

CENTRALES A GAS (CTG)

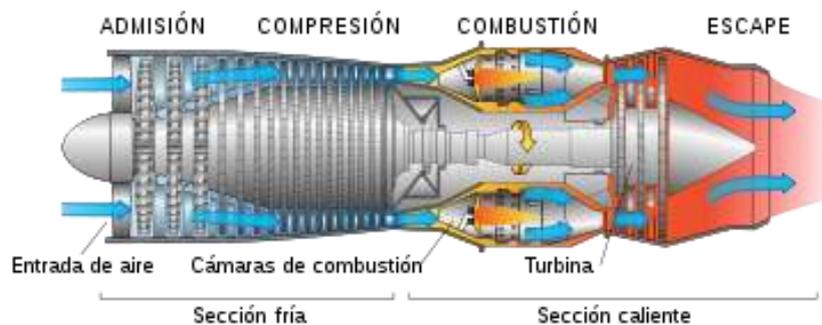
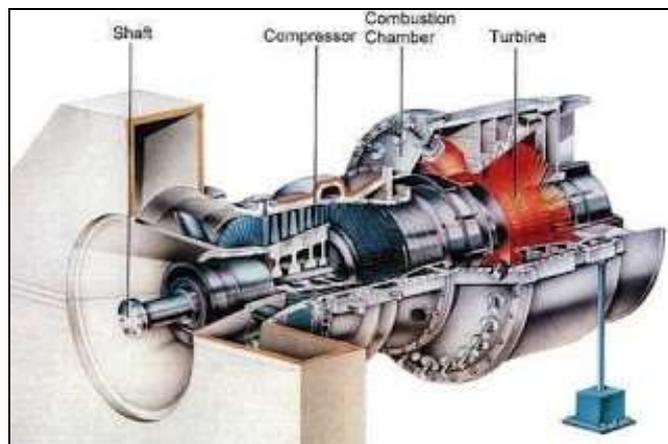
La turbina de gas (TG) es una máquina rotativa de combustión interna, diseñada para accionar una carga. Se usa un flujo de gases calientes dirigidos a los álabes de dicha turbina.

El ciclo térmico que representa esta máquina es el ciclo Brayton. Si bien se le llama ciclo termodinámico, en realidad el fluido de trabajo no realiza un ciclo completo dado que el fluido que ingresa es aire y el que egresa son gases de combustión, o sea en un estado diferente al que se tenía cuando se inició el proceso, por eso se dice que es un "ciclo abierto". El fluido se renueva continuamente.

El aire es aspirado de la atmósfera (admisión de aire) y comprimido (compresor) para después pasar a la cámara de combustión, donde se mezcla con el combustible y se produce la ignición. Los gases calientes, producto de la combustión, fluyen a través de la turbina. Allí se expansionan y mueven el eje, que acciona el compresor de la turbina y el alternador y por último salen muy calientes (orden de 500°C) a la atmósfera.

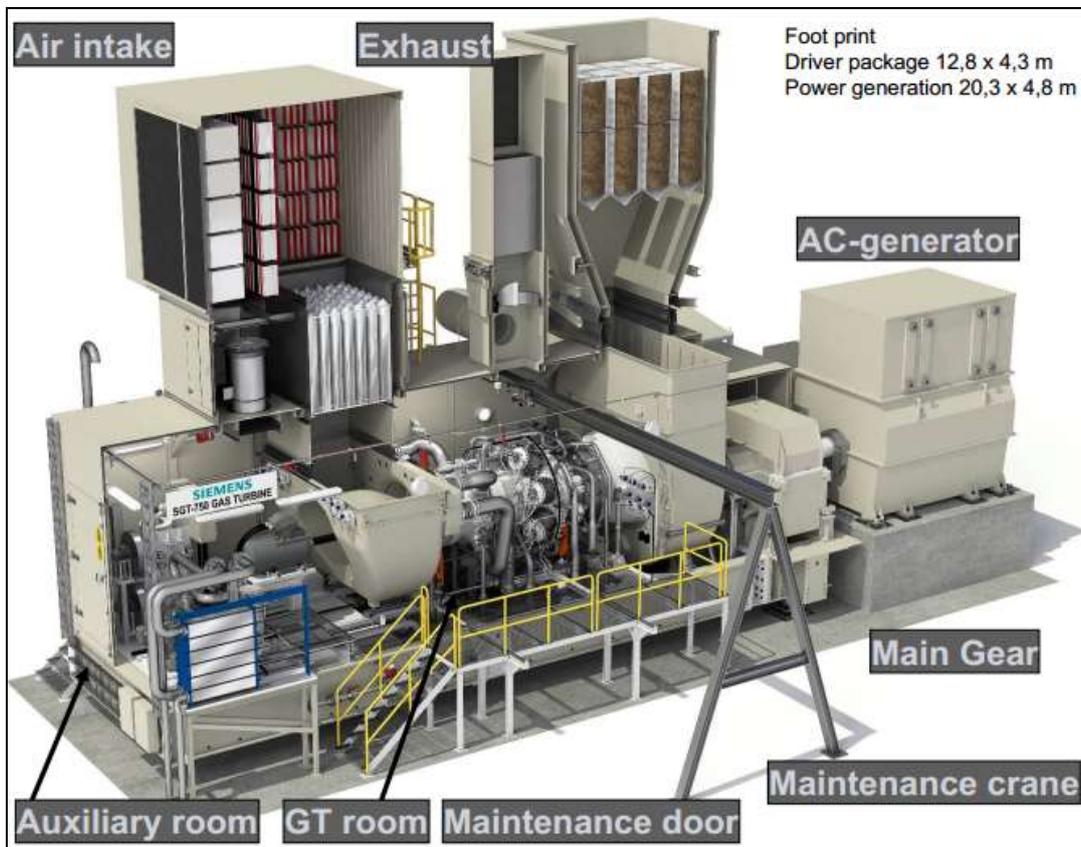
En las turbinas de gas empleadas en los ciclos combinados, en la versión más sencilla, el aire se filtra, se comprime en el compresor y se introduce como comburente en la cámara de combustión. Asimismo, parte del aire comprimido se emplea para la refrigeración de partes calientes de la cámara de combustión y de las primeras etapas de la turbina de gas.

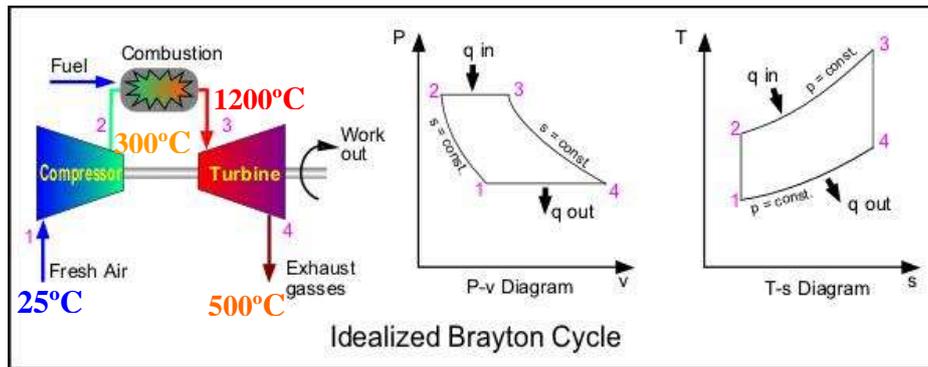
Hoy en día, el diseño de la TG que se ha impuesto está basado en un compresor axial multietapa, una cámara de combustión interna y una turbina de expansión, todo ello construido de una forma bastante compacta que da idea de un equipo unitario.





TG Siemens SGT 750





Fabricantes

- GENERAL ELECTRIC
- SIEMENS
- ALSTOM
- MITSUBISHI
- HITACHI (Lic. GE)

Potencias

- 4,5 MW a 50 MW
- 65 MW a 285 MW (F)
- 340 MW (H)

Combustibles

- Gas Natural
- Fuel Oil
- Carbón Gasificado

			POTENCIAS				
			76 MW	126 MW	170 MW	255 MW	345 MW
Clase E	Consumo Especifico	Kcal/kWh		2545			
	Rendimiento	%		33,8			
	Ratio Presiones			13:1			
	Temperatura in	°C		1250			
	Temperatura out	°C		540			
Clase F	Consumo Especifico	Kcal/kWh	2460		2360	2280	
	Rendimiento	%	34,9		36,4	37,7	
	Ratio Presiones		16:1		16:1	17:1	
	Temperatura in	°C	1280		1300	1320	
	Temperatura out	°C	570		600	600	
Clase H	Consumo Especifico	Kcal/kWh					2150
	Rendimiento	%					39,9
	Ratio Presiones						23:1
	Temperatura in	°C					1430
	Temperatura out	°C					610

Oferta (II) - Aeroderivadas

<u>Fabricante</u>	<u>Potencias</u>	<u>Rendimiento / Temp Salida</u>
- GENERAL ELECTRIC	- 10 MW a 50 MW	- <40% / 450°C
- PRATT & WHITNEY	- 100 MW (GE/LMS100)	- 45% / 420°C
- ROLLS ROYCE		

Algunas características técnicas de una TG

Las centrales eléctricas que operan con turbinas de gas de ciclo abierto alcanzan un rendimiento del orden del 37-40% en las unidades más alta tecnología que operan con temperaturas en "partes calientes" del orden de 1200-1300°C (cuentan con álabes cerámicos, refrigeración adecuada desde el compresor, y cámara recubierta internamente de material cerámico). Estas centrales entregan a la atmósfera una importante cantidad de calor a través de los gases de salida que presentan una temperatura de aproximadamente 500°C.

La capacidad de la TG esta limitada, debido a que las presiones en juego son relativamente bajas (10-40 bar, no comparables con las grandes presiones de una TV), siendo necesario el empleo de turbinas y compresores grandes a fin de proveer el gran volumen de aire requerido. Su franja de operación va desde pequeñas potencias, 30 KW para las microturbinas, hasta 500 MW para los últimos desarrollos. De esta forma, compiten tanto con los motores alternativos (ciclos termodinámicos Otto y Diesel), como con las TV de pequeña y media potencia.

PARAMETROS DE FUNCIONAMIENTO	TEMPERATURA (°C)	PRESION (kg/cm ²)
Aire entrada compresor axial (punto 1)	15	1
Aire salida compresor axial (punto 2)	316	10
Relación de compresión	-----	10/1
Gases de combustión entrada turbina (punto 3)	1.100	10
Gases de combustión salida turbina (punto 4)	495 a 560	1

Breve descripción de los elementos de una TG

Admisión de aire: Consta de una serie de dispositivos, con el fin que el aire entre en la turbina en condiciones adecuadas de presión, temperatura y limpieza. Para ello cuenta con filtros de varios tipos, que se encargarán de eliminar la suciedad que pueda arrastrar el aire; y de una serie de sistemas que acondicionarán la temperatura de entrada.

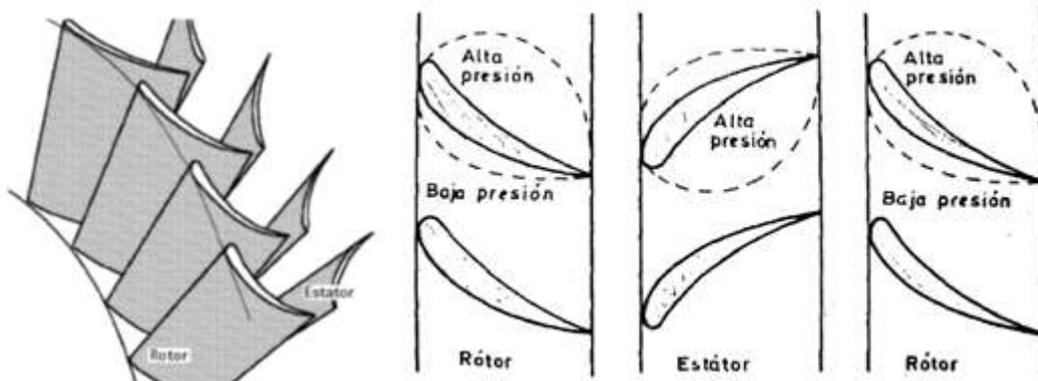
Compresor de aire axial (también los hay centrífugos): Es parecido a la turbina de reacción ya estudiada, con 10-12 escalares (álabe fijo-álabe móvil), cada uno de los cuales impulsa el aire hacia la etapa siguiente, aumentando su presión en una relación de compresión por etapa que oscila entre 1:1,5 y 1:2,5.

Se diferencia de la turbina, en que a medida que avanza la corriente de aire, va disminuyendo su sección transversal y por lo tanto el volumen del aire, según progresa la compresión de escalón a escalón. El álabe está diseñado aerodinámicamente.

Eleva la presión del aire de combustión (una vez filtrado) antes que entre en la cámara de combustión, en una relación que varía según la turbina pero que normalmente está comprendida entre 1:10 y 1:30. Esta compresión se realiza en varias etapas y consume aproximadamente las 2/3 partes del trabajo producido por la turbina, ya que debe empujar el aire a través de cada etapa de álabes por secciones cada vez menores trabajando en contrapresión. Para disminuir la potencia necesaria para este proceso, puede optarse por un diseño que enfríe el aire en etapas intermedias, favoreciendo su compresión, aunque reduce la eficiencia de la turbina por la entrada más fría del aire en la cámara de combustión.

El control de la entrada de aire para la combustión se puede realizar variando el ángulo de inclinación de las ruedas iniciales de álabes del compresor. Una parte del aire del compresor (en el orden del 50%) se utiliza para refrigeración de álabes y de la cámara de combustión. Los álabes deben estar recubiertos por material cerámico para soportar las altas temp., además, un flujo de aire refrigerador proveniente del compresor los atraviesa internamente, saliendo al exterior por pequeños orificios practicados a lo largo de toda su superficie. El rendimiento actual de un compresor está en el orden del 85%.

El funcionamiento del compresor de flujo axial: álabes del rotor y álabes del estator



El compresor de flujo axial consta de múltiples rotores a los que están fijados los álabes cuyo perfil es aerodinámico. El rotor gira accionado por la turbina, de manera que el aire es aspirado continuamente hacia el compresor, donde es acelerado por los álabes rotativos y barrido hacia la hilera adyacente de los álabes del estator. Este movimiento, por tratarse los álabes de perfiles aerodinámicos, crea una baja presión en el lado convexo (extrados o lado de succión) y una zona de alta presión en el lado cóncavo (intrados o lado de presión). El aire, al pasar por los álabes, sufre un aumento de velocidad sobre la parte convexa inicial del perfil, para reducirse luego cuando prosigue el movimiento hacia el borde de salida. Ocurre por lo tanto un proceso de difusión. Este proceso se desarrolla a lo largo de todas las etapas que componen el compresor.

La elevación de presión del flujo de aire se debe a este proceso de difusión, que tiene lugar en los pasajes de los álabes del rotor y en un proceso similar realizado en los álabes del estator. El estator sirve además para corregir la deflexión dada al aire por los álabes del rotor y para que el aire pueda presentar el ángulo correcto a la siguiente etapa, hacia la próxima etapa de los álabes del rotor. La última hilera de los álabes del estator actúan como "enderezadores del aire" a fin de limitar la turbulencia de manera que el aire ingrese al sistema de combustión a una velocidad axial suficientemente uniforme

A través de cada etapa el aumento de presión es muy pequeño, entre 1:1,15 y 1:1,35. La razón que motiva tan pequeño aumento de presión es que si se desea evitar el desprendimiento de la capa límite y la consiguiente entrada en pérdida aerodinámica de los álabes, el régimen de difusión y el ángulo de incidencia deben mantenerse dentro de ciertos límites. La pequeña elevación de presión en cada etapa, junto con la trayectoria uniforme del flujo de aire, contribuye a lograr la alta eficiencia del compresor axial.

Cámara de combustión: Lugar donde se realiza la combustión a presión constante del gas combustible junto con el aire. Esta combustión a presión, obliga a que el combustible sea introducido a un nivel de presión adecuado, que oscila entre 10 y 40 bar. Debido a las altas temperaturas que pueden alcanzarse en la combustión y para no reducir demasiado la vida útil de los elementos componentes de la cámara, se trabaja con un exceso de un 300 a 400% más de aire teórico necesario, con lo que se consigue por un lado, reducir la temperatura de llama y por otro refrigerar las partes más calientes de la cámara. Parte del aire que procede del compresor, se dirige directamente hacia las paredes de la cámara de combustión para mantener su temperatura en valores convenientemente bajos. Otra parte se hace circular por el interior de los álabes de la turbina, saliendo por orificios en los bordes que crean una película sobre la superficie de los álabes.

Turbina de expansión: En la turbina es donde tiene lugar la conversión de la energía contenida en los gases de combustión que poseen presión y temperatura elevada, a potencia mecánica (en forma de rotación de un eje). Esta potencia se produce cuando los gases calientes provenientes de la cámara de combustión inciden en los álabes de la turbina de expansión (3-4 escalares, por lo que la turbina es más corta que el compresor), provocando un torque que se puede aprovechar para mover un generador y producir electricidad o provocar un impulso utilizado para mover por ejemplo un avión. Los álabes deben estar recubiertos por material cerámico para soportar las altas temperaturas, además, un flujo de aire refrigerador proveniente del compresor los atraviesa internamente, saliendo al exterior por pequeños orificios practicados a lo largo de toda su superficie.

Los gases, que entran a la turbina a una temperatura de 1000-1300°C y una presión de 10 a 40 bar, salen de la turbina a unos 450-550°C. Esa alta temperatura hace que la energía que contienen, pueda ser aprovechada ya sea para mejorar el rendimiento de la turbina (con un sistema conocido como la regeneración, que consiste en utilizar estos gases para calentar adicionalmente la mezcla en la cámara de combustión) o bien, como es más habitual, para generar vapor en una caldera de recuperación, que se introduce posteriormente en una TV, consiguiéndose un aumento del rendimiento global actualmente del orden del 60% (el rendimiento de la TG es del orden del 37-40%).

Sistemas Auxiliares para su funcionamiento:

-*Casa de filtros:* Elemento que sirve de soporte a los filtros. Su gran tamaño, que tiene su origen en la necesidad de tener una gran superficie frontal, hace que sea uno de los elementos más visible y significativo de la instalación. Se encarga del filtrado del aire de admisión que se introduce al compresor, se componen de 2 primeras fases de filtrado grosero, y una última con filtro de luz del orden de las 5 micras. En este proceso se puede aplicar diferentes tecnologías para aumentar la humedad y disminuir la temperatura del aire de entrada.

-*Cojinetes:* Pueden ser radiales o axiales, según sujeten el desplazamiento axial o el provocado por el giro del eje. En ambos casos la zona de contacto esta revestida por un material especial antifricción llamado material Babbit, el cual se encuentra a su vez lubricado. En los cojinetes axiales el contacto se realiza en un disco anillado al eje y se montan con un sensor de desplazamiento longitudinal, y en los radiales el contacto es directamente sobre el eje y se utilizan 2 sensores de desplazamiento montados en ángulo para detectar vibraciones.

-*Sistema de lubricación:* Puede contener hasta 10.000 litros de aceite en grandes turbinas de generación eléctrica, su misión es tanto refrigerar como mantener una película de aceite entre los mecanismos en contacto. El sistema de lubricación suele contar con una bomba mecánica unida al eje de rotación, otra eléctrica y otra de emergencia, aunque en grandes turbinas desaparece la turbina mecánica por una turbina eléctrica extra. Entre sus componentes principales está el sistema de filtros, el extractor de vahos inflamables, refrigerador, termostato, sensor de nivel,, etc.

-*Virador:* El sistema virador consiste de un motor eléctrico o hidráulico (normalmente el segundo) que hace girar lentamente la turbina cuando no está en funcionamiento. Esto evita que el rotor se curve debido a su propio peso o por expansión térmica, durante la parada de la turbina. La velocidad de este sistema es muy baja (pocas vueltas por minuto), pero se vuelve esencial para asegurar la correcta rectitud del rotor. Si por alguna razón la turbina se detiene (avería del rotor, avería de la turbina, inspección interna con desmontaje) es necesario asegurar que, antes de arrancar, estará girando varias horas con el sistema virador.

- *Recinto acústico:* Recubre todos los sistemas principales de la turbina, y su función es aislarla de las inclemencias del tiempo y a su vez aislar al exterior del ruido. Debe contar con un sistema contraincendios y de ventilación.

-*Bancada:* Se construye en cemento para soportar la estructura de la turbina, con una cimentación propia para que no se transmitan las vibraciones propias del funcionamiento de la turbina al resto de los equipos de la planta.

Otros:

- Sistema de alimentación de combustible
- Sistema de regulación de velocidad
- Sistema de puesta en marcha y parada
- Sistemas de protección de máquina
- Motor de lanzamiento (motor diesel o a gas , o motor eléctrico)

Tipos de TG

Pueden clasificarse según:

A) Origen

Aeroderivadas (TAD): Son aquellas que tiene su origen en turbinas diseñadas para propulsar aviones. Son compactas, robustas, tienen una alta relación potencia/peso, son versátiles de operar (regulan rápidamente su carga), su arranque es sencillo. Sus potencias rondan los 50 MW, moviendo los gases calientes a gran velocidad pero bajo caudal. Todas estas características las hacen fáciles de mantener y sustituir en caso necesario.



Turbina Aeroderivada

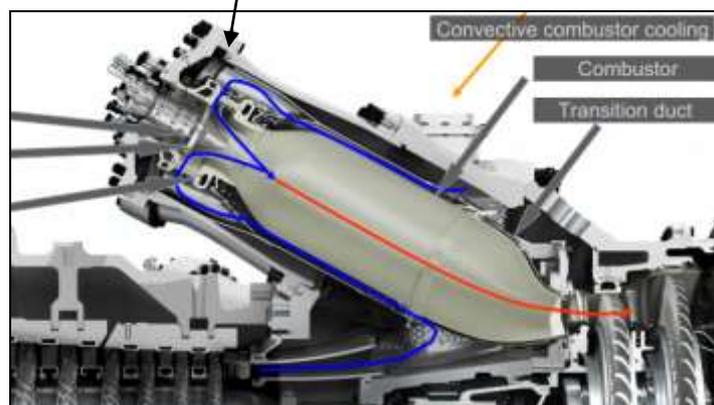
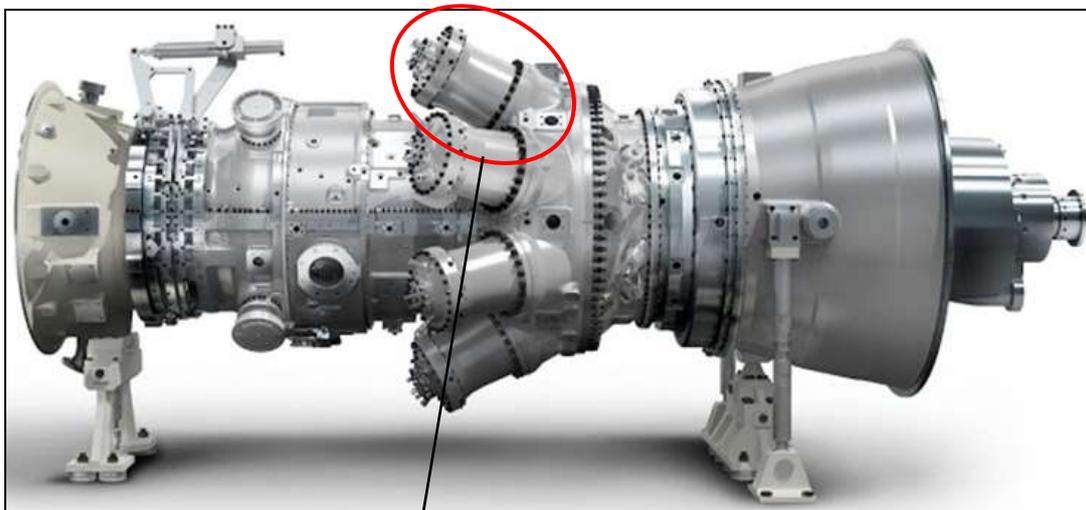
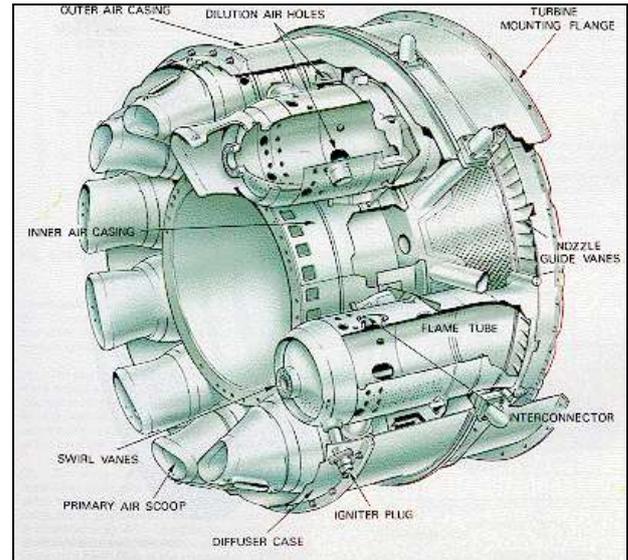
Industriales: La evolución de su diseño se ha orientado siempre a la producción de electricidad, buscándose grandes potencias y largos periodos de operación a máxima carga sin paradas ni arranques continuos. Su potencia de diseño puede llegar a los 500 MW, moviendo grandes cantidades de aire a bajas velocidades, que pueden aprovecharse en posteriores aplicaciones de cogeneración. Su mantenimiento debe realizarse in-situ debido a su gran tamaño y peso, buscándose alargar lo más posible en el tiempo las revisiones completas del equipo.



Turbina de uso industrial para producir electricidad

B) Tipo de cámara de combustión:

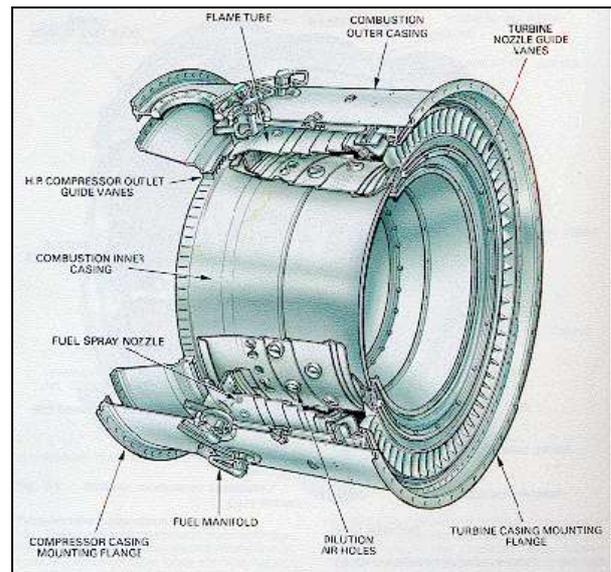
Cámara de combustión Tuboanular: Está formada por una serie de cilindros puestos alrededor del eje, cada uno con su quemador y sistema de encendido. En caso que uno no encienda, puede provocar grandes diferencias de temperatura, por lo que no puede haber una cámara apagada. Para esto existe un tubo que vincula todas las cámaras (tubo propagador de llama). Estas TG son más pesadas al tener varias cámaras de combustión, pero tienen una mayor resistencia estructural. Sus fabricantes son General Electric y Mitsubishi, Siemens.



Turbina Siemens SGT 750, con cámara de combustión Tuboanular

<http://www.youtube.com/watch?v=c12Gh8BN0Io>

Cámara de combustión Anular: es una única cámara en forma de anillo continuo, alrededor del eje entre el compresor y la turbina y los quemadores están dispuestos a lo largo de todo el anillo. Hay un solo tubo de llama y una serie de quemadores distribuidos en toda la circunferencia (12-15). La mezcla combustible comburente y la distribución de temperaturas es menos uniforme que en las tuboanulares, aunque también son menores las pérdidas de carga y presentan una buena refrigeración. Es la solución adoptada principalmente por Alstom y Siemens para sus turbinas industriales, y en general, la que se aplica en las TAD.



Cámara de combustión Anular

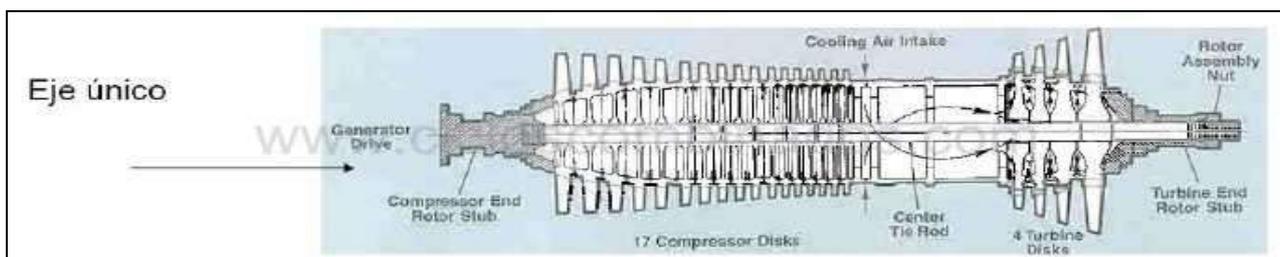
Cámara de combustión tipo Silo: La cámara de combustión se encuentra fuera del eje que une la turbina y el compresor. Los inyectores se instalan en la parte superior atravesando el techo de la cámara, y los gases de escape llegan a la turbina de expansión por una abertura inferior conectada a ésta.



Cámara de combustión tipo Silo.

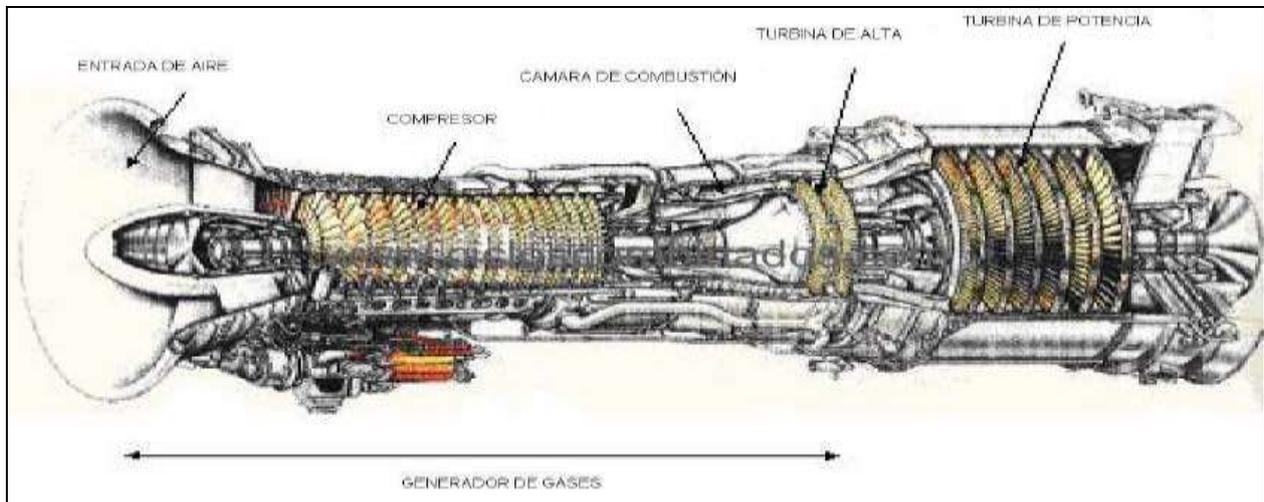
C) Por número de ejes

Monoeje: el compresor, turbina y generador, están unidos en el mismo rotor girando de forma solidaria. El compresor siempre gira a la misma velocidad (dada por el generador), y por lo tanto absorbe la misma cantidad de aire. No puede regular carga y mantener al mismo tiempo un buen rendimiento. Su velocidad de giro suele estar en 3000 rpm para ajustarse a los 50 Hz de la red eléctrica. .



Turbina Monoeje.

Dos Ejes: formado por dos ejes, uno donde está el compresor y la turbina de alta (encargada de impulsar al compresor) y el otro donde se encuentra la turbina de potencia que mueve el generador. Por lo tanto, la velocidad de giro del compresor es independiente del generador, y puede regularse por una admisión adecuada de aire en cada momento. Este tipo puede usarse en TAD, presentando buen comportamiento frente a variaciones de carga.



Turbina de dos ejes

Aplicaciones de una TG

Una TG puede emplearse básicamente para:

- realizar trabajo mecánico
- propulsar aviones
- generar energía eléctrica.

Nota: La posibilidad de aprovechar el calor de los gases de escape de la TG para producir vapor aprovechable en la industria, como energía térmica o para producir más energía eléctrica (en los denominados ciclos combinados), provocaron una auténtica revolución en el mercado de la generación eléctrica, donde la TV había sido la central indiscutible durante muchos años.

Ventajas y Desventajas de una TG

Ventajas:

- Muy buena relación potencia vs. peso y tamaño.
- Baja necesidad de refrigeración, comparada con la TV, lo que facilita su rápida instalación en cualquier lugar. Costo reducido de fundaciones y posibilidad de operar a la intemperie.
- No necesitan agua (diferente a las turbinas a vapor que requieren de un condensador).
- Baja inercia térmica, permitiéndole alcanzar su plena carga en tiempos muy bajos, lo que la hace ideal para determinadas aplicaciones en las que se requiere variaciones de carga rápidas, como regulación de carga o abastecimiento de picos de demanda.
- Arranque rápido (del orden de los 10-30 minutos) mediante un motor eléctrico, diesel, TV o TG, con una toma de carga del orden de 100 MW en 10 minutos. Es automático in situ o desde sala de control. El arranque puede hacerlo mediante máquinas sincrónicas

o asincrónicas o motores independientes de la electricidad (motor diesel, motor a gas natural, motor a aire comprimido). Estos últimos se usan cuando la TG se emplea para arranque en "negro", es decir luego de un blackout, energizando los servicios auxiliares de una central, que será la que pondrá en funcionamiento todo el sistema.

- Sencillo mantenimiento y elevada fiabilidad (debido a reducida necesidad de lubricación y refrigeración y ausencia de movimientos alternativos). Una instalación de generación eléctrica puede alcanzar valores de disponibilidad superiores al 95%.
- Bajo costo de instalación (400-500 U\$S/kW_{instalado}) y rápido montaje (4 a 6 meses).
- Mínima necesidad de personal para operar (un operador).
- Uso de diversos combustibles (fuel oil, diesel oil, gas natural).

Desventajas:

- Alta velocidad de rotación
- Alta pérdida de calor al ambiente que se traduce por la alta temperatura de salida de los gases de escape por chimenea, entre 495°C a 560 °C
- Relativamente bajo rendimiento térmico (35-37%) .
- Gran parte de la potencia mecánica generada por la TG es consumida por el compresor, en el orden del 70%.

Las mejores Turbinas de hoy

General Electric: Es el mayor fabricante de TG. Entre estas se encuentra la 7F-7, usada en una CC, en la que se alcanza un $\eta \approx 61\%$. La TG presenta una emisión de 9 [ppm/MWh] (en la CC es de 2 [ppm/MWh]). La TG arranca de 0 a carga nominal en 10 minutos, y tiene una tasa de tomada de carga de unos 50 [MW/min].

Mitsubishi: Las TG serie J, se usan en una CC que posee un $\eta \approx 61,5\%$. Incrementó la temperatura de combustión a 1600°C (se mejoró la estructura de enfriamiento). El ahorro de emisión de CO₂ en una CC, es de un 60% menor, comparada con una central basada en carbón.

Alstom: La TG KA24, presenta un tipo de combustión llamado secuencial (existen dos sistemas de combustión en serie que hace aumentar la temperatura en dos etapas), se aumenta la eficiencia sin incrementar significativamente las emisiones. Puede llegar a 450 MW en 10 minutos.

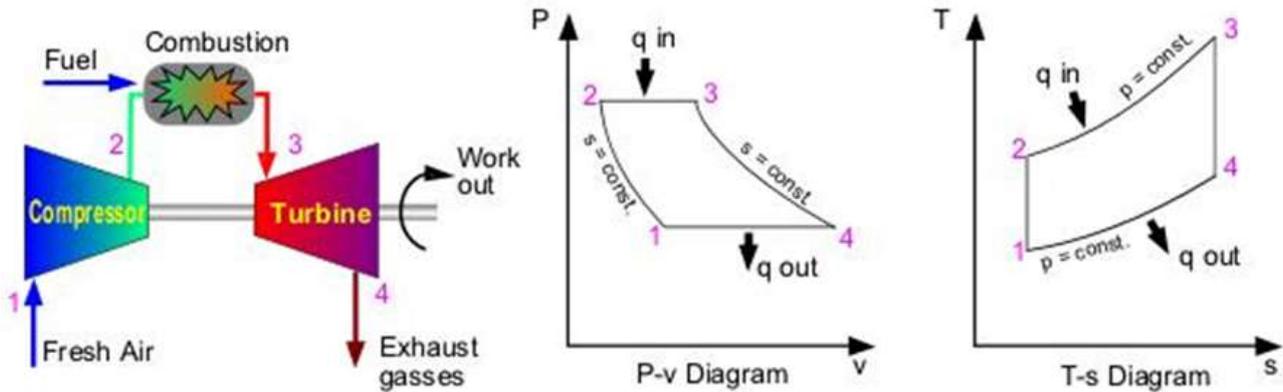
El desarrollo alcanzado de la TG sólo ha sido posible por:

- Obtención de un compresor axial de buena eficiencia, a partir de la mejora del diseño aerodinámico de los álabes, que han permitido altas relaciones de compresión.
- Innovación tecnológica en el campo de los materiales, con el desarrollo de nuevas aleaciones monocristal y recubrimientos cerámicos.
- Estudio de la refrigeración interior del alabe, que permitió alcanzar temperaturas muy altas tanto en cámara de combustión, como en las primeras ruedas de álabes.

Ciclo Termodinámico de Brayton

El fluido de trabajo no cumple con un ciclo cerrado en las TG, ya que finaliza en un estado diferente al que tenía cuando inició los procesos, por lo que se podría decir que es un ciclo abierto.

Las TG de ciclo abierto simple, utilizan una cámara de combustión interna para suministrar calor al fluido de trabajo y las TG de ciclo cerrado simple, utilizan un proceso de transferencia para agregar o remover calor del fluido de trabajo.



Ciclo termodinámico básico de las TG

El ciclo básico de Brayton en condiciones ideales, está compuesto por cuatro etapas:

Trecho 1-2: Compresión isentrópica en un compresor.

Trecho 2-3: Aporte de calor al fluido de trabajo a presión constante en un intercambiador de calor o una cámara de combustión.

Trecho 3-4: Expansión isentrópica en una turbina.

Trecho 4-1: En realidad no existe este tramo (ciclo abierto). Lo que se produce es la remoción de calor del fluido de trabajo de salida a presión cte, en un intercambiador de calor o en la atmósfera.

El trabajo neto realizado por el compresor es: $W_{compresor} = mCp_{aire}(T_2 - T_1)$

El calor aportado en la cámara de combustión es: $Q_{aportado} = mCp_{gas}(T_3 - T_2)$

El trabajo neto realizado por la turbina es: $W_{turbina} = mCp_{gas}(T_3 - T_4)$

El trabajo neto puede escribirse como: $W_{neto} = mCp_{gas}(T_3 - T_4) - mCp_{aire}(T_2 - T_1)$

Cp [kcal/kg °C] = calor específico medio = cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia para elevar su temperatura en una unidad.

El trabajo neto realizado por unidad de masa, es la diferencia entre el trabajo obtenido en la expansión y el trabajo invertido en la compresión, y la eficiencia térmica ideal de un ciclo Brayton es la relación entre el trabajo neto desarrollado y el calor adicionado, es decir:

$$W_{neto} = W_{turbina} - W_{compresor} \quad \eta_{térmico} = \frac{W_{neto}}{Q_{aportado}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

Como las evoluciones 1-2 y 3-4 son adiabáticas entonces se aplican relaciones isentrópicas. Se debe tener en cuenta que en el caso de los gases perfectos, su energía interna y su entalpía solo dependen de la temperatura. De esta forma se puede definir a los calores específicos a volumen y presión constantes como:

$$c_{v_o} = \left(\frac{du}{dT} \right)_v \quad c_{p_o} = \left(\frac{du}{dT} \right)_p$$

Se define la razón de calores específicos como:

$$k = \frac{c_{p_o}}{c_{v_o}}$$

$k = 1.4$ para el aire estándar

Se puede demostrar que:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left[\frac{p_2}{p_1} \right]^{\frac{k-1}{k}} \quad \frac{T_3}{T_4} = \left[\frac{p_3}{p_4} \right]^{\frac{k-1}{k}}$$

Como:

$$r = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_4} \rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4}$$

Para un proceso isentrópico y gas ideal:

$$r^{\frac{k-1}{k}} = \left[\frac{p_2}{p_1} \right]^{\frac{k-1}{k}} = \left[\frac{v_1}{v_2} \right]^{k-1} = \xi^{k-1}$$

$$\eta_{térmico} = 1 - \frac{1}{r^{\frac{k-1}{k}}} = 1 - \frac{1}{\xi^{k-1}}$$

La eficiencia de este ciclo varía con la relación de presiones. Si se aumenta la relación de compresión, será necesario suministrar más calor al sistema debido a que las líneas de presión constante divergen hacia arriba y hacia la derecha en el diagrama T-S y la temperatura máxima del ciclo será mayor. Como el calor suministrado es mayor $\rightarrow Q_{aportado} = mC_{p_{gas}}(T_3 - T_2)$, la eficiencia térmica aumentará con el ratio de compresión. Sin embargo la temperatura máxima del ciclo está limitada por los materiales en los cuales están contruidos los componentes y por lo tanto se requerirán sistemas de refrigeración más eficientes.

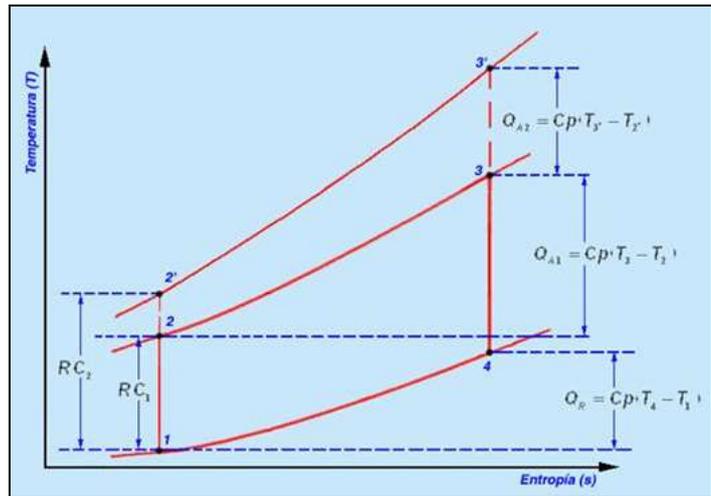
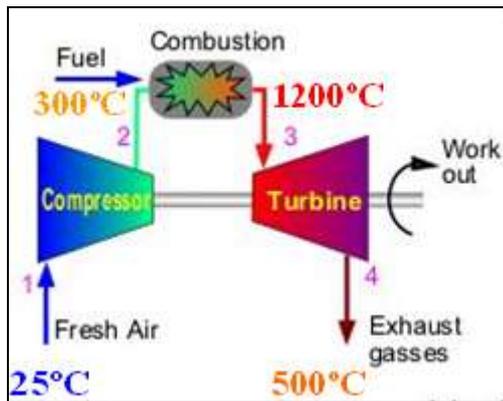


Diagrama T-S de una TG con diferentes relaciones de compresión.

El ciclo ideal se ve afectado por:

- Las pérdidas en el compresor, turbina y por las caídas de presión en la cámara de combustión y otros pasajes de aire (el proceso 2-3 no es isobárico)
- Los procesos 1-2 y 3-4 no son isentrópicos, sino politrópicos.
- El proceso de combustión no es perfecto como se ve en la línea azul de la figura siguiente.

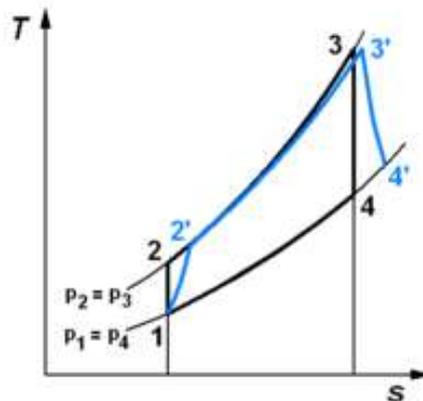


Diagrama T-S considerando pérdidas, caídas de presión y procesos no isoentrópicos.

Se puede encontrar que el rendimiento real o efectivo η_e del ciclo es:

$$\eta_e = \eta_{term.} \frac{\eta_t - \frac{Ltc}{Ltt \cdot \eta_c}}{1 - \frac{Ltc}{Ltt}}$$

η_{term} = rendimiento ideal del ciclo Brayton

η_t = rendimiento real de la turbina

η_c = rendimiento real del compresor

Ltt = trabajo teórico de la turbina

Ltc = trabajo teórico del compresor

A diferencia del ciclo Rankine, el proceso de compresión para elevar la presión en el ciclo Brayton requiere un gran consumo de energía y gran parte del trabajo producido por la turbina es consumido por el compresor (un 70%). Esta desventaja frente al ciclo Rankine hace que sea necesario prestar una mayor atención en el diseño de la TG, ya que cualquier pérdida de presión en la cámara de combustión y demás componentes entre el compresor y la turbina debe compensarse con mayor trabajo en el compresor. Adicionalmente, la eficiencia del compresor y la turbina juegan un papel muy importante, debido a que eficiencias cercanas al 60% en estos componentes, ocasionarían que todo el trabajo producido por la turbina sea consumido por el compresor y por tanto la eficiencia global sería cero.

Análisis comparativo de trabajos netos por unidad de masa, sin y con enfriador:

$$W_{neto}(\text{sin enfriador}) = Cp_g(T_5 - T_6) - Cp_a(T_2' - T_1)$$

$$W_{neto}(\text{con enfriador}) = Cp_g(T_5 - T_6) - Cp_a[(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)]$$

Como las curvas de presión divergen hacia la derecha:

$$(T_2' - T_1) > [(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)]$$

Por lo tanto el trabajo neto del ciclo sin enfriador será menor que el trabajo neto del ciclo con enfriador:

$$W_{neto}(\text{sin enfriador}) < W_{neto}(\text{con enfriador})$$

Por otro lado, se debe suministrar una mayor cantidad de calor al ciclo con enfriador para aumentar la temperatura desde T4 hasta T5, que al ciclo sin enfriador para aumentar la temperatura desde T2' hasta T5.

Cuando se tiene el enfriador de aire, por lo tanto se encuentran dos resultados que van en dirección contraria:

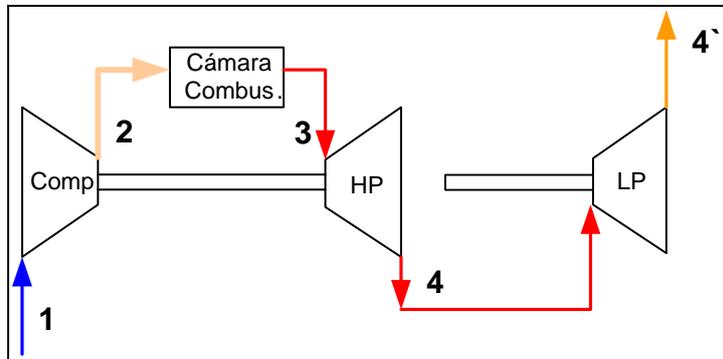
- (a) Disminución del trabajo realizado por el compresor
- (b) Aumento de la cantidad de calor que se debe agregar al sistema

Se puede demostrar que el resultado (b) es de mayor valor que el (a), por lo que la eficiencia térmica del ciclo sin enfriador será mayor que con enfriador:

$$\eta_{térmico}(\text{sin enfriador}) > \eta_{térmico}(\text{con enfriador})$$

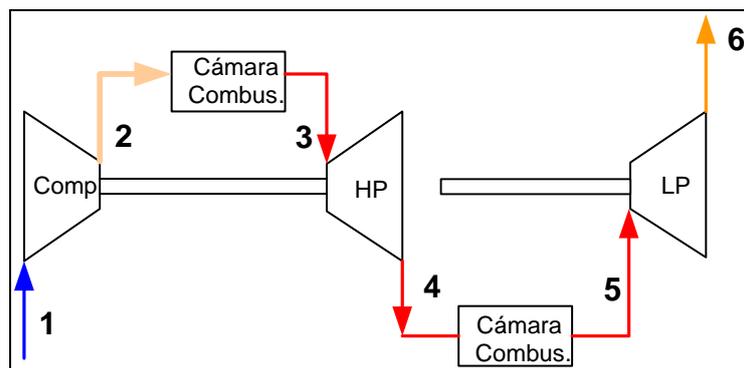
B) Ciclo con Recalentamiento Intermedio

La TG es multieje. La expansión de los gases puede realizarse en dos etapas. La primera expansión (3-4) ocurre en lo que se conoce como turbina del compresor de alta presión (HP), acoplada al compresor mediante un eje. Todo el trabajo desarrollado por la turbina HP es consumido por el compresor. La segunda expansión (4-4') tiene lugar en la turbina de baja presión (LP) o turbina de potencia, acoplada a un eje diferente al de la turbina del compresor.



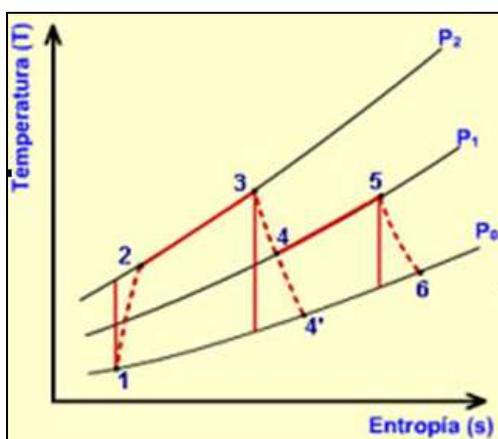
TG con una turbina HP y una LP

Se agrega ahora un recalentador intermedio (segunda cámara de combustión) a la salida de la turbina de HP para elevar la temperatura de los gases que entran a la turbina de LP. Como estos gases todavía son ricos en oxígeno no suele hacer falta un aporte extra de comburente.



TG con una turbina HP, una LP y recalentamiento intermedio

El ciclo de Brayton para cada una de estas dos configuraciones es el siguiente:



Ciclo Brayton para las dos configuraciones

Se puede observar que el trabajo de compresión (1-2) es el mismo para el ciclo con y sin recalentamiento y en consecuencia el trabajo desarrollado por la turbina HP (3-4) será también igual para los dos ciclos. Sin embargo, el trabajo desarrollado por la turbina LP sin recalentamiento (4-4') es menor que la desarrollada en la turbina LP con recalentamiento (5-6), debido a que las líneas de presión divergen hacia la derecha.

El trabajo neto desarrollado por la turbina LP por cada unidad de masa de gas, es igual a:

$$W_{turbinaLP}(\text{sin recalentamiento}) = C_p (T_4 - T_4')$$

$$W_{turbinaLP}(\text{con recalentamiento}) = C_p (T_5 - T_6)$$

Debido a que:

$$T_4 - T_4' < T_5 - T_6$$

$$W_{turbinaLP}(\text{sin recalentamiento}) < W_{turbinaLP}(\text{con recalentamiento})$$

Para comparar el trabajo neto de ambas configuraciones, se debe considerar que el trabajo en el compresor y en la turbina HP es igual para ambas configuraciones, y que la diferencia que existe estará en el trabajo realizado en la turbina LP:

$$W_{neto}(\text{sin recalentamiento}) = W_{turbinaHP} + W_{turbinaLP}(\text{sin}) - W_{compresor}$$

$$W_{neto}(\text{con recalentamiento}) = W_{turbinaHP} + W_{turbinaLP}(\text{con}) - W_{compresor}$$

$$W_{neto}(\text{sin recalentamiento}) < W_{neto}(\text{con recalentamiento})$$

A pesar de que hay un incremento en el trabajo neto desarrollado en el ciclo con recalentamiento, una cantidad de calor adicional $C_p(T_5 - T_4)$ debe suministrarse al sistema para elevar la temperatura de los gases que salen de la turbina HP.

Cuando se tiene el recalentador intermedio, por lo tanto se encuentran dos resultados que van en dirección contraria:

- (a) Aumento del trabajo desarrollado por la turbina LP
- (b) Aumento de la cantidad de calor que se debe agregar al sistema

Esta cantidad adicional de calor (b) es mayor que (a), por lo tanto la eficiencia térmica del ciclo sin recalentamiento será mayor que con recalentamiento.

$$\eta_{térmico}(\text{sin recalentador}) > \eta_{térmico}(\text{con recalentador})$$

C) Ciclo Regenerativo

En ocasiones se presenta que la temperatura de los gases a la salida de la turbina en el ciclo Brayton T4, es mayor que la temperatura del aire a la salida del compresor T2. El ciclo regenerativo aprovecha esta diferencia de temperaturas para transferir a un regenerador o intercambiador de calor, energía térmica de los gases que salen de la turbina, al aire que sale del compresor para aumentarle su temperatura.

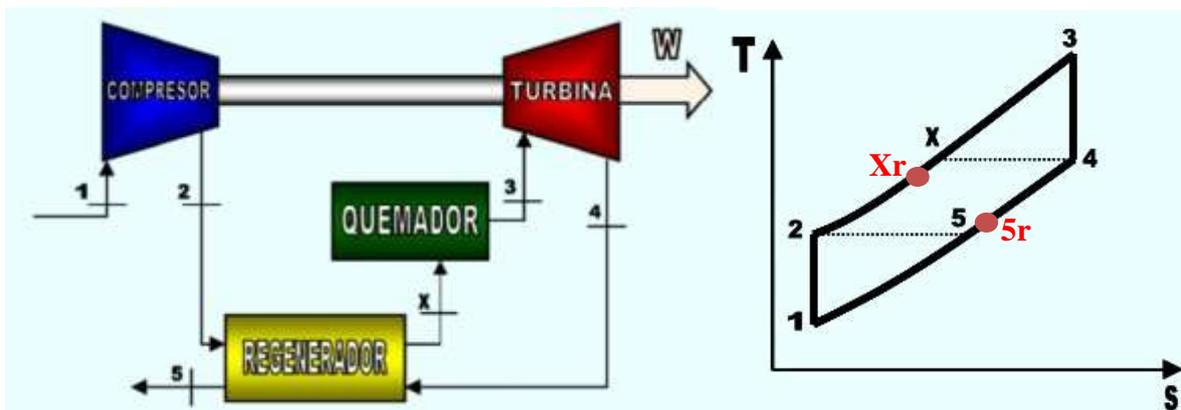
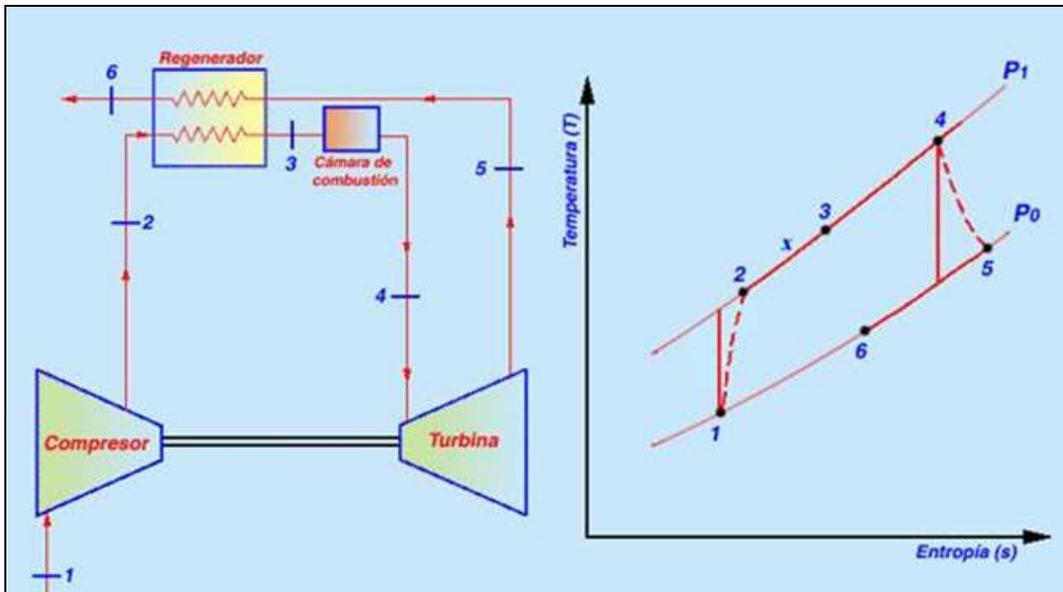


Diagrama T-S de TG con regeneración.

Esta entrega de calor que realizan los gases calientes de la salida de la turbina, al aire comprimido, produce una caída de temperatura de estos gases de T4 a T5, y un aumento de temperatura del aire comprimido de T2 a TX. En el caso ideal, el aire comprimido en el estado 2 tendrá la misma temperatura de los gases en el estado 5 y de igual manera la temperatura del aire en el estado X será la misma que la de los gases en el estado 4. En consecuencia, el calor suministrado en la cámara de combustión será únicamente el necesario para elevar la temperatura de TX a T3 y no de T2 a T3.

El trabajo neto desarrollado en el ciclo regenerativo 1-2-X-3-4-5, es el mismo que en el ciclo Brayton simple 1-2-3-4 ya que el trabajo realizado por el compresor y el trabajo producido por la turbina no varía en los dos casos. Sin embargo, al requerirse un menor calor de adición para elevar la temperatura al valor máximo del ciclo T3, se obtendrán eficiencias térmicas más favorables para el ciclo regenerativo.

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{W_{\text{neto}}}{Q_{\text{aportado}}}$$

$$W_{\text{neto}} (\text{sin regeneración}) = W_{\text{neto}} (\text{con regeneración})$$

$$Q_{\text{aportado}} (\text{sin regeneración}) > Q_{\text{aportado}} (\text{con regeneración})$$

Entonces:

$$\eta_{\text{térmico}} (\text{sin regeneración}) < \eta_{\text{térmico}} (\text{con regeneración})$$

En el caso ideal, se considera que una diferencial infinitesimal en la diferencia de temperatura, es suficiente para que el calor fluya en el regenerador de los gases que salen de la turbina al aire que sale del compresor. En el caso real, se requiere más que una diferencia infinitesimal y por lo tanto no se puede decir que T_X es igual a T_4 , ni que T_2 es igual a T_5 .

La diferencia de temperaturas ($T_4 - T_X$) requerida por el regenerador para transferir energía térmica de un fluido al otro define su eficiencia:

$$\eta_{\text{reg}} = \frac{h_{x_r} - h_2}{h_4 - h_2} = \frac{h_4 - h_{5_r}}{h_4 - h_5} \quad \text{donde} \quad h_4 = h_x \quad \text{y} \quad h_5 = h_2$$

Si el flujo másico y los calores específicos del aire y el gas se suponen similares:

$$\eta_{\text{reg}} = \frac{T_{x_r} - T_2}{T_4 - T_2} = \frac{T_4 - T_{5_r}}{T_4 - T_5}$$

Cuanto mayor sea la diferencia de temperaturas ($T_X - T_{Xr}$), menor será la diferencia ($T_{Xr} - T_2$) y en consecuencia la eficiencia del regenerador será menor.

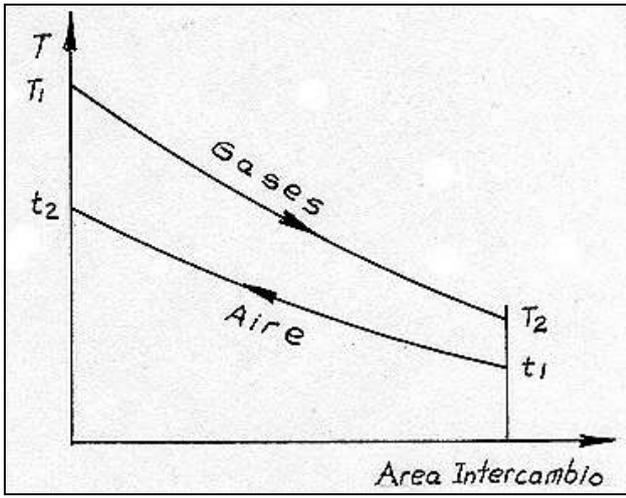
La selección del regenerador o intercambiador de calor debe ser un ejercicio cuidadoso ya que la eficiencia de éste puede mejorarse aumentando el área de transferencia, pero la caída de presión será mayor perjudicando la eficiencia térmica del ciclo.

Se puede observar que:

- El calor específico a presión constante de los gases calientes, es mayor que el del aire, debido a que los gases están a mayor temperatura.
- El caudal másico de gases es superior al del aire, en virtud de que es la suma del caudal másico del aire más el del combustible quemado.

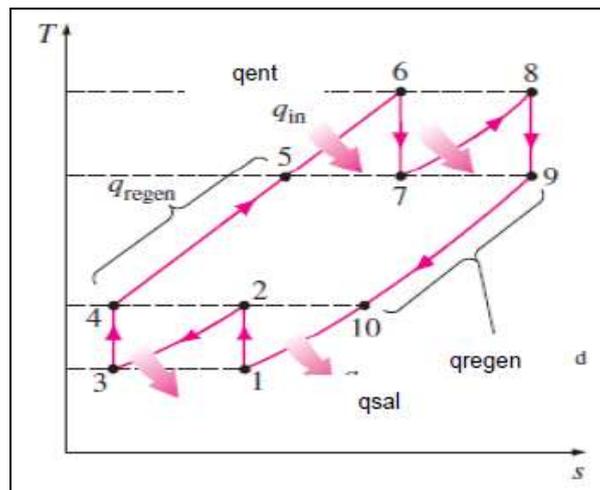
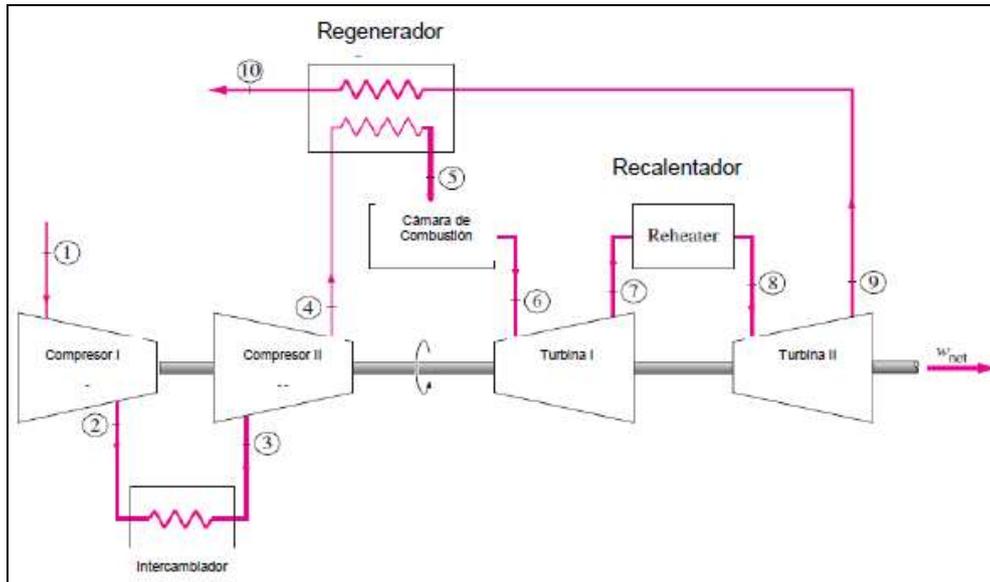
Por estas razones es que la elevación de temperatura del aire será mayor que la disminución de temperatura en los gases.

La Fig. siguiente representa la variación de temperatura que sufre el aire y los gases de escape en función de la superficie de intercambio de calor del regenerador, para el caso real.



Ciclos de turbina de gas con Refrigeración Intermedia, Recalentamiento y Regenerador

Un diagrama esquemático del arreglo físico de un ciclo de turbina de gas de dos etapas con interenfriamiento, recalentamiento y regeneración se muestra a continuación:



El gas entra a la primera etapa del compresor en el estado 1, se comprime de modo isentrópico hasta una presión intermedia P_2 ; se enfría hasta una presión constante hasta el estado 3 ($T_3 = T_1$) y se comprime en la segunda etapa isentrópicamente hasta la presión final P_4 . En el estado 4 el gas entra al regenerador, donde se calienta hasta T_5 a una presión constante. En un regenerador ideal, el gas saldrá del regenerador a la temperatura del escape de la turbina, es decir, $T_5 = T_9$. El proceso de adición de calor (o combustión) primario toma lugar entre los estados 5 y 6. El gas entra a la primera etapa de la turbina en el estado 6 y se expande isentrópicamente hasta el estado 7, donde entra al recalentador. Se recalienta a presión constante hasta el estado 8 ($T_8 = T_6$), donde entra a la segunda etapa de la turbina. El gas sale de la turbina en el estado 9 y entra al regenerador, donde se enfría hasta el estado 1 a presión constante. El ciclo se completa cuando el gas enfría hasta el estado inicial. También se puede asumir que la $T_4 = T_{10}$.

El hecho es que el interenfriamiento y el recalentamiento siempre disminuirán la eficiencia térmica a menos que se acompañen de la regeneración. Por lo tanto, en centrales eléctricas TG, el interenfriamiento y recalentamiento se utilizan siempre en conjunción con la regeneración.

Regulación de potencia

Para modificar la potencia de una TG se deben alterar, principalmente, dos parámetros: el flujo másico que pasa a través de los álabes de la turbina y la temperatura del fluido de trabajo a la entrada del rotor.

Así mismo, es posible incrementar la eficiencia y la potencia de un ciclo simple recuperando la energía remanente en los gases de escape mediante un recuperador de calor. Este equipo produce vapor que puede ser expandido en el mismo eje de la turbina de gas o en otro eje mediante una turbina de vapor.

Factores que afectan el desempeño de las turbinas de gas

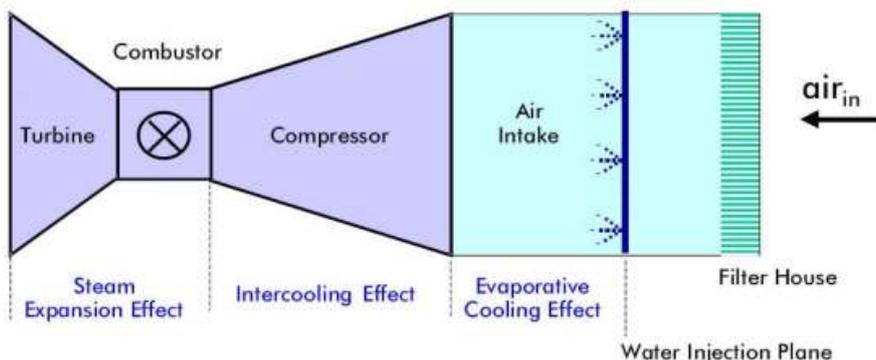
La TG, se alimenta del aire ambiente, por lo que una TG varía significativamente su comportamiento con las condiciones locales de temperatura, presión y humedad.

- Si se disminuye la temperatura ambiente, la capacidad y eficiencia de las TG se incrementan, debido a que esta disminución induce un aumento en la densidad del aire en la succión del compresor y, para una velocidad constante del mismo, esto se traduce en un incremento en el flujo másico.
- La presión atmosférica tiene un efecto importante sobre la capacidad de las TG, aunque no sobre su eficiencia. Cuando la presión atmosférica disminuye, la densidad del aire baja, lo que, a su vez, reduce el flujo de masa hacia la turbina y, por tanto, su capacidad.
- El aire húmedo, al ser más denso que el aire seco, también afecta la producción de potencia.
- El tipo de combustible también influye en el rendimiento. Usando gas se consigue un 2 % más de salida de potencia que usando destilados de petróleo.

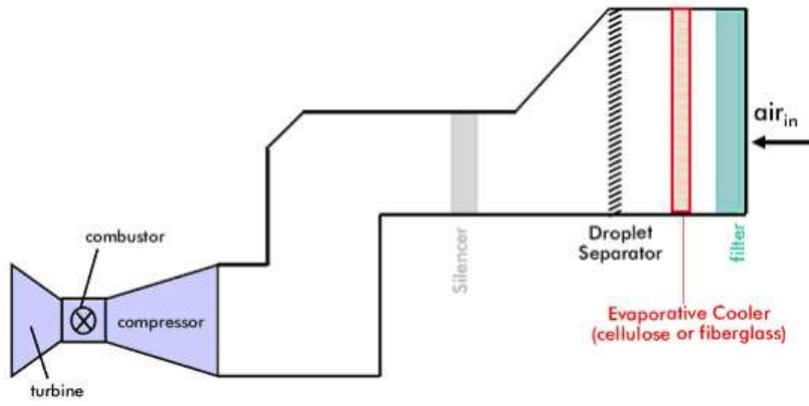
Sistemas de enfriamiento del aire

Los parámetros que se tienen en cuenta para seleccionar el tipo de sistema de enfriamiento más conveniente incluyen: tipo de turbina, condiciones climáticas, horas de operación de la turbina, relación entre flujo másico y potencia generada y precio de la energía en el mercado.

Las principales ventajas que se obtienen al enfriar el aire en la succión del compresor son: mejoramiento en la potencia de salida, disminución del consumo térmico específico en ciclo simple y ciclo combinado y disminución en las emisiones debido al mejoramiento en la eficiencia total.



Air Inlet Cooling Principle



Evaporative Cooler System 7

Arranque de una TG

Los diferentes tipos de arranques los podemos clasificar según la temperatura de la carcasa y del rotor, en el momento de iniciar el arranque.

Los fabricantes de las TG los suelen dividir en tres grupos:

- Arranque frío, que es aquel que se produce cuando la turbina ha estado más de 72 horas parada
- Arranque templado, entre las 24 y 72 horas.
- Arranque caliente, se produce en menos de 24 horas de que se haya producido la parada,

Adicionalmente, existen dos tipos más de arranques:

- Arranque superfrío. En el arranque superfrío el metal de la turbina está a temperatura ambiente, y posiblemente el rotor se encuentre ligeramente curvado, por lo que será necesario que la turbina funcione en modo virador entre 6 y 24 horas
- Rearranque. Se produce inmediatamente después de un disparo, porque algún sensor ha dado un aviso y se ha corregido rápidamente o ha sido una falsa alarma, o se están haciendo pruebas

La diferencia fundamental entre estos arranques, será la rampa de subida de carga, ya que por ejemplo cuanto más frío sea el arranque, la subida de carga deberá ser más suave, consiguiendo así un calentamiento uniforme entre el estator y el rotor (presentan diferentes masas) minimizando las tensiones térmicas. Un arranque frío con subida de carga hasta la plena potencia puede completarse en 30-45 minutos, mientras que para un arranque caliente menos de 15.

Fases de un arranque

Las 5 fases en que puede dividirse el arranque de una TG son:

1.- Funcionamiento del virador

Para asegurar el reparto de pesos a lo largo del eje de rotación en caso de parada prolongada es necesario que la turbina gire en virador durante unas horas, evitando así deformaciones producidas al enfriarse de forma no homogénea. Si tras la parada ha estado funcionando en virador, esta fase ya está realizada.

2.- Preparación para el arranque.

- Debe haber presión de gas (combustible).
- El sistema eléctrico debe estar operativo, para alimentar al generador, en caso que actuara de motor para arrancar la turbina.
- El sistema de refrigeración debe estar operativo, para ir evacuando el calor conforme lo vayamos generando y no tener que sacar mucho de golpe.
- Bomba de lubricación en marcha, temperatura correcta, para que todo este bien lubricado y evitar posibles daños.
- Ausencia de alarmas de cualquier tipo,

3.- *Inicio y subida hasta velocidad de barrido de gases.*

- El motor de lanzamiento, que puede ser el propio generador, hace girar la turbina, y se comienza a introducir aire en el compresor y gas en la cámara de combustión.
- El variador de velocidad controla la velocidad del motor de arranque, para ir subiendo de forma adecuada intentando evitar lo más rápido posible las zonas peligrosas de vibración.
- Subir lentamente la velocidad, hasta una velocidad de giro lento, no superior a 500 rpm y de esta manera realizar un barrido de gases que pudiera haber en la turbina, para evitar explosiones. También se pretende que la distribución de pesos a lo largo del eje de rotación sea perfecta y se eviten problemas de vibración al atravesar las velocidades críticas.

4.- *Aceleración hasta velocidad de sincronismo. Paso por velocidades críticas.*

- Se ordena desde el control subir hasta velocidad de sincronismo, pasando por las velocidades críticas lo más rápido posible. Se debe supervisar las vibraciones.
- A una velocidad determinada, se activa el ignitor, y se enciende la llama piloto, que a su vez enciende las cámaras de combustión o quemadores.
- A partir de ese momento la fuerza de los gases de combustión empieza a impulsar la turbina.
- Poco a poco, la fuerza que ejerce el motor va siendo menor, y la de la turbina mayor.
- A una velocidad determinada, el motor de arranque se desconecta. Si es el generador, deja de actuar como motor y se prepara para actuar como generador.
- Se alcanza la velocidad de sincronismo.

5.- *Sincronización y Subida de carga hasta la potencia seleccionada.*

- Cuando se alcanzan las 3000 r.p.m. , entra en funcionamiento el sincronizador, que automáticamente regulará frecuencia, tensión y desfase de la curva de tensión del generador y de la red eléctrica
- Se cierra el interruptor de máquina una vez alcanzada la velocidad de sincronismo
- La subida de carga debe ser lenta, de acuerdo al tipo de arranque.

Parada de una TG

Las principales secuencias para sacar de servicio una turbina a gas que acciona un generador eléctrico son las siguientes:

- 1.- Se empieza a bajar potencia eléctrica en el generador actuando sobre la válvula de regulación de combustible hasta reducir la potencia a cero.
- 2.- Se saca de paralelo el generador eléctrico.
- 3.- Se pone en marcha la bomba auxiliar de aceite.
- 4.- Se corta el suministro de combustible con lo cual empieza el período de desaceleración del grupo.
- 5.- Cuando el número de vueltas ha bajado a aproximadamente 3 a 5 rpm. entra en funcionamiento el virador.

Emisiones

Durante la combustión de un hidrocarburo se generan los siguientes productos: Dióxido de carbono (CO_2), vapor de agua (H_2O), y trazas de otros componentes como, óxidos de nitrógeno (NO, NO_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de sulfuro (SO_2), material particulado, hidrocarburos no quemados y hollín.

Gas constituyente	Contenido por % de volumen
Nitrógeno (N_2)	78.0870
Oxígeno (O_2)	20.9476
Argón (Ar)	0.9340
Dióxido de carbono	0.0314

Tabla No.1 Principales componente del aire¹

De estos, el que se oxida es el nitrógeno, formando NO, NO_2 y son llamados los NO_x . El NO se forma en los procesos de combustión de los combustibles fósiles, la formación de estos depende de:

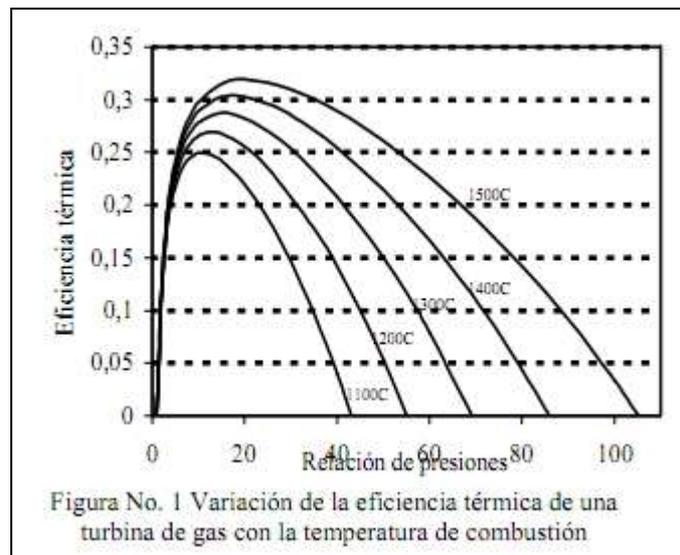
- Temp. de combustión del proceso
- Concentración de oxígeno durante el proceso de combustión o porcentaje de exceso de aire
- Presión en el dispositivo de combustión
- Tiempo durante el cual se realiza el proceso de combustión

En la atmósfera el NO se oxida rápidamente formando NO_2 , este proceso se acelera debido a la presencia de los rayos solares, efecto fototérmico, y material orgánico presente en el aire. En muchos países las TG son la principal fuente de generación de energía eléctrica, allí se han implementado normas ambientales que hacen necesario el control de las emisiones de NO y NO_2 . Dichas regulaciones demandan emisiones máximas de 25 ppm (partes por millón) de NO_x para combustibles líquidos y de 10 ppm para gas natural. Las emisiones de NO_x tienen efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente, formando:

- Lluvia ácida.
- Niveles peligrosos de ozono (O_3) en la superficie terrestre.
- Smog en la atmósfera

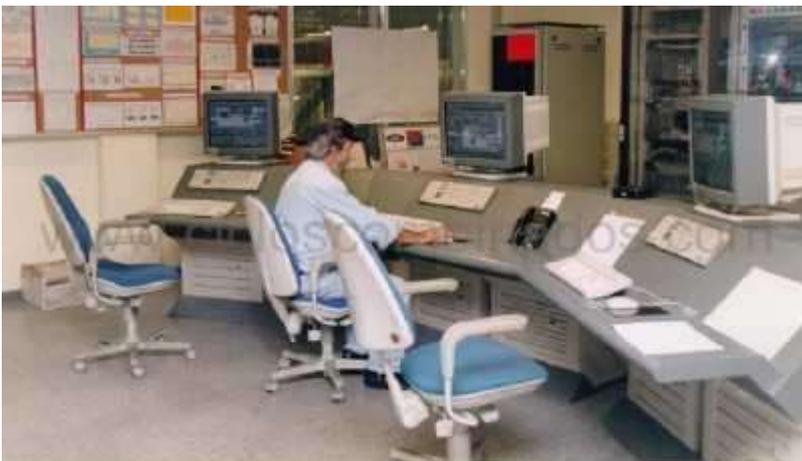
El NO_2 captura el oxígeno que transporta la hemoglobina y también forma ácido en los pulmones, de ahí que es mucho más tóxico que el CO para la misma concentración.

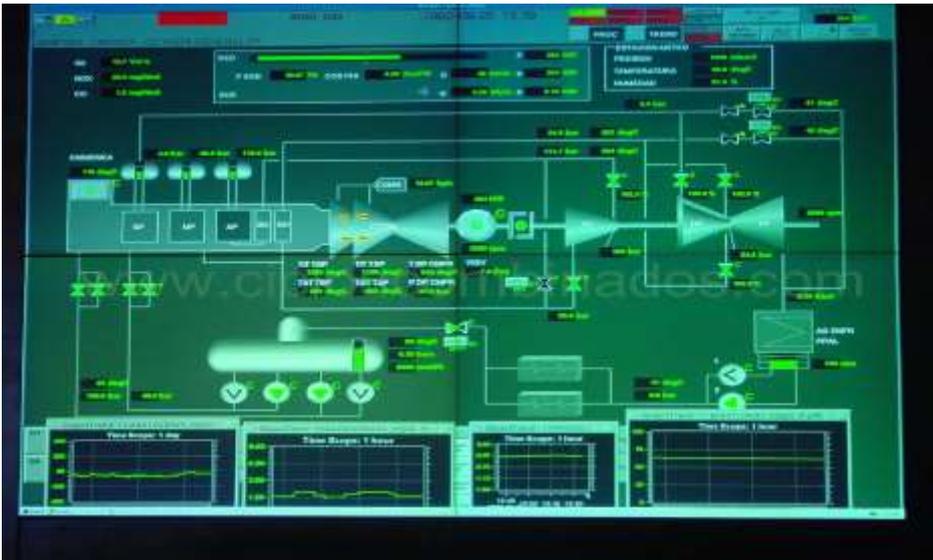
La mayoría de las TG queman gas natural (el cual puede modelarse, para cálculos previos, como CH_4 : metano) de allí que tienen un alto impacto en la contaminación ambiental por NO_x . Los investigadores y productores de turbinas de gas han centrado parte de sus estudios en desarrollar técnicas que permitan reducir las emisiones de NO_x . Esta preocupación está altamente relacionada con el aumento que se ha logrado en la temperatura de combustión, o temperatura de entrada a la turbina, con el propósito de mejorar la eficiencia térmica de la turbina, pero que trae aparejado la formación de NO_x .



Entre los métodos que se han venido desarrollando para el control de emisiones de NO_x están las tecnologías de control de combustión y post-combustión, entre las cuales se encuentran

- Ciclos con inyección de agua o de vapor para Control de combustión.
- Ciclos con humidificación en cascada para Control de combustión.
- Combustores secos bajos en NO_x para Control de combustión.
- Combustores catalíticos para Control de combustión.
- Ciclos con reducción catalítica selectiva para Control de post-combustión





Bibliografía

Renovatec

<http://www.uamerica.edu.co/tutorial/4turgas.ht>

http://www.youtube.com/watch?v=A6a_5cJQZJg

<http://www.youtube.com/watch?v=jRn1DROPMRE>