

Máximo rendimiento en la generación de energía eléctrica con las centrales de ciclo combinado

Las centrales de ciclo combinado son, entre las centrales energéticas térmicas, las que alcanzan mayores rendimientos. Ni la carnotización del proceso en las turbinas a gas ni las demás combinaciones de turbinas de gas/vapor dan lugar a resultados comparables. Las centrales de ciclo combinado dan también excelentes resultados en lo que se refiere a la potencia específica de salida y a la potencia nominal límite de las turbinas a gas. Los resultados pueden mejorar todavía más inyectando vapor en la turbina a gas o inyectando agua caliente o supercrítica. Los mayores rendimientos y potencias se consiguen aplicando ciclos combinados con turbinas a gas de combustión secuencial. Las centrales de ciclo combinado KA24 y KA26 de ABB, construidas con las avanzadas turbinas a gas GT24 y GT26, ilustran las ventajas de esta tecnología.

Desde que entraron en funcionamiento las primeras turbinas de gas se han hecho grandes esfuerzos para aprovechar sus características con el fin de optimizar el rendimiento y la rentabilidad de la generación de energía a partir de combustibles fósiles. Los primeros intentos se concentraron en la carnotización del ciclo termodinámico aplicando diferentes ideas: refrigeración intermedia durante la fase de compresión, recuperación de los gases de escape de la turbina (para recalentar el aire comprimido), y recalentamiento durante la expansión. Sin embargo, todos estos conceptos exigían un diseño complejo y muy articulado [1].

Dado que la turbina de gas es una «máquina diferencial generadora de energía», en la que entre el 50 y el 70 por ciento de la potencia producida se utiliza para accionar el compresor, las consecuencias de la irreversibilidad termodinámica se manifiestan de manera muy patente. Por ejemplo, una reducción del 1% en el rendimiento de la

turbina hace que la potencia útil caiga entre 2 y 3%. Las caídas de presión en los conductos de entrada de aire y salida también tienen un efecto multiplicador sobre las pérdidas. Estas son especialmente importantes cuando se utilizan la refrigeración intermedia y la recuperación, no pudiendo conseguirse de forma económica la ganancia prevista.

Finalmente, ha resultado patente que en vez de utilizar la refrigeración intermedia y el precalentamiento del aire, sería más ventajoso utilizar los gases calientes de salida de la turbina de gas para producir vapor con el fin de generar energía adicional. De aquí nació el proceso combinado de gas/vapor que condujo a las centrales de ciclo combi-

Hans Ulrich Frutschi
ABB Power Generation

nado, las cuales aprovechan de forma ideal el gran potencial térmico que ofrece la tecnología actual.

En la figura 1 se muestra un resumen simplificado de los métodos utilizados para carnotizar el proceso en las turbinas de gas y los procesos combinados de gas/vapor.

Carnotización del proceso en las turbinas de gas

Comenzando por una turbina simple a gas, los esquemas 2a a 2c ilustran los diferentes esfuerzos hechos para la carnotización, en concreto la integración de un refrigerador intermedio, de un recuperador de calor y de un recalentador.

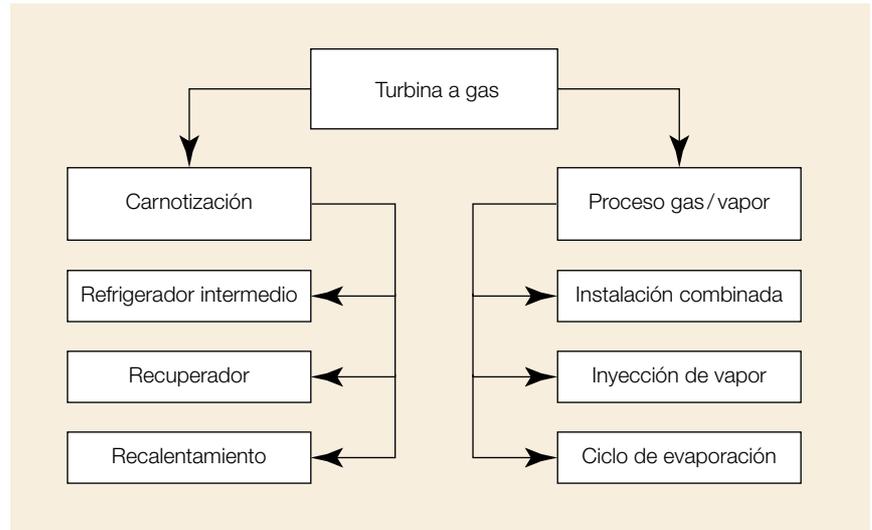
Si la refrigeración intermedia en el compresor ha de incrementar tanto la potencia producida por la turbina a gas como el rendimiento de la misma, el refrigerador intermedio ha de estar integrado –en términos de energía– después de aproximadamente un tercio del proceso de compresión 2a. Sin embargo, la ganancia principal se consigue en la potencia producida, ya que el rendimiento sólo aumenta ligeramente.

Símbolos en las figuras 2 a 7

C	Compresor
T	Turbina
ST	Turbina de vapor
G	Alternador
IC	Refrigerador intermedio
Rec	Recuperador
HRSG	Caldera de recuperación a vapor
Cond	Condensador
Eco	Economizador
M	Mezclador
F	Bomba de alimentación
O	Válvula de inyección de vapor
Comb	Combustor
AGV	Alabes guía regulables
GT	Turbina de gas
CC	Central de ciclo combinado
SQ	Combustión secuencial
STIG	Turbina a gas con inyección de vapor
EVAP	Turbina a gas con evaporación
$\dot{m}H_2O$	Caudal másico de agua o vapor, en tanto por ciento, del caudal en el compresor
Índices	
HP	Alta presión
LP	Baja presión

La ganancia máxima de rendimiento por medio de la carnotización se consigue empleando un recuperador combinado con la refrigeración intermedia en el compresor, optimizado para conseguir potencia máxima. Para ello, el refrigerador intermedio tiene que dividir el compresor en dos secciones, ambas con aproximadamente la misma relación de compresión **2b**. En la práctica, desafortunadamente, la efectividad de la recuperación disminuye considerablemente debido al gran volumen de aire de refrigeración requerido por las modernas turbinas a gas, que trabajan con temperaturas altas de gas. Además, el coste de instalación de un recuperador es muy elevado.

Otra forma de elevar la potencia producida y el rendimiento de las turbinas es recalentar el gas en un proceso de combustión secuencial. Se consiguen condiciones óptimas para la carnotización cuando a esta configuración se le añaden un recuperador y varios refrigeradores intermedios de compresor **2c**. Al principio se construyeron estas complejas centrales de turbinas a gas aplicando tanto ciclos abiertos como

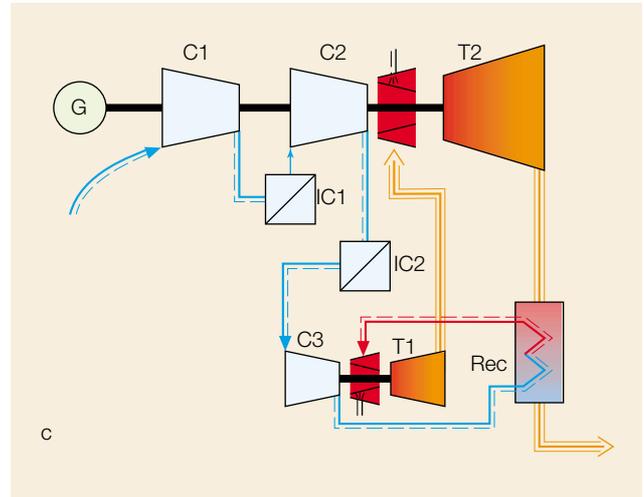
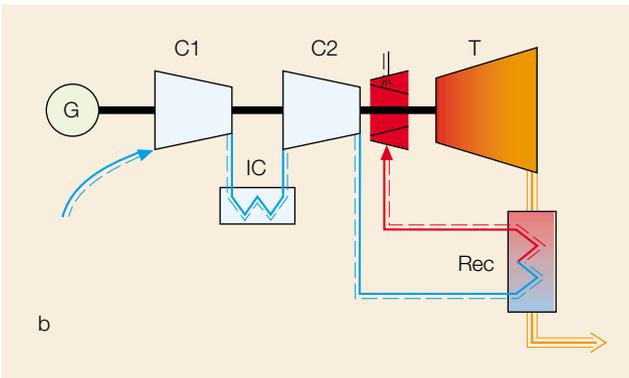
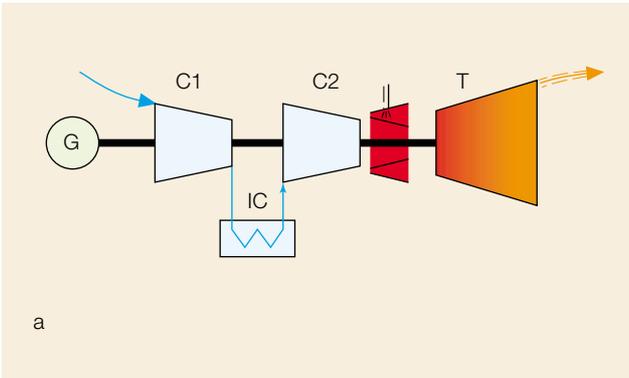


Carnotización del proceso de turbinas a gas y de los procesos combinados de gas/vapor/agua

1

cerrados; este tipo de instalaciones ha estado funcionando, o al menos han sido mantenidas en estado operativo, durante al menos 50 años. La central térmica de Beznau (Suiza) es un ejemplo de esta clase de central [1].

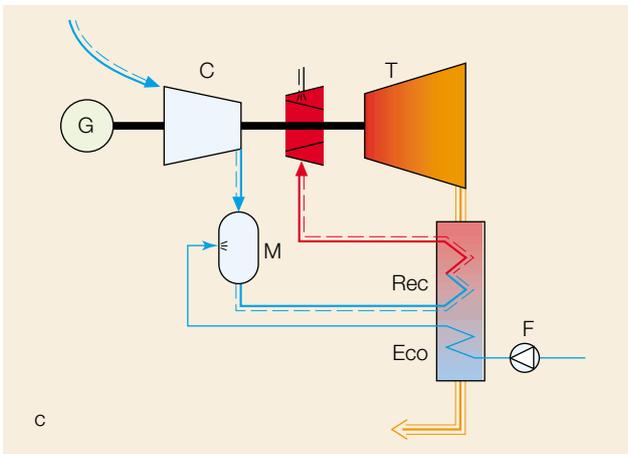
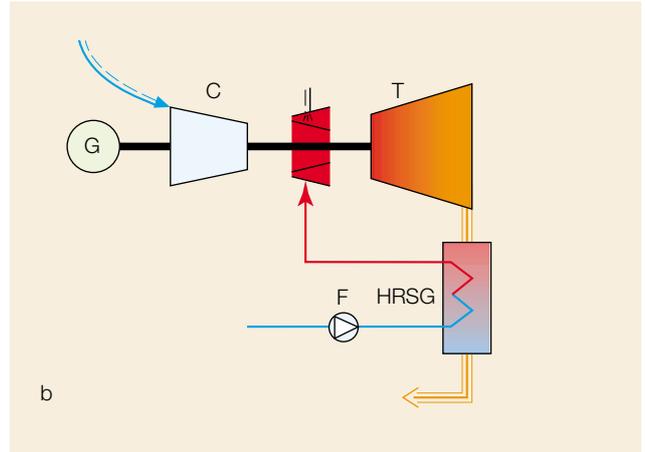
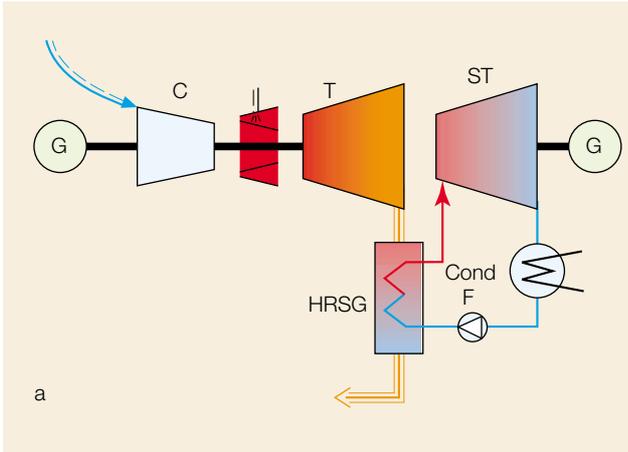
En cuanto al aumento de potencia producida, el recalentamiento proporciona la solución óptima para las turbinas de gas compactas, monocuerpo y de un solo eje, como son las GT24/GT26, que reúnen todas las ventajas de la tecnología avanzada de turbinas a gas.



Carnotización del proceso en las turbinas a gas

2

- a Integración de un refrigerador intermedio en el proceso de compresión
- b Adición de un recuperador de calor
- c Recalentamiento adicional en el proceso de expansión (combustión secuencial)



Combinaciones de procesos de gas y vapor

3

- a Turbina a gas convertida en central de ciclo combinado al añadirle el ciclo de vapor
- b Turbina a gas con inyección de vapor (STIG)
- c Proceso de turbina a gas con evaporación

Combinaciones gas/vapor

Los diagramas **3a** a **3c** muestran las tres combinaciones básicas gas/vapor. En **3a** se presenta, de forma muy simplificada, el principio de cascada de la turbina de gas y vapor conocido como central de ciclo combinado. En esta configuración puede dejarse sin modificar la turbina a gas de ciclo simple, constituida por el compresor, el combustor y la turbina misma. El sistema está completado por una caldera de recuperación y una turbina de vapor acoplada a la caldera. En las modernas centrales de ciclo combinado, la turbina a vapor, conectada a continuación de la turbina a gas, genera un 50% adicional de energía sin necesidad de quemar más combustible.

Otra combinación gas/vapor es la llamada turbina a gas con inyección de vapor (STIG, Steam Injection Gas Turbine) **3b**. En este caso, al igual que en la central de ciclo combinado, el vapor se produce exterior-

mente pero se inyecta en la turbina a gas por delante de la cámara de combustión. Este vapor, por lo tanto, se expande en el interior de la turbina a gas mezclándose con los gases de escape, es decir, bajo presión parcial. Esta variante de la combinación gas/vapor genera una potencia específica considerablemente mayor (referida al caudal de aire en el compresor) que una central de ciclo combinado. La potencia producida por la turbina a gas se supera en un 80 a 100 por ciento y la producción de vapor es mayor que en la central de ciclo combinado. Esto se debe a que el vapor inyectado, sobrecalentado hasta la temperatura de los gases calientes, también produce vapor en la caldera de recuperación después de expandirse en la turbina a gas y a que la caída de entalpía del vapor es mayor que en la turbina a gas de una central de ciclo combinado. Sin embargo, a pesar de tener una temperatura relativa-

mente baja, los gases de escape después de la caldera de recuperación todavía contienen una considerable cantidad de calor latente en forma de vapor, de modo que el rendimiento es menor que en las centrales de ciclo combinado. Debido a que este vapor de salida está a una baja temperatura de condensación, no es útil para un aprovechamiento exergético adicional.

Un tercer tipo de combinación gas/vapor es el proceso evaporativo **3c**. En este proceso, el agua precalentada, por los gases de escape o por otro método, se inyecta en el ciclo de la turbina de gas durante o después de la compresión, evaporándose por el calor de compresión. El vapor producido de esta forma se lleva a la temperatura de los gases calientes en el combustor, se mezcla con el aire y posteriormente se expande en la turbina. Puesto que el agua de evaporación enfría considerable el aire comprimido, es necesario un

recuperador para garantizar un alto rendimiento. En esta configuración, la producción y expansión del vapor se produce internamente, es decir, en el ciclo de la turbina a gas. A lo largo de los años se han propuesto numerosas versiones de esta configuración, entre ellas la turbina de aire húmedo HAT (*Humid Air Turbine*). A pesar de la altísima potencia específica producida, del mismo orden que la configuración STIG, su rendimiento es inferior al de los ciclos combinados por las razones ya expuestas.

En **4a** se presenta una comparación cualitativa del rendimiento y de la potencia específica de las diferentes variantes, referidos al caudal másico del compresor. Sin embargo, el caudal másico del compresor no determina las dimensiones o la potencia máxima de una turbina a gas –las dimensiones de la propia turbina son el factor decisivo– por lo cual es más conveniente referir la potencia específica al caudal másico de la turbina. Esto permitiría realizar una comparación más objetiva **4b**. Sin embargo, el ciclo combinado requiere una turbina a vapor no integrada en el ciclo de la turbina de gas.

El refrigerador intermedio puede aumentar la potencia, pero el rendimiento sólo au-

menta ligeramente en el mejor de los casos. Añadir un recuperador hace posible aumentar el rendimiento, pero también provoca una reducción de la potencia. La razón es que se ha de reducir la relación óptima de presión hasta un nivel inferior al necesario para conseguir una potencia máxima con el fin de no reducir el rendimiento y a que hay que tener en cuenta las pérdidas adicionales de presión en el recuperador. La superioridad de la central de ciclo combinado se basa en su extraordinario rendimiento y en su alta potencia específica. En el caso del proceso evaporativo HAT o de la inyección de vapor STIG, las potencias específicas son sólo ligeramente superiores si se toma como referencia el caudal real de la turbina **4b**. Sin embargo, los rendimientos están bastante alejados de los de las centrales de ciclo combinado, por lo que no pueden competir seriamente con ellas.

Dado que todas las demás variantes exigen realizar importantes modificaciones en la turbina a gas, la central de ciclo combinado tiene en la práctica una posición dominante y, de hecho, casi excluye a todas las demás.

En **5** se muestran los rendimientos y trabajos específicos que pueden conse-

guirse con las turbinas a gas avanzadas con combustión simple y secuencial, disponibles actualmente, y los diferentes conceptos de central y procesos STIG derivados basados en ellas. En el caso de las turbinas a gas con combustión secuencial, las relaciones de presión han sido optimizadas para la generación mediante ciclo combinado. Además, puede constatar la posibilidad de construir grupos STIG de gran interés utilizando máquinas con combustión secuencial. Actualmente, sin embargo, el concepto STIG no ofrece ventajas en cuanto al coste de la electricidad generada que justifiquen la gran inversión necesaria para el desarrollo [2].

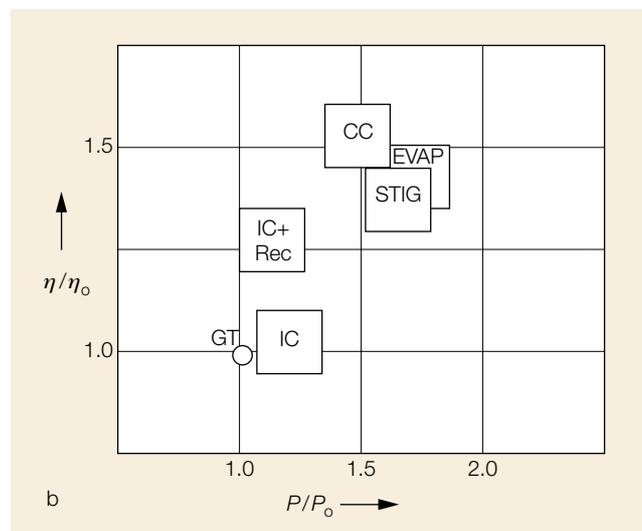
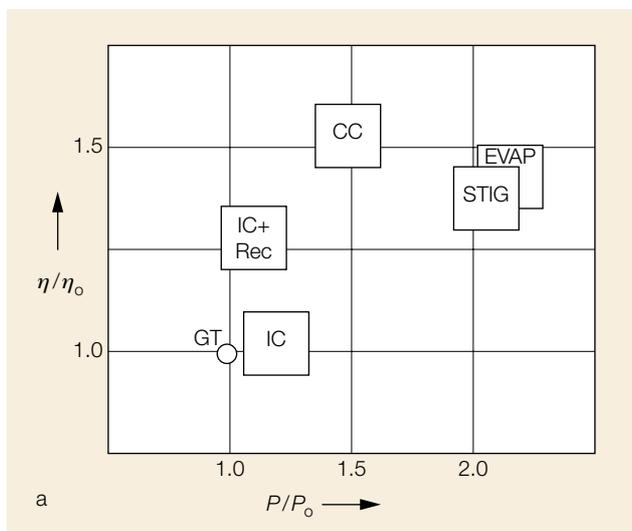
En cuanto al consumo de agua no hay apenas diferencias entre las variantes con inyección de vapor, con aire húmedo y de ciclo combinado (con una torre de refrigeración). El consumo de agua, de hecho, sólo depende del rendimiento. Es irrelevante que el agua se evapore en la torre de refrigeración de un sistema de ciclo combinado o que se expulse en forma de vapor por la chimenea, como sucede en los otros dos procesos¹⁾. Sin embargo, las centrales de ciclo combinado pueden construirse también con refrigeración seca, es decir, sin agua de refrigeración, lo cual hace posible

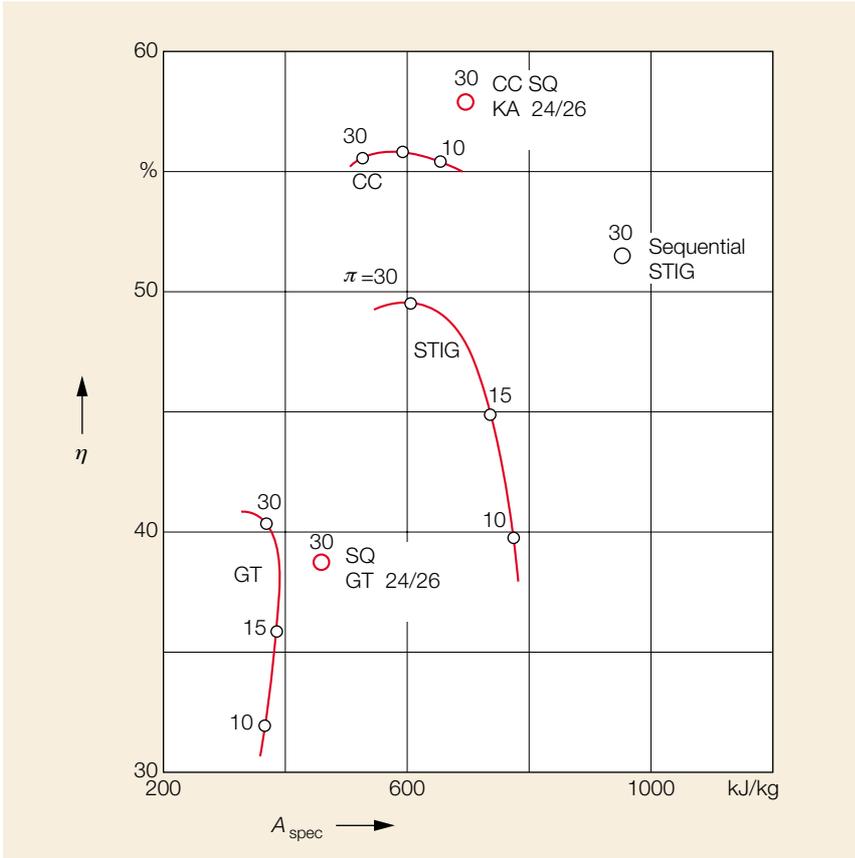
Rendimiento y potencia eléctrica producida por las diferentes configuraciones de turbinas a gas

4

- a Rendimiento en función de la potencia específica de salida, respecto del caudal másico del compresor
- b Ídem, respecto del caudal másico de la turbina

- η Rendimiento térmico
- η_0 Rendimiento térmico inicial
- P Potencia del alternador
- P_0 Potencia nominal del alternador





Rendimiento y trabajo específico de las avanzadas turbinas a gas actuales y de las configuraciones gas/vapor, suponiendo igual temperatura de entrada a las turbinas e iguales rendimientos de las turbinas y compresores.

5

η Rendimiento térmico
 π Relación de presiones en el compresor

A_{spec} Trabajo por kg de aire comprimido

una gama mucho más amplia de aplicaciones y además permite ahorrar agua.

Funcionamiento con carga parcial y aumento de potencia con las turbinas a gas y con las centrales de ciclo combinado basadas en la combustión secuencial

En la figura 6 se muestra el diagrama termodinámico simplificado de una central de ciclo combinado con combustión secuencial. El vapor es generado en dos o tres etapas de compresión y se introduce en la

turbina de condensación, que se encuentra montada sobre el mismo eje, por los puntos apropiados de admisión.

En el funcionamiento con carga parcial, el volumen de aire que pasa a través del compresor se reduce en el 40% al fluir a través de las tres primeras filas de álabes guía regulable. A la salida de la turbina de baja presión se controla la temperatura con el fin de mantenerla constante. Gracias a la elevada temperatura, constante, a la entrada de la turbina de alta presión en régimen de funcionamiento con carga parcial, se consigue un rendimiento óptimo en dicha gama.

Para aumentar la potencia se extrae una parte del vapor antes de la turbina; dicho vapor se inyecta por medio de un elemento de control (O en la figura 6) antes del primer combustor, en el combustor mismo, o

en el aire de refrigeración. Esta fracción del vapor produce en la turbina de gas más potencia que la que se pierde en la turbina de vapor, debido, en parte, a que el vapor expandido en la turbina de gas produce vapor adicional en la caldera de recuperación.

Otra forma de aumentar la potencia de una turbina a gas y de una central de ciclo combinado consiste, simplemente, en inyectar agua antes del primer combustor. Una cantidad de agua correspondiente al 1% del caudal de aire en el compresor puede aumentar la potencia de la turbina en un 4%, lo que corresponde a un aumento de potencia del 3% en una central de ciclo combinado. La inyección de agua fría reduce el rendimiento. Sin embargo, si el agua inyectada se precalienta con el calor residual, es posible mantener constante, o incluso aumentar, el rendimiento de la turbina. En la combustión simple se precisa una temperatura del agua de aproximadamente 320°C a 120 bar para mantener el rendimiento, mientras que en la combustión secuencial se necesitan 200°C a 35 bar [3].

En las centrales de ciclo combinado, la inyección de agua caliente o de vapor reduce el rendimiento. Sin embargo, la inyección de agua o de vapor es un método sencillo y muy efectivo para el funcionamiento, en sobrecarga temporal, de las turbinas a gas y de las centrales de ciclo combinado.

En la figura 7 se puede observar cómo se desarrollan la potencia y el rendimiento cuando las turbinas a gas se convierten en centrales de ciclo combinado o cuando, suponiendo que se utiliza la combustión secuencial, se aplica el proceso de inyección empleando agua fría, caliente o supercrítica. Los valores aproximados de los caudales máxicos relativos de vapor y de agua, referidos al 100% del caudal de aire en el compresor, se introducen como parámetros.

Mientras que el aumento de la potencia viene dado aproximadamente por la cantidad de agua o de vapor inyectados, el rendimiento depende de su entalpía. Se asume que los gases de escape de la turbina de gas se utilizan para precalentar el agua y para generar y sobrecalentar el vapor. En el diagrama se indican los valores

¹¹ Debido a que las instalaciones con inyección de vapor y las de evaporación necesitan agua desmineralizada, hay que tener también en cuenta los equipos de tratamiento y el consumo de productos químicos, que representan una parte importante de los costes de inversión y de explotación y mantenimiento.

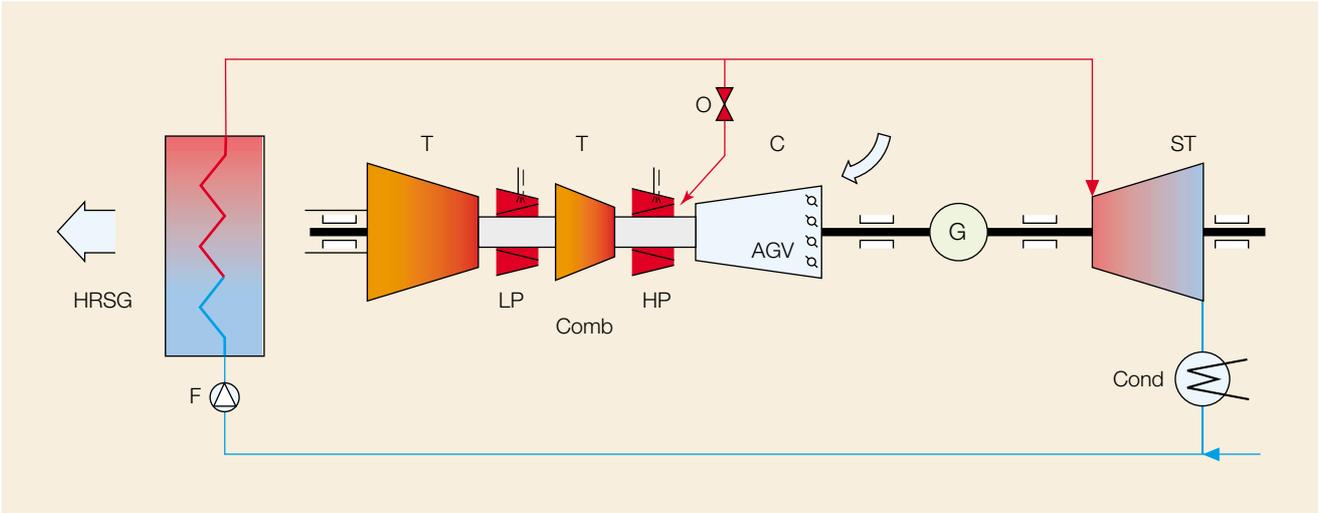


Diagrama termodinámico de una central de ciclo combinado basada en la tecnología de combustión secuencial

6

de proyecto para las máquinas modificadas y una aproximación al comportamiento en sobrecarga de las máquinas no modificadas en caso de inyección de agua o vapor con un caudal de hasta el 3% aproximadamente. Por ejemplo, puede observarse que, inyectando un caudal de agua del 3%, la potencia de la turbina a gas puede elevarse en cerca del 12%. Si el agua se calienta previamente hasta cerca de 200°C, el rendimiento de la turbina a gas sólo puede mantenerse, como ya se ha dicho anteriormente. Calentando el agua por medio de, por ejemplo, un flujo auxiliar de gases de escape, es posible aumentar apreciablemente el rendimiento [4].

La inyección de agua a temperatura cualquiera en la turbina a gas de una central de ciclo combinado, en vez del vapor supuesto en el diagrama, tiene como resultado una importante pérdida de rendimiento del ciclo combinado.

La cantidad de agua y de vapor inyectado depende de la capacidad de sobrecarga de las máquinas disponibles en el mercado.

Extracción de calor para calefacción urbana

Aunque el rendimiento de la generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles, especialmente a partir del gas natural, ha aumentado mucho a lo largo de los años –actualmente es del 60%–, se sigue

perdiendo gran cantidad de energía en forma de calor residual disipado. Las compañías eléctricas se están esforzando, por lo tanto, en utilizar este calor residual en sistemas de calefacción urbana. Las centrales de la dimensión que tratamos aquí

producen grandes cantidades de calor a baja temperatura, que puede utilizarse en las redes de calefacción urbana.

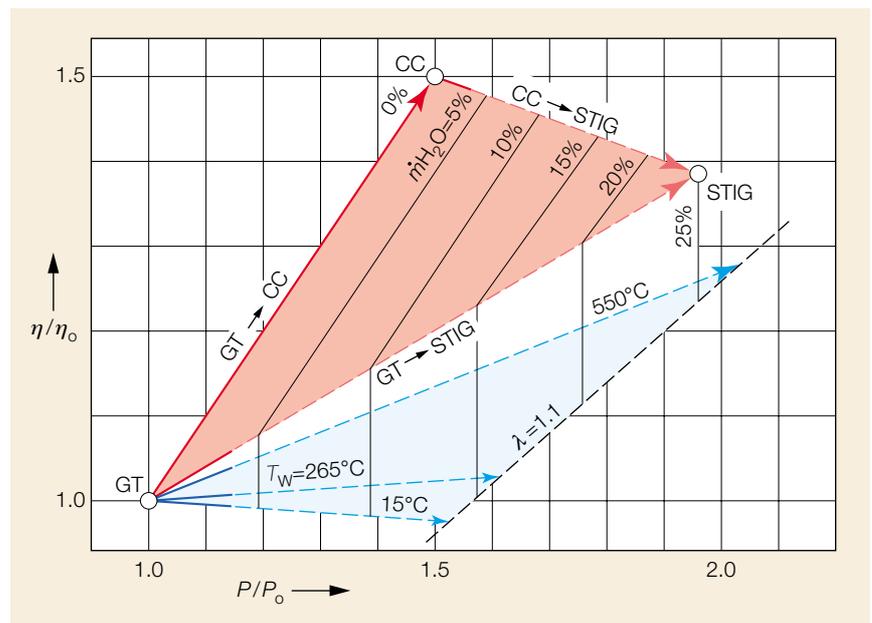
A diferencia de las centrales que utilizan los procesos STIG –con inyección de vapor– y evaporativo, que no pueden com-

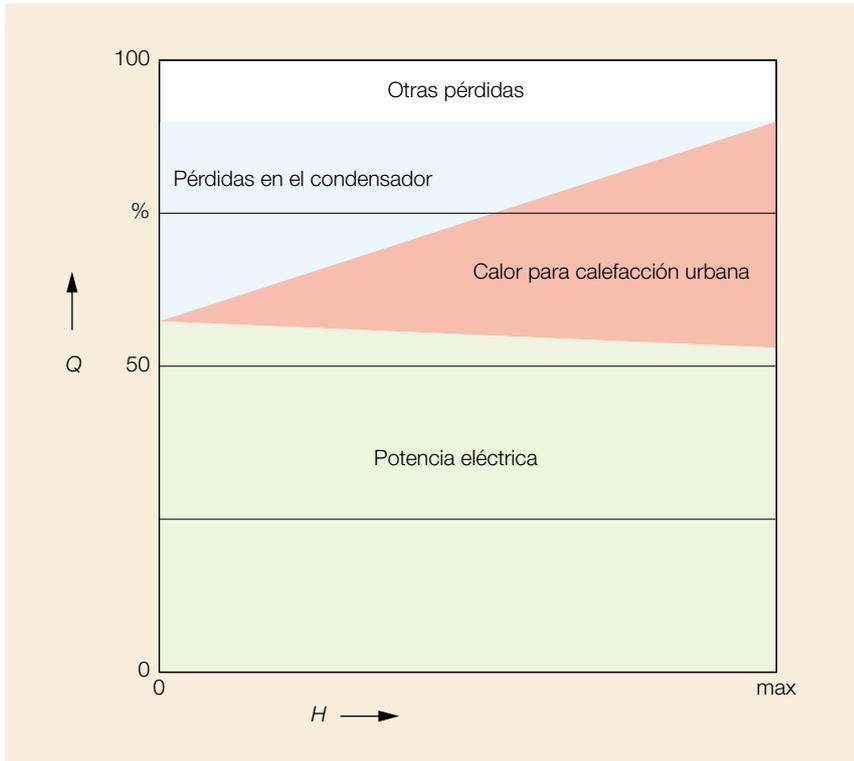
Inyección de vapor y agua en las turbinas a gas con tecnología de combustión secuencial. Rendimiento en función de la potencia específica producida.

7

Las líneas continuas representan la capacidad de sobrecarga de las turbinas a gas existentes.

- η Rendimiento térmico
 - η_0 Rendimiento térmico inicial
 - λ Relación estequiométrica aire/combustible
 - P Potencia del alternador
 - P_0 Potencia nominal del alternador
 - T_w Temperatura del agua inyectada
- rojo Inyección de vapor
 - azul Inyección de agua





Balance energético «deslizante» de la extracción de calor para calefacción urbana en una central de ciclo combinado con combustión secuencial. Producción de energía eléctrica y de calor, de izquierda a derecha: funcionamiento con condensación simple, funcionamiento con extracción y funcionamiento con contrapresión.

8

Q Energía del combustible

H Calor extraído

binar eficientemente la generación de calor y de energía eléctrica, las centrales de ciclo combinado ofrecen condiciones ideales para la calefacción urbana. En estas centrales se puede extraer vapor de la sección de baja presión de la turbina de vapor para cogeneración normal de calor y de energía eléctrica, con un coeficiente de rendimiento que normalmente está entre de 7 y 10, es decir, que, para un consumo constante de combustible, la potencia eléctrica producida disminuye en sólo 1/7 a 1/10 del calor extraído para calefacción urbana. Este resultado puede verse en el balance energético «deslizante» 8. Tal como puede verse en el diagrama, el producto principal (la energía eléctrica) permanece más o menos en el mismo nivel, de forma que para la calefacción urbana casi sólo se utiliza calor residual.

Otra importante ventaja es que la pequeña disminución de potencia eléctrica

producida, debida a la extracción de calor, es compensada por el apreciable aumento de la potencia que puede producir la turbina de gas a medida que baja la temperatura exterior. Esto significa que en los meses de invierno puede producirse la totalidad de la potencia eléctrica a pesar del calor extraído para calefacción urbana [5].

Resumen

Las centrales de ciclo combinado tienen varias ventajas importantes respecto de otras configuraciones de gas/vapor. Se pueden resumir del modo siguiente:

- Se pueden utilizar turbinas estándar a gas y plantas de ciclo combinado.
- Esta técnica de centrales está sobradamente acreditada.
- Las turbinas a gas o vapor ya existentes pueden convertirse en cualquier momento en centrales de ciclo combinado.

- Eficiente cogeneración de calor y energía eléctrica sin comprometer la producción máxima de energía eléctrica.
- Máximo rendimiento posible en la generación de energía.
- El aumento de potencia puede conseguirse de forma fácil y rápida.
- Refrigeración por aire del condensador en regiones secas.
- Rapidez de instalación de las centrales.
- Cortos tiempos de puesta en marcha, flexibilidad en el seguimiento de la carga.
- Alto rendimiento en carga parcial.

Bibliografía

[1] H. U. Frutschi: Las nuevas turbinas de gas GT24 y GT26: el segundo plano histórico del «Advanced Cycle System». Revista ABB 1/94, 20 – 25.
 [2] A. Hofstädter, H. Haselbacher, H. U. Frutschi: Effects of steam reheat on power plants consisting of steam injected gas turbines with sequential combustion and back pressure steam turbines. ASME Conference Stockholm, 1998.
 [3] M. Eriksson: Methods of overload and part-load operation of gas turbines and combined cycles with sequential combustion. Tesis doctoral, KTH Stockholm 1997.
 [4] R. Segl: Das Thermodynamische Potential der Wassereinspritzung in Gasturbinen mit einfacher und sequentieller Verbrennung. Trabajo de licenciatura, TU Munich, 1998.
 [5] H. Haselbacher, H.U. Frutschi: Efficient district heat production by steam extraction from combined cycle plants. ASME 96-GT-538, ASME Transactions.

Autor

Hans Ulrich Frutschi
 ABB Power Generation Ltd
 CH-5401 Baden, Suiza
 Telefax: +41 56 205 7829