

## Turbinas TV de Siemens

### SST-200

#### up to 10MW

The SST-200 is a single-casing turbine, geared or with direct drive suited to both generator and mechanical drives. Used for industry and power generation applications.

#### Technical data

- Power output up to 10MW
- Inlet pressure up to 110bar/1595psi
- Inlet temperature up to 520°C/970°F
- Controlled extraction up to 16bar/230psi and up to 350°C/562°F
- Bleed up to 60bar/870psi
- Exhaust pressure (back pressure) up to 16bar/230psi
- Exhaust pressure (condensing) up to 0.25bar/3.6psi
- Exhaust area 0.17–0.34m<sup>2</sup>/1.8–3.7sq.ft.

### SST-150

#### up to 20MW

The SST-150 is a single-casing turbine, providing geared drive to a 1,500 or 1,800rpm generator and packaged in a skid-mounted design. For power generation, it provides high efficiency together with a very compact arrangement.

#### Technical data

- Power output up to 20MW
- Inlet pressure up to 103bar/1,495psi
- Inlet steam temperature up to 505°C/940°F
- Rotational speed up to 13,500rpm
- Bleed up to 25bar/365psi
- Controlled extraction up to 16bar/232psi
- Exhaust pressure (back pressure) up to 10bar/145psi
- Exhaust pressure (condensing) up to 0.25bar/3.6psi
- Exhaust area 0.28–1.6m<sup>2</sup>/3.0–17.2sq.ft.

### SST-600

#### up to 150MW

The SST-600 is a single-casing turbine with front admission, geared or with direct drive; suited to both generator and mechanical drives. Used for tailor-made applications for most complex processes in industry and power generation.

#### Technical data

- Power output up to 150MW
- Inlet pressure up to 165bar/2,393psi
- Inlet temperature up to 565°C/1,049°F
- Rotational speed 3,000–18,000rpm
- Up to 2 controlled extraction with pressure up to 72bar/1,044psi
- Up to 7 bleeds at various pressure levels
- Exhaust pressure (back pressure) up to 72bar/1,044psi or condensing
- Exhaust area 0.2–8.0m<sup>2</sup>/1.9–38sq.ft.

### SST-800

#### up to 250MW

The SST-800 is a single casing turbine with center admission that is suitable for condensing operation or for back-pressure operation up to 72 bar. Used for tailor-made applications for most complex processes in industry and power generation.

#### Technical data

- Power output up to 250MW
- Inlet pressure up to 170bar/2,465psi
- Inlet temperature up to 565°C/1,049°F
- Rotational speed 3,000–5,000rpm
- Up to 2 controlled extraction with pressure up to 65bar/943psi
- Up to 7 bleeds at various pressure levels
- Exhaust pressure (back pressure) up to 72bar/1,044psi or condensing
- Exhaust area 1.1–5.6m<sup>2</sup>/11.8–60.3sq.ft.

## Turbinas TG de Siemens

Cuanto mayor la potencia, mayor la eficiencia y menor la velocidad de rotación

### SGT-300

#### Generación de energía

**7,90 MW(e)**

- Combustible: gas natural\*
- Frecuencia: 50/60Hz
- Eficiencia eléctrica: 30,6%
- Consumo específico: 11.773 kJ/kWh (11.158 Btu/kWh)
- Velocidad de la turbina: 14.010 rpm
- Relación de compresión: 13,7:1
- Caudal de gases de escape: 30,2 kg/s (66,6 lb/s)
- Temperatura gases escape: 542 °C (1008 °F)
- Emisiones de NO<sub>x</sub> (con DLE, corregidas al 15% de O<sub>2</sub> seco): ≤ 15 ppmV

### SGT-600

#### Generación de energía

**24,77 MW(e)**

- Combustible: gas natural\*
- Frecuencia: 50/60Hz
- Eficiencia eléctrica: 34,2%
- Consumo específico: 10.533 kJ/kWh (9.983 Btu/kWh)
- Velocidad de la turbina: 7.700 rpm
- Relación de compresión: 14:1
- Caudal de gases de escape: 80,4 kg/s (177,3 lb/s)
- Temperatura gases escape: 543 °C (1.009 °F)
- Emisiones de NO<sub>x</sub> (con DLE, corregidas al 15% de O<sub>2</sub> seco): ≤ 25 ppmV

### SGT-800

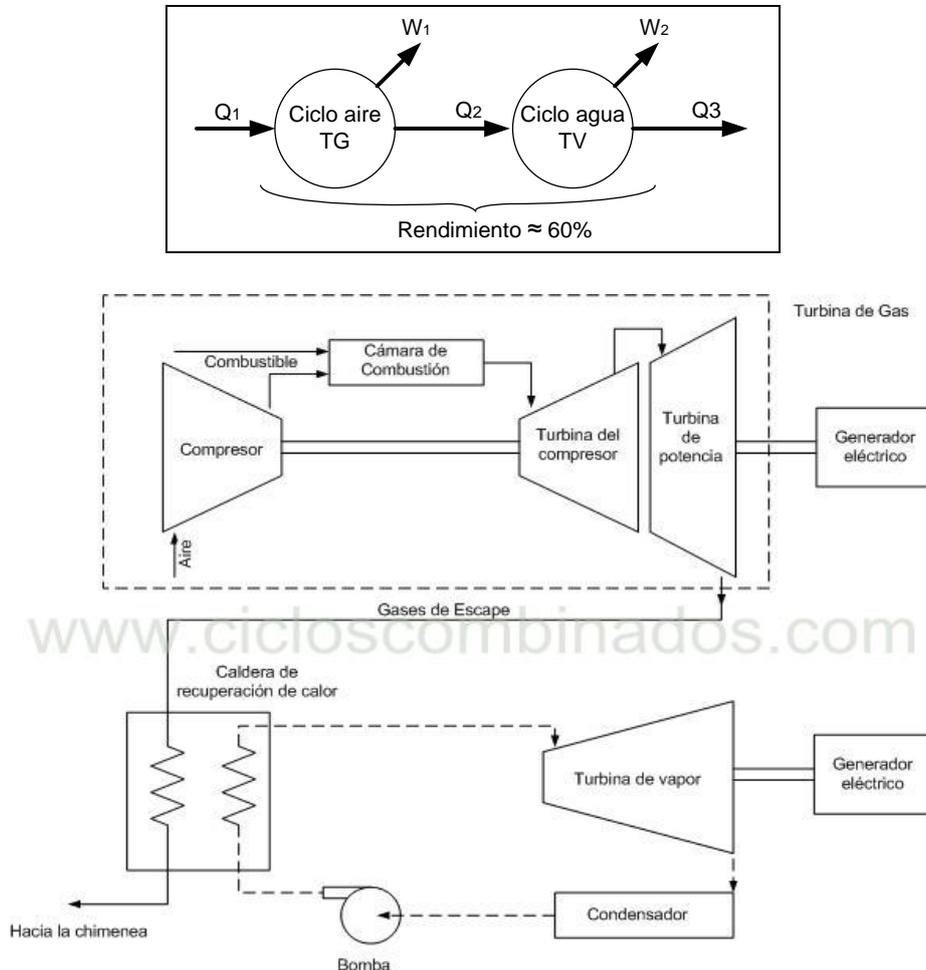
#### Generación de energía

**47,00 MW(e)**

- Combustible: gas natural\*
- Frecuencia: 50/60Hz
- Eficiencia eléctrica: 37,5%
- Consumo específico: 9.597 kJ/kWh (9.096 Btu/kWh)
- Velocidad de la turbina: 6.608 rpm
- Relación de compresión: 19:1
- Caudal de gases de escape: 131,5 kg/s (289,9 lb/s)
- Temperatura gases escape: 544 °C (1.011 °F)
- Emisiones de NO<sub>x</sub> (con DLE, corregidas al 15% de O<sub>2</sub> seco): ≤ 15 ppmV

## CENTRALES DE CICLO COMBINADO (CC)

Una Central Térmica de Ciclo Combinado (CC) es una planta de producción de energía eléctrica basada en dos máquinas térmicas coexistentes, cada una con un ciclo térmico diferente: una TV con ciclo Rankine (agua como fluido de trabajo) y una TG con ciclo Brayton (gas como fluido de trabajo).



Esquema de funcionamiento de una central de ciclo combinado.

Los gases calientes a la salida de la TG ( $500-550^{\circ}\text{C}$ ) son usados como fuente de calor para producir vapor de agua en un elemento llamado Generador de Vapor por Recuperación de Calor (Heat Recovery Steam Generator). En esta transferencia de calor, los gases calientes se enfrían y son descargados a la atmósfera a través de una chimenea.

El vapor de agua producido es dirigido a la turbina, donde se va expandiendo y perdiendo energía a medida que pasa por los escalones de álabes. Luego de atravesar el último escalón de la turbina, se condensa en el condensador a presión inferior a la atmosférica.

La unión de estos dos ciclos, permite un muy eficiente empleo del combustible, con rendimientos que están en el orden del 60% (60% de la energía contenida en el combustible se convierte en energía eléctrica). Para que esta unión de ciclos ocurra, la central TG debe tener unos  $2/3$  de la potencia de la central de CC y la central TV,  $1/3$  de la potencia de la CC. En resumen, la TG debe tener aproximadamente el doble de potencia que la TV. Si por ejemplo la potencia de una central de CC es de 400 MW, se podría tener dos TG de 130 MW cada una, por lo que la TV será de unos 140 MW.

También se pueden hacer extracciones de vapor y usarse para calentar agua y calefaccionar con la misma ciudades, casas, etc. (**district heating**). Esto puede llevar a que el rendimiento total del sistema sea cercano al 96%.  $(W_{TG} + W_{TV} + Q_{\text{agua caliente}})/Q_{TG} \approx 96\%$

[http://www.dailymotion.com/video/x12ulyw\\_central-termoelectrica-manuel-belgrano\\_tech](http://www.dailymotion.com/video/x12ulyw_central-termoelectrica-manuel-belgrano_tech)

#### Fabricantes

##### TV + TG

- GENERAL ELECTRIC
- SIEMENS
- ALSTOM
- MITSUBISHI

##### TG

- HITACHI

##### HRSG

- BABCOCK
- FOSTER WHEELER
- ALSTOM

#### Combustibles

##### Potencias

- 67MW a 830 MW (\*)
- (\*) 2TG x 275MW + 1TV x 280 MW

- Gas Natural
- Gas Oil
- Carbón Gasificado

#### **Aspectos positivos y limitaciones de los ciclos combinados.**

Además de la flexibilidad de utilización, ya sea para generación de energía eléctrica como para obtención de vapor, este tipo de configuración permite la conversión o "repowering" de instalaciones térmicas con TV con el consiguiente aumento de la eficiencia integral de las mismas.

Los fabricantes de turbinas de gas y plantas de ciclo combinado indican las siguientes razones para justificar el mayor uso de los mismos:

- 1) Disponibilidad de grandes volúmenes de gas natural.
- 2) Posibilidad de uso de otros combustibles, diesel, carbón gasificado, etc., con rendimientos elevados pero con limitaciones en el funcionamiento de los quemadores. El diseño se optimiza para gas natural.
- 3) Elevados rendimientos con buen factor de carga.
- 4) Bajo impacto ambiental en relación con las emisiones de  $CO_2$  y  $NO_x$  y menor eliminación de calor al medio ambiente por kWh producido.
- 5) Menores consumo de agua de refrigeración, respecto a una central convencional de igual potencia.
- 6) Bajos costos de capital y cortos plazos de entrega de las plantas, para los niveles de eficiencia obtenidos.
- 7) Ventajas asociadas a la estandarización de componentes, con la simplificación de su montaje y mantenimiento.

Respecto de las limitaciones, podemos citar las que imponen los materiales y las temperaturas de trabajo asociadas a los equipos y componentes del circuito de los gases de combustión, son los esfuerzos térmicos que aparecen cuando estos ciclos se operan en forma intermitente o "se ciclan". Estos esfuerzos son mayores que los que se producen en operación continua, ya que cuando se efectúa el ciclado los transitorios de arranque y parada son mucho más frecuentes.

En estos transitorios se produce fatiga termomecánica de los metales base. Tanto este tipo de paradas como las de emergencia afectan fuertemente la vida útil de la turbina, ya que en este aspecto cada arranque equivale a aproximadamente veinte horas de operación en régimen continuo y cada parada de emergencia equivale a diez arranques normales (unas doscientas horas de funcionamiento).

Por otra parte se ha comprobado que aún en condiciones normales de operación mucho de los componentes del citado circuito de gases de combustión no alcanzan el tiempo de vida útil previsto. Por ejemplo los álabes de la turbina de gas presentan frecuentemente fallas antes de cumplir la vida útil establecida en el diseño.

Otra limitación de estos ciclos es la respuesta de la turbina de gas de acuerdo con las condiciones ambientales. Así, en días calurosos la turbina trabaja con menor eficiencia que en los días fríos. Una turbina de gas que se opera con una temperatura ambiente de 0 °C produce alrededor del 15 % más de energía eléctrica que la misma máquina a 30 °C. Asimismo los climas secos favorecen la eficiencia de estos equipos. Por estas razones las eficiencias nominales expresan los resultados de los cálculos de potencia basados en condiciones ambientales normalizadas ISO (15°C, 1,013 bar. y 60% de humedad relativa).

En lo que respecta a la contaminación ambiental, los combustores de baja emisión de NO<sub>x</sub> fueron uno de los más importantes logros en la tecnología de las turbinas de gas. No obstante implican la limitación de tener mayor inestabilidad de llama que los de difusión convencionales por la necesidad de usar mezclas aire-combustible más pobres. La oscilación de la llama puede producir vibraciones y ruido inaceptables y además afectar la vida útil y la fiabilidad operativa de la turbina de gas.

## Generador de Vapor por Recuperación de Calor (HRSG)

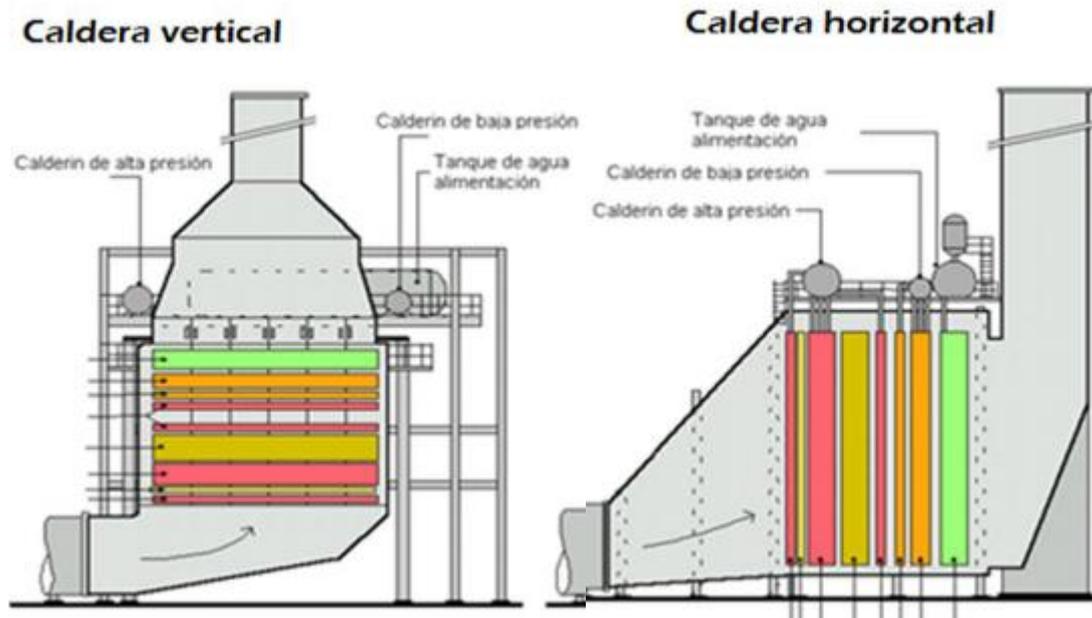
El HRSG no es una caldera convencional como la que usa una TV. Es un intercambiador de calor, que aprovecha la energía de los gases de escape de la TG para producir vapor de agua en una TV. Aquí también el agua pasa por tres tipos de sectores ya vistos:

- 1) Economizadores, situados en la chimenea, que elevan la temperatura del agua hasta casi la temperatura de ebullición
- 2) Evaporadores, situados en la zona central de la caldera, donde se produce el cambio de fase líquido-vapor (se vaporiza el agua).
- 3) Sobrecalentadores, situados en la zona más próxima al escape de la turbina, donde la temperatura es más alta, haciendo que el vapor adquiera un mayor nivel energético (aumente su entalpía), aumentando su temperatura.

Los HRSG se pueden clasificar según sean calderas con o sin postcombustión y a su vez, cada una de ellas, atendiendo a su configuración geométrica, en calderas horizontales o verticales.

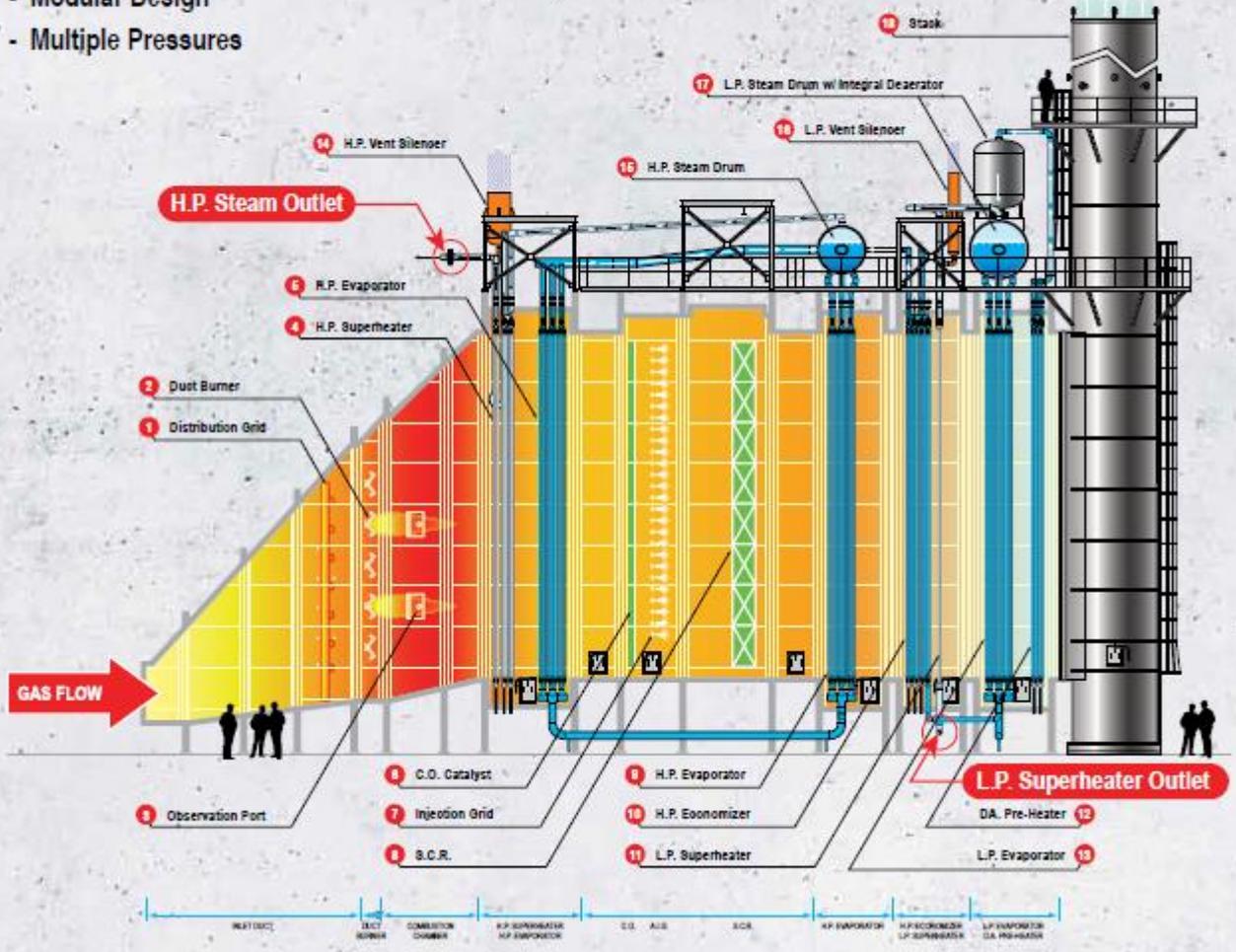
**Caldera sin postcombustión:** es el tipo más común de caldera utilizada en los ciclos combinados. Esencialmente es un intercambiador de calor en el que se transfiere el calor de los gases al circuito agua-vapor por convección.

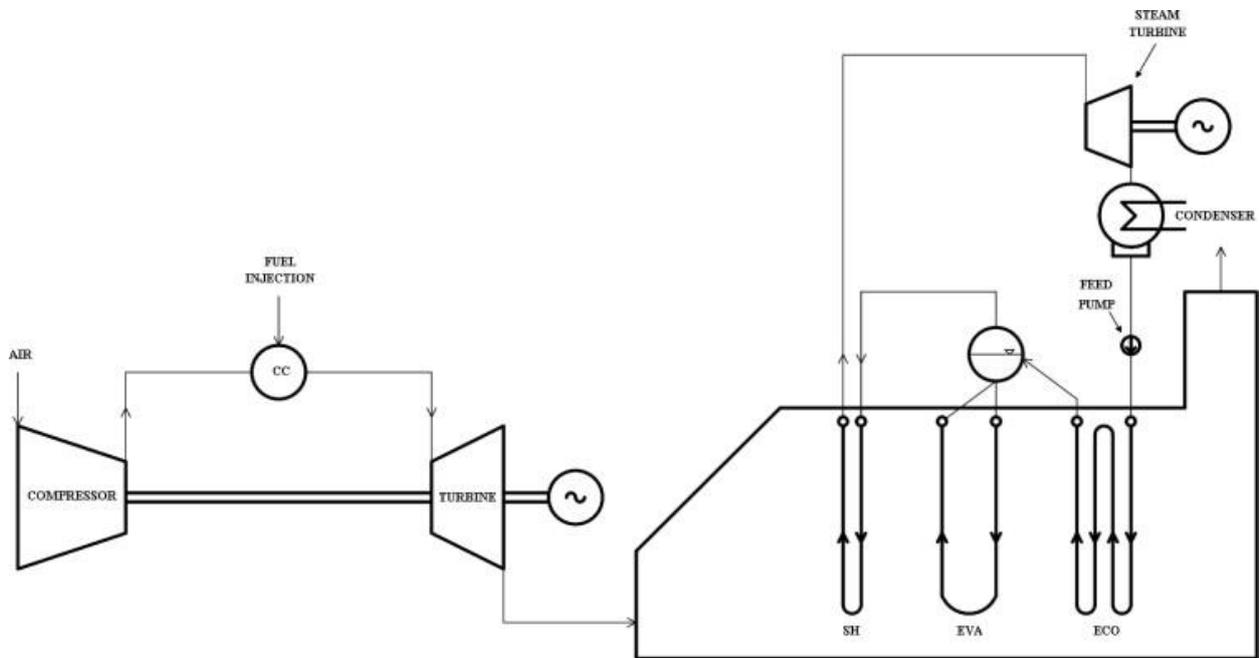
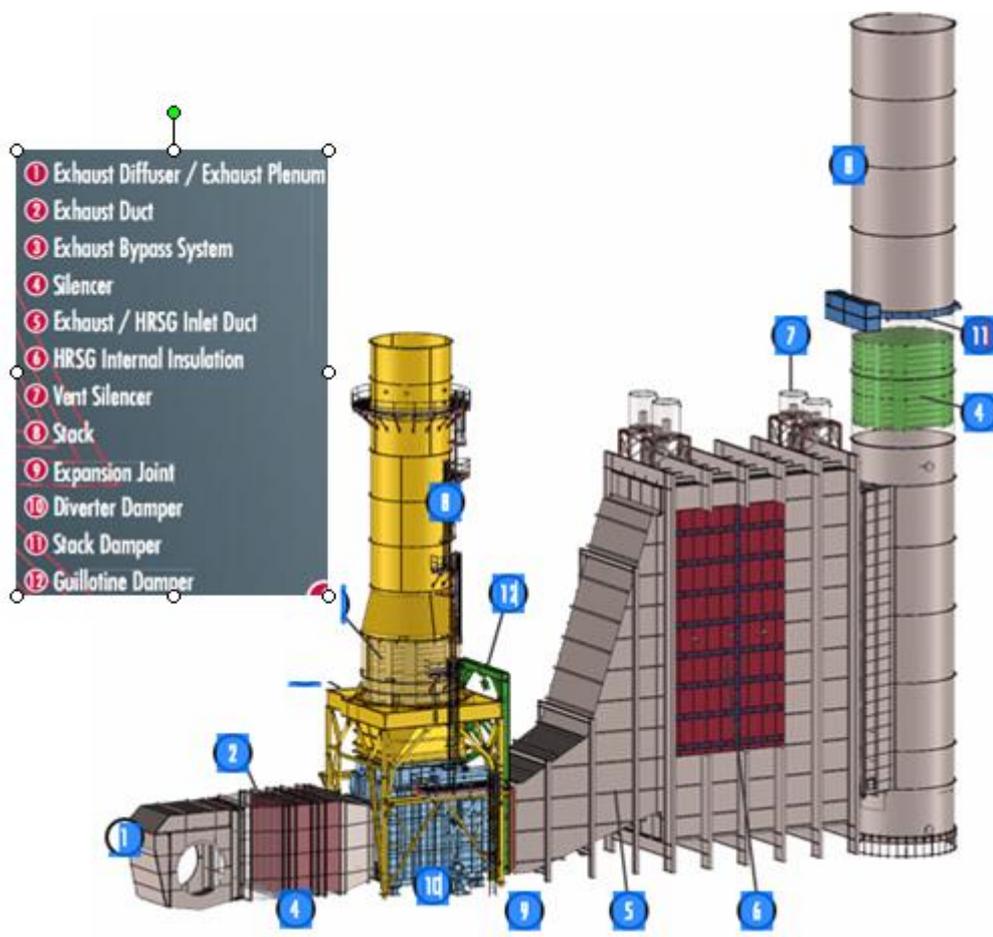
**Caldera con postcombustión:** aunque pueden construirse calderas de recuperación con quemadores y aporte de aire adicional, las modificaciones constructivas normalmente se limitan a la instalación de quemadores en el conducto de gases a la entrada de la caldera. Ello permite que se pueda utilizar el exceso de oxígeno de los gases de escape de la turbina, sin sobrepasar temperaturas admisibles para la placa de protección interna del aislamiento (temperaturas inferiores a  $800^{\circ}\text{C}$ ) y sin modificar, de forma importante, la distribución de superficies de intercambio de la caldera sin postcombustión. Estas calderas normalmente llevan atemperadores de agua pulverizada para regular la temperatura del vapor.

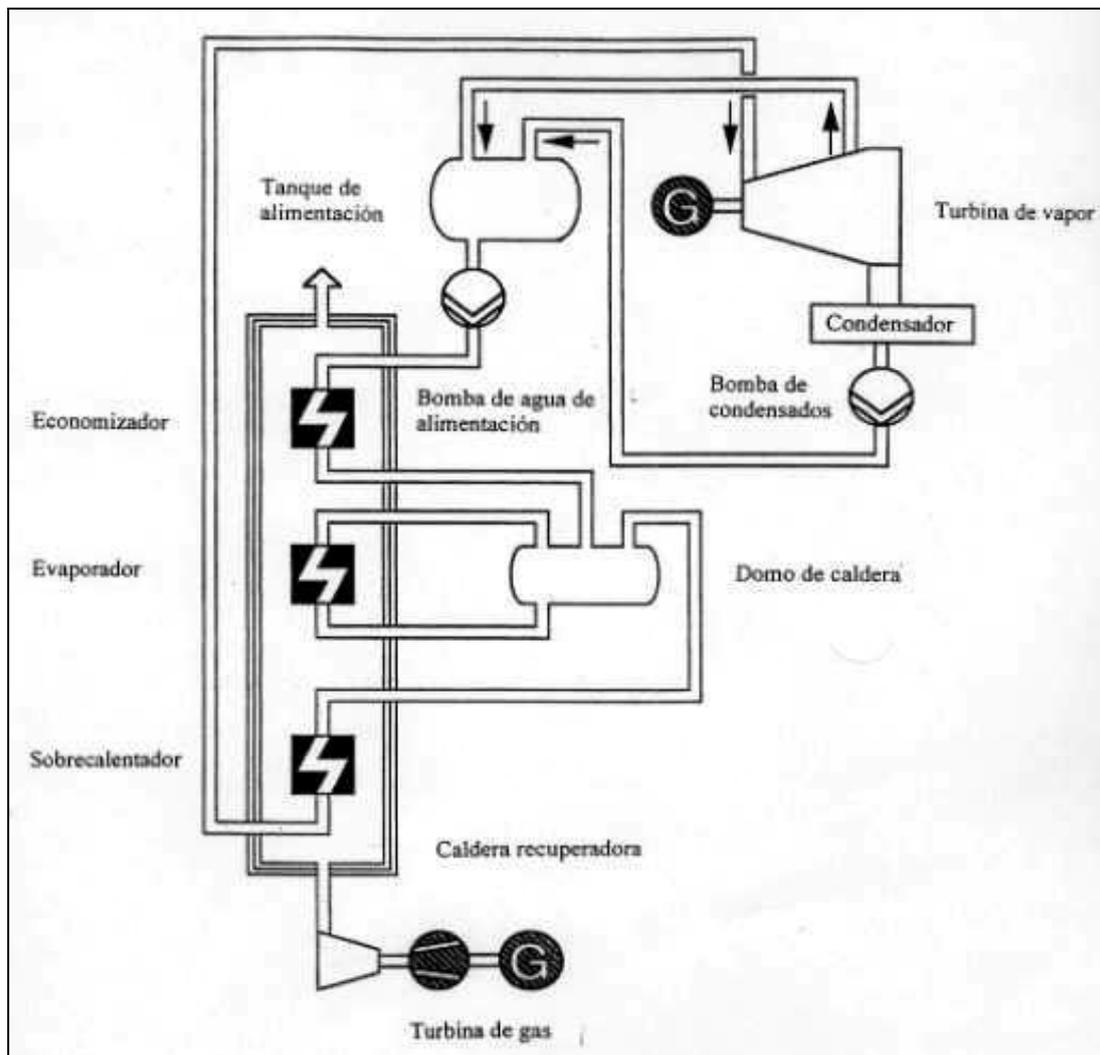


# Combined Cycle Utility HRSG

- Modular Design
- Multiple Pressures



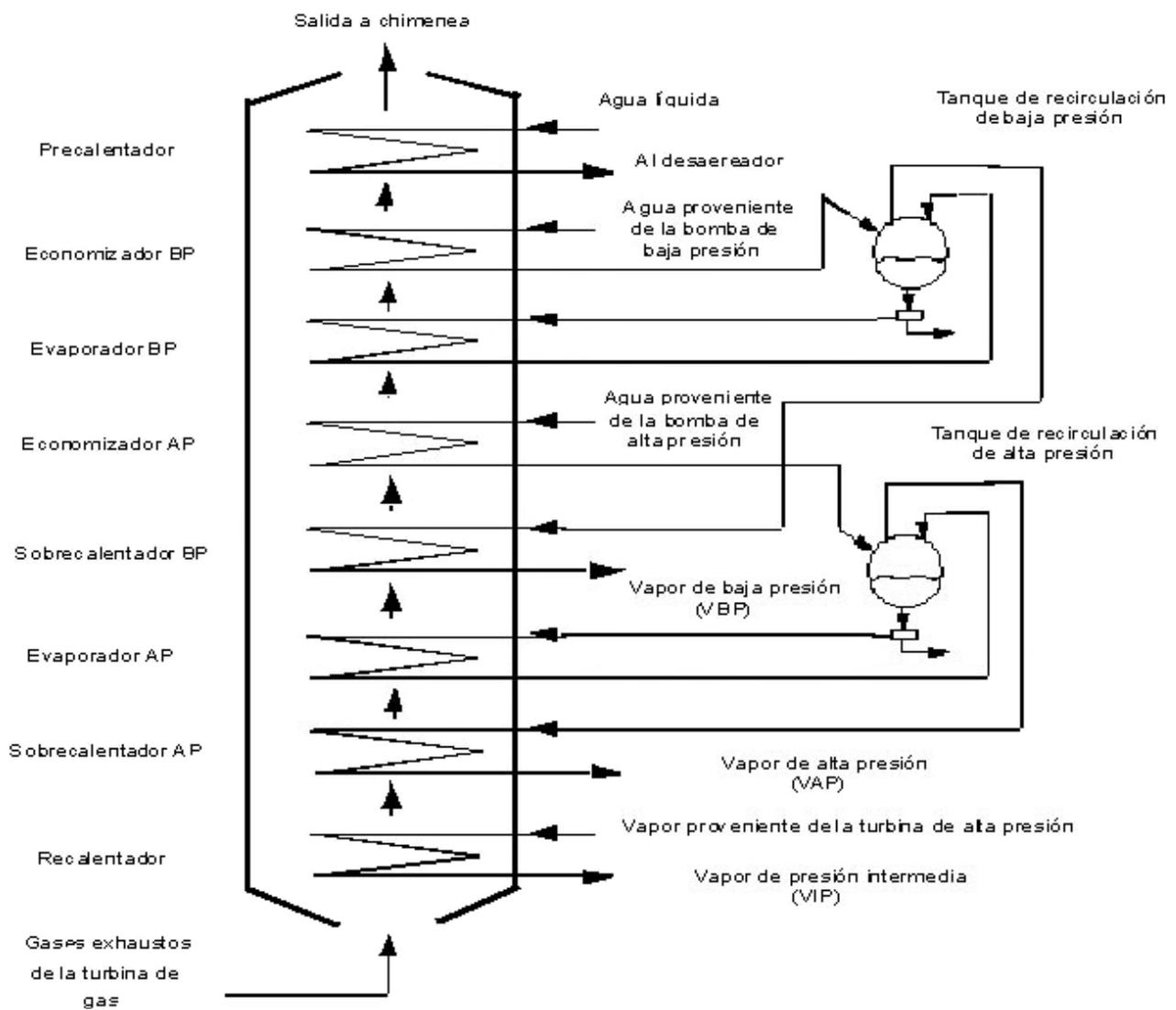




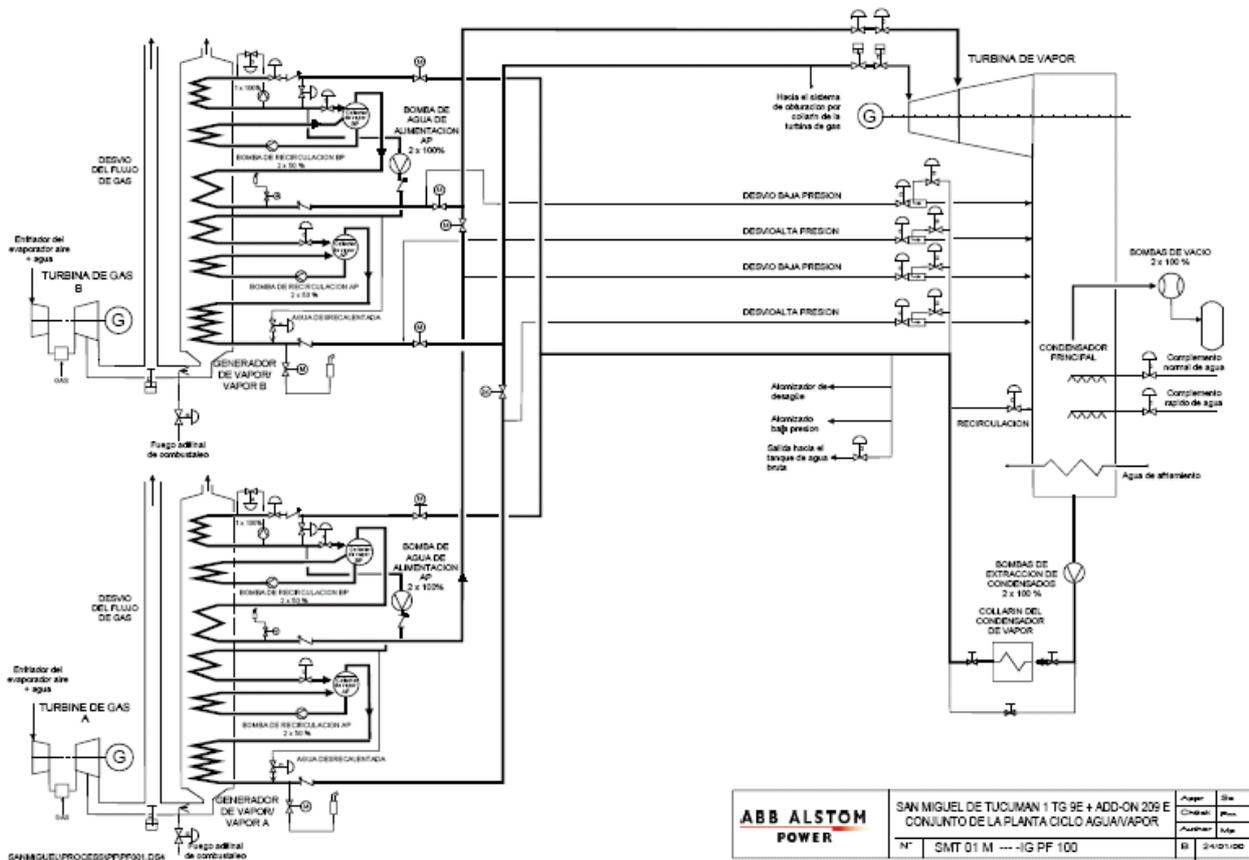
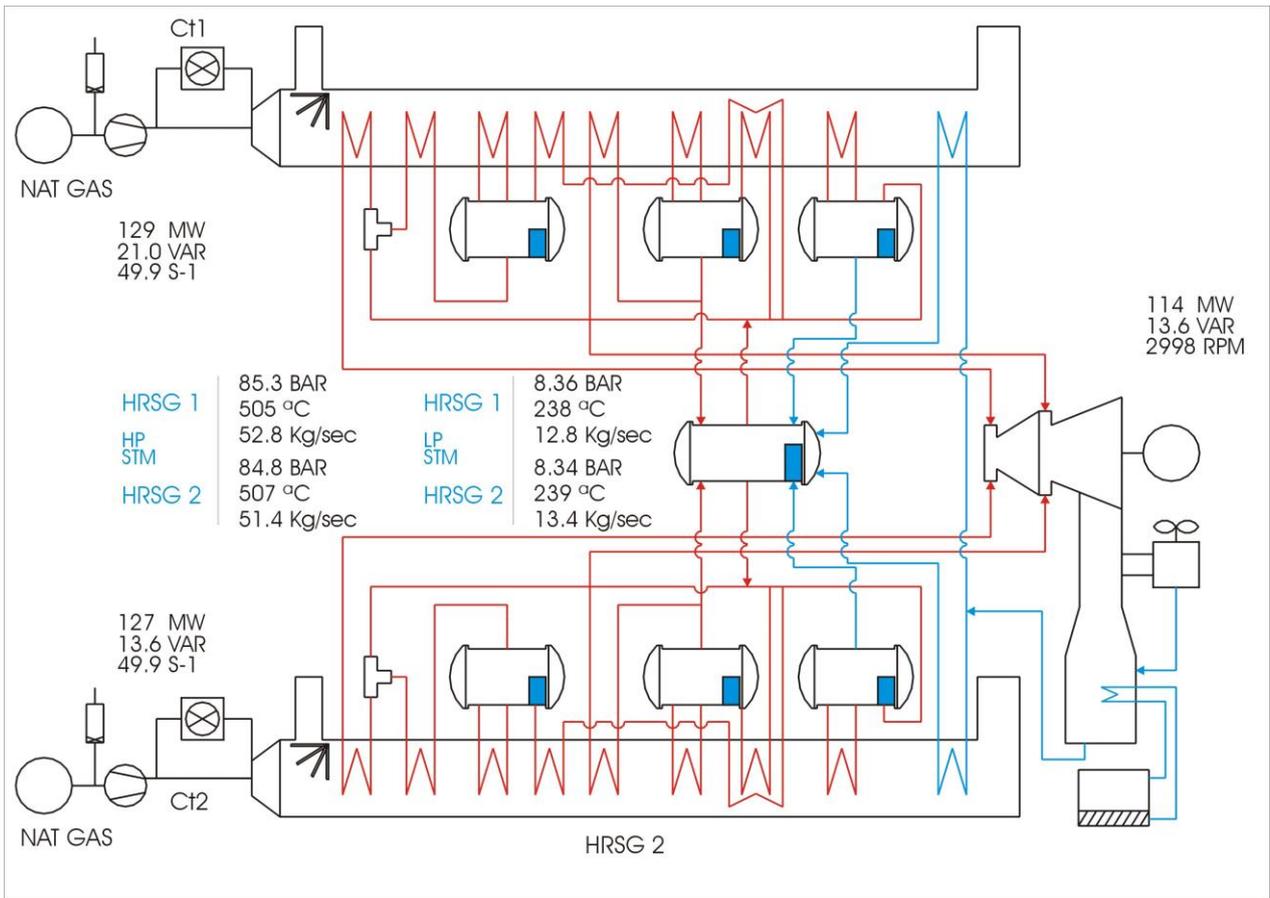
Esquema de la Central de CC Tucumán (situada en El Bracho)

En la Figura se muestra la Central de CC (existen dos TG independientes, en el esquema solo se ve una). Para analizar su funcionamiento partimos del "condensador", con la bomba de condensado enviamos el agua al "tanque de alimentación" (ver nota). Desde este equipo por medio de la "bomba de agua de alimentación" se introduce el agua al "economizador" que se encuentra dentro de la HRSG. El agua adquiere calor por los gases de escape de la TG y pasa al "domo de la caldera", donde se produce la evaporación del agua y la separación del agua-vapor, por la acción del "evaporador" que recibe calor también de los gases de escape de la TG, en la HRSG. Por último el vapor del domo va al "sobrecalentador", donde se transforma en vapor sobrecalentado y adquiere las condiciones requeridas por la TV. En la turbina el vapor se transforma el calor del vapor en energía mecánica en el eje. El "alternador" montado sobre el mismo eje transforma la energía mecánica en energía eléctrica. En este esquema se genera con la TG y la TV, lo que eleva el rendimiento de la instalación y hace más eficiente el uso de la energía primaria disponible

**Nota:** El Tanque de alimentación es el depósito donde se almacena el agua de alimentación que irá a la caldera para convertirse en vapor y después ser conducido a la turbina de vapor. El tanque también puede llevar acoplado un desaerador (desgasificador) ya que se aprovecha para eliminar los restos de oxígeno que no se quitaron en el condensador. Para eliminar el oxígeno calentamos el agua que hay en el depósito por medio de vapor que ha sido extraído de la turbina de vapor.



Se puede ver en la fig. de abajo el diagrama completo de la central de CC Tucumán, con datos de presión, temperatura, producción de vapor, potencias eléctricas



En el montaje de una CC, lo primero que se instala es el módulo TG (0,5 a 1 año), con su chimenea independiente. Se comienza entonces a producir y vender energía, mientras se instala el módulo TV (1 a 1,5 años), de esta manera se amortiza más rápidamente el costo de inversión.

## Configuraciones de Centrales de Ciclo Combinado

En la configuración de un CC es relativamente frecuente que varias TG alimenten con sus gases calientes a una HRSG con una única turbina de vapor.

La disposición relativa de los ejes de la TG y de la TV, según se encuentren alineados o no, hace que se pueda establecer otra clasificación atendiendo al número de ejes principales de que consta el tren de potencia:

- Centrales mono eje
- Centrales multi eje

En los mono eje, el generador puede estar en el extremo del eje (mayor facilidad de mantenimiento) o entre la TG y la TV. En este último caso hay un embrague que acopla la TV con el eje de la TG y el generador, permitiendo producir energía funcionando solo la TG.

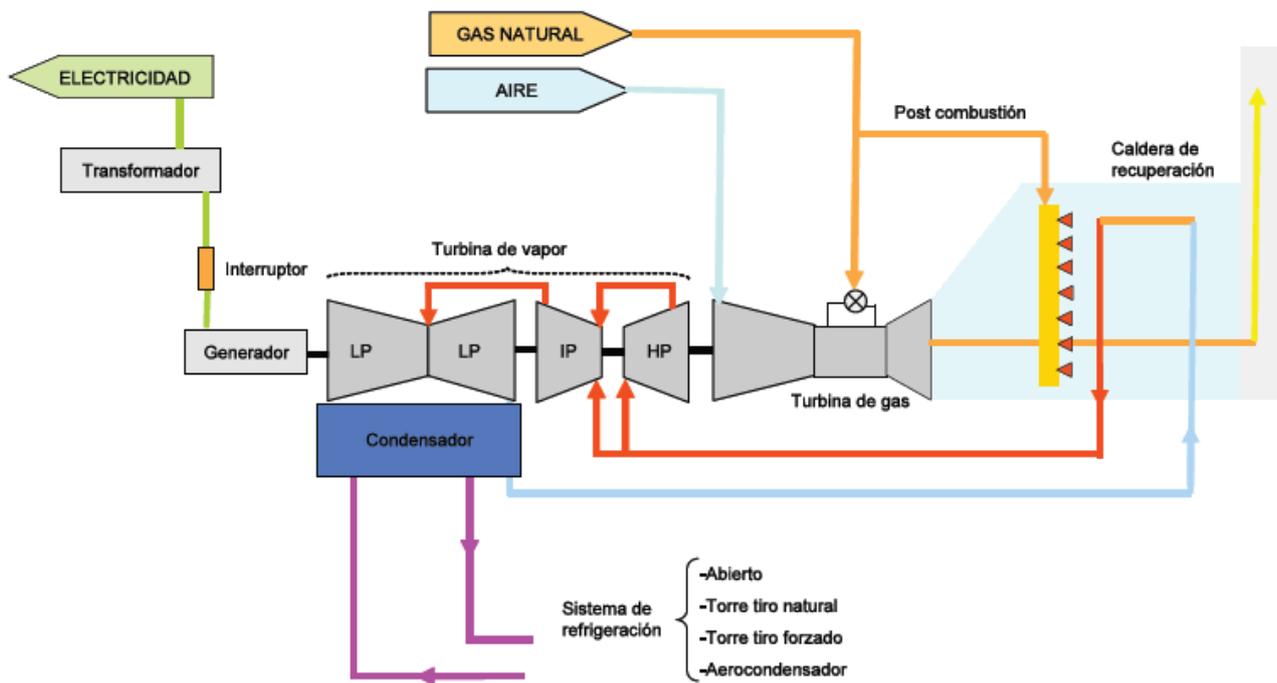
Las configuraciones normalmente empleadas en las centrales CC en operación comercial hoy día son las siguientes:

- Configuraciones 1x1 (una TG que alimenta a una HRSG que produce vapor para un único ciclo de Rankine)
- Configuraciones 2x1 (dos TG que alimentan cada una de ellas a su correspondiente HRSG y producen vapor para un único ciclo de Rankine)

También son posibles las configuraciones 3x1, 4x1, etc.

Es importante destacar que, para las configuraciones 2x1 y 3x1, cuando por una situación operativa de la central al menos una de las HRSG está fuera de servicio y la otra funcionando, existe la posibilidad de que puedan producirse retornos de vapor desde el colector común de vapor a las calderas que están fuera de servicio. Si esto ocurre, pueden producirse daños en los tubos y materiales no aleados de la caldera. Para evitarlo, y desde el proceso de especificación, se debe poner especial énfasis en una alta calidad de las válvulas de retención y cierre.

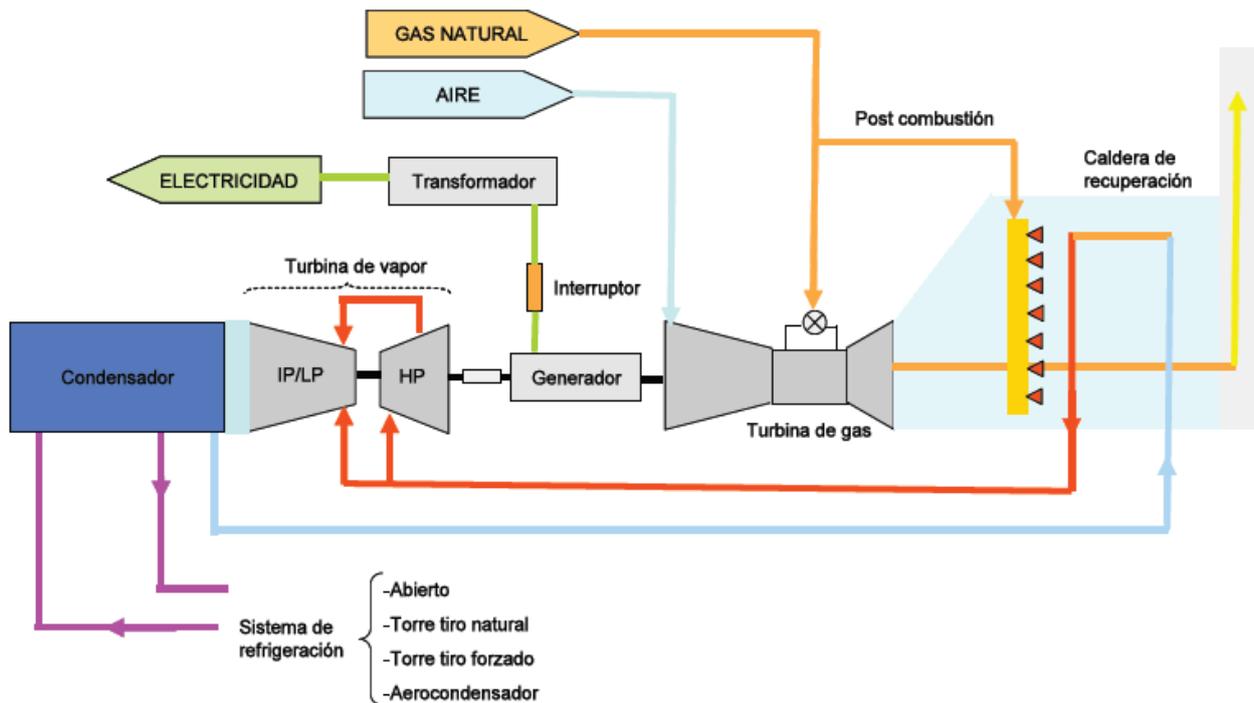
## Configuración mono eje 1x1 sin embrague



Las ventajas e inconvenientes con respecto a la configuración multieje son similares a las descritas en la configuración mono eje con embrague con los siguientes elementos diferenciadores:

- El hecho de disponer el generador en un extremo facilita su revisión e inspección.
- Al no poder situar el condensador axialmente, esta configuración requiere un pedestal de mayor altura y mayor inversión en obra civil que en la configuración mono eje con embrague.
- Frente al resto de configuraciones, el arrancador estático de la turbina de gas es de mayor potencia, al tener que arrastrar la turbina de vapor en el inicio del rodaje.
- Requiere una caldera auxiliar en los arranques para proporcionar vapor de cierres, vapor de vacío -si éste se hace con eyectores- y refrigeración inicial de la turbina de vapor durante el rodaje.

## Configuración mono eje 1x1 con embrague



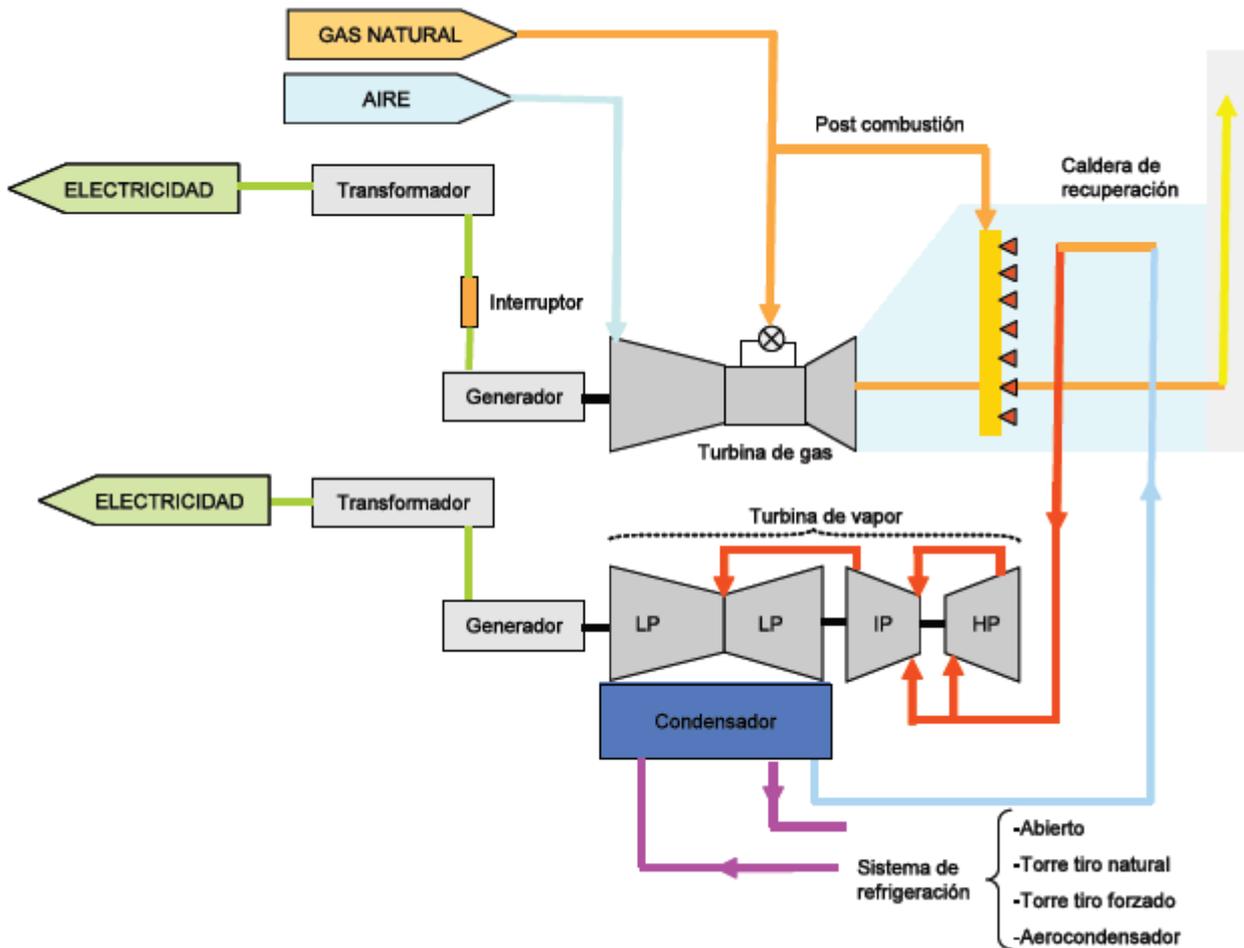
- **Ventajas:**

- Requiere un alternador menos que la configuración multieje.
- El generador, al estar ubicado entre la turbina de gas y la de vapor, proporciona un mayor equilibrio a todo el conjunto.
- Menor coste de inversión que la configuración multieje.
- Menor coste de obra civil. Esto es debido a la menor altura necesaria del pedestal del turbogenerador, al poder disponer el condensador de forma axial.
- Puente grúa de menor luz que la configuración multieje.
- Menor espacio requerido que la configuración multieje.
- El embrague permite un sistema de arranque más sencillo al poder independizar el rodaje de la turbina de gas de la de vapor. A diferencia del mono eje sin embrague, en esta configuración no es necesaria una caldera auxiliar para el calentamiento previo del vapor en el arranque de la turbina.

- **Inconvenientes:**

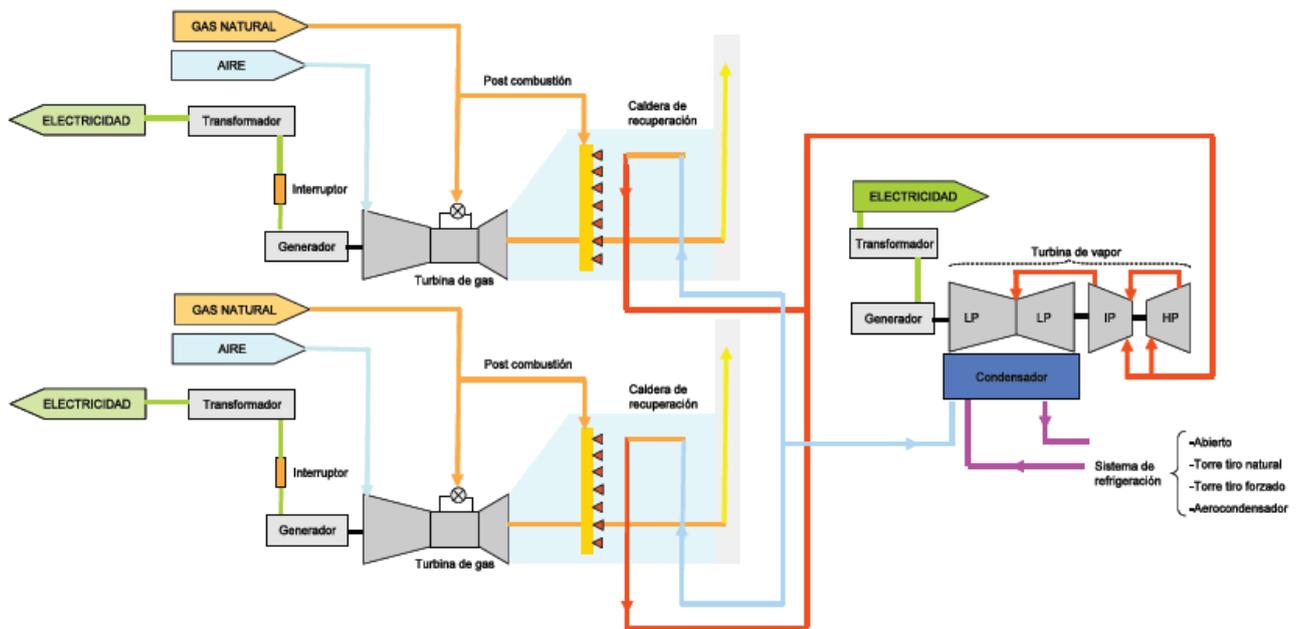
- Menor flexibilidad de operación que la configuración multieje, ya que en general esta configuración no suele llevar chimenea de by-pass.
- Evacuación de energía a través de un solo generador y por tanto, menor fiabilidad del conjunto. En la configuración multieje cada alternador a través de su transformador puede alimentar sistemas de transporte con diferentes tensiones.
- Mayor dificultad en la revisión del generador, al tener que desplazarlo lateralmente para poder extraer su rotor.
- No es posible el montaje y la puesta en marcha por fases, a diferencia de la configuración multieje.

## Configuración multieje 1x1



- **Ventajas:**
  - Posibilidad de funcionamiento con sólo la TG, derivando los gases a la atmósfera si fuese necesario.
  - Mayor disponibilidad de la TG, al poder operar ésta en caso de avería de la TV.
  - Al disponer de dos alternadores puede suministrar energía eléctrica con dos tensiones.
  - Fácil mantenimiento de generadores y turbinas.
- **Inconvenientes:**
  - Requiere dos alternadores y dos transformadores con el consiguiente incremento de inversión.
  - Mayor necesidad de espacio.
  - Puente grúa más grande.

## Configuración 2x1



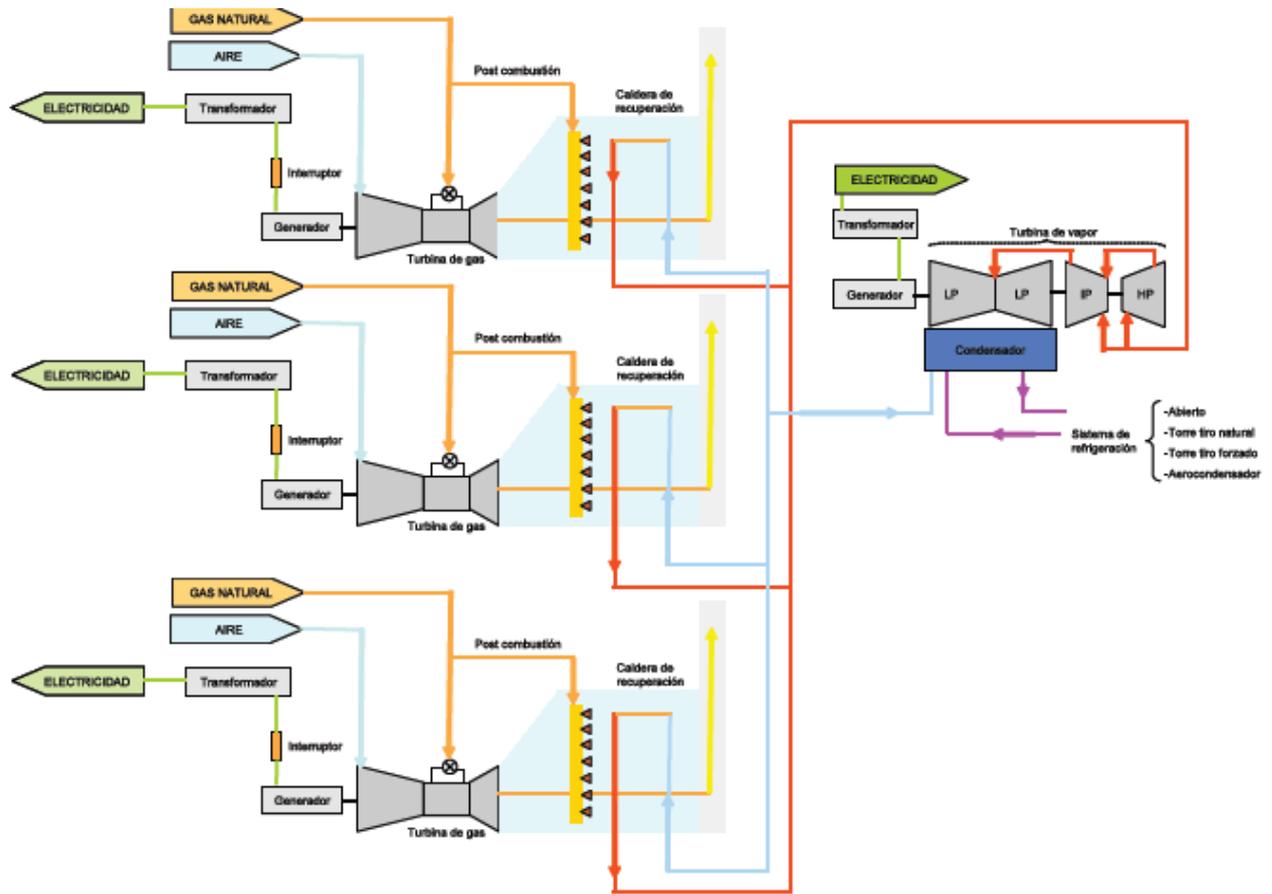
- Ventajas:

- Menor coste de inversión que dos monoejes de la misma potencia (aproximadamente un 10%).
- Mayor flexibilidad de operación, al posibilitar el funcionamiento con una turbina de gas y una turbina de vapor y arrancar de forma rápida la segunda turbina de gas.
- Mejor rendimiento a cargas parciales, y especialmente al 50% de carga, al poderse reducir la potencia en solo una de las turbinas de gas.
- Fácil acceso para el mantenimiento de los generadores.
- Equipos de arranque estáticos de turbina de gas pequeños.
- No es necesaria caldera auxiliar.
- Posibilidad de emplear alternadores refrigerados por aire, al ser estos de menor potencia

- Inconvenientes:

- La avería de la turbina de vapor deja fuera de servicio todo el ciclo combinado si no se dispone de by-pass de gases en las turbinas de gas.

# Configuración 3x1



## Arranque de una CC

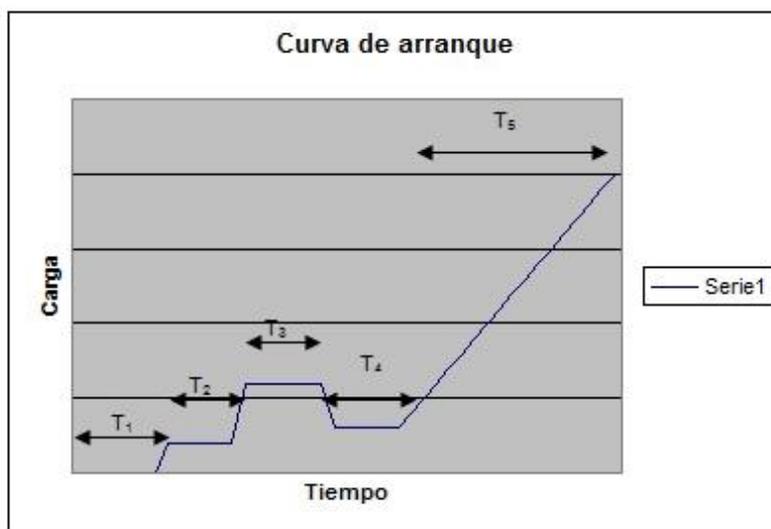
Con la turbina de gas en marcha, la HRGS empieza a recibir gases de escape calientes, generalmente a más de 600 °C, y comienza a calentarse el agua contenida en los haces tubulares de la caldera. Se comienzan a cerrar venteos de caldera, y a los pocos minutos ya se empieza a formar vapor, con lo que la presión comienza a subir rápidamente.

Cuando se alcanza la presión adecuada, se comienza la operación en by-pass, esto es, el vapor generado se deriva hacia el condensador directamente, sin pasar por la turbina de vapor. La razón es que el valor de conductividad del vapor no es el adecuado, y los diversos contaminantes que contiene, sobre todo sílice, hierro, sodio y cobre, pueden dañar los álabes de la turbina de vapor. Se purga gran cantidad de agua de la caldera, y se sustituye por agua de refresco, de menor conductividad, proveniente de la planta de producción de agua desmineralizada.

Cuando se alcanza el valor de conductividad conveniente se comienza a hacer girar la turbina de vapor. Poco a poco va aumentando de velocidad, y cuando se llega a 3000 r.p.m., su generador sincroniza con la red, aportando más energía eléctrica (aproximadamente un 50% de lo que aporte la turbina de gas). En las centrales de eje único, en las que la turbina de gas y la de vapor están unidas a un único generador, cuando se alcance la velocidad nominal se conectarán mecánicamente el eje del generador y el de la turbina de vapor, generalmente por medio de un embrague.

Se comienza entonces a subir carga, y se hace de forma lenta, para minimizar los efectos del estrés térmico. Cuando la planta alcance la carga deseada, que puede ser el mínimo técnico, la plena carga o cualquier otra entre estas dos, el proceso de arranque habrá finalizado.

Por tanto, se puede desglosar el tiempo empleado en el arranque de la siguiente forma



*T1: Desde el inicio del arranque hasta la sincronización*

*T2: Tiempo de espera hasta que los by-pass están presurizados y perfectamente operativos*

*T3: Tiempo necesario para conseguir la calidad de vapor adecuada*

*T4: Tiempo necesario para acelerar y acoplar la turbina de vapor*

*T5: Tiempo necesario para subir carga desde la carga mínima con turbina de vapor hasta la carga deseada*

## Vigilancia de parámetros durante la operación

Otra de las partes de las que se compone la operación es la vigilancia de parámetros de funcionamiento de nuestra central en modo continuo, que son los que nos van a indicar el estado de la misma y van a influir en su producción.



Sala de control de una Central de CC

Los parámetros a vigilar de forma constante son los siguientes:

**Condiciones meteorológicas**, las variaciones de temperatura ambiente, humedad y presión atmosférica, que afectarán a nuestros rendimientos.

**Presión de gas a la entrada/salida de la ERM (Estación de Regulación y medida)**, en este punto se recibe el gas, el combustible, si la central se alimenta de depósitos propios no debería haber problemas con la presión del gas ya que se sabe que valor tiene y se puede controlar, pero sin embargo si se alimenta la central a través de gaseoductos puede haber problemas de caída de presión debido a la entrada de grandes consumidores que harán bajar la presión del gaseoducto, por lo que habrá que estar preparados con bombas y demás sistemas para intentar mantener siempre la presión constante en el valor adecuado para el funcionamiento de la turbina.

**Presiones de aire a la entrada y salida del compresor**, la presión atmosférica varía a lo largo del día y del año, por lo que si varía la presión de nuestro aire de entrada, también variara la presión del aire de salida del compresor, afectando al rendimiento.

**Temperaturas de entrada/salida a las cámaras de combustión**, si las temperaturas de los gases de entrada son menores de los habituales esto puede indicar que hay menos presión de la que debería. Con la temperatura de salida se debe tener cuidado ya que grandes temperaturas pueden deteriorar los compuestos cerámicos que recubren la cámara de combustión, los quemadores y los álabes de la turbina.

**Temperatura de aceite**, se debe controlar ya que si su temperatura sube por encima de ciertos límites empezara a perder propiedades, y no lubricara de forma correcta con los posibles daños que esto puede provocar. Un aumento de la temperatura normal de funcionamiento del aceite nos puede indicar también que algo pasa, como que puede no estar siendo bien refrigerado.

**Vibraciones en cojinetes**, pueden ser originadas por la degradación de los cojines debido a falta de lubricación o por desgaste debido a su uso, se debe vigilar ya que estas vibraciones pueden ser transmitidas al rotor lo que nos haría que el sistema también vibrase, pudiendo provocar más daños.

**Desplazamiento axial**, la turbina cuando funciona produce un empuje al igual que las turbinas de los aviones, por lo que ha de estar anclada de forma que no se mueva mucho, ya que arrastraría al resto del sistema, para ello tiene unos cojinetes axiales que al igual que los que soportan el rotor deben estar perfectamente lubricados y en buenas condiciones para evitar posibles averías.

**Temperatura en cojinetes**, un aumento en la temperatura en los cojinetes nos puede indicar que están mal lubricados, por lo que se pueden estar degradado, debemos revisarlos y ver que sucede.

**Revoluciones de la turbina**, las revoluciones de la turbina se deben ajustar para que no alcance la velocidad del sonido en el extremo de los álabes, ya si se alcanza se provocaría la destrucción de estos al producirse una onda de choque, como la que le ocurre a los aviones cuando alcanza la velocidad del sonido.

**Potencia instantánea**, es el valor de potencia que esta entregando el sistema en cada momento, debería ser constante sino hay variaciones significativas de ningún factor importante, como pueden ser las condiciones climáticas o el mal funcionamiento de algún sistema.

De todos estos parámetros es conveniente conservar un histórico, en el sistema de control o en papel, para ver como nos han ido influyendo en el funcionamiento de nuestra planta y para ver que se ha hecho y si ha podido ser corregido.

## **Parada de una CC**

El proceso de parada de los ciclos combinados se divide normalmente en 7 etapas:

- 1) Bajada a mínimo técnico, es la potencia mínima en la que la planta mantiene estables sus parámetros.
- 2) Descarga de la turbina de vapor. Se deriva el flujo de vapor al condensador directamente.
- 3) Desacople de la turbina de vapor. Si es de eje único la planta se desacoplará la turbina de vapor a través del embrague, si es de eje múltiple se cerrarán las válvulas de admisión de vapor de la turbina.
- 4) Reducción progresiva de la entrada de gas y aire a la turbina de gas.
- 5) Una vez alcanzado el mínimo, se cierran las válvulas de admisión de gas, la turbina se desacopla de red, se sigue dejando pasar aire para asegurar que no queda gas en la turbina.
- 6) Parada por inercia de la turbina, se deja que la turbina se desacelere sola.
- 7) Puesta en marcha del virador, para evitar el pandeo del rotor durante su enfriamiento.

## Agregar en el apunte de TV

### INCONVENIENTES DE LAS CENTRALES TÉRMICAS CONVENCIONALES

Los principales problemas asociados a las centrales térmicas de carbón convencionales son la emisión de contaminantes atmosféricos entre los que se encuentran el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y las partículas sólidas. La concentración de estos contaminantes es superior a la de centrales de ciclo combinado o cogeneración que utilizan otros combustibles como gas natural, biogas, biomasa.

En cuanto a los contaminantes líquidos hay que tener presente las trazas de productos químicos utilizados en el control de la corrosión y del ensuciamiento, así como también el calor evacuado desde el condensador.

Los residuos sólidos comprenden la ceniza residual del combustible y de cualquier absorbente que se haya empleado en el sistema de control de la contaminación. Los residuos sólidos y gaseosos procedentes del combustible y del proceso de combustión se minimizan actuando sobre:

- La selección de un combustible adecuado
- El control del proceso de combustión

Las emisiones de SO<sub>2</sub> se pueden reducir:

- Utilizando combustibles con bajo contenido en S
- Con la combustión en lecho fluidificado
- Mediante lavadores o depuradores de postcombustión

Las emisiones de NO<sub>x</sub> se controlan mediante:

- Quemadores especiales, con baja producción de NO<sub>x</sub>
- Combustión en lecho fluidificado

Las cenizas volantes o partículas suspendidas en el seno de los humos se retiene por medio de:

- Filtro de tela o sacos
- Precipitador electrostático, con rendimientos operativos del 99%.

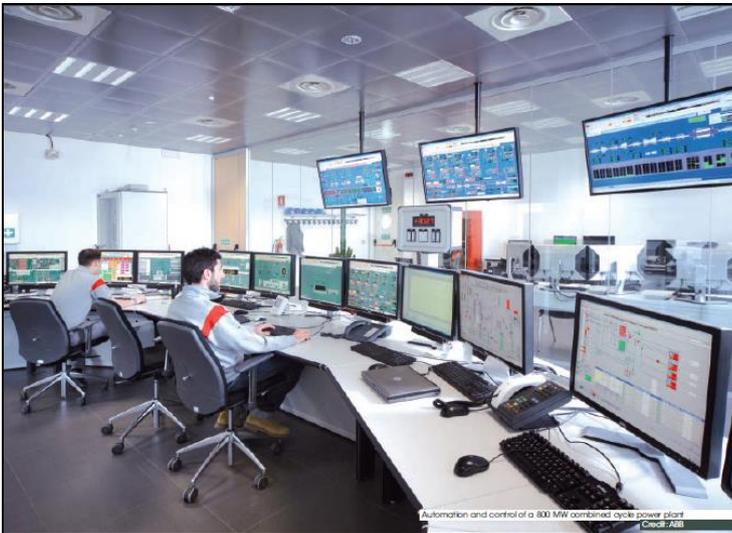
El equipo de recogida de partículas, así como los subproductos sólidos que se generan en los depuradores de SO<sub>2</sub>, se deben:

- verter con cuidado al medio ambiente
- utilizar para alguna aplicación industrial

A continuación se indican algunos valores de emisiones, antes y después del control, para una unidad de producción de electricidad de 500 MW.

Emisiones	Equipos típicos control	Tasa emisiones, (t/h)	
		Sin control	Con control
SO <sub>x</sub> medido en SO <sub>2</sub>	Lavador húmedo con caliza	9,3	0,9
NO <sub>x</sub> medido en NO <sub>2</sub>	Quemador bajo NO <sub>x</sub>	2,9	0,9
CO <sub>2</sub>	No aplicable	485	485
Polvo a atmósfera	Precipitado electrostático o filtro de tela	22,9	0,05
Descarga térmica en aguas	Torre de refrigeración, tiro natural, 109 (MW <sub>e</sub> )	2,8	0
Ceniza a vertedero	Vertido controlado	9,1	32
Lodos de lavador, yeso + agua	Vertido controlado	0	25

Las descargas de aguas se minimizan instalando sistemas de refrigeración en circuito cerrado, con grandes torres de refrigeración, para disipar en el aire el calor residual del ciclo energético, en lugar de emplear otras fuentes acuosas en circuito abierto



Centro de control de una CC de 800 MW

### Notas

La TG es una central que puede regular carga. La TV en cambio, se eleva su potencia en el orden de 95% de la carga y se la mantiene así. Por lo tanto una Central CC regula en cuanto la TG pueda regular.

Hay dos láminas de centrales de CC en el aula. En una de estas se observa que la cámara de combustión es del tipo anular (hay una sola galería a la vuelta). La marca Yount Brown es una versión de la turbina GE. En la otra lámina, el fabricante es diferente, hay dos TG y dos HRSG para una turbina de vapor.

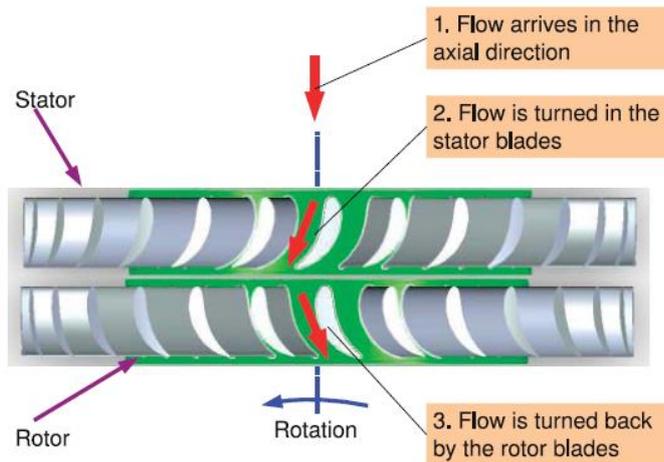
Los quemadores de la Tg son duales, para gas o para combustible líquido.

Estudio de las láminas consistirán en observar y describir:

- La Central de manera general
- Cada elemento de la Central
- Cada Circuito y Esquema
- Leer e interpretar cada dato (están en inglés).

Tipo de Central	Rendimiento [%]	Costo de Instalación [U\$S/kW]	Costo de producción [mils/kWh]	Tiempo de instalación [anos]			
TG	37	400	20	0,5-1			
TV	41	1200		1-1,5			
CC	60	800	12	1,5			

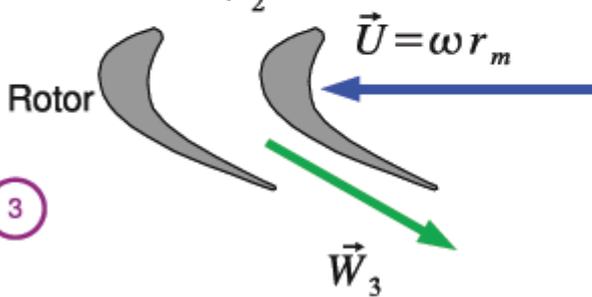
Ventajas de los ciclos combinados	Ciclos combinados	Centrales clásicas de ciclo agua/vapor
Mayor eficiencia energética	55-57%	35-40%
Menores emisiones atmosféricas, en especial de CO2	360 g CO <sub>2</sub> /kWh	850 g CO <sub>2</sub> /kWh
Menor consumo de agua, por ser menor la necesidad de refrigeración	435 m <sup>3</sup> /h (400 MW)	875 m <sup>3</sup> /h (400 MW)
Bajo coste de inversión específico	400-600 €/kW	> 1000 €/kW
Menor plazo de construcción	2 años	3-4 años
Alto grado de automatización	5 €/kW-año	27 €/kW-año
Mayor aceptación social, bajo requerimiento de espacio: facilidad de ubicación próxima al consumo	100000 m <sup>2</sup> (400 MW)	260000 m <sup>2</sup> (400 MW)



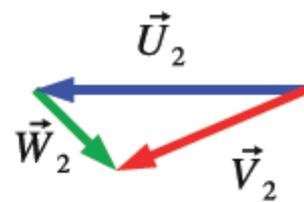
1



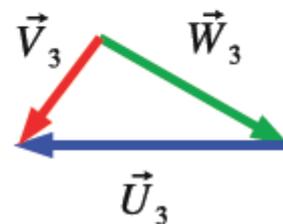
2



3



Velocity Triangle at 2



Velocity Triangle at 3

El desarrollo tecnológico en los últimos años ha permitido pasar de turbinas de gas de 125 MW y rendimiento 33% a potencias de 250 MW y rendimiento superior al 37%. Este avance en las turbinas de gas ofrece, actualmente, ciclos combinados con rendimientos cercanos al 60% o superiores y potencias de 800 MW.

Actualmente, los fabricantes que están ofreciendo sus productos en el mercado son: *General Electric*, *Alstom*, *Mitsubishi* y *Siemens-Westinghouse* con rendimientos aproximados entre el 56 y el 58%, potencias del conjunto entre 245 MW y 800 MW y dos tipos de configuraciones 1 x 1 monoeje y 2 x 1.

Para potencias del orden de 800 MW la configuración 2 x 1 presenta ligeras ventajas frente a los equipos 1 x 1 de 400 MW cada uno, al tener menor coste de instalación (sólo una turbina de vapor) y un coste de operación y mantenimiento ligeramente inferior. Por el contrario, la disponibilidad puede ser ligeramente inferior.

## **CONCLUSIONES**

Las centrales de ciclo combinado son un instrumento básico de la política energética:

**Contribuyen a la mejora de la eficiencia energética**

**Facilitan la integración de energías renovables intermitentes**

Son fundamentales en el mix energético por su flexibilidad.

Bajo impacto ambiental:

No emiten SO<sub>2</sub> ni partículas

Bajas emisiones de CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>.

Bajo consumo de agua (25-35% del consumo de las centrales convencionales y nucleares)

Aparte de un elevado rendimiento que puede alcanzar actualmente el 60 %, y potencia desarrollada, los ciclos combinados se caracterizan por su flexibilidad, arranque rápido en carga parcial, adaptabilidad tanto a la carga de base como a la carga cíclica, y alto rendimiento para un amplio intervalo de la carga. Tienen la posibilidad de utilizar diversos combustibles naturales o sintéticos. Su principal inconveniente radica, obviamente, en la mayor complejidad derivada de combinar dos tecnologías en una misma central.

## **Influencia de la Temp. y humedad ambiente en una central**

La temperatura es el factor fundamental en la variación del comportamiento de los ciclos combinados, aunque en menor medida también debe tenerse en cuenta la humedad relativa. Si bien la temperatura influye tanto en la turbina de gas como en el ciclo de vapor, la humedad relativa afecta básicamente al funcionamiento de la torre de refrigeración y en consecuencia solamente al ciclo de vapor. Debido a la evolución de la temperatura a lo largo de las diferentes horas del día y para diferentes épocas del año, el ciclo combinado será capaz de producir más o menos energía y a distinto rendimiento. Esta oscilación en la producción de energía y en el rendimiento influye considerablemente en la rentabilidad y en el análisis económico del ciclo combinado.

Las condiciones ambientales del emplazamiento elegido para un ciclo combinado tienen una gran influencia en el funcionamiento de estos sistemas de producción de energía eléctrica. Los factores que más importancia tienen son la temperatura ambiente, la humedad relativa y la presión atmosférica. Un aumento de la temperatura ambiente y de la humedad relativa provoca un descenso en la producción de potencia del ciclo combinado y un empeoramiento del rendimiento global del ciclo. En cuanto a la presión atmosférica, presiones ambientales menores darán lugar a una menor producción de energía eléctrica.

El aumento de la temperatura ambiente tiene un efecto negativo en el funcionamiento de la turbina de gas. Provoca una disminución de la densidad del aire en la entrada del compresor, y al ser las turbinas de gas máquinas de caudal volumétrico constante, el caudal másico que circula es menor. Como consecuencia, la potencia útil que es capaz de producir la turbina de gas disminuye. El rendimiento también se ve afectado, ya que el trabajo específico necesario para comprimir el aire en el compresor aumenta cuando lo hace la temperatura de admisión.

Cuando la turbina de gas se encuentra instalada en un ciclo combinado, al efecto negativo que se produce en las turbinas de gas hay que añadir el agravante de que las altas temperaturas influyen también en el circuito de refrigeración del ciclo de vapor. El funcionamiento del sistema de refrigeración empeora con las altas temperaturas, aumentando como consecuencia la presión del condensador. La turbina de vapor, sobre todo la etapa de baja presión, depende del funcionamiento de este último. Cuando la presión del condensador es baja - alto vacío -, la expansión del vapor en la turbina es mayor y la potencia producida por la turbina aumenta, aunque la mejora se ve reducida ligeramente por unas mayores pérdidas en el escape. Cuando la presión en el condensador aumenta, la expansión se ve limitada y la potencia de la turbina de vapor disminuye. La presión en el escape de la turbina de vapor está condicionada por el sistema utilizado para refrigerar el condensador. Existen varias alternativas, cuando se dispone de un foco frío como el mar o un río, la refrigeración se puede llevar a cabo en su seno. Esta opción es bastante recomendable ya que la oscilación de Temp. del foco frío entre estaciones es pequeña y por tanto el enfriamiento en el condensador y la potencia

que se puede obtener en la turbina de vapor es más regular. Sin embargo, en ocasiones no es posible llevar a cabo este tipo de enfriamiento y en ese caso se prefiere la instalación de torres de refrigeración. El funcionamiento de las torres de refrigeración se basa en la evaporación de parte del agua que refrigera el condensador en una corriente de aire, de manera que ésta absorbe el calor necesario del agua que condensa y que refrigera el condensador. La temperatura que se alcanza en el agua de refrigeración depende básicamente de dos parámetros climáticos. Por una parte, altas temperaturas ambientales favorecen la evaporación, pero hacen que el agua enfriada en la torre y que refrigera el condensador se mantenga en valores altos y no permita alcanzar condiciones de alto vacío. Por otra parte, la humedad relativa alta impide la evaporación del agua y por tanto el calor que

se evacua por este sistema se reduce, impidiendo una refrigeración efectiva del condensador. En consecuencia, tanto la cantidad de agua evaporada en la torre de refrigeración como la temperatura ambiente condicionan la refrigeración del condensador y, por tanto, la presión que se consigue a la salida de la turbina de baja.

Finalmente, a través de la caldera de recuperación el ciclo de vapor también puede verse afectado por la variación en las condiciones atmosféricas. Esta dependencia se debe al funcionamiento de la turbina de gas. Por lo general, y aunque depende de la turbina de gas considerada, a mayores temperaturas de admisión, el caudal de gases de escape disminuye pero estos están a una mayor temperatura. Dependiendo del tipo de turbina, estas variaciones afectan de manera distinta al perfil de temperaturas en la caldera y a la cantidad de calor que se puede recuperar. Como los efectos producidos por la temperatura son contrarios, el grado en el que afecte a la turbina de vapor va a depender del tipo de turbina y del diseño de la caldera de recuperación.

Se concluye que las condiciones climáticas del lugar donde esté situado el ciclo combinado influyen notablemente en su funcionamiento. En particular, una temperatura y humedad relativa altas afectarán de manera negativa al funcionamiento de la central, de manera tanto la potencia producida como su rendimiento estén por debajo del punto de diseño. La temperatura siempre va a tener un efecto mucho más pronunciado que la humedad relativa y afectará en mayor medida a la potencia producida por la turbina de gas. Evidentemente, las variaciones que se producen en la turbina de gas tienen siempre una mayor importancia que las que se producen en la turbina de vapor, ya que en un ciclo combinado, la mayor parte de la potencia se produce en el ciclo de cabeza. Otro factor a tener

en cuenta en la selección del emplazamiento es su altitud, ya que cuando la presión atmosférica disminuye el trabajo producido por la turbina de gas también se reduce. Todo esto lleva a incluir la influencia del clima como un factor adicional a tener en cuenta a la hora de elegir el emplazamiento de los ciclos combinados.

**Resumen:** Después de un análisis de los diferentes sistemas que integran un ciclo combinado se conoce que el sistema más afectado por las altas temperaturas es la turbina de gas, seguido de la temperatura de baja de la etapa de baja presión de la turbina de vapor. Otros factores climáticos, como la humedad relativa tienen una influencia menor.

Si se reduce la temperatura de entrada a la TG aumentará la densidad del aire, el flujo másico que es función de la densidad y también se incrementará la potencia generada que es directamente proporcional al flujo másico de aire.

En la TG la influencia de la temperatura ambiente es tal que es posible que sea económico incluso refrigerar el aire de admisión

Una misma turbina funciona con mejor rendimiento en países fríos que en países cálidos, en invierno mejor que en verano.

#### **VI.6. Influencia de la temperatura ambiente**

Tanto el consumo de combustible (gas natural) como la producción de energía eléctrica se ven afectados por la temperatura ambiente exterior. Un aumento de la temperatura ambiente, para una determinada presión ambiental, conlleva una disminución de la densidad del aire que entra en el compresor. Considerando que el volumen de entrada es constante, para una velocidad de rotación determinada resulta una masa menor de aire. Para una temperatura fija de salida de los gases de la cámara de combustión, esta menor masa de aire requerirá menos combustible y, como consecuencia, se obtendrá menos potencia y rendimiento.