

CICLOS COMBINADOS

Ismael Prieto Fernández
Gijón, Julio de 2006

ÍNDICE DE MATERIAS

1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. CICLOS COMBINADOS Y COGENERACIÓN	3
2.1. Sistema simple de ciclo combinado	5
2.2. Sistemas comerciales de ciclo combinado.....	5
2.3. Cogeneración.....	7
2.4. Generador de vapor recuperador de calor	8
3. CONSIDERACIONES TÉCNICAS	11

1. INTRODUCCIÓN

Durante muchos años ha estado barajando la idea de utilizar la energía residual, para generación de vapor en la industria.

El progresivo crecimiento de los precios de combustibles, la necesidad de aprovechar el calor de los diversos procesos industriales y las cada vez más rigurosas regulaciones medioambientales han creado la necesidad de utilizar el calor residual hasta su máximo potencial.

En la industria energética, el calor residual de un sistema energético, *como el de una turbina de gas*, sirve como fuente de calor para un ciclo de turbina de vapor.

Tales ciclos combinados pueden elevar la eficiencia global del ciclo de producción de electricidad hasta más del 50 %.

El uso global de la energía puede rebasar sustancialmente ese porcentaje, cuando la generación eléctrica se combina con el uso de vapor en procesos.

Hay una serie de industrias, tales como la siderúrgica, la de refino de aceites, la de pulpa y papel y la del procesado de alimentos que han utilizado muchos sistemas singulares de generación de vapor, para aprovechar sus calores residuales.

Estos sistemas permiten: reducir los consumos de combustibles tradicionales; recuperar el calor residual por seguridad y economía; y eliminar subproductos de procesos industriales.

Los desarrollos más recientes de recuperación de energía residual incluyen un sistema para destruir los elementos orgánicos peligrosos presentes en residuos que tienen suficiente contenido calórico para mantener una combustión.

Hay una gran variedad de otros sistemas que utilizan fuentes de energía menos convencionales, que están en fase de desarrollo y de demostración.

Las fuentes de energía solar y de energía geotérmica actualmente están emergiendo para la producción de vapor.

Los esfuerzos de desarrollo continúan sobre sistemas avanzados para combinar la generación directa de electricidad con el más convencional de ciclo de vapor basado en el ciclo Rankine.

Todos esos sistemas han creado la necesidad de diseños y aplicaciones especializadas de equipos generadores de vapor.

2. CICLOS COMBINADOS Y COGENERACIÓN

En el sentido más amplio, una planta de “ciclo combinado” consiste en la integración de dos o más ciclos termodinámicos energéticos, para lograr una conversión más completa y eficiente de la energía aportada en trabajo o potencia.

El desarrollo durante las pasadas cinco décadas de diseños de turbinas de gas de alta potencia (entre 50 MW y 380 MW) con incremento de la potencia específica, ha permitido el desarrollo paralelo de ciclos combinados de altos rendimientos, tanto térmicos como económicos. Usualmente, en la actualidad, un ciclo combinado se refiere a un sistema compuesto por una turbina de gas, un generador de vapor recuperador de calor (HRS.) y una turbina de vapor.

Termodinámicamente, esto implica la unión de un ciclo Brayton de gas a alta temperatura con un ciclo Rankine de moderada temperatura; el calor residual del escape del ciclo Brayton sirve como calor de aporte al ciclo Rankine.

El reto, que se plantea en tales sistemas, radica en el grado de integración que se necesita para maximizar la eficiencia a un coste económico.

Cuando el generador de vapor recuperador de calor suministra, al menos, parte de tal vapor para un proceso, la aplicación suele denominarse “Cogeneración”.

Aunque las breves discusiones que siguen se centralizan en la combinación de una turbina de gas con un generador de vapor recuperador de calor y una turbina de vapor, hay otros sistemas avanzados de ciclos combinados que también están disponibles o se encuentran en fase de desarrollo.

Algunos de estos incluyen el sistema de combustión en lecho fluido presurizado (PFBC), que se discute en otro capítulo, el sistema del ciclo combinado de gasificación integrada (IGCC) discutido también en otro capítulo y el sistema magneto-hidro-dinámico (MHD).

Hay también otras combinaciones para modernizar o re-potenciar (*re-equipar*) calderas convencionales con turbinas de gas.

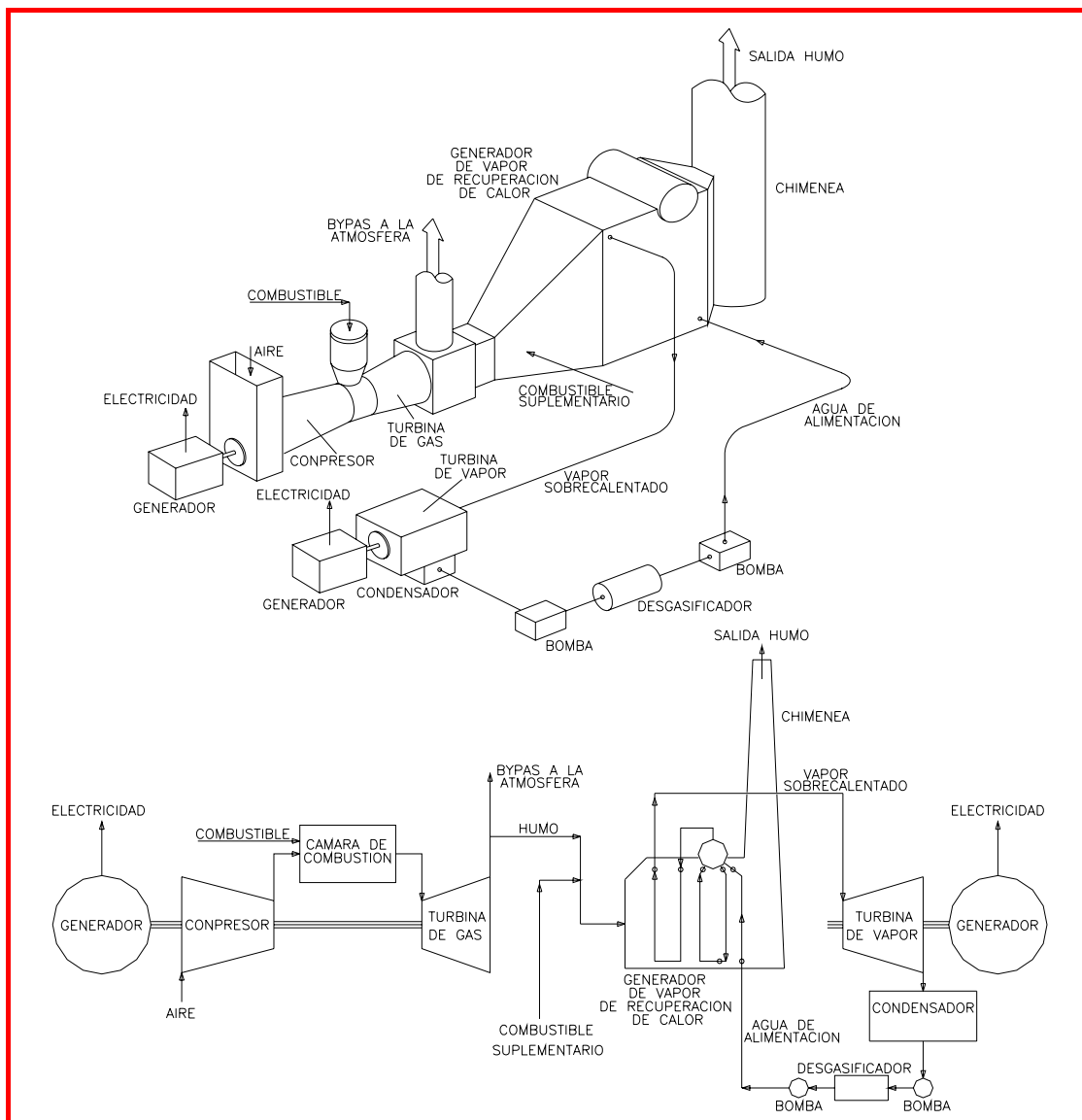


Figura 1. Esquema simplificado de un ciclo combinado

2.1. Sistema simple de ciclo combinado

Tal como se representa esquemáticamente en la figura 1, el sistema simple de ciclo combinado se compone de:

- Un grupo simple “turbina de gas + alternador”,
- Un “generador de vapor recuperador de calor” (HRSG),
- Un grupo simple “turbina de vapor + alternador”,
- Un condensador; y
- Sistemas auxiliares.

Adicionalmente, si lo requieren las regulaciones medioambientales, se puede integrar directamente en el generador de vapor un sistema de reducción selectiva catalítica (SCR), para controlar las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x). Esto resulta particularmente atractivo, porque el catalizador de (SCR) se puede ubicar en un recinto de óptima temperatura dentro del HRSG.

La temperatura del gas que sale de la turbina de gas está normalmente en el rango de 510 a 566 C (950 a 1.050 F), mientras que la temperatura óptima de la catálisis SRC es de 357 a 449 C (675 a 840 F).

Es posible una gran variedad de configuraciones más complejas.

Una mejora clave en la eficiencia del ciclo de vapor, como se justificará más adelante, puede obtenerse mediante la adición de múltiples circuitos de presiones independientes en el HRSG, para suministrar vapor de media y baja presión y para desaireación (*desgasificación*) y calentamiento del agua de alimentación.

Esto sustituye al *calentamiento regenerativo* con vapor de extracción, utilizado en los ciclos convencionales energéticos de vapor.

2.2. Sistemas comerciales de ciclo combinado

Las configuraciones actuales son típicamente más complejas, como consecuencia de los requisitos de aplicación y del grado de integración.

Los grupos “turbina de gas+alternador”, “turbina de vapor+alternador” y “generador de vapor recuperador de calor” (HRSG) están disponibles comercialmente en toda una serie de tamaños y disposiciones específicas.

En ocasiones, se disponen múltiples turbinas de gas con sus correspondientes generadores de vapor recuperadores de calor, que alimentan a un único sistema o ciclo de turbina de vapor. En la figura 2 se muestran algunos ejemplos de disposiciones de ciclos combinados

Es bastante normal que exista una chimenea “bipaso” de gas (*humo*) y un silenciador, instalados aguas abajo de la turbina de gas, de tal modo que pueda operarse ésta independientemente del ciclo de vapor.

Habida cuenta de los elevados niveles de oxígeno residual, presentes en el escape de la turbina de gas, se pueden instalar sistemas de combustión suplementaria (post-combustión) aguas arriba (*en el lado de humos*) del generador de vapor recuperador de calor (HRSG).

Lo anterior permite una gran flexibilidad de operación, mejora el control de la temperatura del vapor e incrementa la capacidad global energética de la planta.

Tal como se discute más adelante, el generador de vapor recuperador de calor (HRSG) se puede diseñar con uno a cuatro circuitos independientes, operando a presiones diferentes, para lograr optimizar la recuperación de calor y maximizar la eficiencia del ciclo.

En determinados casos se puede incrementar aún más la eficiencia del ciclo, cuando se introduce en el mismo un recalentamiento del vapor.

Es posible disponer de un amplio rango de eficiencias de ciclo, según sea la complejidad del sistema y de sus componentes.

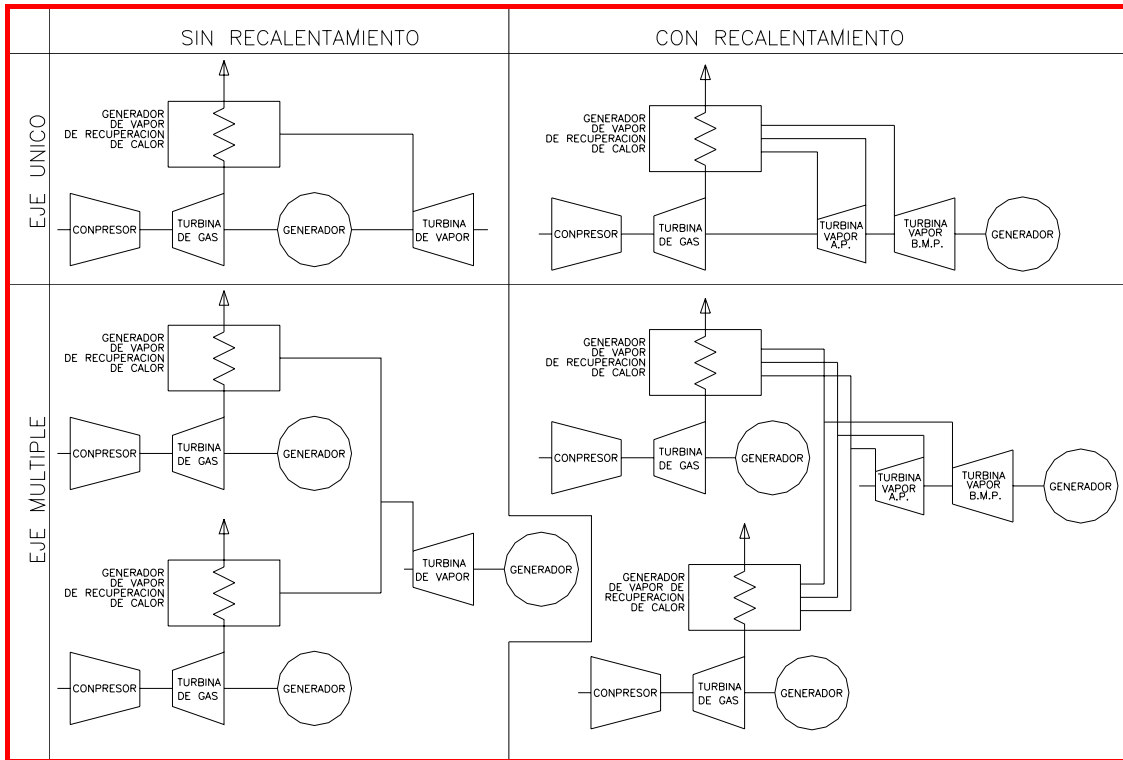


Figura 2. Distintas disposiciones de ciclos combinados

En la Tabla 1 se recogen algunos ejemplos de eficiencias globales de ciclos de generación de energía eléctrica, cuando se utiliza una turbina de gas con una temperatura de gas en su entrada de 1.204 C (2.200 F).

Tabla 1
Rendimientos y consumos específicos de ciclos

Sistema	Rendimiento (%)	Consumo específico (kJ/kWh)
Turbina de gas simple	32	11.904,6
Turbina de gas más Simple ciclo de vapor Sin combustión	42	9125,6
Turbina de gas avanzada más Múltiple sistema de vapor Sin combustión	48	9125,6
Turbina de gas más Sistema vapor presión dual Más uso vapor proceso (cogeneración)	61	-
Nota: Todos los valores están calculados sobre el poder calorífico superior (PCS ó HHV) del combustible. Si se utilizase el inferior (PCI ó LHV), los valores listados serían más altos.		

Las cifras precedentes se refieren al poder calorífico superior del combustible.

Las emisiones medioambientales de los ciclos combinados suelen ser generalmente bastante bajas .

Si se quema gas natural, las emisiones correspondientes de dióxido de azufre (SO₂) y de partículas serán despreciables.

Con los diseños normales de combustores para turbinas de gas, las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) procedentes de la turbina de gas serán bajas, generalmente situadas en un rango de 10 a 70 ppm.

De todos modos, las emisiones finales de NO_x dependen además del sistema de combustión suplementaria utilizado (*si es que se usa*), y de la posible incorporación de un sistema de control (*limitador*) de NO_x mediante reducción catalítica selectiva (SCR)

Además de las ganancias en eficiencia térmica y de las relativas bajas emisiones medioambientales, los beneficios potenciales de una planta de ciclo combinado con turbina de gas se extienden a los siguientes puntos:

Programa

- *Aunque depende del tamaño y de la complejidad de los equipos, la entrega y la construcción (montaje) de una turbina de gas, puede ser de aproximadamente un (1) año.*
- *La entrega y el montaje (construcción) del sistema de un ciclo de turbina de vapor se puede completar frecuentemente en un (1) año adicional.*

Flexibilidad

- *La turbina de gas se puede utilizar independientemente para una rápida puesta en servicio, para atender puntas de demanda.*
- *El sistema de la caldera del generador de vapor recuperador de calor (RHSG) requiere usualmente, para pasar desde estado frío a 100% de plena carga alrededor de sesenta (60) minutos.*

Inversión

- *Típicamente, el coste de capital (inversión) del sistema es bajo, como consecuencia de que hay menos componentes de construcción modular, de la entrega rápida, del montaje (construcción) corto y de mínimos costes de los sistemas soportes.*

En la selección del sistema, tales beneficios tienen que sopesarse frente a los costes usualmente más elevados de los *combustibles* habitualmente más limpios que precisan las turbinas de gas, de las cuestiones de potencial *mantenimiento* y de disponibilidad, y de los *requisitos* de carga.

2.3. Cogeneración

Los sistemas de ciclo combinado con turbina de gas se suelen concentrar en la producción de electricidad, con el conjunto “*turbina de gas alternador*”; sin embargo, se puede también adaptar parte del sistema del “*generador de vapor recuperador de calor*” (HRSG), para que suministre vapor a un *proceso* y, además, genere *electricidad*.

En tales sistemas, el calor residual procedente de la turbina de gas se puede utilizar para producir vapor, destinado al calentamiento de recintos (*espacios*) o al aporte calorífico para un proceso.

Gracias a la utilización del calor residual, la energía total usada se puede aproximar al 80 %, en comparación con la cifra de 40 a 50 % que puede conseguirse con el mejor sistema de *ciclo combinado con turbina de gas*, sin utilizar el vapor para un proceso.

Los factores que contribuyen al funcionamiento económico en el caso de generación de potencia eléctrica y calor (cogeneración) son los siguientes:

- Alto rendimiento térmico.
- Bajo coste de instalación.
- Bajos costes de operación y mantenimiento.
 - Generación de vapor en las condiciones del proceso.
 - Turbinas de vapor de condensación/extracción.
 - Turbinas sin condensación con escape al proceso.
 - Generador de vapor de recuperación de calor con combustión y sin combustión.
 - Turbina de gas de baja emisión de NO_x DLN/Inyección de vapor.
- Alta relación potencia eléctrica/potencia calorífica.
- Alta relación fiabilidad/disponibilidad.
- Instalación en un periodo de tiempo relativamente corto.

2.4. Generador de vapor recuperador de calor

El “*generador de vapor recuperador de calor*” (HRSG) se identifica en algunas ocasiones como “*caldera recuperadora de calor residual*” (WHRB) o como “*caldera de gas de escape de turbina*” (TEG).

Esta última designación (TEG) identifica la aplicación principal de estas unidades, en el momento presente: “*recuperar el calor residual y generar vapor a partir del gas de escape de la turbina de gas*”.

El HRSG es un elemento clave en una planta de ciclo combinado, que afecta e influye en el coste de capital (inversión), en el coste de operación y en la eficiencia global del ciclo.

Los generadores de vapor recuperadores de calor (HRSG) son flexibles en diseño para aplicaciones específicas.

El flujo de gas a través de la unidad puede ser horizontal o vertical, con el posible intercambio entre el coste de suelo, para una disposición de flujo horizontal, y los requisitos de acero estructural, para una unidad de flujo vertical.

El caso más frecuente es la unidad con flujo horizontal de gas.

El HRSG se puede diseñar para operar con múltiples sistemas o circuitos de *agua-vapor* de presiones distintas, para cumplimentar los requisitos de aplicación y para maximizar la recuperación de calor.

La circulación puede ser forzada o natural, aunque la mayoría de las unidades de flujo horizontal de gas utilizan la circulación natural.

Los generadores de vapor recuperadores de calor (HRSG) pueden:

- Carecer de fuego (*combustión*), es decir, que usan sólo el calor sensible del gas como aporte de calor, o bien,
- Incluir fuego (*combustión*) suplementario de un combustible,
 - Para elevar la temperatura de los humos,
 - Para reducir los requisitos de superficie termo permutadora,
 - Para incrementar la producción de vapor,
 - Para controlar la temperatura del vapor sobrecalentado, o bien
 - Para cumplimentar los requisitos de temperatura de vapor para el proceso.

Por último, los generadores de vapor recuperadores de calor (HRSG) deben estar diseñados para incorporar un sistema de reducción catalítica selectiva (SCR).

Los fabricantes de ciclos combinados disponen de un rango completo de *calderas de vapor de recuperación de calor* (HRSG), adecuadas para utilizarlas con potencias de ciclos combinados superiores a 400 MW. En la figura 3 se representa un esquema de la disposición de los componentes principales de un HRSG.

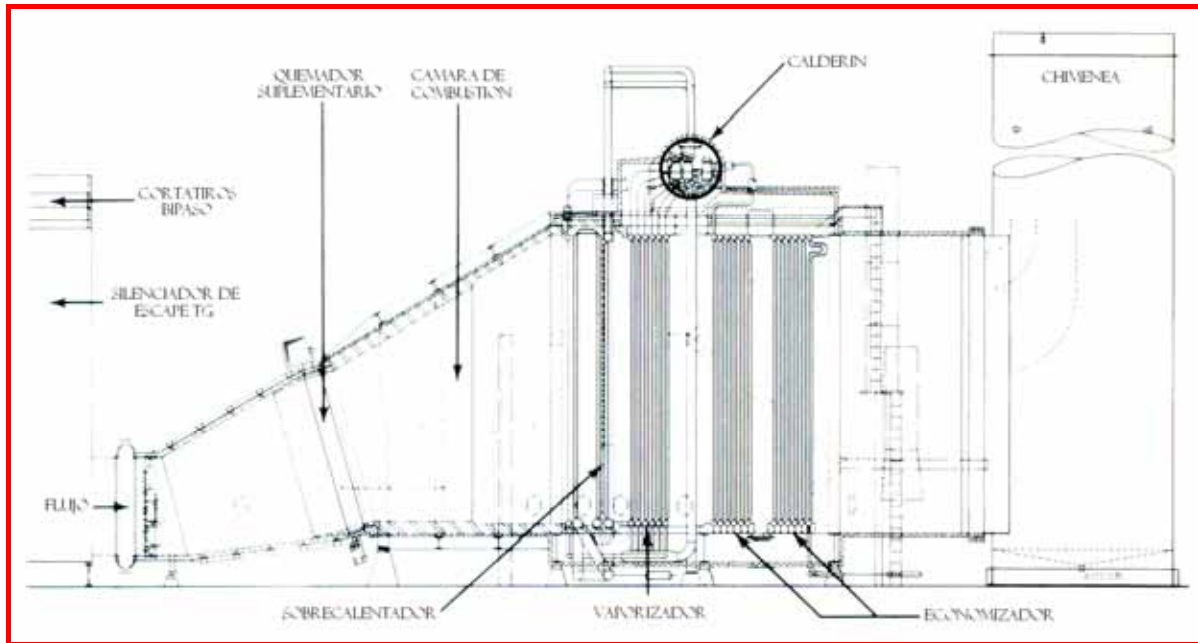


Figura 3. Disposición del generador de vapor de recuperación de calor

Los generadores de vapor recuperadores de calor suelen ser de diseños modulares, de circulación natural, aplicables a requisitos singulares de una gran variedad de sistemas de ciclos combinados.

Según sea la configuración del ciclo, el HRSG puede contener de *uno (1) a cuatro (4)* circuitos independientes de caldera (*uno de alta presión, uno o dos de presión intermedia y uno de baja presión*), dentro de la misma envolvente.

El circuito de alta presión, con sobrecalentado que puede llegar a los 540 C (1.00 F), se utiliza para la generación de energía.

Los *circuitos* de presiones intermedias se pueden utilizar para generación de vapor, para la inyección de vapor a fin de controlar el NO_x (*agua o vapor inyectado en el combustor de la turbina de gas para limitar la formación de NO_x*), y/o para suministro de vapor a procesos. También se puede inyectar este vapor en algún punto del circuito de turbina como a la entrada del recalentador.

El circuito de baja presión se usa normalmente para calentamiento del agua de alimentación y/o desaireación (*desgasificación*). También se puede inyectar el vapor producido a la entrada de las turbinas de baja presión

Todas estas calderas (HRSG) están diseñadas para manipular grandes flujos de gases, con mínimas caídas de presión (contrapresión en la turbina de gas baja), lo que permite una mayor producción neta de electricidad por la turbina de gas.

También hay que prestar una atención especial a la configuración de las interconexiones de los conductos de gases, a las transiciones de los mismos y a las válvulas desviadoras, con el fin de minimizar las caídas de presión provocadas por los cambios de dirección en las líneas de flujo o por velocidades excesivamente altas.

Las pérdidas de calor a través de la envolvente de caldera y de los conductos se minimizan mediante la utilización de un sistema de aislamiento térmico.

En el diseño de circulación natural, los tubos verticales facilitan la altura de bombeo necesaria para alcanzar los caudales de circulación suficientes, para que ésta sea estable.

Se eliminan así las bombas de circulación de caldera.

Este diseño produce también una respuesta más rápida en transitorios de carga, que son comunes en los ciclos combinados.

Como la mayoría de los requisitos de recuperación de calor son demasiado importantes (grandes), como para permitir un montaje en taller de una unidad HRSG completa, las unidades se diseñan para un máximo montaje en taller del conjunto de las partes a presión.

La unidad básica de la construcción es la “sección”, que se compone de unas filas al tresbolillo de tubos aleteados helicoidalmente y soldados a los respectivos colectores superior e inferior.

Estas secciones se reúnen, montándolas y configurando los correspondientes “módulos”, que constituyen los bultos para su transporte.

Algunas de las partes más pequeñas de HRSG se pueden ensamblar totalmente en fábrica, y en este caso se montan sobre un bastidor.

Para soportar una rápida puesta en servicio, el diseño incluye las necesarias provisiones para la expansión diferencial entre partes a presión y partes no a presión.

En aquellos lugares en los que se requiere un cierre estanco a gas, se emplean las convenientes juntas de expansión.

Los rangos de los parámetros típicos para unidades HRSG, de alguno de los fabricantes se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2
Parámetros de “HRSG”

APLICACIÓN DE TURBINA:	
Tamaños turbina gas	1 MW a 300 MW
Flujos de gas	0,32 a 630 kg/s (25.000 a 5.000.000 lb/h)
Temperatura salida turbina gas	≤ 650 C (1.200 F)
Temp. combustión suplementaria.	≤ 899 C (1.600 F)
CAUDAL DE VAPOR:	1,9 a 90 kg/s (15.000 a 715.000 lb/h)
PRESIONES DE OPERACIÓN:	
Alta	≥ 29 bar (400 psig)
Media	4,4 a 29 bar (50 a 400 psig)
Baja	2,0 a 4,4 bar (15 a 50 psig)
Temperatura vapor	Hasta 565 C (1.050 F)
Combustibles suplementarios	Gasóleo, gas natural

También hay diseños especiales de HRSG para mejorar las aplicaciones de recuperación (extracción) de aceite (*petróleo*) en los yacimientos.

En tal caso el gas de escape de la turbina de gas se utiliza en el HRSG para generar vapor húmedo (*aproximadamente con un 80 % de calidad*) a presiones que llegan hasta los 173 bar (2.500 psig).

El vapor obtenido se inyecta en los pozos para forzar la recuperación (extracción) de los aceites más pesados.

Una característica singular es que se utiliza un agua de alimentación relativamente “sucia” (*hasta con 10.000 ppm de sólidos disueltos*), en el diseño de un generador de vapor de un paso (*de proceso directo*).

3. CONSIDERACIONES TÉCNICAS

El generador de vapor recuperador de calor (HRSG) es básicamente un termopermutador con flujos en contracorriente, que se compone de una serie de secciones formadas por sobrecalentador, vaporizador y economizador, ubicadas respectivamente desde la entrada hacia la salida del gas, para maximizar la recuperación de calor y para suministrar el caudal estipulado de vapor a la presión y a la temperatura adecuadas.

Para facilitar el diseño más económico, es necesario evaluar los cinco (5) parámetros siguientes:

- 1- Contrapresión admisible;
- 2- Presión y temperatura del vapor;
- 3- Punto de acercamiento;
- 4- Temperaturas de aproximación de sobrecalentador y economizador; y
- 5- Temperatura de salida de chimenea.

Todos estos parámetros se evalúan y se fijan por la experiencia y por consideraciones económicas.

La contrapresión está influenciada notablemente por el área de la sección recta del flujo en el HRSG.

Las altas contrapresiones reducen el coste del HRSG, pero también disminuyen el rendimiento de la turbina de gas (aumenta la presión de escape).

Típicamente, los valores de contrapresiones en la mayoría de unidades están entre 10 y 2,5 y 3,8 kPa (15 in wg).

La temperatura del punto de acercamiento y las temperaturas de aproximación tienen un impacto significativo en el tamaño global de la unidad.

Estos dos parámetros se representan en la Figura 4 para un HRSG de una sola presión.

Para un punto de acercamiento bajo y una temperatura de aproximación del sobrecalentador reducida se precisan mayores superficies termopermutadoras y mayor coste de capital (*inversión*), mientras que un punto de acercamiento de economizador se establece típicamente para evitar la vaporización en el economizador, para las condiciones de diseño.

La experiencia ha establecido, en general, que los rangos siguientes facilitan diseños satisfactorios técnica y económicamente, aunque los valores más bajos son los correspondientes a aplicaciones específicas:

- Punto acercamiento = $\Delta T_P = 11$ a 28 C; (20 a 50 F);
- Temperatura aproximación sobrecalentador = $\Delta T_{SH} = 22$ a 33 C; (40 a 60 F) y
- Temperatura aproximación economizador = $\Delta T_E = 6$ a 17 C; 10 a 30 F.

La temperatura del agua a la entrada al economizador debe fijarse para minimizar la corrosión ácida por *punto de rocío*, si hay azufre presente en los gases.

Típicamente, la mínima temperatura del agua de alimentación se establece en 116 C; (240 F), si hay azufre presente en el combustible.

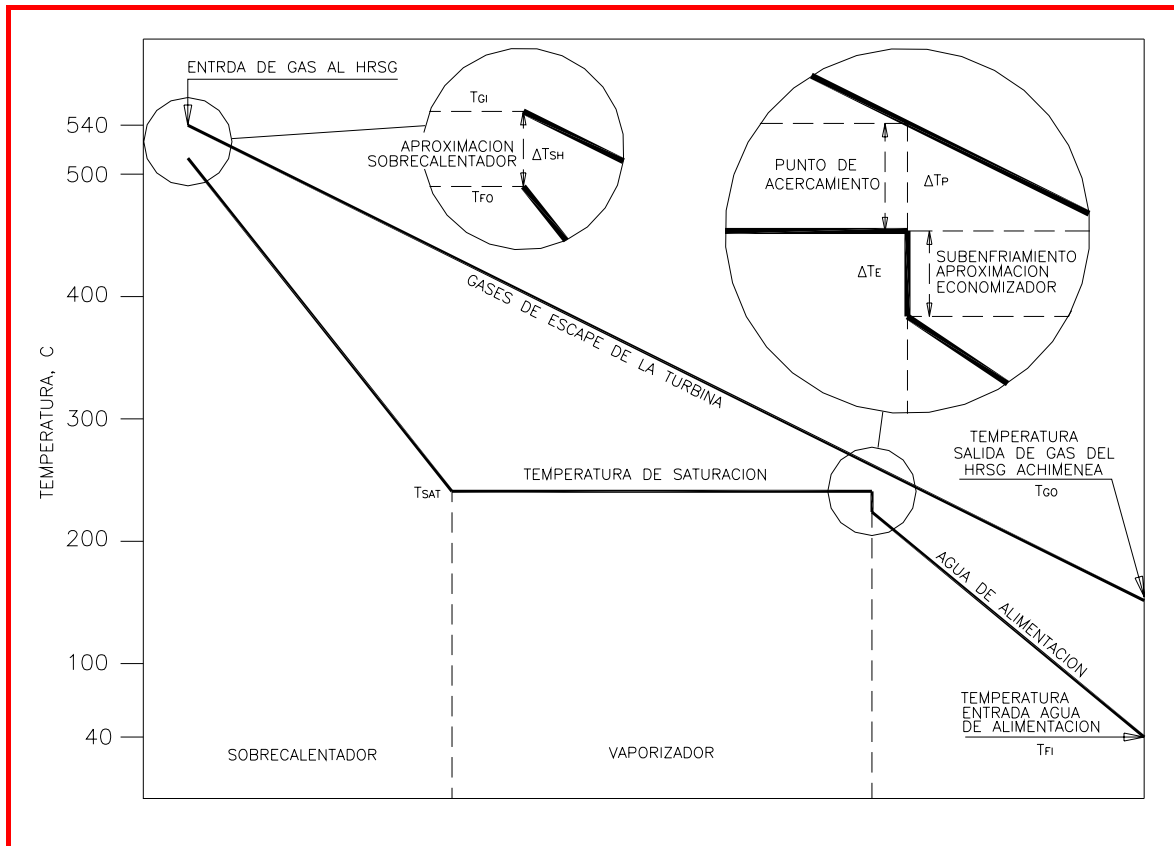


Figura 4. Perfil de temperaturas en un HRSG de una sola presión

Paralelamente a la temperatura del agua de alimentación, la temperatura mínima de gas (humo) a la salida, o temperatura de chimenea, tiene que controlarse para evitar la corrosión debida a la condensación ácida.

Los valores típicos para calentadores recuperativos que se muestran en la figura 5 son aplicables a este tipo de instalación.

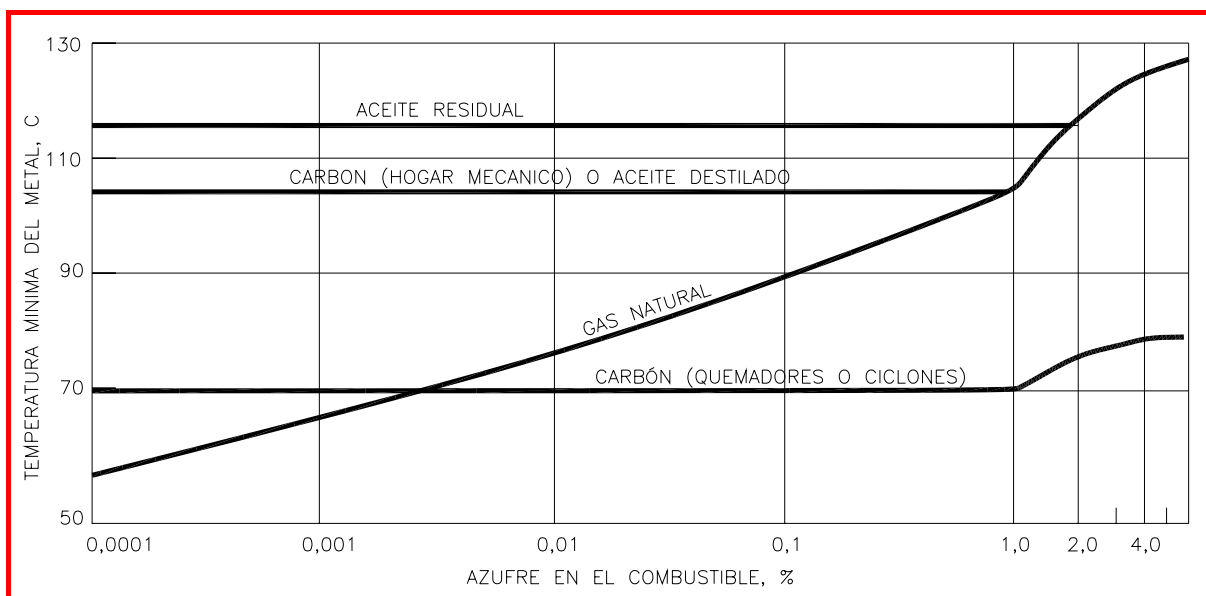


Figura 5. Temperatura mínima del metal en el lado frío de los calentadores de aire tipo recuperativo, en función de la cantidad de azufre del combustible

La presión y la temperatura del vapor se seleccionan para facilitar un diseño que resulte económico.

En general, las altas presiones de vapor incrementan la eficiencia del sistema, pero pueden limitar la recuperación global del calor de los gases, en el caso de un HRSG de presión única, por su alta temperatura de saturación.

Se resuelve este problema mediante un HRSG de varias presiones.

Se suelen utilizar entre 1 y 4 secciones, con distintas presiones independientes.

Las secciones de sobrecalentador, caldera y economizador, a cada una de sus respectivas presiones, permiten reducir los costes globales e incrementar la recuperación de calor.

La vaporización en el economizador es inevitable cuando se opera en puntos que no corresponden al de diseño, y por ello los economizadores de los HRSG deben incorporar características constructivas, para prevenir problemas.

Tales características deben incluir:

- 1.- Flujo ascendente en la sección final antes del calderín;
- 2.- Línea de recirculación, para emplear durante las puestas en servicio, para minimizar la generación de vapor, cuando no hay flujo de agua de alimentación;
- 3.- Paso del agua de alimentación por el equipo de separación "vapor - agua", que está ubicado en el calderín.

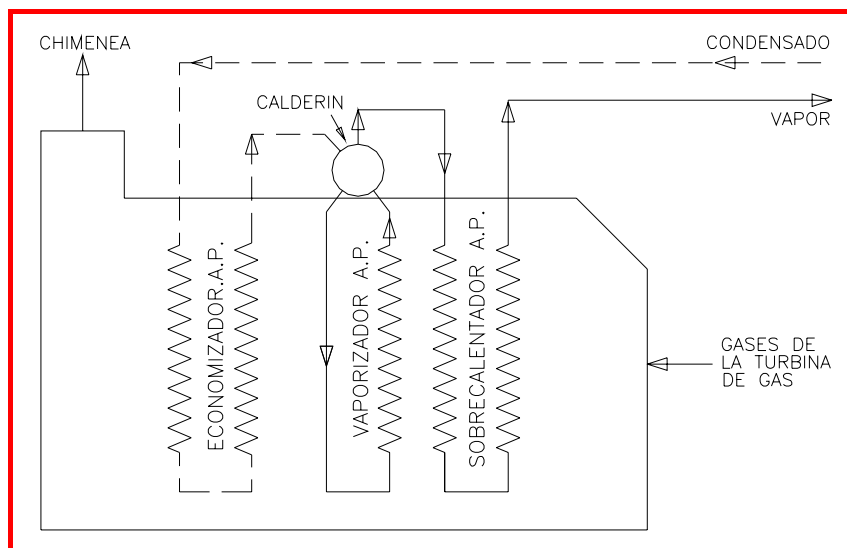


Figura 6. Esquema de un HRSG con un solo nivel de presión

Para la generación de potencia mediante ciclos combinados son posibles varias disposiciones que pueden utilizar un amplio rango de combustibles, como respuesta al coste de los mismos, a las prestaciones necesarias y a otras consideraciones de tipo económico. Esto posibilita la selección del ciclo de vapor más adecuado a cada aplicación, que pueda responder de forma adecuada a necesidades económicas y de operación. Algunos de los ciclos de vapor utilizados son los siguientes:

- Presión simple, sin recalentamiento, con calentamiento del agua de alimentación.

Este ciclo de vapor, cuyo diagrama esquemático se muestra en la figura 6 y cuya evolución de temperaturas en el HRSG corresponde a la mostradas en la figura 4, es un ciclo sin combustión, con sobrecalentador, evaporador y economizador de tubos de aletas. La

energía se recupera de los gases de escape de la turbina por transmisión de calor convectiva. Este es el ciclo de vapor más simple que se puede utilizar en un ciclo combinado y se ha usado ampliamente. El coste de instalación es bajo, aunque con él no se obtienen los máximos rendimientos de los ciclos combinados. Parece una elección adecuada cuando el combustible es barato, cuando se utiliza en puntas de consumo o cuando se queman combustibles con alto contenido en azufre. Este ciclo se utiliza con turbinas de gas que tienen una temperatura de escape de 538 C o menos. La temperatura del gas de salida hacia la chimenea es de unos 170 C

- *Presión múltiple, sin recalentamiento, con calentamiento del agua de alimentación.*

El sistema de presiones múltiples del generador de vapor se utiliza para hacer máxima la recuperación de calor de los gases de escape de la turbina de gas. En la figura 7 se representa un esquema de un generador de vapor de recuperación de calor (HRSG) con tres niveles de presión y sin recalentador. Los ciclos de dos o tres niveles de presión dan un rendimiento superior al que se obtiene con un solo nivel de presión, pero el coste de instalación es mayor. Es la mejor elección cuando el coste del combustible es alto y también puede serlo en el caso de aplicaciones específicas.

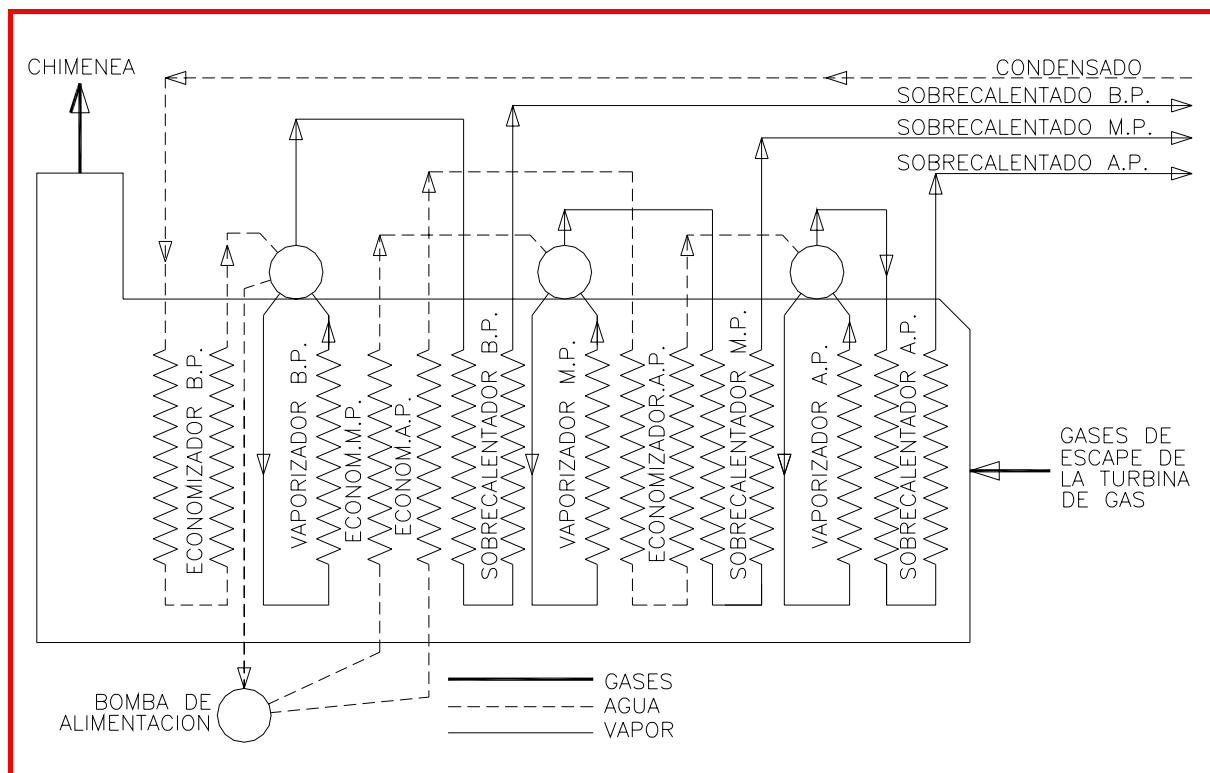


Figura 7. Generador de vapor de recuperación de calor (HRSG) de tres niveles de presión y sin recalentador

- *Tres niveles de presión, recalentador de recuperación de calor, calentamiento del agua de alimentación.*

El ciclo de vapor con recalentamiento es aplicable cuando se utilizan turbinas de gas con una temperatura de gases de escape de 593 °C o más que suministran suficiente energía al generador de vapor de recuperación de calor, para que de forma práctica se pueda utilizar el recalentador. En ocasiones se suele utilizar el calentamiento del gas combustible a 185 C utilizando un suministro de agua del economizador de media presión del generador de vapor de recuperación de calor, en la figura 8 se puede ver esta disposición.

Un resumen del equipo y posibles configuraciones del sistema, puede ser el siguiente:

- Ciclo sin combustión y con tres niveles de presión
- Sin recalentamiento para temperaturas de escape de la turbina de gas menor de 538 °C.
- Con recalentamiento para temperaturas de escape de la turbina de gas superiores a 566 °C y calentamiento del gas combustible.
- Calentamiento del agua de alimentación mediante recuperación de calor.
- Circulación natural en los tubos vaporizadores del generador de vapor.
- Desgasificación del agua de alimentación en el condensador.
- Turbina de gas con combustión seca de baja formación de óxidos de nitrógeno.
- Sistema de agua de refrigeración del condensador de un solo paso.
- Sistemas multieje.
- Sistema de eje único.
- Equipos y sistemas de control integrados.

En la figura 8 se muestra el esquema de un generador de vapor con recalentador, donde además se muestran los circuitos principales de los sistemas de turbina de gas y de turbina de vapor. En la figura 9 se muestra un ciclo combinado de los instalados en los últimos años en España, donde figuran los datos más importantes de funcionamiento de dicho ciclo.

Como se ha dicho la utilización de varias presiones en el HRSG sirve para hacer máxima la recuperación de calor de los gases de escape de la turbina de gas. En la figura 10 se muestra una aproximación de la evolución de temperaturas de los gases y de los distintos niveles de presión tal como tienen lugar en el HRSG.

Si se compara la figura 10 con la 4, que muestra la misma evolución cuando existe solamente un nivel de presión en el ciclo de vapor, se aprecia que la diferencia de temperaturas es mucho menor en el caso de varios niveles de presión, lo que aproxima más el proceso al concepto de reversibilidad que se expone en termodinámica. Cuando el proceso es más aproximado a la reversibilidad, la destrucción de exergía (energía utilizable) es más pequeña, lo que justifica desde un punto de vista termodinámico la inclusión de varios niveles de presión para mejorar el rendimiento.

Para que sirva como comparación en la figura 11 se muestra la evolución de temperaturas de los gases y del ciclo de vapor en los mismos puntos del generador de vapor, para el caso de carbón pulverizado. En este caso las diferencias de temperaturas son muy grandes y la destrucción de exergía muy importante.

Los ciclos combinados son los sistemas de generación de potencia de más alto rendimiento que existen en la actualidad.

Los datos que se muestran en la tabla 3 representan el funcionamiento termodinámico óptimo esperado, de la configuración óptima, desde el punto de vista económico para carga base y media carga. Existe un amplio rango de opciones para la generación de energía eléctrica dentro de las líneas de los distintos fabricantes, para adaptarse a criterios económicos específicos así como a determinadas condiciones de instalación y de operación que necesite el usuario. La tabla 4 muestra las opciones más comúnmente aplicables por General Electric a parte de las configuraciones básicas.

También se encuentran disponibles generadores de vapor de recuperación de calor con sistema de vaporización de circulación forzada, para servir a instalaciones específicas o a preferencias de los propietarios.

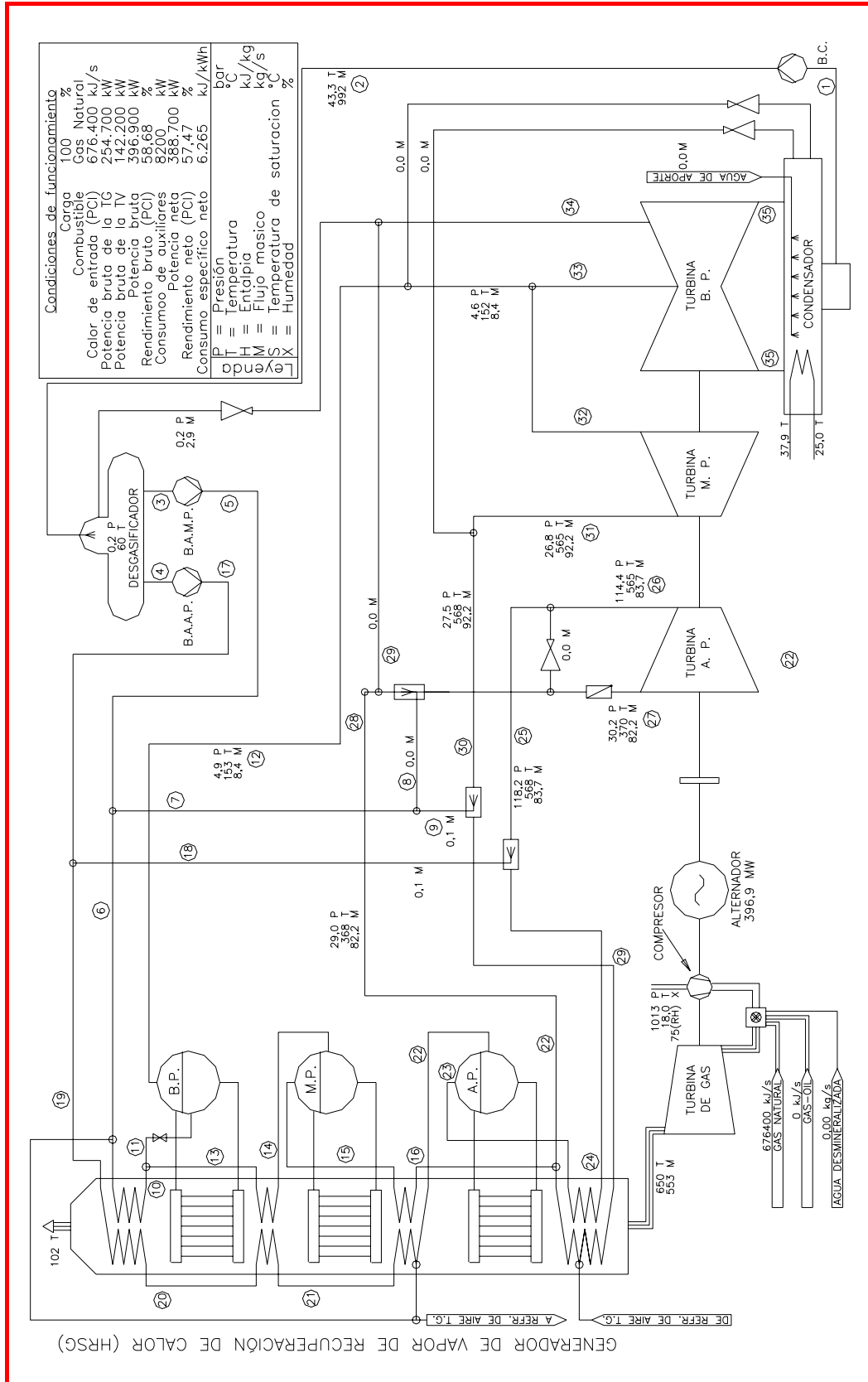


Figura 9. Esquema de un ciclo combinado representativo de los instalados los últimos años en España

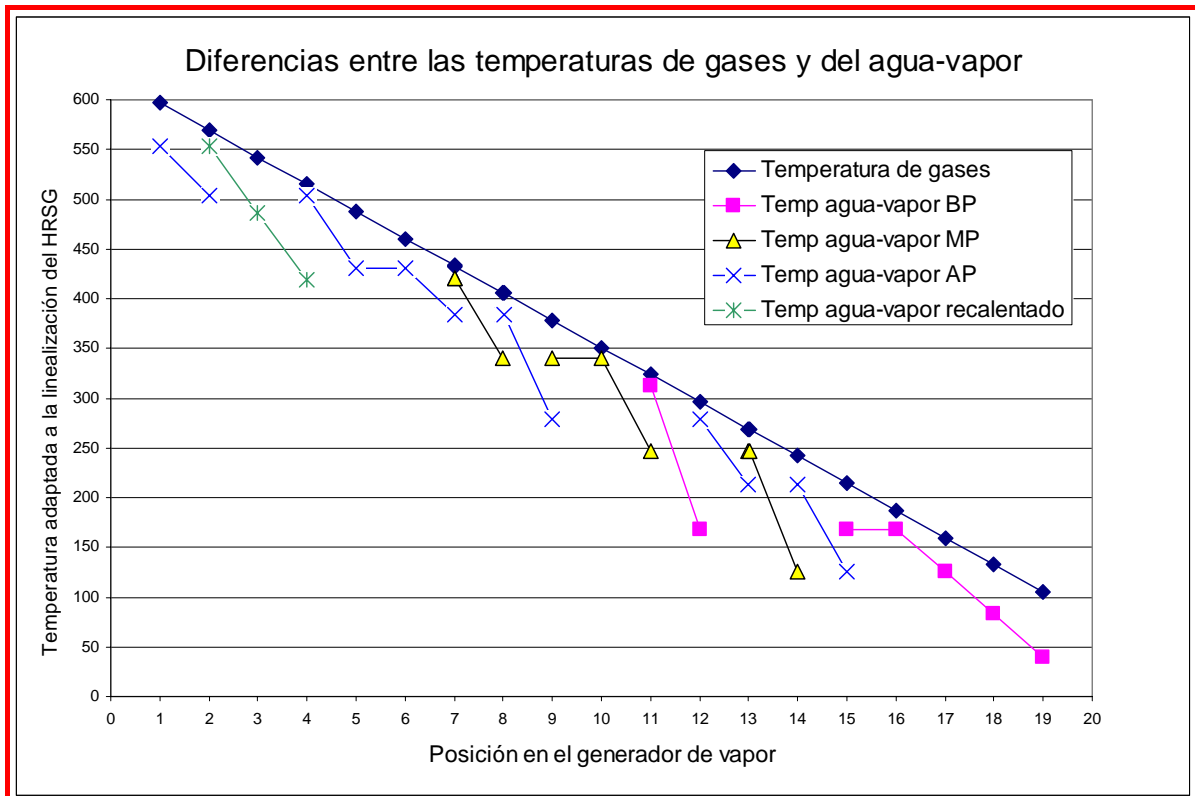


Figura 10. Diferencias de temperatura entre el gas y las partes del circuito agua vapor en contacto con él en el HRSG de un ciclo combinado.

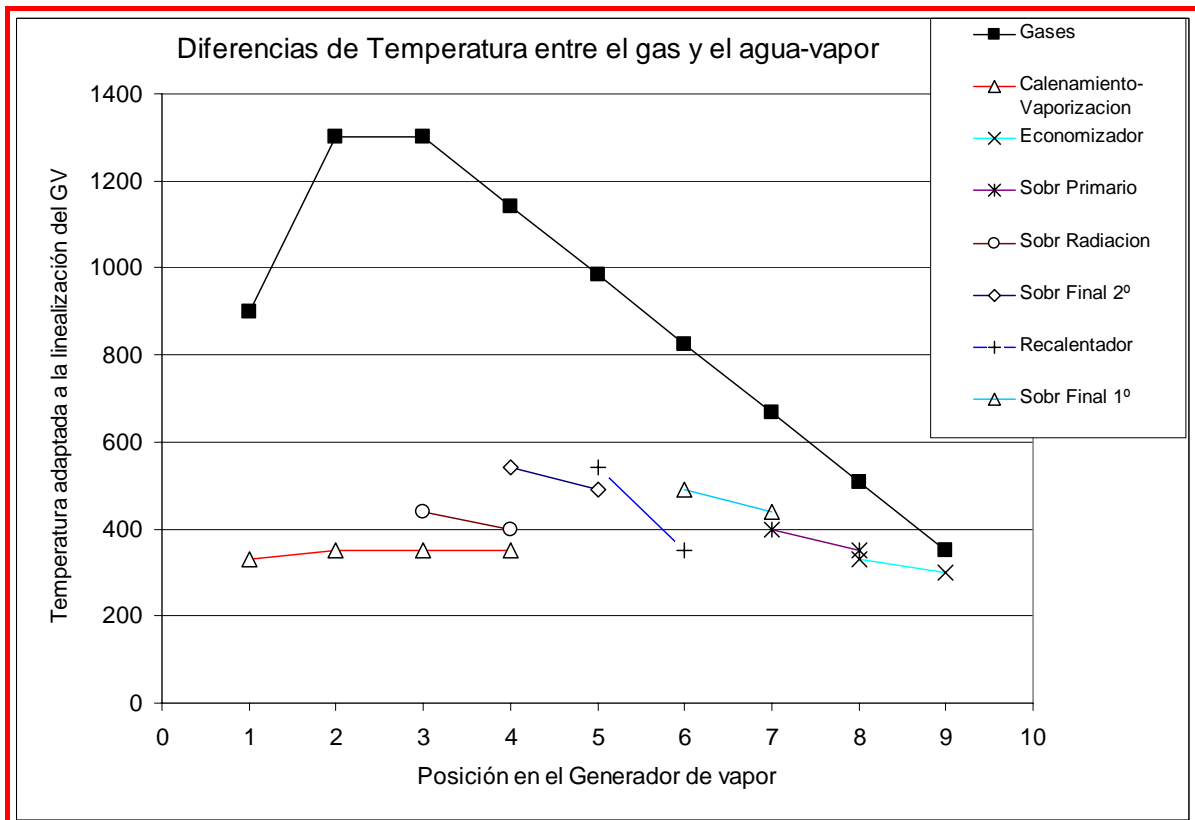


Figura 11. Diferencias de temperatura entre el gas y las partes del circuito de agua vaporen contacto con él en un generador de vapor de carbón pulverizado.

Los sistemas se pueden suministrar con desgasificador integral con el generador de vapor (suele consistir en desgasificar en el calderín de baja presión) que utiliza la energía del vaporizador de baja presión para constituir la desgasificación del agua de alimentación a presión positiva con una mínima reducción del rendimiento térmico. El economizador de baja presión, que se utiliza para obtener un alto rendimiento térmico, debe de estar hecho de material que resista la corrosión porque, por el interior circula agua de alimentación con una alta concentración de oxígeno, y por la parte exterior, la temperatura de la superficie externa de los tubos debe de ser inferior al punto de rocío de los humos, lo que producirá con seguridad condensaciones ácidas.

Tabla 3
Características de los ciclos combinados de General Electric para generación de potencia eléctrica a 50 Hz (Europa)

Designación	Nota	Potencia neta MW	Consumo específico kJ/kWh	Rendimiento térmico % (S/PCI)
S106B	4	64.3	7340	49.0
S206B	4	130.7	7230	49.8
S406B	5	261.3	7230	49.8
S106FA	5	107.4	6775	53.2
S206FA	4	218.7	6650	54.1
S109E	4	189.2	6935	52.0
S209E	4	383.7	6840	52.7
S109EC	5	259.3	6660	54.0
S209EC	5	522.6	6615	54.4
S109FA	5	390.8	6350	56.7
S209FA	5	786.9	6305	57.1
S109H	6	480.0	6000	60.0

Notas: 1. Condiciones del lugar: 15 °C, 1013 mbar, 60 % de humedad
 2. Presión de escape de la turbina de vapor, 30.48 mm Hg a.
 3. El funcionamiento debe de ser con todos los equipos asociados de la planta, disponibles.
 4. Ciclo de vapor de tres presiones, sin recalentador, calentamiento del agua de alimentación mediante recuperación de calor.
 5. Ciclo de vapor de tres presiones, con recalentador, calentamiento del agua de alimentación mediante recuperación de calor, sistema integrado de calentamiento del combustible gas.
 6. Ciclo de vapor de tres presiones, con recalentador, calentamiento del agua de alimentación mediante recuperación de calor, sistema integrado de refrigeración de turbina vapor-aire, sistema integrado de calentamiento del combustible gas

Las características del combustible afectan al funcionamiento de los ciclos combinados por varias razones. Los altos contenidos en hidrógeno, tal como ocurre con el gas natural, dan como resultado un contenido alto de agua en los productos de combustión. El agua tiene una capacidad calorífica mayor que el aire u otros productos de combustión, por lo que los combustibles con altos contenidos en hidrógeno disminuyen la potencia y el rendimiento. Los combustibles que contienen cenizas ensucian la turbina y el generador de vapor de recuperación de calor; y además resulta que los diseños de equipos y sistemas para que soporten el ensuciamiento conducen a empeoramientos del rendimiento y de la potencia de la planta. El contenido en azufre en el combustible, puede requerir ajustes de la temperatura del gas a la chimenea (cumplir los requisitos de la figura 5) y, como

consecuencia, en la temperatura del agua que entra en el economizador del generador de vapor, para evitar la condensación de ácido sulfúrico corrosivo. El aumento necesario de la temperatura del gas a la chimenea, debido a la presencia de azufre en el combustible, disminuye la potencia y el rendimiento. La variación del funcionamiento según el tipo de combustible (contenidos en hidrógeno, cenizas y azufre) se muestra en la tabla 5.

Tabla 4
Opciones posibles para los ciclos combinados de General Electric.

TIPO DE CICLO DE VAPOR - Presión simple. - Dos presiones. - Tres presiones*. - Sin recalentador. - Con recalentador.	CONTROL DE NO_x - Inyección de agua. - Inyección de vapor. - SCR (NO _x y/o CO) - Combustión seca de baja formación de NO _x *
DESGASIFICACIÓN - Desgasificación en el condensador*. - Desgasificación/vaporización integral con el HRSG.	CONDENSADOR - Refrigerado por agua (un solo paso)*. - Refrigerado por agua (torre de refrigeración evaporativa). - Refrigerado por aire
DISEÑO DEL HRSG - Vaporización de circulación natural*. - Vaporización de circulación forzada. - Sin combustión. - Combustión suplementaria.	COMBUSTIBLE - Gas natural*. - Destilado de petróleo (gas-oil). - Aceite con contenido de cenizas. - Gas derivado de Carbón de bajo y de aceite. - Combustibles múltiples.
* Configuración básica	

Tabla 5
Variación de las variables de funcionamiento con el combustible, para el ciclo combinado de General Electric 209E

Combustible	Rendimiento neto de la planta, %	Rendimiento térmico de la planta, %
Gas natural	BASE	BASE
Destilado de petróleo (gas-oil)	- 3.0	- 2.1
Residuo de la destilación del petróleo (fuel-oil)	- 9.3	- 7.6
NOTA 1: Punto de funcionamiento igual al de la carga BASE. NOTA 2: Dos presiones, sin recalentamiento, calentamiento recuperativo del agua de alimentación.		

Las líneas que existen en el mercado ofrecen turbinas de gas con “combustores secos” de baja formación de óxidos de nitrógeno (DLN), que pueden funcionar consiguiendo concentración de NO_x en los humos de la chimenea de 9 ppm sobre volumen seco, con un 15 % de oxígeno (15.5 g/GJ) sin inyección de agua ni vapor, cuando se funciona con gas natural. La inyección de agua o de vapor puede ser necesaria para ajustar las emisiones de NO_x cuando se utiliza como combustible productos de destilación del petróleo. También están en el mercado, turbinas de gas con quemadores convencionales, combustores con llamas de difusión que utilizan inyección de agua o de vapor para ajustar las emisiones de NO_x a las limitaciones existentes. En la Tabla 6 se muestran las emisiones de NO_x de las turbinas de gas

típicas de los ciclos combinados, funcionando con los quemadores de baja formación de óxidos de nitrógeno y con los quemadores de llama de difusión cuando se quema gas natural. También se presenta el efecto de la inyección de agua o de vapor en la emisión de NO_x y en el rendimiento.

Tabla 6
Efecto del control de NO_x en el funcionamiento de los ciclos combinados

Turbinas de gas (de General Electric)©	MS7001EA						MS7001FA				
Sistema de combustión	DLN	Llama de difusión						DLN	Llama de difusión		
NO_x , ppm vol. seco con 15 % de O_2 (g/GJ)	9 (15.5)	160 (275)	42 (72)		25 (43)		9 (15.5)	212 (365)	42 (72)		
Inyección de diluyente Agua/combust., peso. Vapor/combust., peso	0 0	0 0	0.81 -	- 1.22	1.04 -	- 1.58	0 0	0 0	0.89 -	- 1.62	
Funcionamiento planta Potencia neta, Δ %. Rend. Térm. Neto, Δ %.	BASE BASE	BASE BASE	+3.5 +3.6	+1.0 +2.1	+5.0 +5.2	+1.1 +3.4	BASE BASE	BASE BASE	+5.4 +3.9	+2.8 +3.1	
Ciclo de vapor	Sin recalentamiento, tres presiones						Recalentamiento, tres presiones				
Nota 1: Condiciones del lugar: 15 °C, 1.013 bar, 60 % de humedad relativa. Nota 2: Combustible: Gas natural											

La reducción catalítica selectiva (SCR), es un sistema de reducción de las emisiones de NO_x que utiliza amoníaco para reaccionar con el NO_x sobre un catalizador que reduce el NO_x a nitrógeno y agua. Este sistema aumenta los costes de instalación y de operación de la planta, pero puede reducir la emisión de NO_x a menos de 9 ppm referido a volumen seco con un 15 % de contenido en oxígeno (15.5 g/GJ) para todos los sistemas de ciclo combinado que General Electric tiene en el mercado.

El sistema de reducción catalítica selectiva (SCR) funciona en el rango de temperaturas entre 300 °C y 400 °C, de manera que el sistema debe de estar instalado en la zona de los evaporadores del circuito de alta presión. La trama de inyección de amoníaco se sitúa aguas arriba del evaporador donde la temperatura del gas es inferior a la temperatura a la cual el amoníaco se oxida para formar NO_x . Así se produce una mezcla íntima entre el amoníaco y el NO_x mientras el gas pasa entre los tubos de la sección de vaporización.

Las emisiones de monóxido de carbono (CO) son bajas a cargas de la turbina de gas superiores al 50 %, típicamente 5-25 ppm referido a volumen seco (9-43 g/GJ). Las emisiones de CO bajas son el resultado de un alto rendimiento de la combustión. También hay disponibles sistemas catalíticos para reducir las emisiones de CO, en el caso de emisiones bajas. El sistema catalítico para reducir la emisión de CO se instala en el escape de la turbina, aguas arriba del generador de vapor.

También hay disponibles para reforzar la potencia de los ciclos combinados otras opciones como refrigeración a la entrada del compresor, inyección de agua o vapor para el aumento de la potencia, combustión suplementaria para el generador de vapor de recuperación de calor y turbinas con puntas de capacidad. Estas opciones son aplicables generalmente para cubrir puntas de demanda.

La refrigeración en la entrada del compresor que utiliza enfriamiento evaporativo es un medio efectivo de aumentar la capacidad de la planta, aplicable con altas temperaturas del aire ambiente y baja humedad relativa. Un refrigerador evaporativo de un rendimiento del 85

% se espera que aumente la potencia de la instalación un 5 % durante el funcionamiento a 32 C de temperatura ambiente y con una humedad relativa del 30 %.

Los refrigeradores mecánicos y evaporativos se pueden utilizar para refrigerar el aire de entrada a al compresor a valores del orden de 7 C. Tal refrigeración puede aumentar la capacidad de la planta en un 11 % durante el funcionamiento con unas condiciones del lugar de 32 C de temperatura ambiente y 30 % de humedad relativa. Los sistemas de refrigeración del aire de entrada al compresor no mejoran el rendimiento de la planta, sin embargo pueden obtener picos de energía adicional durante los periodos calurosos del verano.

La combustión suplementaria en el generador de vapor de recuperación de calor, se puede utilizar para aumentar la potencia de la turbina de vapor tanto como el 100 %. Esto aumenta la capacidad de la planta un 25 %. La cogeneración de energía eléctrica y de calor suele ser el tipo de instalaciones donde se utiliza la combustión suplementaria; sin embargo, en las instalaciones de potencia pura, la postcombustión se puede utilizar para cubrir puntas de demanda. La utilización de la postcombustión cuando hay generación de calor y trabajo puede mejorar el rendimiento total.

Mientras que con la inyección de agua o de vapor, que se puede utilizar para aumentar la potencia de la instalación y reducir las emisiones de NO_x, se disminuye el rendimiento. En la tabal 7 se resumen las opciones para aumento de potencia y sus efectos en el consumo específico.

Tabla 7
Opciones para aumento de potencia y sus efectos

Opciones de aumento de potencia	Impacto en el funcionamiento	
	Δ potencia %	Δ consumo específico %
Configuración base	Base	Base
Enfriamiento evaporativo en la entrada del compresor (enfriador del 85 % de rendimiento)	+5.2	-
Enfriamiento del aire de entrada del compresor a 45 °C	+10.7	+1.6
Puntas de carga de la turbina de gas	+5.2	- 1.0
Inyección vapor en la turbina de gas (5 % del caudal de aira)	+3.4	+4.2
Inyección agua en la turbina de gas (2.9 % del caudal de aira)	+5.9	+4.8
Combustión suplementaria en el HRSG	+28	+9
<i>Nota 1:</i> Condiciones del lugar, 32 °C, 30 % de humedad relativa. <i>Nota 2:</i> Combustible: Gas natural. <i>Nota 3:</i> Ciclo de vapor de tres presiones, con recalentador		

Las capacidades para dar puntas de potencia están disponibles para muchas de las configuraciones de las turbinas de gas y estos aumentos de potencia suelen ser del orden del 3-10 % de la potencia del ciclo combinado. Esta suele ser la mejor solución para pequeños aumentos de capacidad durante cortos periodos de tiempo, porque el funcionamiento con puntas de carga afecta considerablemente la vida de los componentes de la turbina de gas y los costes de mantenimiento. Los ciclos combinados se pueden integrar con sistemas de gasificación para formar plantas eficientes de generación de potencia, de carbón o de productos petrolíferos con un buen comportamiento desde el punto de vista medioambiental. Los módulos estándar de los ciclos combinados se pueden adaptar con gran facilidad para ser integradas en sistemas de gasificación (IGCC) “gasificación integrada en ciclo combinado”.