de vapor/agua en la instalación combinada,
- menor temperatura de entrada a la turbina a gas y, por tanto, menor consumo relativo de aire de refrigeración,
- bajas emisiones de NO_x y de otros gases, procedentes de la segunda cámara de combustión secuencial EV (SEV),
- alta disponibilidad, gracias al uso de componentes acreditados,
- bajas temperaturas en los conductos de gases de combustión.

Disponibilidad equivalente (A_e) de distintas centrales de ciclo combinado de ABB, recientemente construidas, equipadas con turbinas a gas de los tipos GT13E y GT13E2. Roosecote, Killingholme y Deeside se encuentran en Gran Bretaña, Kuala Langat en Malasia.

4



La figura 5 representa la potencia específica y el rendimiento térmico de las actuales turbinas a gas, de ABB y de otros fabricantes [4, 5, 6, 7]. Todos los datos de las máquinas han sido reducidos a 3600 rpm para hacer posible la comparación de las máquinas de 50 y 60 Hz. La figura 6 muestra el caudal másico de aire a la entrada y la relación de compresión de estas turbinas.

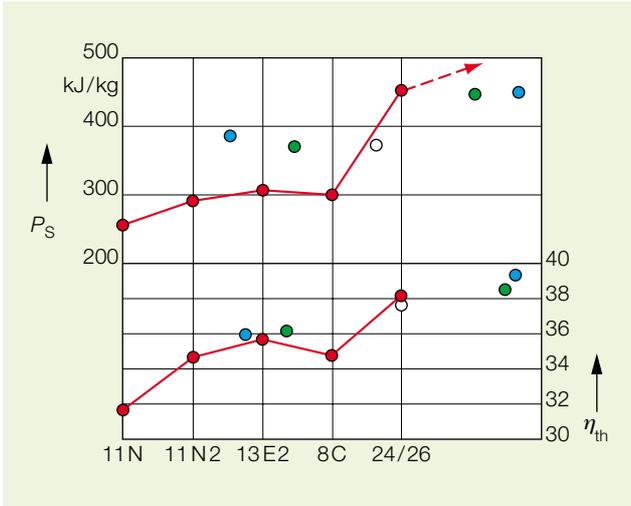
Compresor

En un compresor, el medio de trabajo fluye en dirección a una presión más alta. La conversión de energía en el alabeado de compresor es, por tanto, limitada. Esta diferencia respecto de la turbina requiere un mayor número de niveles en el compresor, con el fin de evitar los desprendimientos de corriente. Para conseguir compresores más compactos, menores longitudes constructivas y menor número de niveles se precisan relaciones de presión mayores entre niveles. Un flujo másico más grande y unas relaciones de presión entre niveles mayores requieren, sin embargo, mayores velocidades periféricas y de flujo, y la correspondiente desviación de este.

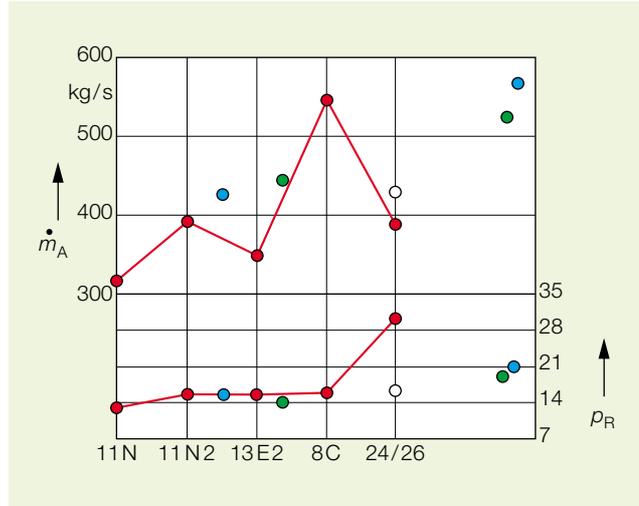
La antigua empresa BBC construyó compresores industriales para altas relaciones de presión (hasta 50 bar) en ejecución axial/radial y con refrigeración intermedia. ABB ha seguido cuidando la técnica de compresores de alta presión para construir turbinas a gas.

La técnica transsónica de compresor de la turbina a gas GT8 [8], que fue introducida por BBC en la década de los ochenta, sigue consiguiendo aún hoy valores sobresalientes de flujo y de carga de los niveles 6. Ya en 1983 se conseguía una relación de presión de 16 en la GT8, con sólo 12 niveles. La relación de presiones entre niveles de las GT8C y GT24/26 es actualmente un valor puntero. Las nuevas turbinas a gas de la competencia, 7G y 501G2, alcanzan rendimientos parecidos.

Durante los últimos 60 años, los perfiles de álabes de los compresores han evolucionado desde la primera generación (AVA Göttingen), hasta la cuarta y quinta generaciones (con multiple circular controlled difu-



5 *Potencia específica (P_s) y rendimiento térmico (η_{th}) de las distintas turbinas a gas, de ABB (rojo) y de algunos de sus concurrentes (azul, verde, blanco), reducida a 3600 rpm*



6 *Caudal másico de aire de entrada (\dot{m}_A) y relación de presión del compresor (p_R) de distintas turbinas a gas, de ABB (rojo) y de algunos concurrentes (azul, verde, blanco), reducidos a 3600 rpm*

sion), pasando por la segunda y tercera generaciones (perfiles NACA). Se ha prestado una atención especial a reducir las zonas marginales y a las fugas por juego, así

como a la relación entre el juego radial de los álabes y el límite de bombeo. Además se han hecho otras correcciones del perfil de álabes en las zonas marginales.

Combustión

Las medidas siguientes pueden reducir la formación de óxidos de nitrógeno en la llama: menor tiempo de estancia (gran nú-

Tecnologías de quemadores ABB para gas natural y fuel-oil ligero 2

SBK Quemador estándar
* con inyección de agua

EV Cámara de combustión para bajas emisiones de NO_x

SA Cámara de combustión anular

SEV Quemador secuencial para cámara de combustión de baja presión

1 Generador de torbellino

2 Núcleo de torbellino

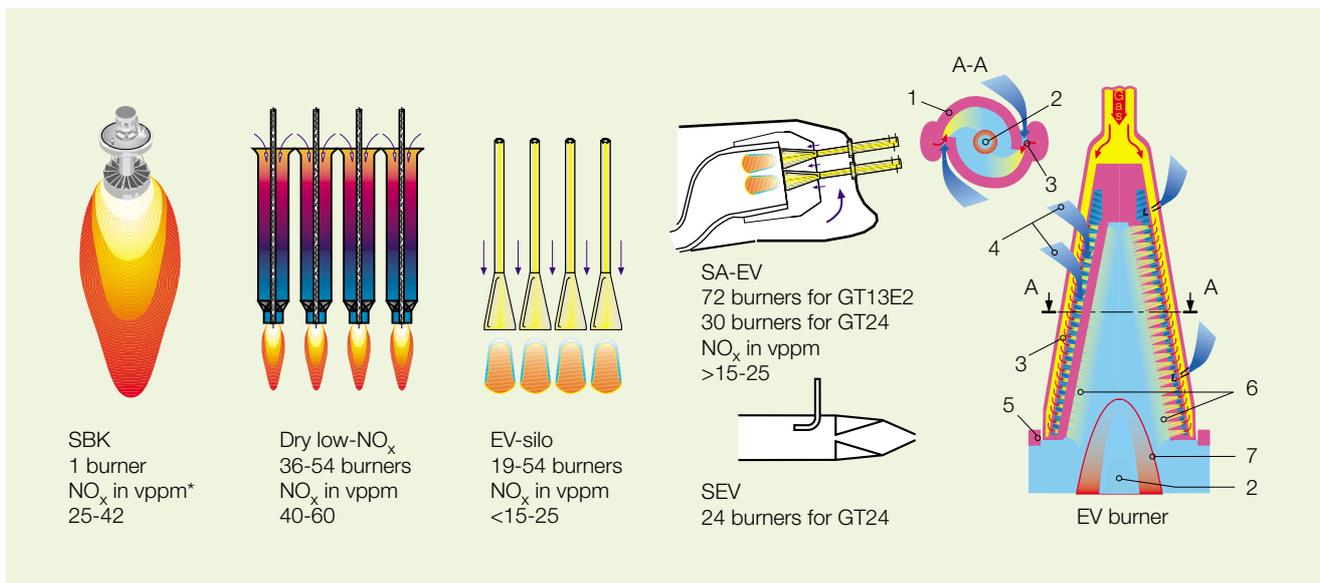
3 Inyección de gas

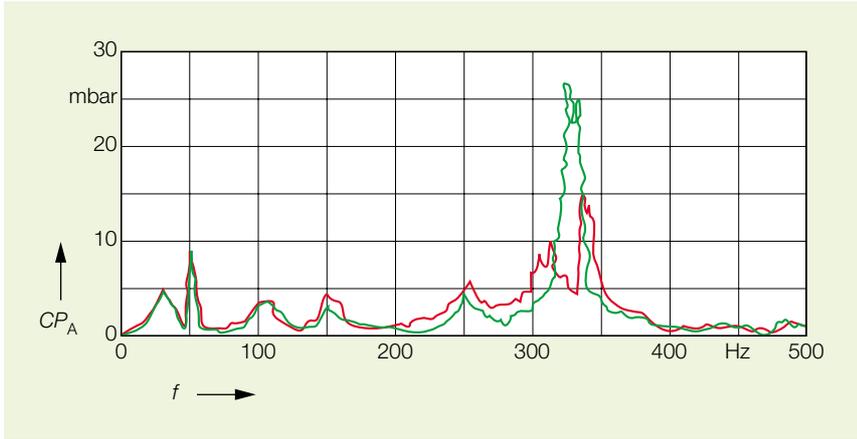
4 Aire comburente

5 Nivel de salida del quemador

6 Mezcla de gas y aire comburente

7 Frente de la llama





Vibraciones en el gas por autoexcitación en cámaras de combustión muy cargadas

8

CP_A Amplitud de las vibraciones en el gas
 f Frecuencia

verde Sin amortiguación
 rojo Con amortiguadores de Helmholtz

mero de llamas y baja temperatura de las mismas, combustión con mezcla previa lean premix combustion) y combustión subestequiométrica secuencial, así como combustión catalítica y ciertas medidas de tipo químico.

El principio de la combustión con mezcla previa ha sido introducido con éxito en las turbinas industriales a gas.

La figura 7 muestra la tecnología de quemadores ABB para gas natural y fuel-oil ligero 2, el principio de los quemadores EV y SEV de ABB [9, 10, 11] y el quemador EV utilizado en la turbina GT26.

La combustión de gas natural cumple las normas más estrictas de emisiones. El sistema de combustión de mezcla previa con baja formación de NO_x no necesita inyección de vapor ni de agua para suprimir las emisiones de NO_x . También pueden utilizarse otros combustibles, además del gas natural; en las instalaciones que operan con gas natural, a menudo se utiliza fuel-oil como combustible de reserva o incluso, en ciertos momentos, como combustible principal. Aparte de los NO_x , debidos a las altas temperaturas de combustión, el combustible no produce sustancias nocivas. Para eliminar las emisiones de NO_x se inyecta agua o vapor. Al perfeccionar los quemadores EV, ABB tiene como objetivo reducir las emisiones de NO_x en explotación seca, es decir, sin

inyectar agua ni vapor, por debajo de los valores admisibles.

El cálculo del flujo turbulento tridimensional en las cámaras de combustión, considerando o no los fenómenos de reacción cinéticos, ocupa un lugar fundamental en los métodos analíticos. La exactitud de los cálculos depende de la influencia mutua entre el quemador y la cámara de combustión, del calor liberado y de los modelos de turbulencia aplicados. Por eso es fundamental disponer de instalaciones apropiadas de ensayo. Además hay que realizar mediciones y ensayos en instalaciones existentes, puesto que en laboratorio es sumamente difícil comprobar la influencia mutua entre el quemador y la cámara de combustión. Otro aspecto muy importante en el desarrollo de la cámara de combustión es el diseño del sistema de alimentación de aire y de combustible. En la zona de combustión de cámaras fuertemente cargadas se corre el riesgo de que el gas comience a vibrar intensamente por autoexcitación. La figura 8 muestra las frecuencias y amplitudes medidas en una cámara de combustión de silo de una turbina ABB, en un caso sin amortiguación y en el otro con varios amortiguadores de Helmholtz.

La combustión secuencial aplicada en las turbinas GT24/26 se basa tanto en la experiencia de ABB como en trabajos sis-

temáticos de desarrollo y ensayos. La combustión con mezcla previa en el quemador SEV es autoinflamable y apenas produce emisiones de NO_x [11].

También se ha desarrollado la tecnología de quemadores para los gases de poder calorífico medio, originados en la gasificación de carbón o de aceite pesado. ABB ha modificado el quemador EV para hacer posible la combustión seca con bajo nivel de emisiones. Con este fin se mezcla el gas de síntesis con nitrógeno, procedente de una planta de descomposición de aire, y con él se alimentan los quemadores [12]. Otros fabricantes siguen la vía de añadir vapor de agua al combustible. También estos gases de bajo poder calorífico (gases de alto horno) pueden ser quemados en las turbinas a gas ABB [3].

Turbinas

El cálculo tridimensional del flujo y el diseño de perfiles con bajas pérdidas tiene una importancia fundamental en las modernas turbinas a gas. La figura 9 muestra el alabeado de una turbina a gas GT8. La forma de los contornos, el juego radial y las bandas de recubrimiento son puntos importantes del diseño. Además, es imprescindible calcular con precisión los coeficientes de transmisión térmica en la superficie de los álabes para poder dimensionar la refrigeración de estos.

El sistema de refrigeración de los álabes debe resolver, entre otros, el problema de la cantidad mínima de aire de refrigeración. La refrigeración por convección, con nervios transversales y nudos en la pared interior, así como la refrigeración por rebote con pérdida mínima de presión, son elementos firmemente establecidos en las turbinas a gas industriales. Ya a principios de los años setenta, ABB fue uno de los primeros fabricantes de turbinas para centrales eléctricas en introducir la refrigeración de álabes. En la refrigeración por película es fundamental maximizar el rendimiento de la película de refrigeración, el cual depende especialmente de la situación en el lado aire de refrigeración, del flujo exterior y de la disposición y ejecución de los orificios de salida, así como del ángulo de escape de la película de refrige-

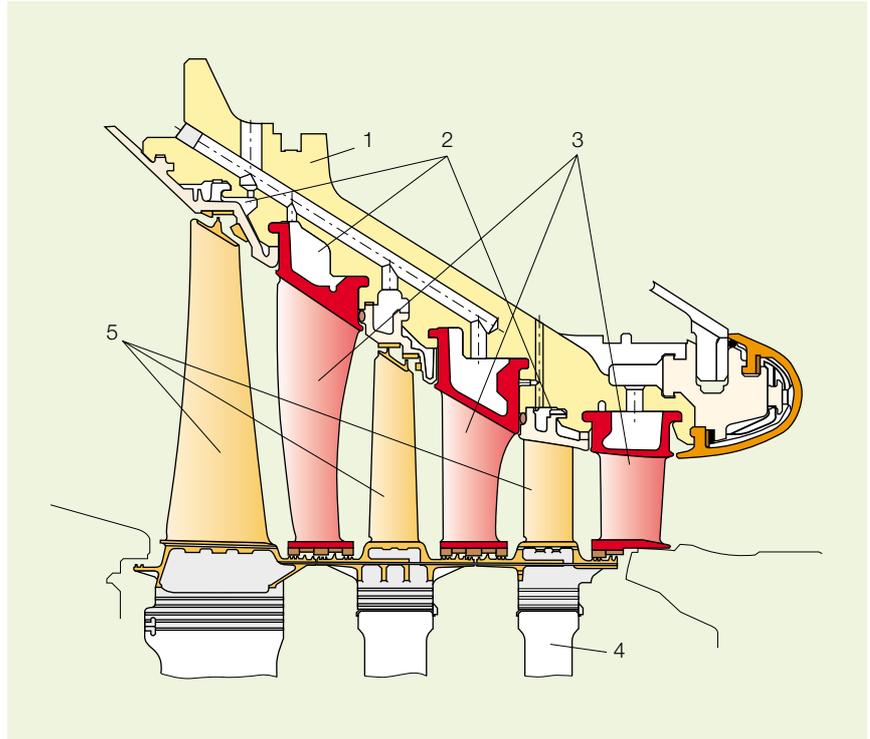
ración. En el borde delantero suele utilizarse refrigeración shower head.

Los álabes de las turbinas están sujetos a fuerzas centrífugas considerables (álabes de rodete) y a fuerzas de flexión debidas al gas. Para calcularlas es necesario disponer de datos sobre la resistencia a la fluencia del material de los álabes. Estos deben diseñarse de manera que su frecuencia propia no coincida con un múltiplo de la frecuencia de giro y de la frecuencia de las fuerzas periódicas debidas al gas. A menudo, los álabes están recubiertos con bandas. Frecuentemente se unen entre sí los álabes largos de los últimos niveles por medio de bulones para mejorar la amortiguación mecánica. En los alabes refrigerados aparecen además tensiones térmicas que, aunque a lo largo del tiempo se reducen por la fluencia, pueden provocar deformaciones o daños permanentes. Las tensiones térmicas en condiciones de funcionamiento transitorio, por ejemplo durante el arranque, la puesta fuera de servicio y los cambios de carga, provocan la llamada fatiga LCF (Low Cycle Fatigue). Al superar un número determinado de ciclos pueden aparecer fisuras. Si los álabes de turbinas a gas de alta temperatura están sometidos a altas cargas, las fisuras puede crecer hasta provocar la rotura brusca HCF (High Cycle Fatigue).

Materiales y capas de protección

El desarrollo de los materiales para álabes de turbinas y la mejora de los procedimientos de colada han contribuido decisivamente al aumento de la temperatura de entrada a las turbinas. Los álabes convencionales, fabricados con colada de precisión en IN 738 para los primeros niveles de turbina, han sido sustituidas por álabes de solidificación orientada. El paso siguiente lo constituyen los álabes monocristalinos hechos con aleaciones de níquel CMSX-2 o CMSX-4 **11**.

Ha mejorado muchísimo la resistencia a la fluencia y a las cargas cíclicas; también ha sido enorme el incremento de la temperatura de entrada a las turbinas **10**. La experiencia sobre el comportamiento a largo plazo de tales álabes ha sido adquirida con grupos propulsores de aviones. Aún



Alabeado de una turbina a gas GT8

9

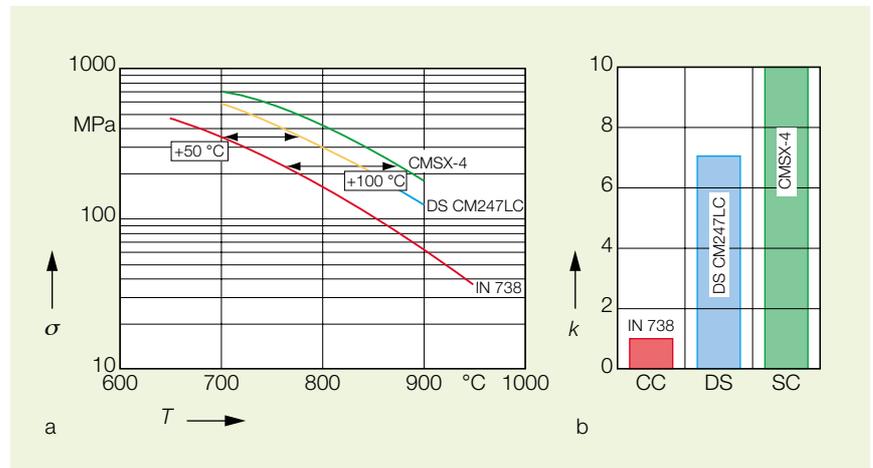
- 1 Soporte de álabes
- 2 Cámaras de circulación del aire de refrigeración
- 3 Álabes directores
- 4 Rotor
- 5 Álabes móviles

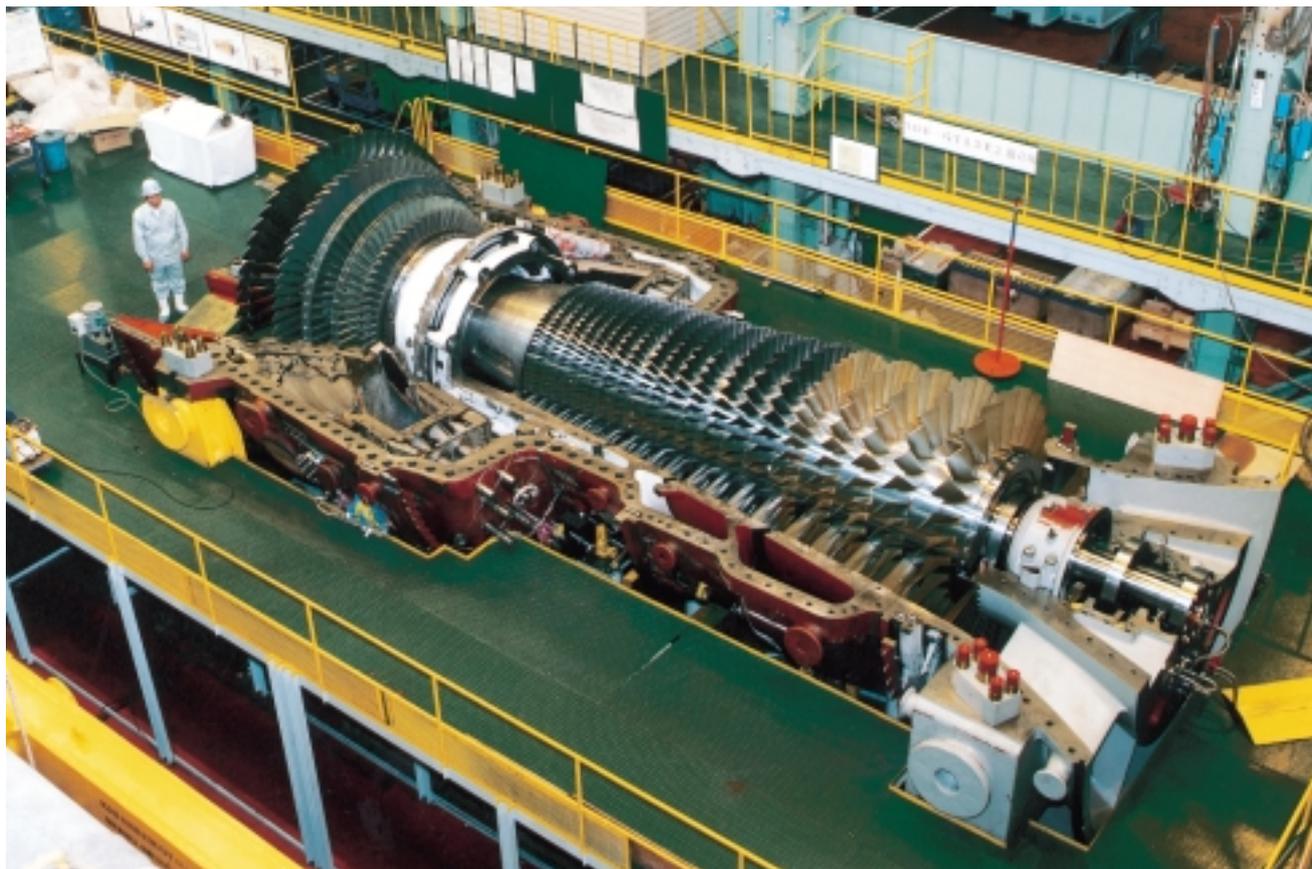
Mejora de la resistencia a la fluencia durante un periodo determinado (a) y mejora relativa de la capacidad ante las sollicitaciones cíclicas (b) de los materiales para turbinas a gas, en comparación con Inconel 738.

10

- σ Resistencia a la fluencia durante un periodo determinado
- T Temperatura
- k Factor de mejora respecto de IN 738

- CC Álabes policristalinos convencionales
- DS Álabes con solidificación orientada
- SC Álabes monocristalinos





Montaje de una turbina a gas GT13E2 en la fábrica ABB de Mannheim

11

se dispone de poca experiencia con las turbinas industriales a gas equipadas con modernos álabes DS y SC, especialmente sobre las posibilidades de reparación, que deberán estudiarse con base en la experiencia de explotación.

El desarrollo de capas de protección contra la corrosión y la oxidación a alta temperatura, así como las capas de aislamiento térmico, permiten reducir la cantidad de aire de refrigeración a pesar de que los gases de combustión tienen ahora mayor temperatura.

Construcción de las turbinas a gas

Durante los últimos 60 años, ABB ha construido más de 1200 turbinas a gas con una potencia total de más de 50 000 MW. Una experiencia de muchos años, las buenas propiedades de operación, la sencillez, una técnica moderna y la orientación hacia las necesidades del cliente son las principales características del concepto

actual de ABB en el campo de turbinas a gas y centrales de ciclo combinado. Ya se han descrito [13, 14] las características constructivas de los numerosos tipos de turbinas a gas que ABB ha fabricado durante los últimos 60 años. Entre 1947 y 1960, BBC construyó turbinas a gas de doble eje con refrigeración intermedia, precalentador de aire y doble alimentación de calor (sobrecalentamiento intermedio). Sin embargo, pronto se identificaron las ventajas de las turbinas de un solo eje. A pesar de las numerosas variantes de equipamiento, los elementos fundamentales han sido siempre los mismos. Incluso en las grandes turbinas a gas actuales de ABB (potencia superior a 30 MW), la construcción se basa en una probada técnica que sobresale por la sencillez de construcción y la facilidad de revisión: eje soldado, dos cojinetes y un sencillo concepto de regulación, estas son sus principales características. Para las turbinas a gas de menores dimensiones se han utilizado tradicional-

mente los principios constructivos usuales en la industria aeronáutica. Desde la década de los sesenta han permanecido invariables los principios constructivos de las turbinas a gas ABB, aunque han sido perfeccionados constantemente.

La figura **11** muestra el montaje de una turbina a gas GT13E2, derivada del modelo GT13E1. En la GT13E2 se ha sustituido la cámara de combustión de silo por una cámara de combustión anular buscando reducir costes, facilitar el mantenimiento y mejorar la conducción de los gases de combustión. Su diseño constructivo se basa en la cámara anular de la turbina GT8. Por lo demás, las turbinas GT13E1 y GT13E2 son casi idénticas. La segunda presenta un flujo másico y una temperatura de entrada ligeramente superiores. Este aumento de temperatura de entrada sin incremento de la temperatura de punta ha sido posible gracias a que la cámara de combustión anular proporciona un reparto más regular de las temperaturas.

El eje de la turbina a gas es un componente fundamental, sometido a fuerzas centrífugas enormes y a altísimas temperaturas. La refrigeración, la protección del rotor contra los gases de combustión y el calentamiento lento y controlado durante el arranque en frío (para mantener las tensiones térmicas en un bajo nivel), constituyen misiones fundamentales de la construcción de rotores. Los rotores de otros fabricantes tienen ciertas diferencias, que se deben al uso de técnicas tradicionales en el diseño constructivo y en la fabricación. Una comparación ya publicada [15] entre las construcciones de rotores de distintos fabricantes ilustra las ventajas de las construcciones soldadas: escasas vibraciones y ausencia de mantenimiento. En un rotor, los componentes críticos son el primer y el último disco de la turbina, o más concretamente del compresor. El primer disco del compresor y el último de la turbina están sometidos a fuerzas centrífugas elevadas,

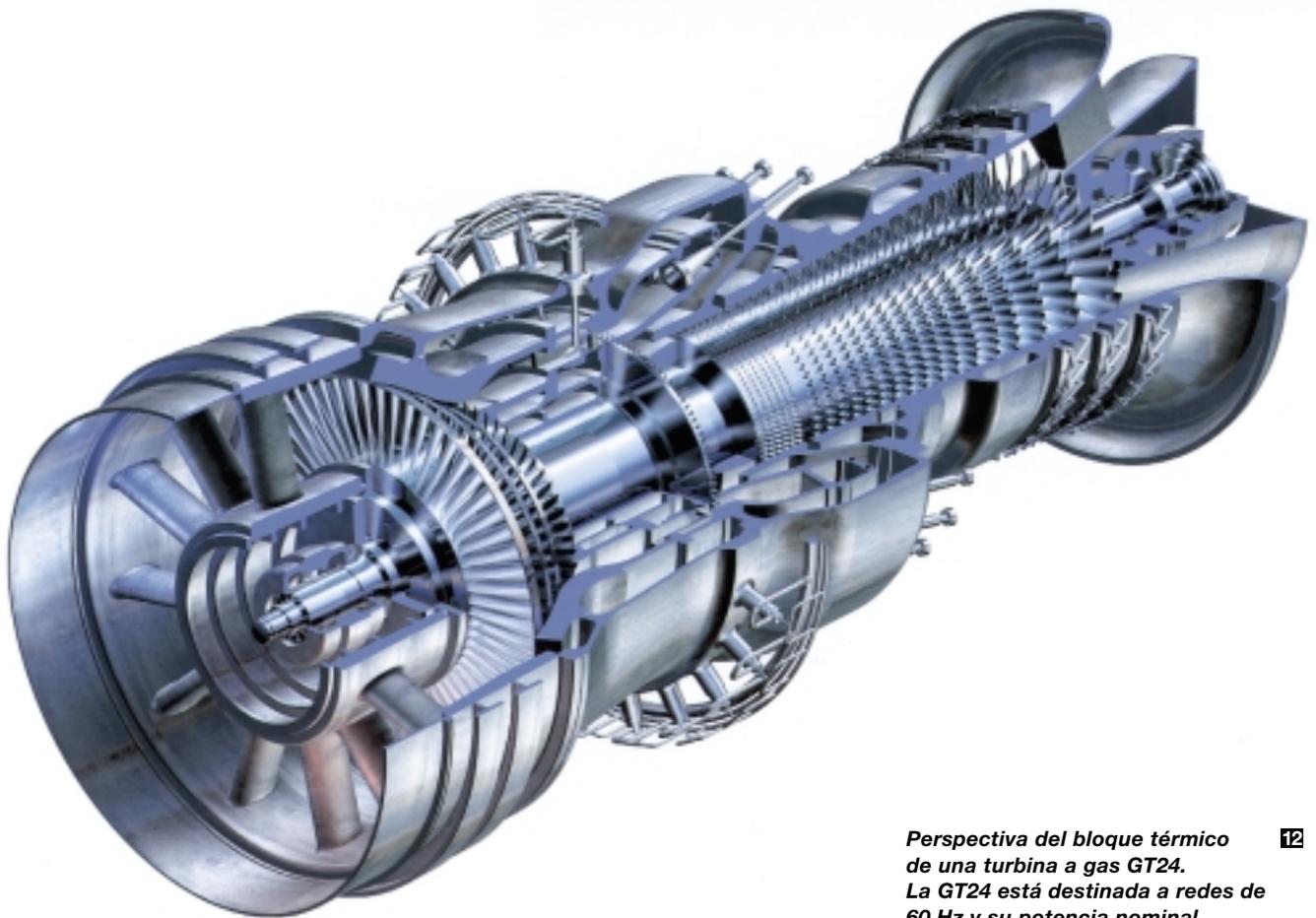
mientras que el último disco del compresor y el primero de la turbina están expuestos a altas temperaturas. En la práctica, el rotor soldado ha demostrado ser muy resistente en lo que se refiere a la LCF (*Low Cycle Fatigue*) y a la seguridad.

En las turbinas a gas de ABB con potencias superiores a 30 MW, los ejes están compuestos por discos forjados y soldados. Los discos y el eje soldado son sometidos a distintos ensayos para comprobar sus propiedades mecánicas y detectar los posibles defectos. Los álabes de rodetes del compresor están montados en ranura circular mientras que los de turbina están fijados radialmente con los llamados pies de abeto, y asegurados axialmente. En la zona de la turbina, el eje está equipado con pantallas térmicas para protegerlo contra las altas sollicitaciones térmicas debidas a los gases de combustión. Estas pantallas están refrigeradas con aire proveniente del compresor, que también se

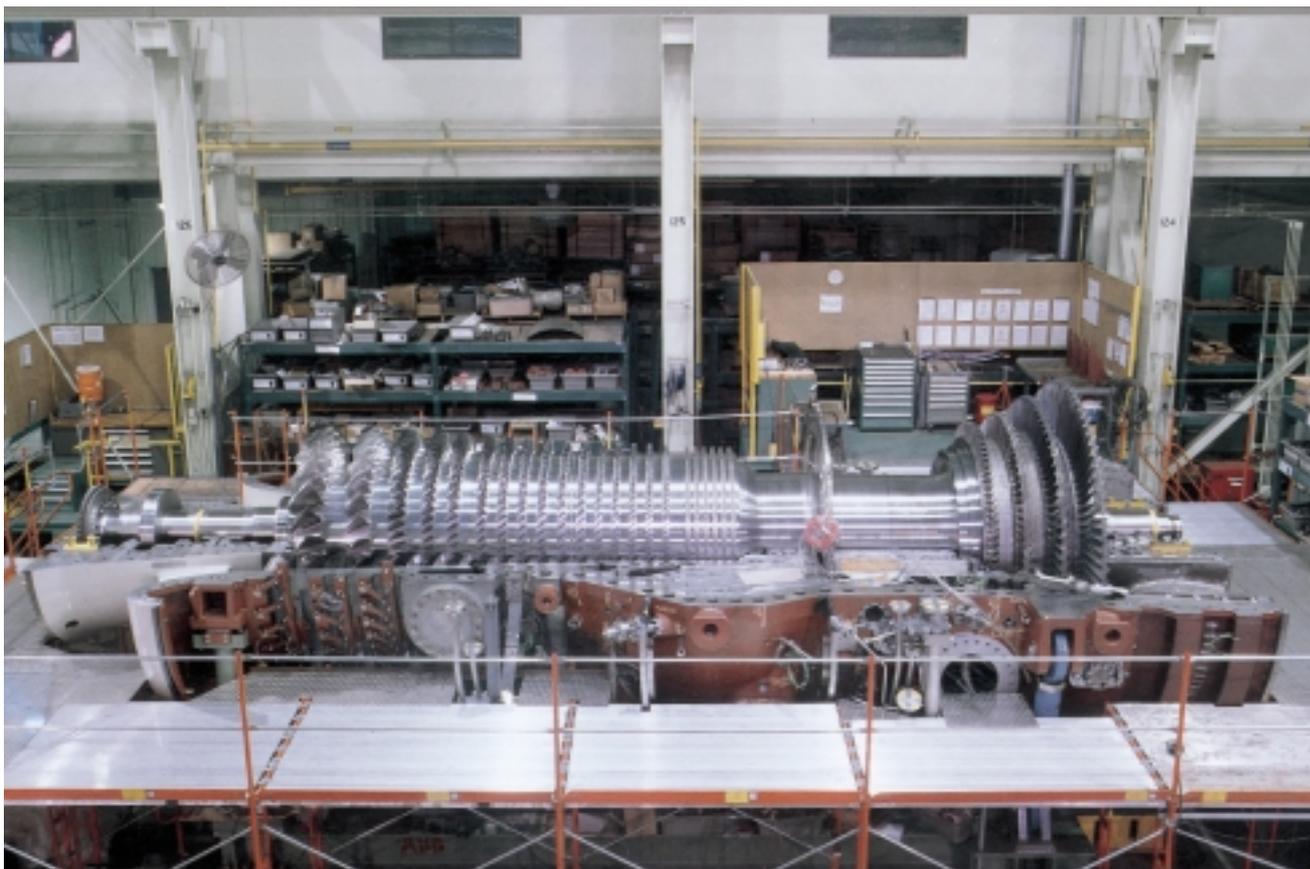
usa para refrigerar los álabes móviles de rodetes delanteros. El eje se apoya sobre dos cojinetes, fácilmente accesibles en estado de parada sin necesidad de abrir la máquina. La posición axial del rotor está asegurada por un cojinete axial de deslizamiento que se encuentra en la carcasa de admisión.

Otros fabricantes construyen los ejes como conjunto de discos fijados entre sí por tornillos precomprimidos. El deslizamiento entre los discos queda impedido, sea por un dentado frontal o de Hirth, o por el rozamiento entre las superficies frontales de los discos.

Las modernas turbinas de alta temperatura se utilizan cada vez más frecuentemente con calderas de recuperación en centrales de ciclo combinado. El alternador se monta entonces en el lado frío del compresor. En esta configuración, el compresor transmite al alternador el momento total de giro de la turbina. Anteriormente



Perspectiva del bloque térmico de una turbina a gas GT24. La GT24 está destinada a redes de 60 Hz y su potencia nominal es de 183 MW. 12



Montaje de una turbina a gas GT24 en la fábrica ABB de Richmond, Estados Unidos

13

se habían presentado dificultades en los rotores con transmisión del momento de giro por rozamiento entre los discos. Gracias a la experiencia de muchas décadas y a los perfeccionamientos que se han conseguido, también el rotor atornillado está actualmente en condiciones de cumplir los requisitos.

Características constructivas de las turbinas GT24/26

Las dos turbinas a gas pertenecen a una misma familia, la GT24 para 60 Hz y la GT26 para 50 Hz. Las figuras **12** y **13** muestran la turbina GT24 en perspectiva y durante el montaje. Casi todos los componentes de la GT26 tienen dimensiones 20% mayores que la versión GT24. ABB ha aplicado también en este caso la acreditada solución de eje soldado con dos cojinetes y cámara de combustión anular con quemadores EV. El sistema de combustión secuencial está basado en 45 años de expe-

riencia de explotación, experiencia adquirida en un total de 27 unidades. Ya en 1978 se construyó la primera máquina según este concepto, que estaba destinada a una instalación de acumulación de aire construida en Huntndorf (Alemania).

La caja de admisión de las turbinas GT24/26 es una construcción compacta con flujo de entrada optimizado. Los cojinetes y los sensores de vigilancia pueden extraerse sin necesidad de desmontar la caja. El compresor cuenta con 22 niveles (relación de presiones igual a 30) con 3 series de álabes directivos regulables. El resultado es una carga de los niveles relativamente baja y un buen comportamiento en carga parcial. Las figuras **14** y **15** muestran los componentes principales de la parte media: los últimos niveles de compresor, el sistema de combustión secuencial con el nivel de alta presión de la turbina, así como la turbina de baja presión de cuatro niveles hacia el sistema de gases de combustión.

La ejecución de la compacta cámara de combustión anular de alta presión es semejante a la de la acreditada turbina GT13E2. Las envolturas interiores y exteriores están formadas por segmentos refrigerados por convección. En la GT24 se han conservado en el segmento frontal los extremos de los 30 quemadores EV, fijados a la cubierta. En la cubierta se han integrado los sistemas de distribución de combustible, para gas natural y fuel-oil.

La cámara de combustión SEV de baja presión ha sido realizada como construcción anular compacta. Los segmentos están refrigerados por convección, igual que en la cámara de combustión de alta presión; los difusores, por el contrario, situados antes de las 24 lanzas de inyección para la combustión, están refrigerados por efusión.

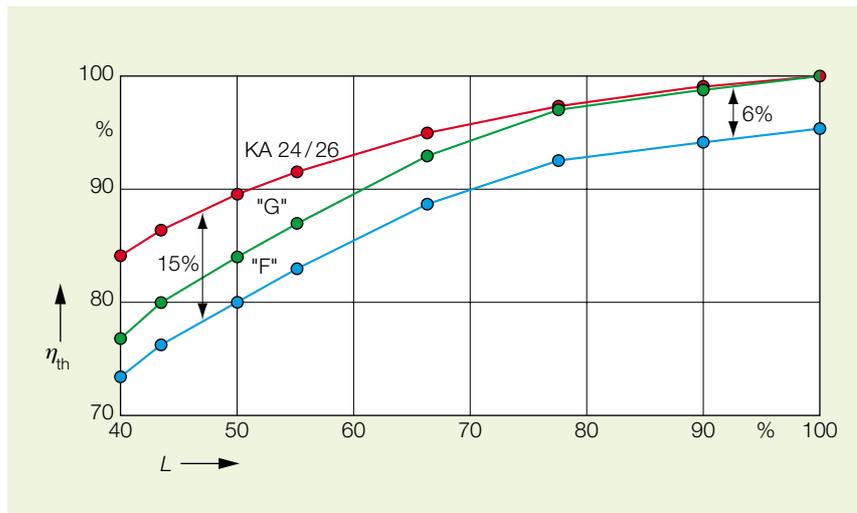
Los álabes de la turbina **15**, con curvatura espacial, han sido diseñados con placas de cobertura. Los álabes de rodete disponen de los llamados pies axiales de

abeto. Los álabes del nivel de alta presión, así como tres niveles de la turbina de baja presión, están refrigerados para que el metal se mantenga a una temperatura moderada. Las aberturas boroscópicas simplifican la inspección de la turbina.

En la caja y el difusor de los gases de combustión se ha aplicado la mecánica de fluidos para conseguir recuperación máxima de presión. También en este caso se ha utilizado la probada construcción con aislamiento de la estructura portante. Además se ha asegurado el fácil acceso para las inspecciones. Los cojinetes están descargados por medio de soportes elásticos.

Control de procedimiento, vigilancia y protección

Durante los últimos años se han endurecido notablemente las exigencias impuestas a la regulación de las turbinas a gas, concretamente la precisión exigida a la regulación de acontecimientos transitorios, como el arranque, la descarga y el sostenimiento de la frecuencia. La razón es que los límites de la zona operacional admisible se han hecho más estrechos, especialmente en cuanto a rendimiento y limitación de las emisiones. Estos límites están determinados, entre otros, por los límites de temperatura y de extinción, por las zonas de pulsación y por los límites de bombeo. Si la turbina funciona fuera de la zona operacional, pueden producirse graves daños, se pierden muchas horas de explotación equivalente y se reduce mucho la disponibilidad de la máquina. La combustión secuencial aporta flexibilidad, que puede aprovecharse plenamente en las turbinas a gas GT24/26 por medio de una regulación jerárquica (adaptación de la carga por los reguladores de combustible EV o SEV, o modificando el flujo másico por ajuste de los álabes directores en los compresores). Para ello se han tenido muy en cuenta los procesos físicos, ya de por sí jerarquizados, que tienen lugar en las turbinas a gas. El desarrollo del concepto de regulación se ha basado en modelos desde el principio; el concepto ha sido pensado y puesto a prueba con ayuda de un simulador dinámico de turbina a gas. El simulador mismo ha sido posible gracias al sistema CACSD (Computer Aided Con-



Comportamiento en carga parcial de instalaciones de ciclo combinado KA24/26, equipadas con turbinas a gas GT24/26, comparado con las turbinas a gas de la competencia

η_{th} Rendimiento térmico relativo
L Carga

rojo Turbinas a gas GT24/26 en centrales de ciclo combinado KA24/26
azul Turbinas a gas de clase «F» de la competencia
verde Turbinas a gas de la clase «G» de la competencia

rol System Design), que permite desarrollar y optimizar reguladores muy complejos.

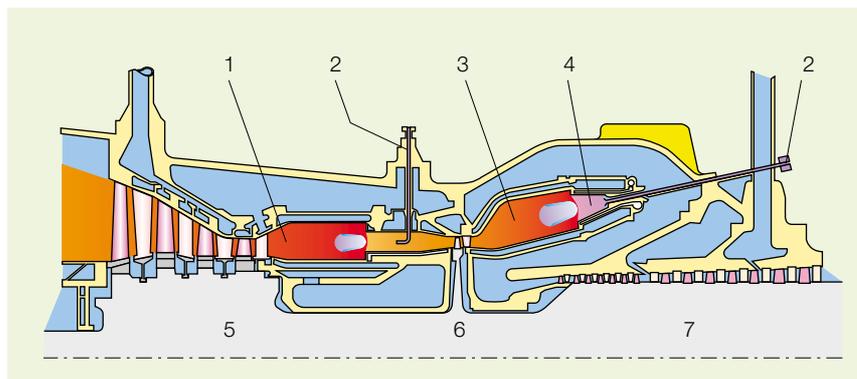
Otro dominio de aplicación posible del simulador de turbina a gas es el llamado On Line Process Monitoring. Las divergencias entre el modelo y el procedimiento real permiten extraer conclusiones sobre

cómo modificar el proceso, que pueden usarse como base para elaborar un concepto de mantenimiento.

El concepto de protección ha de tener en cuenta todas las perturbaciones imaginables, algunas de las cuales puede determinarse simulando el funcionamiento.

Componentes principales de la parte intermedia de las turbinas a gas GT24 y GT26 con el sistema de combustión secuencial

- 1 Cámara de combustión SEV
- 2 Inyección del combustible
- 3 Cámara de combustión EV
- 4 Quemador EV
- 5 Turbina de baja presión
- 6 Turbina de alta presión
- 7 Compresor



Las medidas de protección dan mayor seguridad de operación, pero en general afectan negativamente a la disponibilidad de las instalaciones. Esta, por tanto, ha de ser asegurada por medio de redundancias y procedimientos automáticos de control, y empleando componentes robustos. Las principales acciones de protección son la descarga de protección (descarga hasta marcha en vacío en 2 minutos) y la desconexión de urgencia (GT-Trip, que debe evitarse en lo posible, pues somete a la máquina a altas sollicitaciones.

Perspectivas

Se prevé que el mercado se desarrolle positivamente durante las próximas décadas, lo cual promoverá un rápido avance de la técnica de turbinas a gas [4, 5, 16, 17]. El aumento de la potencia unitaria y del rendimiento térmico, el cumplimiento de las normas referentes a emisiones y la robustez de construcción ocupan el centro de la atención. Con la combustión secuencial, y gracias a los constantes perfeccionamientos de la tecnología fundamental, ABB podrá conseguir su objetivo en un futuro bastante cercano: rendimiento térmico del 60% sin reducir la disponibilidad.

Todos los fabricantes están perfeccionando las tecnologías fundamentales. La refrigeración a vapor de las turbinas a gas, en un proceso cerrado de ciclo combinado, que ABB patentó ya en 1982, deberá ser introducida con el mayor cuidado. Algunos problemas, como las incrustaciones y la obturación de los orificios finos de refrigeración, el arranque con aire de refrigeración y la mutación posterior a vapor, los cambios de carga y la puesta fuera de servicio, deberán resolverse a escala industrial antes de su explotación comercial. En el campo de los materiales, capas de protección, CFD, etcétera, podrían aparecer efectos sinérgicos, reforzados además por el trabajo conjunto de los fabricantes de turbinas a gas. El proceso de combustión y la construcción de cámaras de combustión constituyen tecnologías fundamentales, tanto más cuanto que la flexibilidad de uso de combustible se exigirá cada vez con más frecuencia.

ABB está en el buen camino en la técnica de turbinas a gas gracias a la introducción de la combustión secuencial y de las elevadas relaciones de presión en las turbinas GT24/26 y a los quemadores para combustibles de poder calorífico medio, que se usan en las versiones GT11N2 y GT13E2.

Bibliografía

- [1] Meyer, A.: Die Gleichdruck-Gasturbine, ihre Geschichte, ihr heutiger Stand und ihre Aussichten für die nahe Zukunft. Comunicación Brown Boveri 26 (1939) 6, 127-140.
- [2] Stodola, A.: Leistungsversuche an einer Gleichdruck-Gasturbine der A.-G. Brown, Boveri & Cie. in Baden. Comunicación Brown Boveri 27 (1940) 4, 79-83.
- [3] Mukherjee, D.: Combustibles no convencionales para turbinas a gas. Revista ABB 9/95, 29-37.
- [4] Farmer, R.: Steam-cooled 501G rated 230 MW with 2600°F rotor inlet temperature. Gas Turbine World. Nov./Dic. 1994, 22-27.
- [5] Corman, J.C.; Paul, T.C.: Power Systems for the 21st Century. «H», Gas Turbine Combined Cycles, GER-3935.
- [6] Siemens unveils 240 MW V94.3 Gas Turbine. Modern Power Systems - Staff Report. Marzo 1995.
- [7] Dörr, H.: Die neue Generation der leistungsstarken Gasturbinen für den Einsatz in GuD/Kombi-Kraftwerken in Einwellenanordnung. BWK, Bd. 48 (1996) 1/2, 47-51.
- [8] Farkas, F.: The Development of a Multi-Stage, Heavy-Duty Transonic Compressor for Industrial Gas Turbines, ASME 86-GT-91.
- [9] Sattelmayer, Th. u.a.: Second Generation Low-Emission Combustors for ABB Gas Turbines: Burner Development and Tests at Atmospheric Pressure. Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Bruselas, Bélgica, junio 11-14, 1990. Paper No. 90-GT-162.
- [10] Aigner, A. u.a.: Second Generation Low-Emission Combustors for ABB Gas Turbines: Tests under Full-Engine Conditions. Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Bruselas, Bélgica,

junio 11-14, 1990. Paper No. 90-GT-308.

- [11] Joos, F. u.a.: The SEV Combustor: An Innovative Concept Leading to Single Digit NOX Emission Levels. PowerGen '95 Asia, Sept. 27-29, Singapur.
- [12] Döbbling, K. u.a.: Low NOX Premixed Combustion of MBTU Fuels using the ABB Double-Cone Burner (EV Burner). International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, La Haya, Países Bajos, junio 13-16, 1994.
- [13] Endres, W.: 40 Jahre Brown Boveri Gasturbinen. Comunicación Brown Boveri. 66 (1979) 2, 61-67.
- [14] Endres, W.: Les turbines à gaz types 9, 11 et 13, leur développement et les résultats d'exploitation. Comunicación Brown Boveri. 64 (1977) 1, 5-11.
- [15] Endres, W.: Rotor Design for Large Industrial Gas Turbines. International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Colonia, Alemania, junio 1-4, 1992.
- [16] Corman, J.C.: Gas Turbine Power Generation - Status & Environmental Considerations. ASME 95-CTP-29.
- [17] Matsuzaki, H. u.a.: Development of Advanced Gas Turbines. ASME IGTI Conference, Birmingham, 1996.

Dirección del autor

Dr. Dilip K. Mukherjee
 ABB Kraftwerke AG
 Postfach
 CH-5401 Baden, Suiza
 Telefax: +41 (0) 56 205 28 88