

# L4 Tecnologías de la cogeneración. Turbina de Gas y Ciclos Combinados.



Sistemas de Potencia - Tecnología Energética  
Máster Universitario en Ingeniería Industrial  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

## Estructura Tecnología Energética Sistemas de Potencia

1. Demanda de energía y generación
2. Introducción a la cogeneración
3. Tecnologías de cogeneración. TV
- 4. Tecnologías de cogeneración. TG y CC**
5. Tecnologías de cogeneración. MCIA
6. Evaluación de la demanda
7. Evaluación económica
8. Sistemas de almacenamiento de energía
9. Otras tecnologías de generación

## Estructura

1. Tecnologías de cogeneración
2. El ciclo de turbina de gas
3. Aplicación del ciclo de turbina de vapor a cogeneración
4. Curvas características
5. Influencia de las condiciones de admisión en las prestaciones de la TG
6. Aplicaciones de cogeneración con ciclo de TG

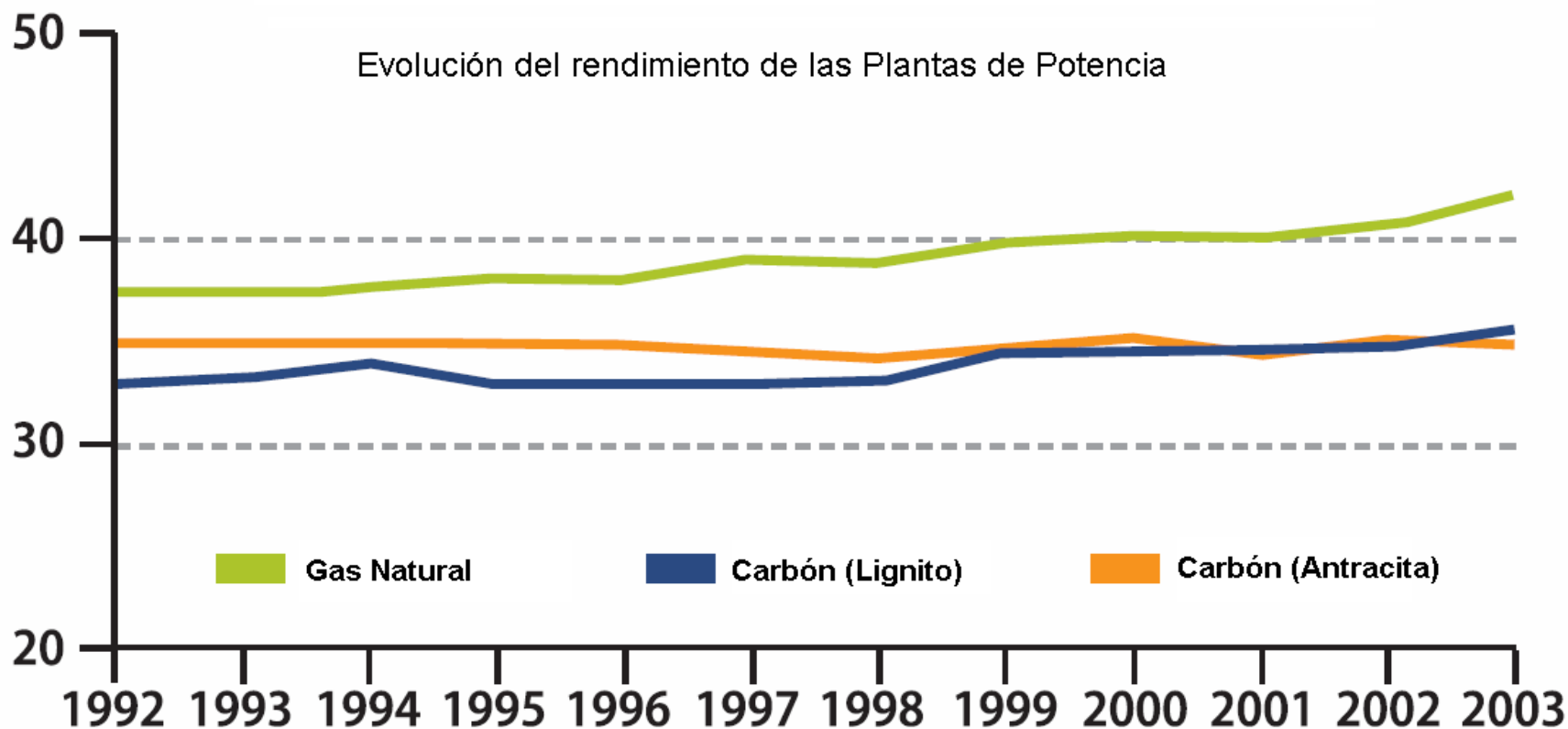
## Objetivos

1. Identificar las principales componentes y configuraciones basadas en ciclo de TG
2. Conocer las curvas características de TG
3. Conocer la influencia de la temperatura, presión y humedad de la admisión en TG
4. Conocer aplicaciones de cogeneración basadas en TG
5. Identificar las principales componentes y configuraciones basadas en ciclo de CC

## Tecnologías plantas de cogeneración

	MOTOR DIESEL	MOTOR GAS	TURBINA VAPOR	TURBINA GAS	MICROTURBINA
Rendimiento eléctrico (PCI)	30-50%	25-45%	30-42%	25-40% (simple) 40-60% (combinado)	20 – 30%
POTENCIA (MW)	0,05 - 5	0,05 - 5	Cualquiera	0,5 - >250	0,025 – 0,25
Coste Instalación (€/kW)	530 - 1000	530 - 1000	530 - 700	470 - 600	330 - 870
Disponibilidad	90 – 95 %	92 – 97 %	98 - 99 %	90 – 98 %	90 – 98 %
Tiempo entre revisiones (h)	25.000 – 30.000	24.000 – 60.000	> 50.000	30.000 – 50.000	10.000 – 40.000
Características de uso	Elevado rendimiento a plena carga y parcial Robustos frente a elevado número de paradas y arranques		Operación estable Averías poco frecuentes	Temperatura de salida de gases elevada Reducidos costes de O&M	Elevada compacidad y portabilidad Reducidos costes de O&M
NOx (g/kWh)	1,35 - 15	1 - 12	0,8	0,13 – 1,8	0,18 – 0,95
Potencia Térmica (kJ/kWhe)	3.400	1.000 – 5.000	--	3.400 – 12.000	4.000 – 15.000
Temperatura útil para cogeneración (°C)	82 - 480	150 - 260	--	360 - 650	250 - 360
Campo de aplicación de la cogeneración	Agua caliente, vapor BP, calefacción distrito, frío absorción	Agua caliente, vapor BP, calefacción distrito, frío absorción	Vapor BP y AP, calefacción distrito, frío absorción	Calentamiento directo, agua caliente, vapor AP y BP, calefacción distrito, frío absorción	Calentamiento directo, agua caliente, vapor BP

## Tecnologías plantas de cogeneración



Fuente: IEA, Energy Technology Perspectives, 2006

# Clasificación de las TG

Las turbinas de gas se han desarrollado como unidades de servicio de gran volumen para aplicaciones industriales y de servicios públicos, o como motores de aviones livianos, compactos y eficientes. Estos motores están modificados para aplicaciones estacionarias, en cuyo caso se denominan "turbinas aeroderivadas".

## 1. Turbina de gas aislada (motor térmico simple):

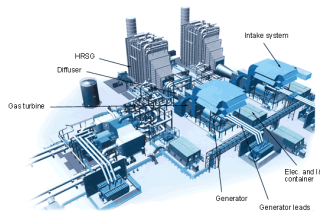
### 1. Ciclo abierto: combustión interna (generalmente)

1. Ciclo simple.
2. Ciclo simple regenerativo
3. Ciclo compuesto

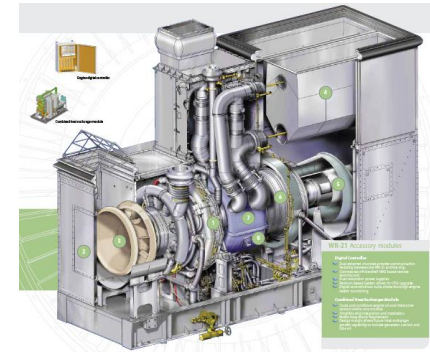
### 2. Ciclo cerrado: combustión externa (nuclear, solar)

## 2. Turbina de gas integrada:

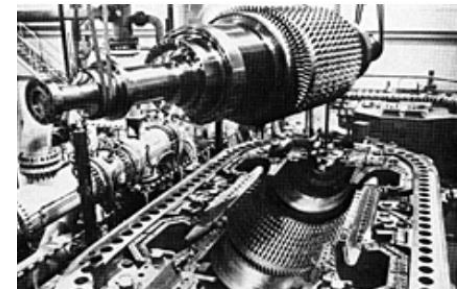
1. Integración con turbina de vapor para producción de potencia eléctrica.
2. Propulsión marítima.
3. Propulsión aérea.
4. Cogeneración.
5. Integración con procesos químicos



Siemens GT13E2 (Ciclo simple)



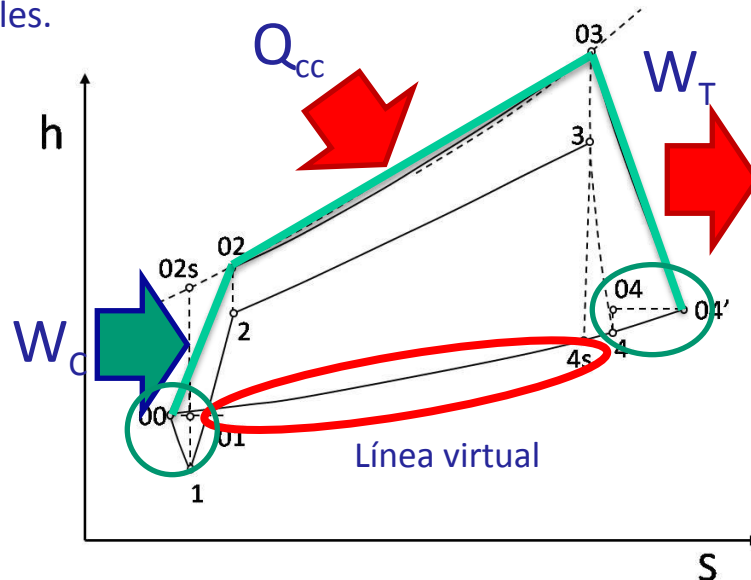
Rolls Royce WR21  
(Ciclo compuesto regenerativo)



Turbina de helio (ciclo cerrado nuclear)

## Proceso real en una turbina de gas

1. El proceso seguido por el fluido de trabajo en el interior de la turbina de gas, trabajando según un ciclo simple abierto no regenerativo, se puede dividir en tres:
  1. Compresión: eleva la presión del gas de trabajo (aire). Tiene lugar en el turbocompresor y suele incluir el proceso de admisión al motor.
  2. Combustión: eleva la temperatura del gas de trabajo, idealmente a presión constante. Tiene lugar en la cámara de combustión.
  3. Expansión: producción de trabajo útil gracias a la expansión del gas de trabajo (gases de combustión) en la turbina.
2. En ciclos regenerativos o compuestos aparecerán procesos adicionales.

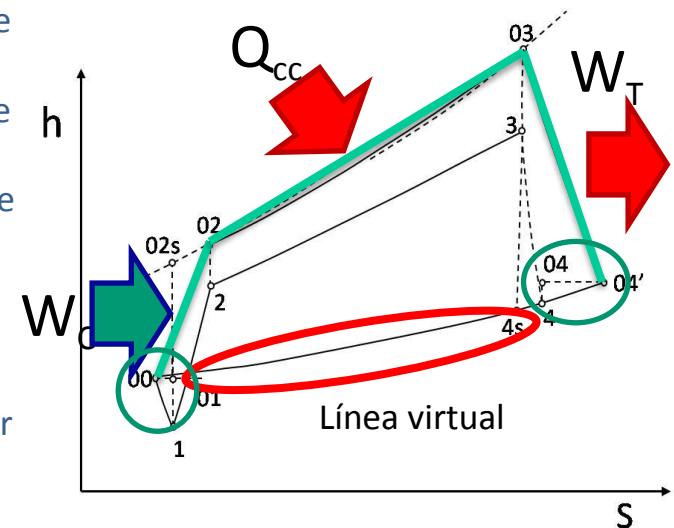


- |    |  |
|----|--|
| 00 | Estado de remanso del medio ambiente.  |
| 01 | Entrada al compresor.  |
| 02 | Estado de remanso en la admisión del compresor.                                  |
| 03 | Salida del compresor y entrada a la cámara de combustión.                        |
| 04 | Estado de remanso a la salida del compresor.                                     |
| 05 | Salida de la cámara de combustión.   |
| 06 | Estado de remanso a la salida de la cámara de combustión y entrada a la turbina. |
| 07 | Salida de la turbina.  |
| 08 | Estado de remanso a la salida de la turbina.                                     |
| 09 | Estado de remanso del fluido en el escape.                                       |



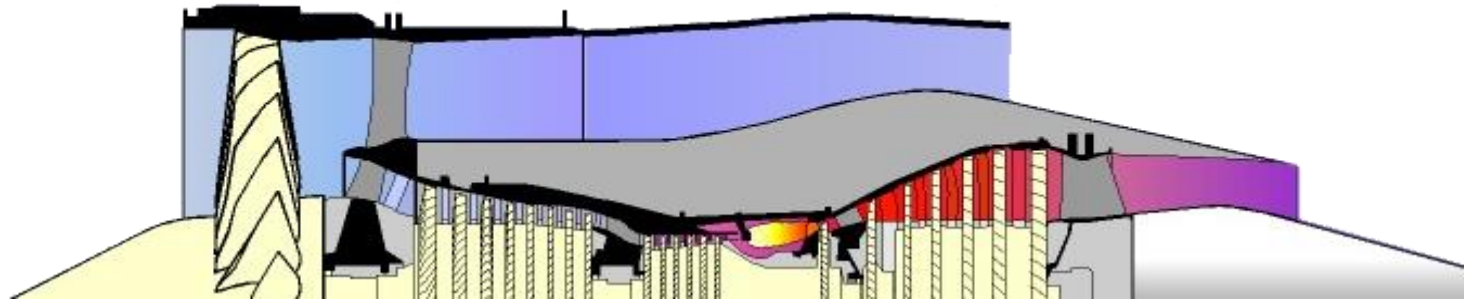
## Proceso real en una turbina de gas

- La mayoría de los sistemas de turbina de gas actualmente disponibles en cualquier sector de aplicaciones operan en el Brayton
- Un compresor toma aire de la atmósfera y lo deriva a mayor presión a la cámara de combustión. La temperatura del aire también se incrementa debido a la compresión. Las unidades más antiguas y más pequeñas operan con una relación de presión en el rango de 15: 1, mientras que las unidades más nuevas y más grandes operan a relaciones de presión cercanas a 30: 1.
- El aire a presión elevada se envía a través de un difusor a una cámara de combustión a presión constante, donde se inyecta y se quema el combustible. El difusor reduce la velocidad del aire a valores aceptables en la cámara de combustión. Hay una caída de presión a través de la cámara de combustión en el rango de 1 - 2%. La combustión tiene lugar con un exceso de aire. Los gases de escape salen de la cámara de combustión a alta temperatura y con concentraciones de oxígeno de hasta 15 -16%. La temperatura más alta del ciclo aparece en este punto; cuanto más alta es esta temperatura, mayor es la eficiencia del ciclo. El límite superior se coloca por la temperatura que pueden soportar los materiales de la turbina de gas, así como por la eficiencia de la refrigeración de los álabes; con la tecnología actual es de aproximadamente 1300 °C.

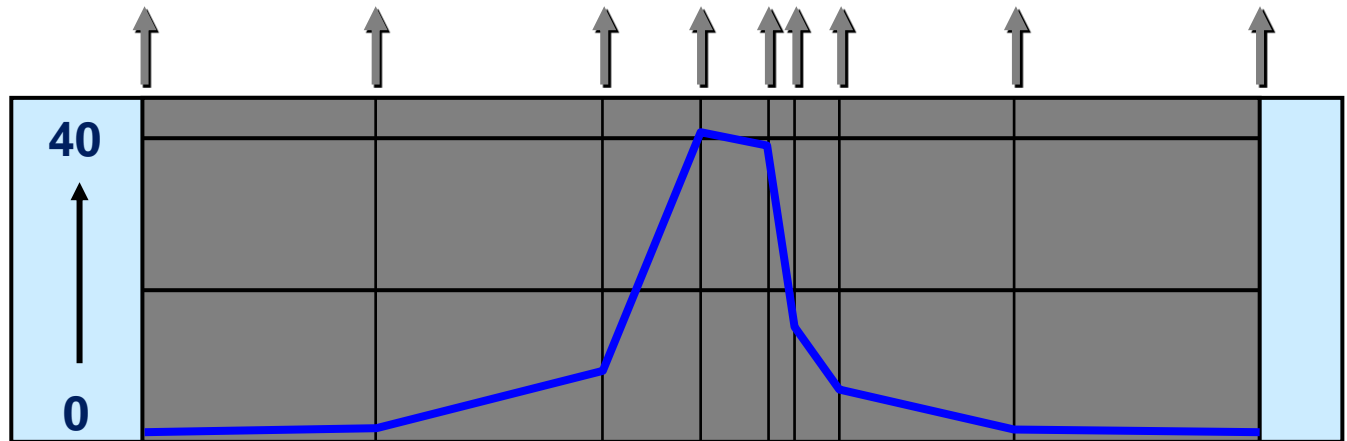


Los gases de escape con presión y temperatura altas entran en la turbina de gas generando trabajo mecánico para la carga y para accionar el compresor (por ejemplo, un generador eléctrico).

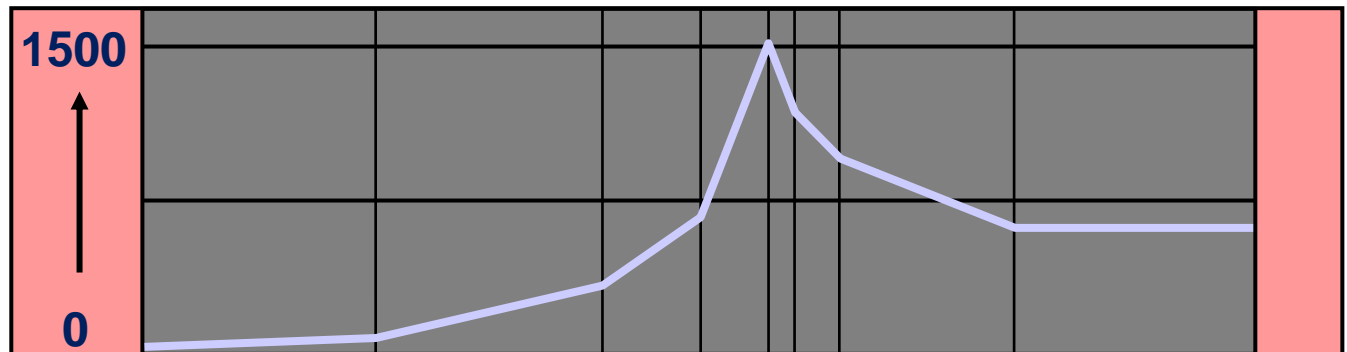
## Proceso real en una turbina de gas



Pressure  
(atm)



Temperature  
(°C)



# Ciclo básico de la turbina de gas. Componentes (Máquinas Térmicas)

## COMPRESOR:

- Comprime el aire desde el ambiente hasta la presión de la cámara de combustión.
- Puede ser radial o centrífugo.
- Sus parámetros característicos son:
  - Relación de compresión:
    - Turbinas industriales:  $11:1 \div 20:1$
    - Turbinas aeroderivadas:  $20:1 \div 45:1$
  - Rendimiento:
    - Centrífugos:  $0,70 \div 0,85$
    - Axiales:  $0,85 \div 0,90$

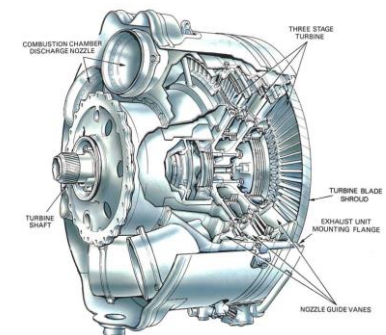
$$\eta_c = \frac{h_{02s} - h_{02}}{h_{02} - h_{01}}$$



## TURBINA.

- Expande los gases de combustión desde la presión de salida de la cámara de combustión hasta la presión atmosférica.
- Suele estar parcialmente refrigerada con aire para soportar altas temperaturas de operación.
- Genera trabajo para accionar el compresor y suministrar trabajo útil.
- Suele ser axial y su rendimiento se sitúa en torno al 90-92%.

$$h_T = \frac{h_{03} - h_{04}}{h_{03} - h_{04s}}$$



# Ciclo básico de la turbina de gas. Componentes (cámara de combustión)

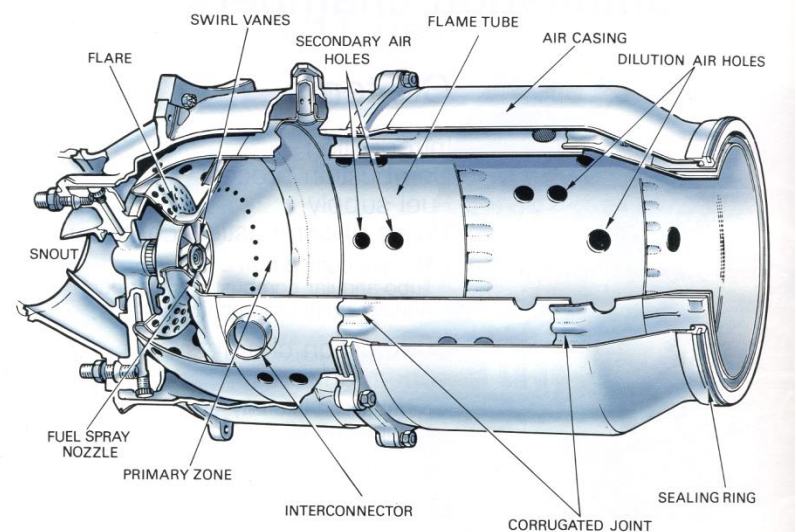
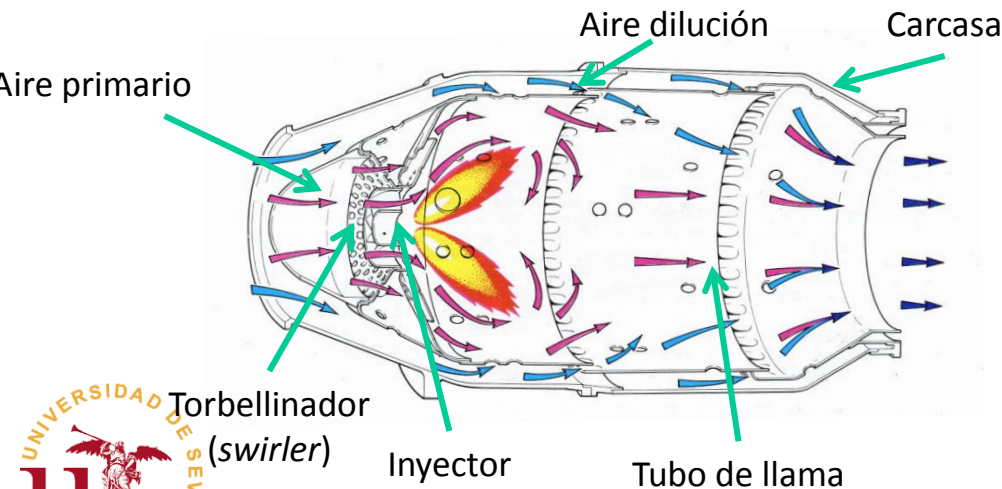
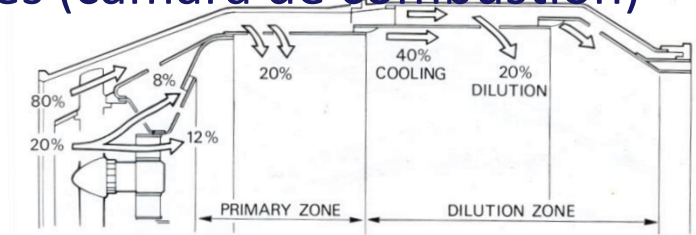
## CÁMARA DE COMBUSTIÓN. Funcionamiento.

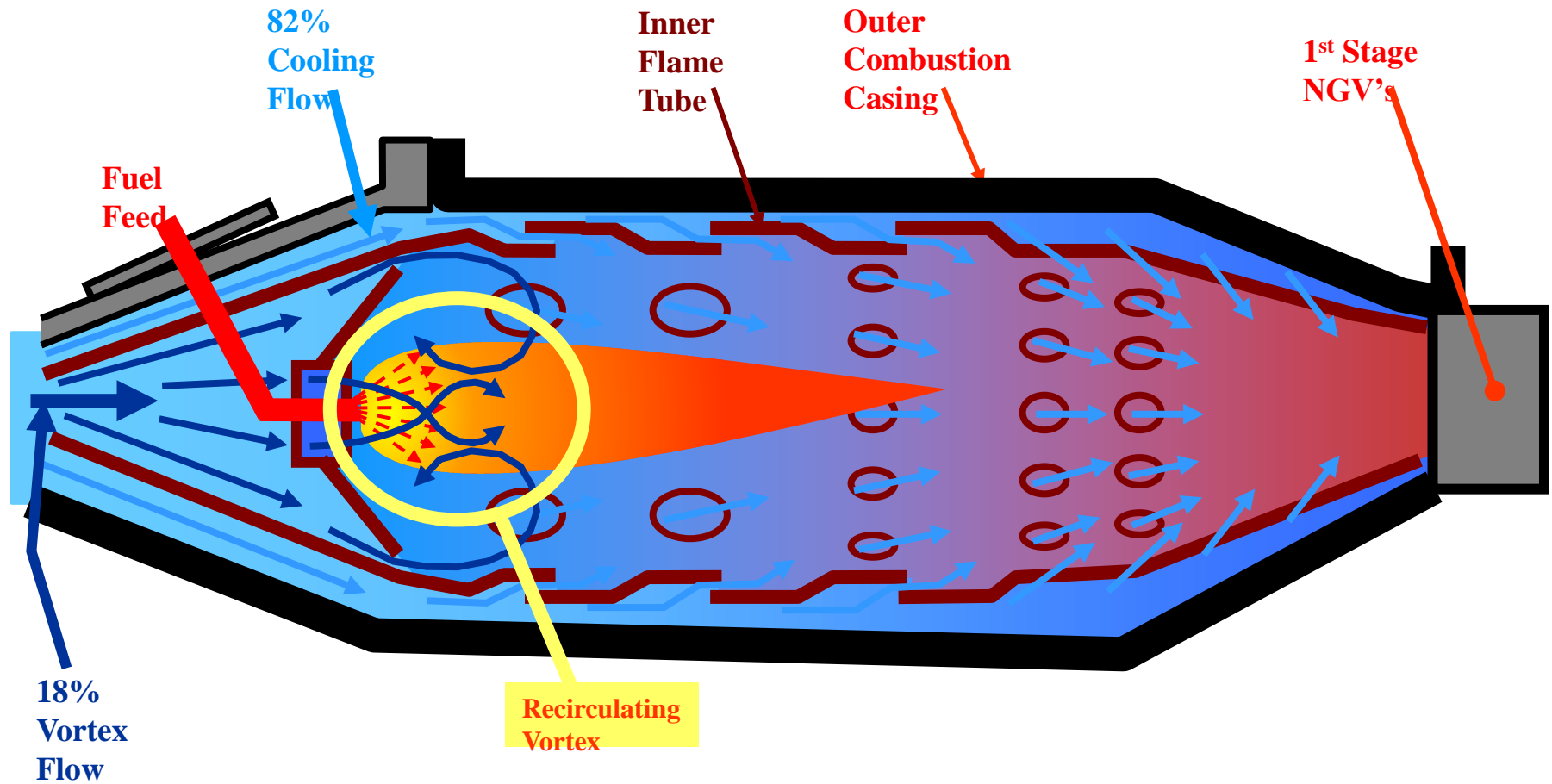
a. El aire que viene del compresor se divide:

a. En torno al 20% entra a la zona de combustión primaria en el tubo interior o tubo de llama (*combustion liner, flame tube*).

b. El resto se deriva al conducto anular externo, comprendido entre el tubo de llama y la camisa o carcasa (*skirt, casing*).

b. El aire que circula por el exterior del tubo de llama entra progresivamente en éste para controlar la temperatura final de los gases mediante un proceso de dilución.



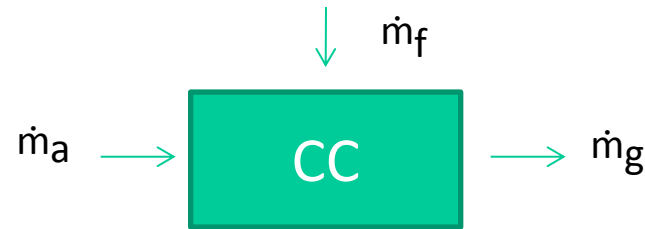


## JET ENGINE – Combustion Process

## Ciclo básico de la turbina de gas. Componentes (cámara de combustión)

- La temperatura del gas de trabajo aumenta como consecuencia del proceso de combustión.
- La cámara de combustión no es adiabática. Existen pérdidas cuantificadas por  $\eta_{cc}$ .
- Balance de energía en la cámara de combustión:

$$\eta_{cc} = \frac{(\dot{m}_a + \dot{m}_f)h_{03} - \dot{m}_a h_{02} - \dot{m}_f h_{sf}}{\dot{m}_f \text{PCI}}$$



- El término de entalpía sensible del combustible es despreciable frente a los demás ( $m_f \ll m_a$ ).

$$\eta_{cc} = \frac{(\dot{m}_a + \dot{m}_f)h_{03} - \dot{m}_a h_{02}}{\dot{m}_f \text{PCI}} = \frac{(1+F)h_{03} - h_{02}}{F \text{ PCI}}$$

$$F = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} \sim 0,02$$

- Se denomina dosado F a la relación entre la masa de combustible y la masa de aire.

# Ciclo básico de la turbina de gas. Potencia y rendimiento

## 1. Potencia.

- Potencia interna: potencia en el proceso de expansión menos potencia en el proceso de compresión:

$$\dot{W}_{int} = (\dot{m}_a + \dot{m}_f)W_T - \dot{m}_a W_C = \dot{m}_a ((1+F)W_T - W_C) = \dot{m}_a W_{int}$$

- Potencia efectiva: potencia interna menos pérdidas mecánicas:

$$\dot{W}_{ef} = \dot{W}_{int} - \dot{W}_{pm}$$

- Rendimiento mecánico: porcentaje de la potencia interna disipado en forma de pérdidas mecánicas:

$$\eta_m = \frac{\dot{W}_{ef}}{\dot{W}_{int}} = 1 - \frac{\dot{W}_{pm}}{\dot{W}_{int}} \sim 0,97-0,99$$

- Si pudieran separarse las pérdidas mecánicas en turbina y compresor, la potencia efectiva sería:

$$\dot{W}_{ef} = \dot{m}_a (1+F) W_T \eta_{mT} - \dot{m}_a W_C \frac{1}{\eta_{mC}}$$



# Ciclo básico de la turbina de gas. Potencia y rendimiento

## 2. Rendimiento.

- Rendimiento térmico: es el rendimiento del ciclo de trabajo definido como trabajo interno dividido por calor aportado:

$$\eta_{cc} = \frac{\dot{W}_{int}}{\dot{Q}_{ap}} = \frac{(\dot{m}_a + \dot{m}_f)W_T - \dot{m}_a W_C}{\eta_{cc} \dot{m}_f PCI} = \frac{(1+F)W_T - W_C}{\eta_{cc} F PCI} = 0,36 - 0,44$$

- Rendimiento económico o global: es el rendimiento del motor, incluyendo las pérdidas mecánicas y de la cámara de combustión:

$$\eta_e = \frac{\dot{W}_{ef}}{\dot{m}_f PCI} = 0,35 - 0,42$$

- Consumo específico de calor (Heat Rate): es la inversa del rendimiento.

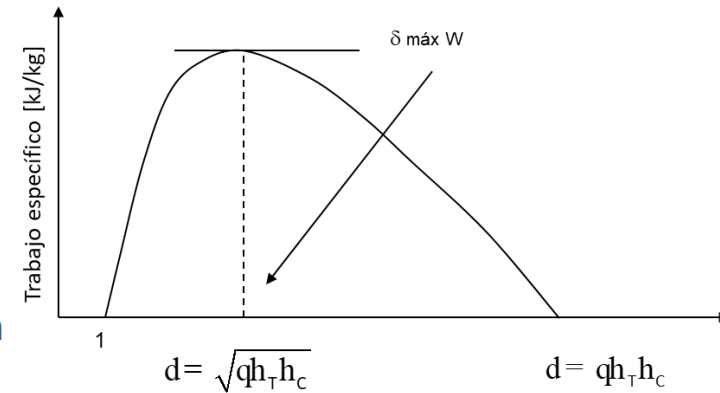
$$\eta_e = \frac{\dot{m}_f PCI}{\dot{W}_{ef}} 3600 \left( \frac{kJ}{kWh} \right)$$



## Ciclo teórico ciclo simple de la turbina de gas

### 3. Hipótesis:

1. Por el motor sólo circula aire, el cual se supone gas perfecto.
2. Los gastos másicos en compresor y turbina coinciden.
3. Las pérdidas de carga en el interior del motor son nulas.
4. La compresión y expansión no son isentrópicas, y sus rendimientos coinciden con los de las máquinas reales.



### Conclusiones:

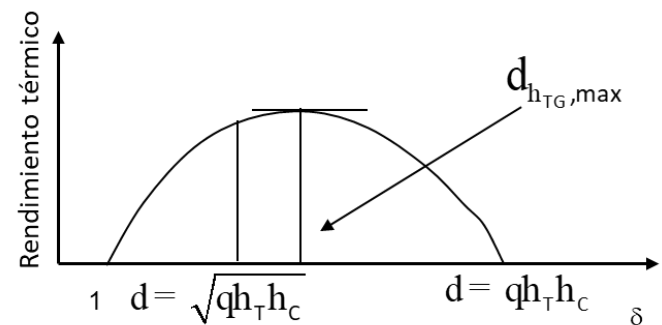
- Existe un valor de la relación de compresión que hace máximo el trabajo específico del ciclo.

$$r = (q h_T h_C)^{\frac{g}{2(g-1)}}$$

- Existe un valor de la relación de compresión que hace máximo el rendimiento del ciclo.

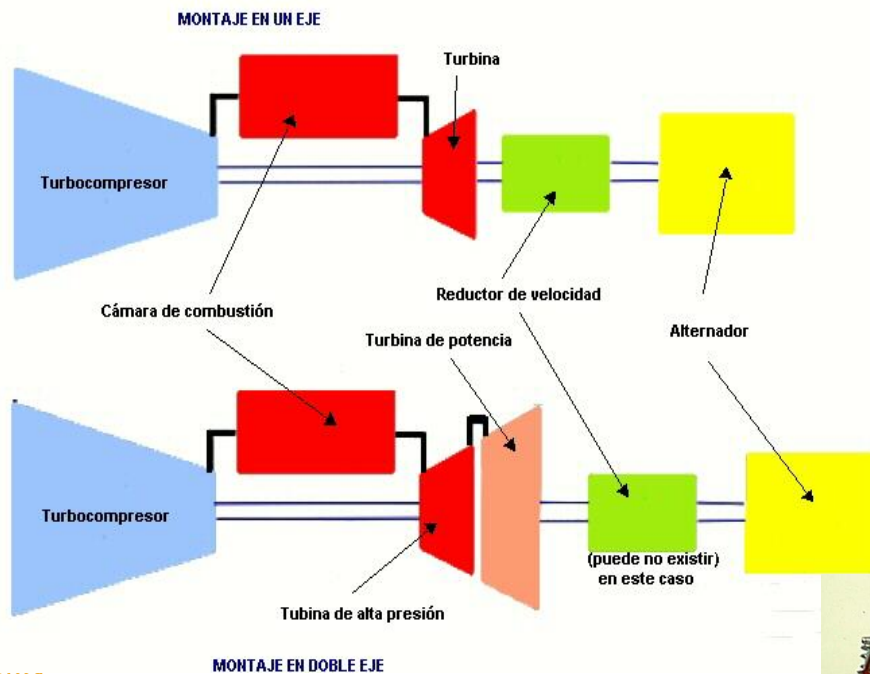
$$r_{h_{\max}} > r_{w_{\max}}$$

- La tecnología de compresores actual permite alcanzar cualquiera de estos valores.
- Ambos valores son tanto mayores cuanto mayor es la temperatura de entrada a la turbina ( $\theta$ ).

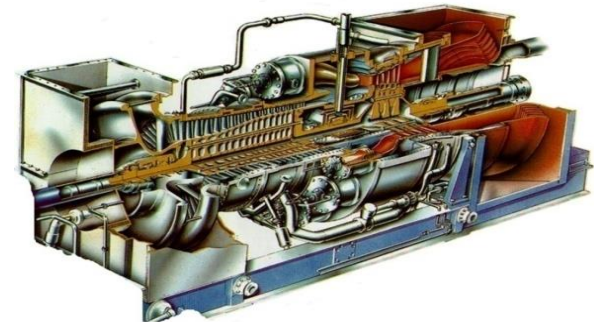


## Esquema mecánico de la TG

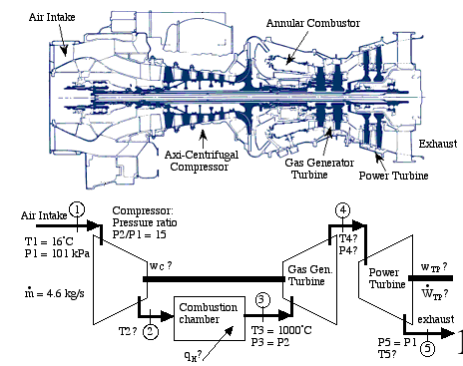
- Representa el modo en que los componentes del motor se conectan entre sí.
- Montaje en un eje: compresor, turbina y alternador están conectados por un único eje.
- Montaje en dos ejes: el eje de alta presión conecta el compresor con la turbina de alta presión mientras el eje de baja presión conecta la turbina de potencia con el alternador.



General Electric MS 7001 gas turbine (171 MW)



General Electric T700 gas turbine

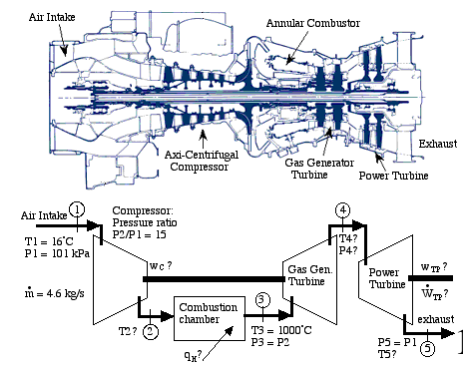
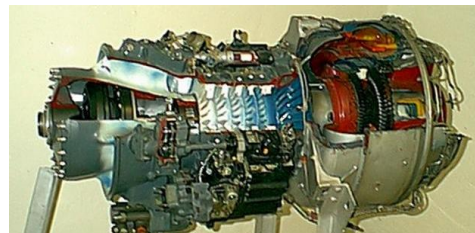
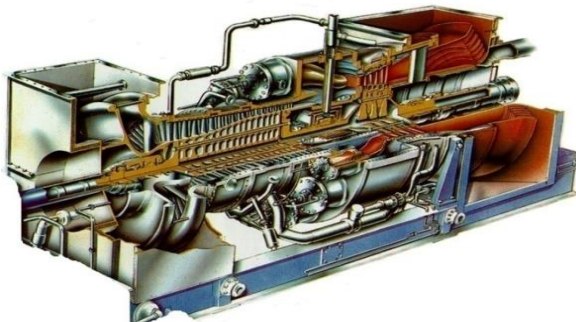


## Esquema mecánico de la TG

- Ventajas del montaje en un eje:
  - Tiene más inercia, por lo que se reduce el riesgo de embalamiento.
  - Se puede emplear el alternador para arrancar el motor.
- Ventajas del montaje en doble eje:
  - Es mas flexible.
  - La velocidad de giro del eje de alta presión no está condicionada por la frecuencia de la carga.

En un motor en doble eje, el conjunto formado por el compresor, la cámara de combustión y la turbina de alta presión se denomina “generador de gas”.

General Electric MS 7001 gas turbine (171 MW)



General Electric T700 gas turbine

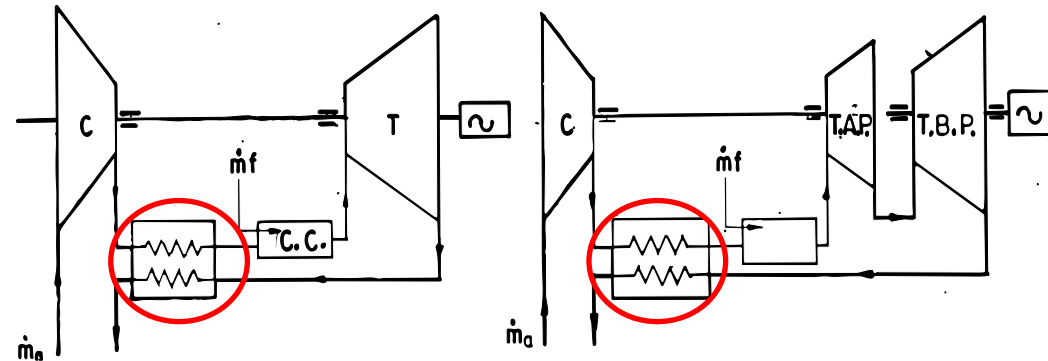
## Ciclo regenerativo de la turbina de gas

### 1. Objetivo:

El objetivo del ciclo regenerativo es recuperar parte de la energía contenida en los gases de escape de la turbina para precalentar el aire de entrada a la cámara de combustión.

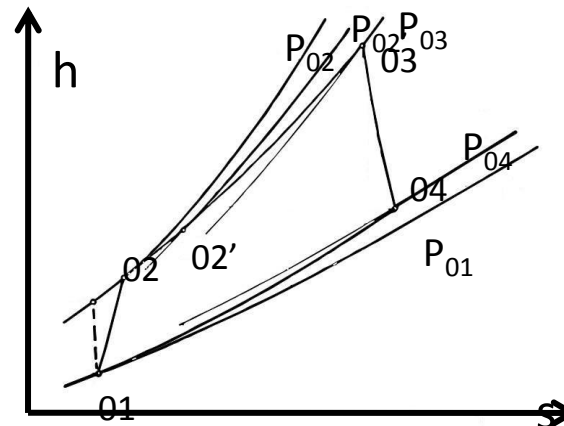
### 2. Variaciones respecto del ciclo no regenerativo:

- Aportación de calor al aire que sale del compresor para calentar de  $T_{02}$  a  $T_{02}'$
- Pérdida de carga en el intercambiador de calor (lado del aire):  $\Delta p = p_{02} - p_{02}'$
- Pérdida de carga en el intercambiador de calor (lado de los gases quemados):  $\Delta p = p_{04} - p_{01}$



- Mayor inercia, menos riesgo de embalamiento.
- Se puede arrancar con el alternador.

- Flexibilidad
- La velocidad de giro del eje de alta presión no está condicionada por la frecuencia de la carga.



$$e_{R,aire} = \frac{p_{02} - p_{02'}}{p_{02}} \cdot 100$$

$$e_{R,gas} = \frac{p_{04} - p_{01}}{p_{04}} \cdot 100$$

$$R = \frac{T_{02'} - T_{02}}{T_{04} - T_{02}}$$

## Ciclo regenerativo de la turbina de gas

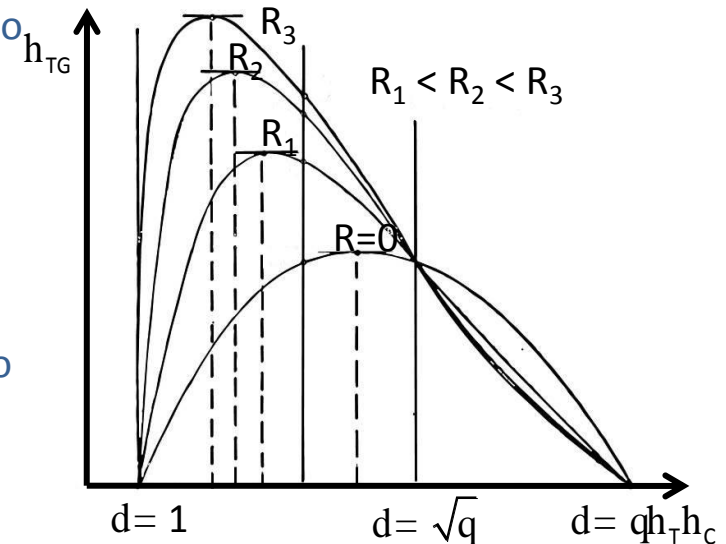
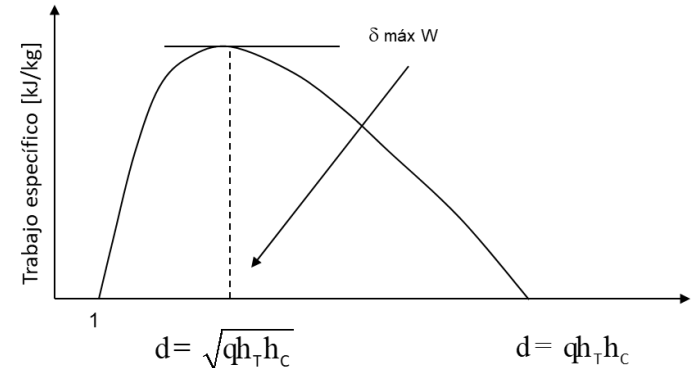
### 3. Ciclo regenerativo teórico. Hipótesis simplificativas:

- Solo circula aire por la instalación y se supone comportamiento de gas perfecto.
- Los gastos máscicos de compresor y turbina coinciden.
- Las pérdidas de carga en cámara de combustión y regenerador se consideran despreciables.
- Procesos de compresión y expansión no isentrópicos con los mismos rendimientos que las máquinas reales.
- Regenerador no ideal con el mismo rendimiento  $R$  que el regenerador real

#### Conclusiones:

- El rendimiento del ciclo aumenta con el rendimiento del regenerador siempre que  $\delta < \theta \frac{1}{2}$
- La relación de compresión de máximo rendimiento es inferior a la relación de compresión de máximo trabajo específico.

El rendimiento máximo aumenta y la relación de compresión a la que se produce disminuye cuando aumenta el rendimiento del regenerador.



# Ciclo regenerativo de la turbina de gas

## **Ventajas del ciclo regenerativo:**

- Aumenta el rendimiento.
- Disminuye la relación de compresión de máximo rendimiento, favoreciendo el diseño del compresor.
- Experimenta un mayor aumento de rendimiento ante un incremento de la temperatura de entrada a la turbina.

## **Inconvenientes del ciclo regenerativo:**

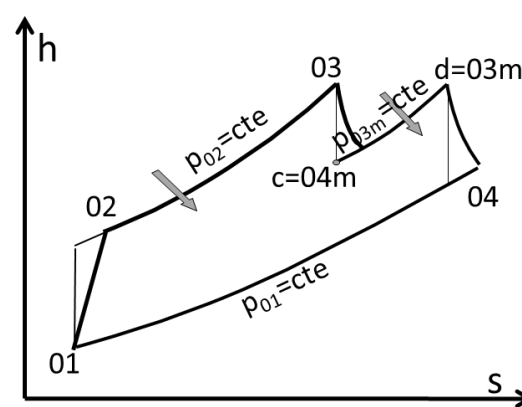
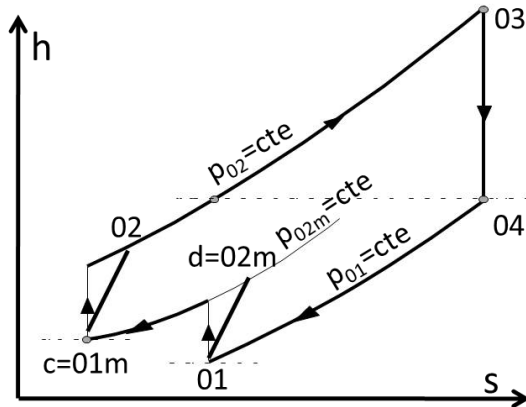
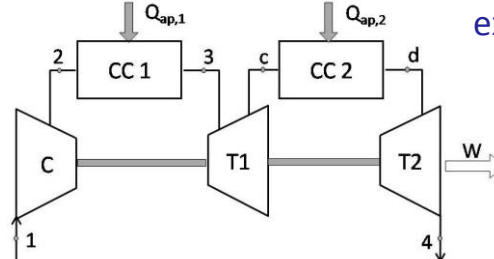
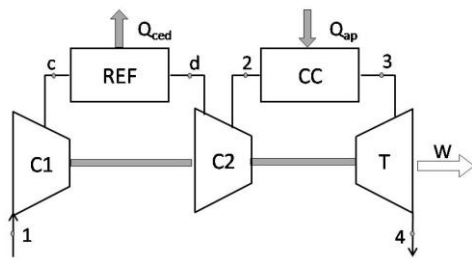
- Las pérdidas de carga en el regenerador (ambos lados) reducen el trabajo específico del ciclo.
- Si se diseña para máximo rendimiento, la menor relación de compresión provoca una disminución del trabajo específico del ciclo.
- Aumenta el peso de la instalación por la existencia del intercambiador.
- El coste de la planta aumenta.
- Problemas de mantenimiento: riesgo de obstrucción en el lado del gas, incremento de la pérdida de carga por ensuciamiento, etc.



## Ciclo compuesto de la turbina de gas

El objetivo del ciclo compuesto con compresión y/o expansión escalonada es reducir el trabajo de compresión y/o incrementar el trabajo de expansión para, en ambos casos, incrementar el trabajo específico del ciclo.

Ciclo compuesto. ALSTOM GT24/GT26: Turbina con expansión escalonada (combustión secuencial).



Ciclo compuesto con  
compresión escalonada

Ciclo compuesto con  
expansión escalonada

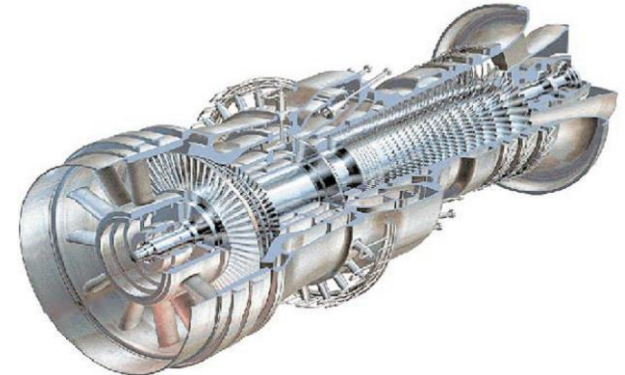


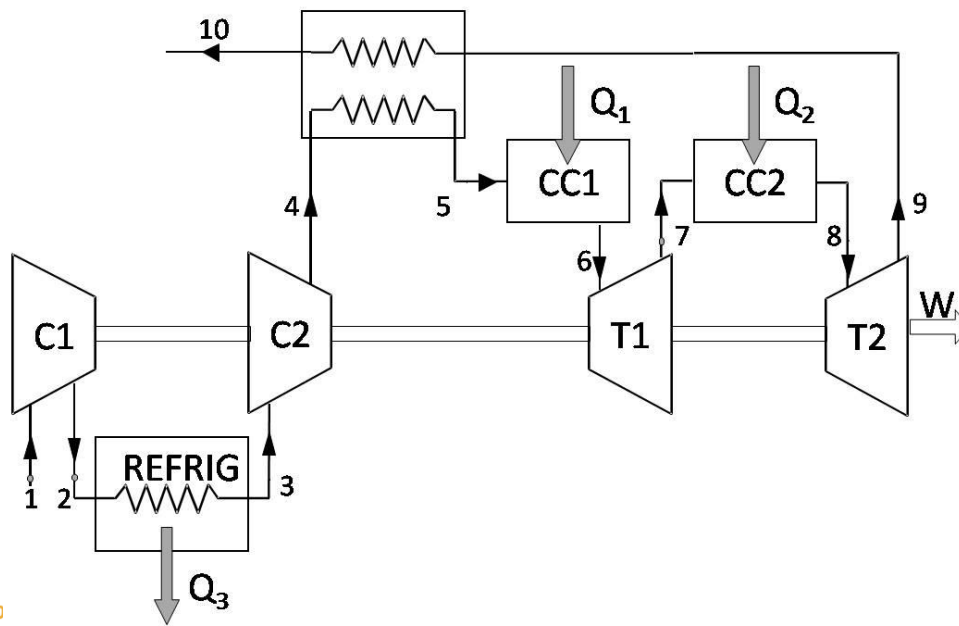
Table 2. GT26 data (at 150 conditions, natural gas)

Gross output* (MW)	241
Gross efficiency (%)	38.2
Compressor pressure ratio	30
Exhaust mass flow (kg/s)	543
Exhaust temperature (°C)	610
Shaft speed (r/min)	3000
NO <sub>x</sub> emissions (ppm)	<25
	(natural gas 15% O <sub>2</sub> )
Number of stages:	
Compressor	22
Turbine	5
Number of combustors	2
Dimensions (m)	
Length	12.3
Width	5
Height	5.5
Weight (approx.)(t)	335

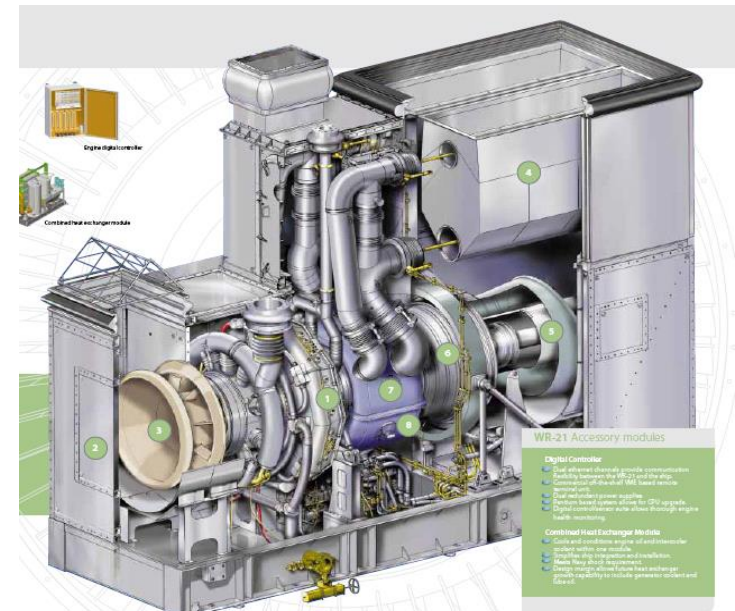
\*At the generator terminals

## Ciclo compuesto regenerativo de la turbina de gas

- El ciclo compuesto favorece el uso de regeneración para aumentar el rendimiento ya que, respecto del ciclo simple:
  - En el ciclo con compresión escalonada la temperatura de salida del compresor es menor.
  - En el ciclo con expansión escalonada la temperatura de salida de la turbina es mayor.
- De este modo se puede obtener simultáneamente un aumento de trabajo específico (ciclo compuesto) y de rendimiento (ciclo regenerativo).



ROLLS ROYCE WR-21: Turbina de gas regenerativa con compresión escalonada



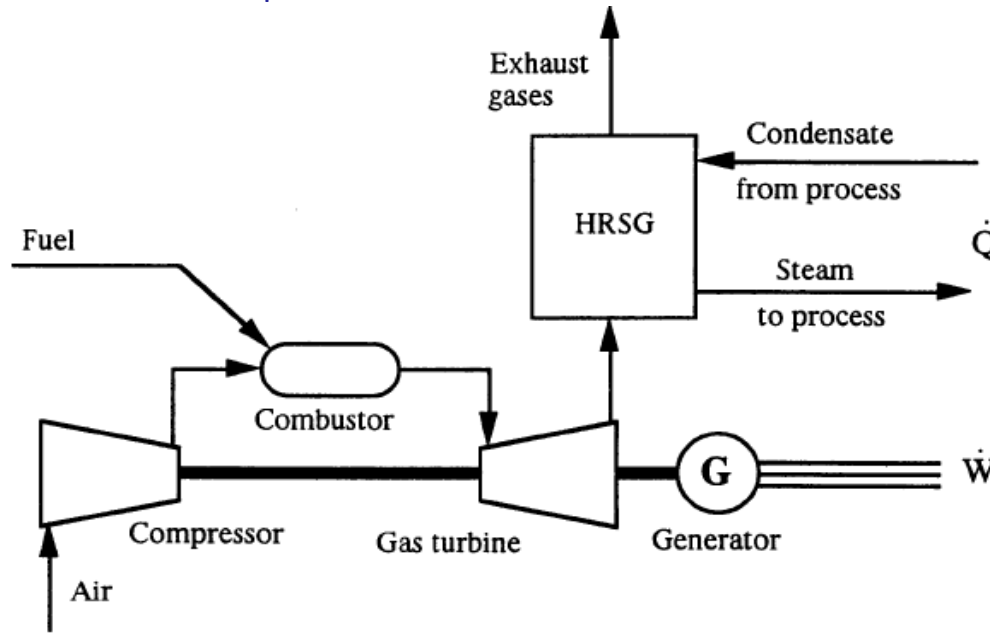


## Turbina de gas. Aplicaciones a la cogeneración

- Las turbinas de gas, ya sea en un ciclo simple o en un ciclo combinado son la tecnología más frecuentemente utilizada en los sistemas de cogeneración recientes de potencia media a alta.
- Su producción de energía eléctrica oscila entre unos cientos de kw a varios cientos de mw.
- Microturbinas: en investigación y desarrollo.
- Gases de escape con alta potencia térmica:
- Debido al relativo bajo rendimiento térmico y a la gran cantidad de exceso de aire requerido para asegurar una temperatura aceptable a la entrada de la turbina
- Posibilidad de recuperar dicho calor residual
- En general, son capaces de arranques más rápidos y respuesta rápida a variación de la carga.
- Turbinas de aplicación industrial y aeroderivadas: se han utilizado con éxito para la cogeneración teniendo como principales ventajas:
  - Bajo costo inicial,
  - Alta disponibilidad,
  - Mantenimiento rápido y de bajo costo,
  - Variedad de combustible y cambio,
  - Calor de alta calidad que puede recuperarse fácilmente
  - Altos rendimientos para grandes tamaños
  - Disponibilidad comercial de unidades empaquetadas que diversifica su aplicación

## Turbina de gas de ciclo abierto. Aplicaciones a la cogeneración

- El valor relativamente bajo del rendimiento térmico, conjuntamente con la gran cantidad de exceso de aire requerido para asegurar una temperatura aceptable a la entrada de la turbina, origina un importante contenido energético en los gases de escape y la posibilidad de recuperar el calor residual.
- Los gases de escape salen de la turbina a una temperatura considerable (450-600 °C), lo que hace que la recuperación de calor a alta temperatura sea ideal.



## Turbina de gas de ciclo abierto. Aplicaciones a la cogeneración

- Producción de vapor de alta calidad (presión y temperatura):
  - Mediante una caldera de recuperación de calor de presión simple o doble presión, para una recuperación más eficiente de calor. La triple presión también es posible, pero no muy habitual, porque hace que el sistema sea más complejo y costoso, lo que no siempre está justificado.
  - El vapor producido puede tener alta calidad (alta presión y temperatura), lo que lo hace apropiado
    - para procesos térmicos
    - también para impulsar una turbina de vapor, produciendo potencia adicional: Ciclo Combinado
- En lugar de producir vapor, los gases de escape a la salida de la turbina se pueden usar directamente en ciertos procesos térmicos, como calentamiento y secado a alta temperatura.
- Para cualquier aplicación, es posible aumentar la potencia térmica y la temperatura de los gases de escape por combustión suplementaria.
  - se instalan quemadores en la caldera de gases de escape, que utilizan combustible adicional
  - Usualmente no hay necesidad de aire adicional, ya que el contenido de oxígeno en los gases de escape es significativo.

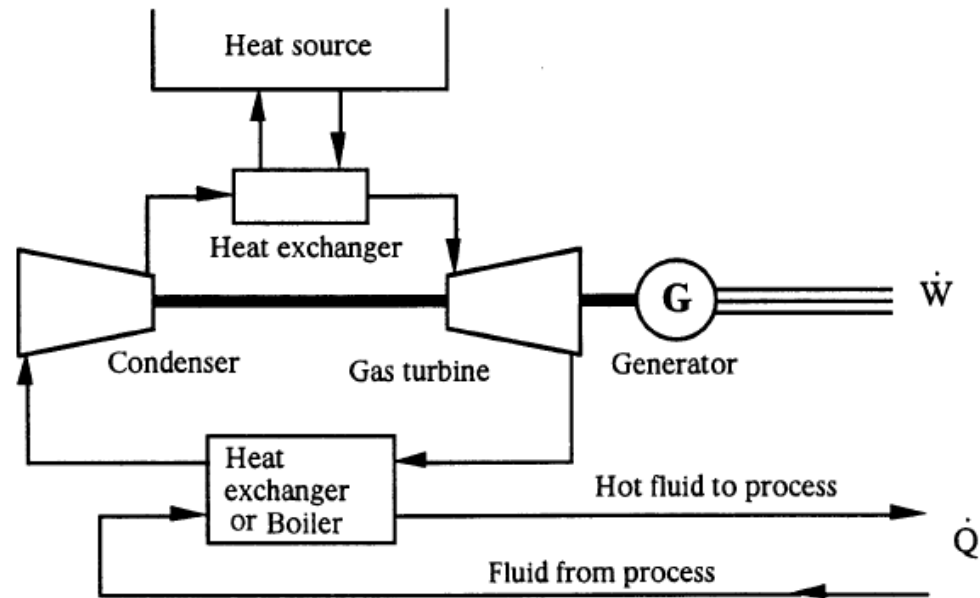
## Turbina de gas de ciclo abierto. Aplicaciones a la cogeneración

- Los sistemas de cogeneración con turbinas de gas de ciclo abierto tienen una potencia de salida eléctrica generalmente en el rango de 100 kW -100 MW, sin excluir valores fuera de este rango.
- Se puede usar una variedad de combustibles: gas natural, destilados ligeros de petróleo (por ejemplo, gasóleo, diésel), productos de gasificación de carbón. Se está investigando el uso de destilados de petróleo más pesados (fueloil) en mezclas con otros más ligeros, y podría resultar exitoso. En general utilizan como combustible gas natural o destilados de gran calidad.
- Se puede usar como combustibles los gases asociados al craqueo catalítico de hidrocarburos en las refinerías de petróleo. Sin embargo, se debe prestar atención al hecho de que los álabes de la turbina están expuestos directamente a los gases de escape. En consecuencia, los productos de la combustión no deben contener sustancias que causen corrosión (como compuestos químicos de sodio (Na), potasio (K), calcio (Ca), vanadio (Va), azufre (S)) o erosión (partículas sólidas más grandes que cierto tamaño). Para evitar estos efectos, es posible que se necesite tratamiento de combustible o tratamiento de gases de escape antes de que entren en la turbina.

## Turbina de gas de ciclo abierto. Aplicaciones a la cogeneración

- El tiempo de instalación para los sistemas de cogeneración de turbinas de gas de hasta 7 MWe es de aproximadamente 9 -14 meses, y puede alcanzar los dos años para sistemas más grandes.
- La fiabilidad y la disponibilidad media anual de los sistemas de turbinas de gas que queman gas natural son comparables a los de los sistemas de turbinas de vapor.
- Los sistemas que queman combustibles líquidos o subproductos gaseosos de procesos químicos pueden requerir inspecciones y mantenimiento más frecuentes, lo que resulta en una menor disponibilidad
- El ciclo de vida es de 15-20 años y puede verse gravemente afectado por un combustible de baja calidad o un mantenimiento deficiente.

## Turbina de gas de ciclo cerrado. Aplicaciones a la cogeneración



## Turbina de gas de ciclo cerrado. Aplicaciones a la cogeneración

- En el sistema de ciclo cerrado, el fluido de trabajo (generalmente helio o aire) circula en un circuito cerrado. Se calienta en un intercambiador de calor antes de entrar a la turbina, y se enfría después de la salida de la turbina, liberando calor útil. Por lo tanto, el fluido de trabajo permanece limpio y no causa corrosión o erosión
- Pocos problemas de corrosión y desgaste: es la principal ventaja de las TG de combustión externa pues a través de sus componentes no circulan los productos de la combustión
- La fuente de calor puede ser la combustión externa de cualquier combustible: carbón, gas de horno alto, desechos urbanos o industriales, energía nuclear o energía solar....etc
- A pesar de esta flexibilidad en la utilización de combustibles, la mayor complejidad de la máquina, juntamente con la necesidad del control de las emisiones, como consecuencia de la combustión de combustibles de inferior calidad, da lugar a unas inversiones mucho mayores que para las TG de combustión interna. En consecuencia, estas TG de ciclo cerrado se utilizan para instalaciones de grandes potencias.
- Los sistemas de este tipo con una potencia de salida de 2 a 50 MWe en Europa y Japón (pocas)

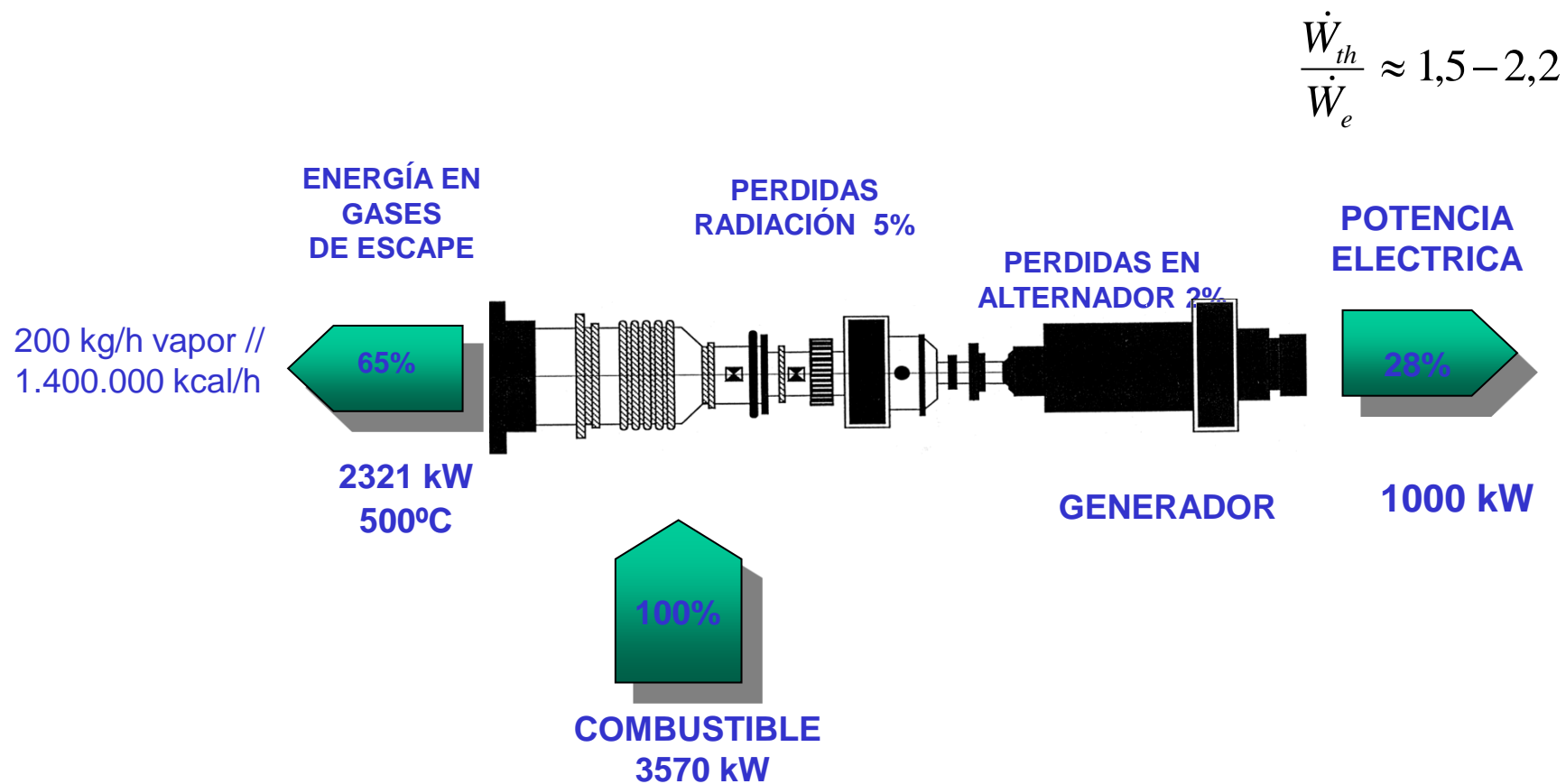
Por experiencia, se espera que la fiabilidad de los sistemas de ciclo cerrado sea al menos igual a la de los sistemas de ciclo abierto, mientras que se espera que la disponibilidad sea mayor gracias al fluido de trabajo limpio.

## Instalaciones de cogeneración con TG

- Esquemas de configuración típicos en aplicaciones de cogeneración de TG son:
  - Los gases de escape se utilizan directamente en un proceso de secado
  - La energía de los gases se utiliza en un generador de calor residual para producir vapor a proceso
  - La energía de los gases se utiliza en un generador de calor residual para accionar una máquina frigorífica de absorción
  - Ciclo Combinado (no se considera ya como cogeneración, sino como sistema de potencia por sí solo)
- También, en lugar de generar electricidad, la energía mecánica de la TG se puede utilizar directamente para accionar bombas, o compresores centrífugos, etc; (estas aplicaciones son menos frecuentes)
- En una instalación de cogeneración con turbina de gas el funcionamiento puede ser:
  - siguiendo la demanda térmica
  - siguiendo la demanda eléctrica } aumentan los costos de operación, reduciéndose la vida media del sistema
- trabajando continuamente a plena potencia:
  - si se genera más calor que el demandado, el exceso de gases de escape se disipa directamente a la atmósfera. Para reducir esta pérdida se pueden instalar dos turbinas, una funcionando en continuo y otra en modo intermitente. Cuando se genera menos calor que el demandado, es necesario un generador de calor (de vapor si así se demanda).



## Esquema Turbina de Gas



# Termodinámica de los sistemas de cogeneración de TG.

## Eficiencia y PHR a potencia nominal

- Rendimiento eléctrico nominal de TG:
  - pequeñas a medianas suele oscilar entre el 25 y el 35%
  - grandes construidas recientemente : han alcanzado de 40 a 42%, debido a la alta temperatura de los gases de escape en la entrada de la turbina (1200-1400 °C)
- Rendimiento total típicamente está en el rango de 60 a 80%
- Relación de potencia a calor (PHR) está en el rango de 0,5 a 0,8 .
- Una parte importante de la salida de potencia de la turbina, que a menudo excede el 50%, se consume para impulsar el compresor, lo que resulta en un rendimiento eléctrico relativamente bajo (por ejemplo, en comparación con un motor alternativo de potencia similar).
- Ciclo compuesto: En casos de altas relaciones de compresión, se puede aplicar un enfriamiento intermedio del aire en una etapa intermedia de compresión, lo que reduce el trabajo requerido para la compresión
- Regeneración: se consigue un aumento significativo del rendimiento eléctrico por precalentamiento del aire con gases de escape. En tal caso, el calor recuperable de los gases de escape después del regenerador disminuye y el valor de PHR aumenta.

Para CC y cogeneración de TG el uso de un precalentador de aire por regeneración no está justificado

## Termodinámica de los sistemas de cogeneración de TG.

### Eficiencia y PHR a potencia nominal

- El máximo calor recuperable depende del límite inferior de la temperatura de salida de los gases de escape. Si el combustible contiene azufre, la temperatura del gas de escape no puede ser inferior a 140-165 °C, para evitar el punto de rocío del ácido sulfúrico. Si el combustible está prácticamente libre de azufre, como es el caso del gas natural, la temperatura del gas de escape puede ser tan baja como 90-100 °C.
- Si el calor recuperable:
  - es mayor que la demandada térmica: el exceso se disipa directamente a la atmósfera. Con el fin de reducir esa pérdida, se pueden instalar dos turbinas, una funcionando en continuo y la otra en modo intermitente.
  - no cubre la demanda térmica: será necesario un generador de vapor auxiliar, si la demanda es de vapor, para compensar ese déficit.

# Termodinámica de los sistemas de cogeneración de TG.

## Efecto de las condiciones ambientales en la potencia y en el rendimiento

### CONDICIONES AMBIENTALES:

- El rendimiento térmico de una TG es función de los parámetros de diseño: relación de compresión, temperatura de entrada a la turbina, combustible utilizado, etc... y además, depende también de las condiciones ambientales en que opera, fundamentalmente de la temperatura ambiental y de la altitud.
- El aire entra al compresor en condiciones ambientales. Esta temperatura y densidad del aire inicial determina la cantidad de trabajo requerido para la compresión, el combustible que se puede quemar, el combustible requerido para lograr una temperatura de entrada de la turbina específica. Como resultado, la potencia de salida neta, la eficiencia, el caudal del gas de escape y la temperatura en la salida de la turbina (en consecuencia, el calor recuperable) son funciones de las condiciones ambientales, con gran influencia
- La potencia de la turbina disminuye a medida que aumenta la temperatura ambiente o la altitud, puede disminuir en aproximadamente un 2 -4% por cada 300 m de aumento de altitud.

# Termodinámica de los sistemas de cogeneración de TG.

## Efecto de la carga parcial en la potencia y en el rendimiento

### FUNCIONAMIENTO A CARGA PARCIAL:

Afecta a la turbina de gas de dos maneras:

- Conforme la carga disminuye, el rendimiento térmico disminuye, aumentando la relación combustible utilizado / energía eléctrica producida, de forma que cada kWh producido implica un mayor coste de combustible.
- Por otra parte, la temperatura de escape y el caudal másico de gases disminuyen. No obstante, este efecto es parcialmente compensado por el aumento del calor que supone la disminución del rendimiento térmico

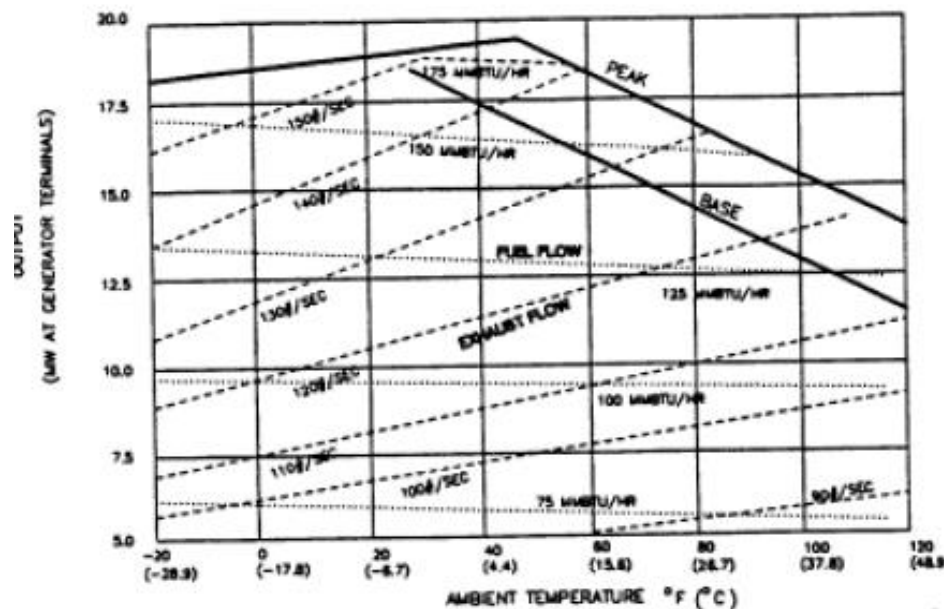
El resultado final de la operación a carga parcial puede significar un aumento importante en los costes de la electricidad generada.

## Termodinámica de los sistemas de cogeneración de TG.

### Efecto de la carga parcial en la potencia y en el rendimiento

La carga parcial tiene un fuerte efecto sobre el rendimiento: la disminución de la carga causa una disminución en el rendimiento eléctrico.

El fabricante proporciona un mapa de rendimiento que muestra la relación entre la temperatura ambiente, la capacidad, la energía requerida de combustible y la carga.



## Termodinámica de los sistemas de cogeneración de TG. Efecto de la carga parcial en la potencia y en el rendimiento

TEMPERATURA (°C)	5	10	18	18	20	25	35	35	26	18	10	8
MES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

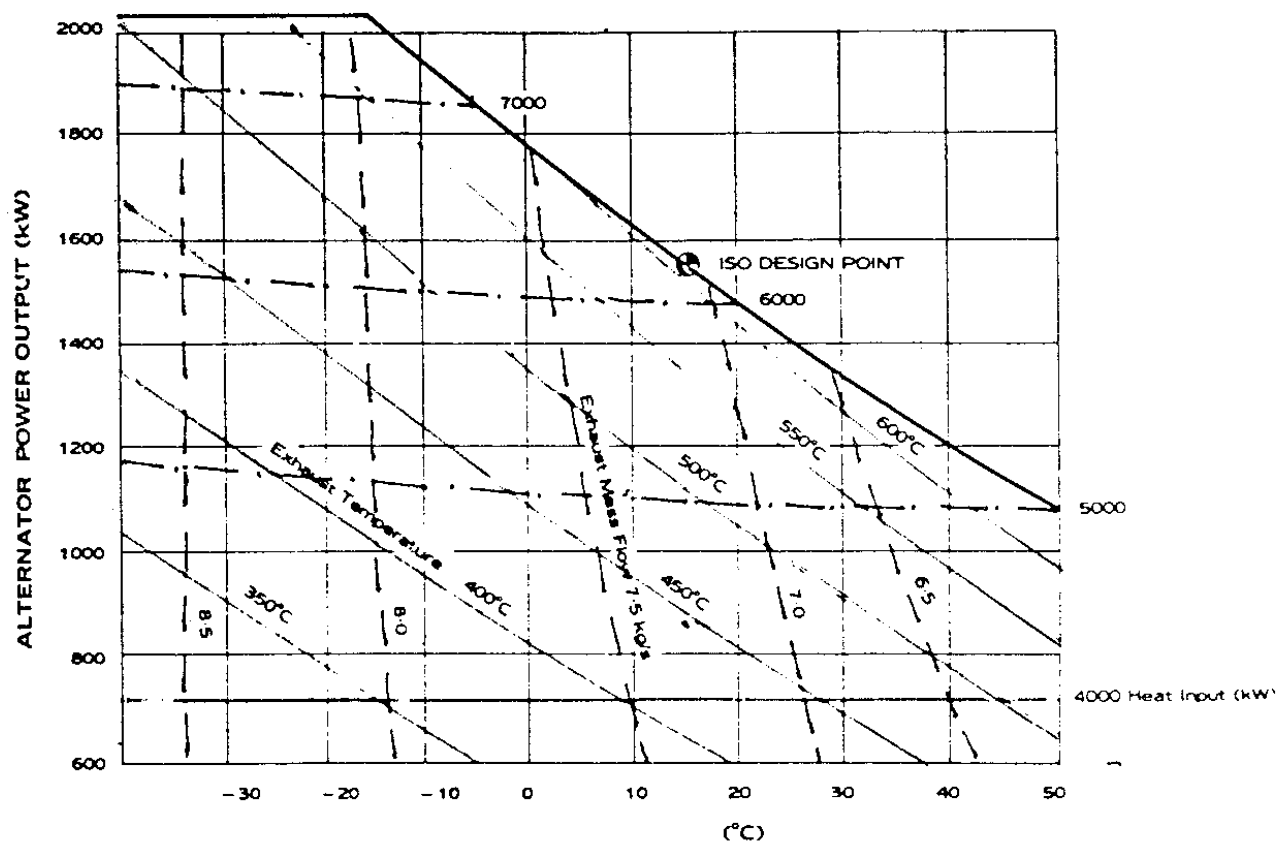


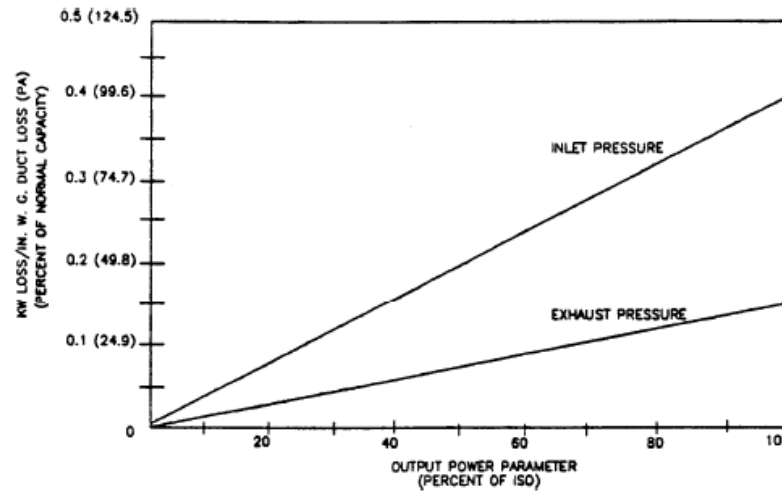
Fig. 4.12

## Termodinámica de los sistemas de cogeneración de TG.

### Efecto de las condiciones ambientales y la carga parcial en la potencia y en el rendimiento

Los fabricantes normalmente especifican la potencia de salida y el rendimiento de una turbina de gas en condiciones estándar ISO: 15 °C, 60% de humedad relativa, a nivel del mar.

Además, el rendimiento se especifica típicamente sin pérdidas de presión en los conductos de entrada y salida.



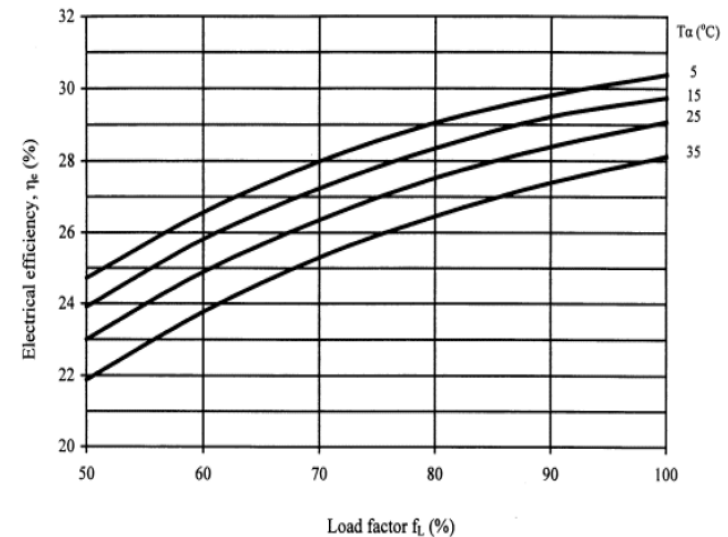
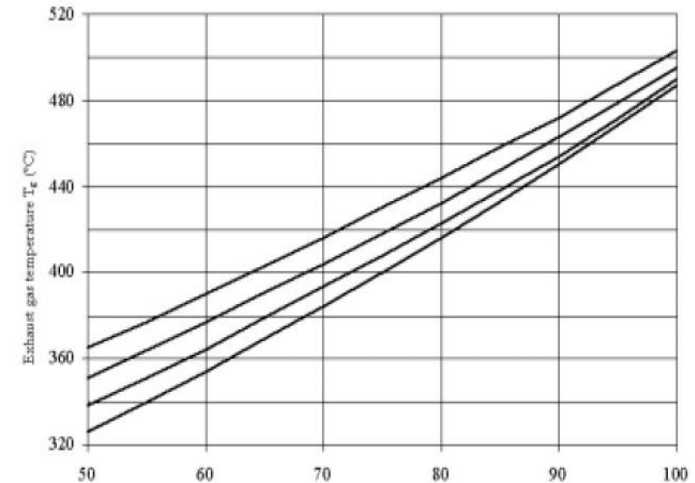
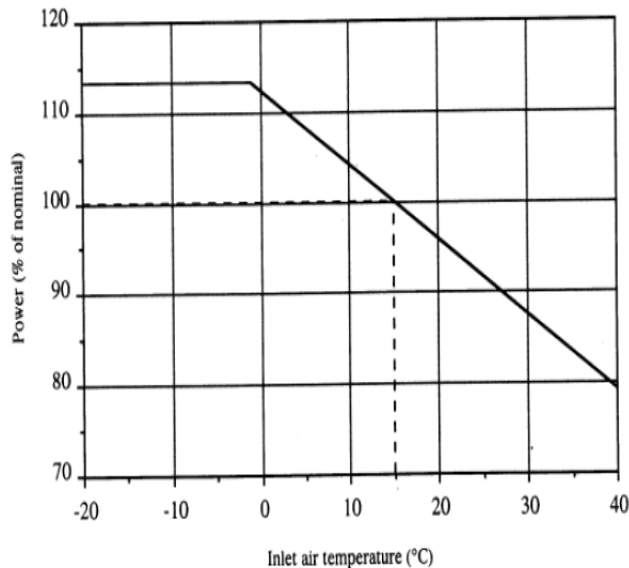
Efecto de las pérdidas de presión en turbinas típicas de eje único



## Termodinámica de los sistemas de cogeneración de TG.

### Efecto de las condiciones ambientales y la carga parcial en la potencia y en el rendimiento

Alternativamente, pueden proporcionarse otros gráficos



## Termodinámica de los sistemas de cogeneración de TG. Efecto de las condiciones ambientales y la carga parcial en la potencia y en el rendimiento

Si un sistema de turbina de gas debe operar durante largos períodos de tiempo en un ambiente de alta temperatura, la refrigeración del aire de entrada puede ser económicamente viable.

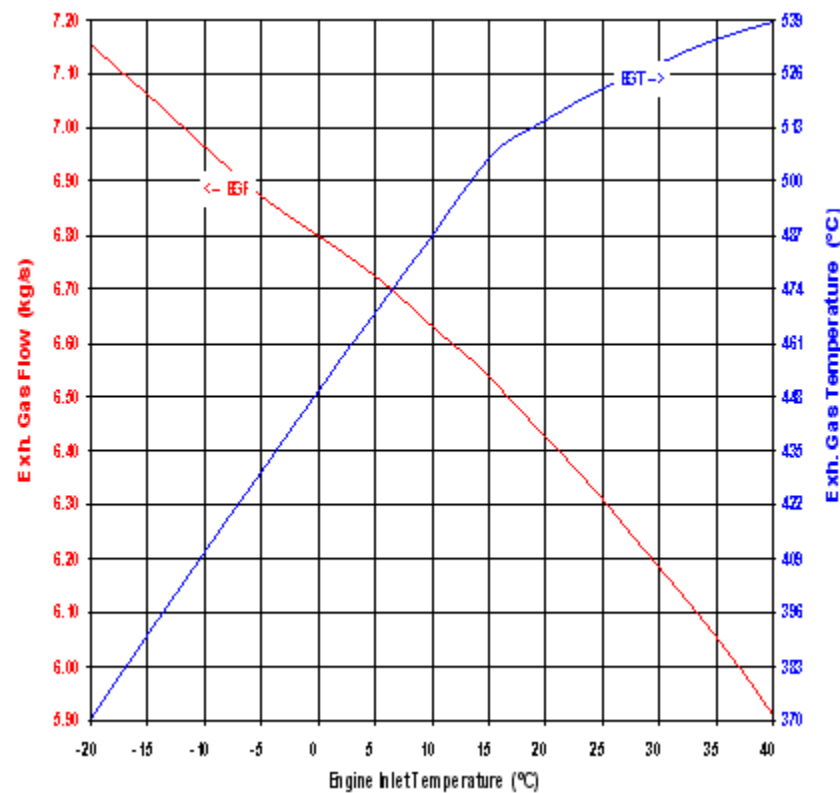
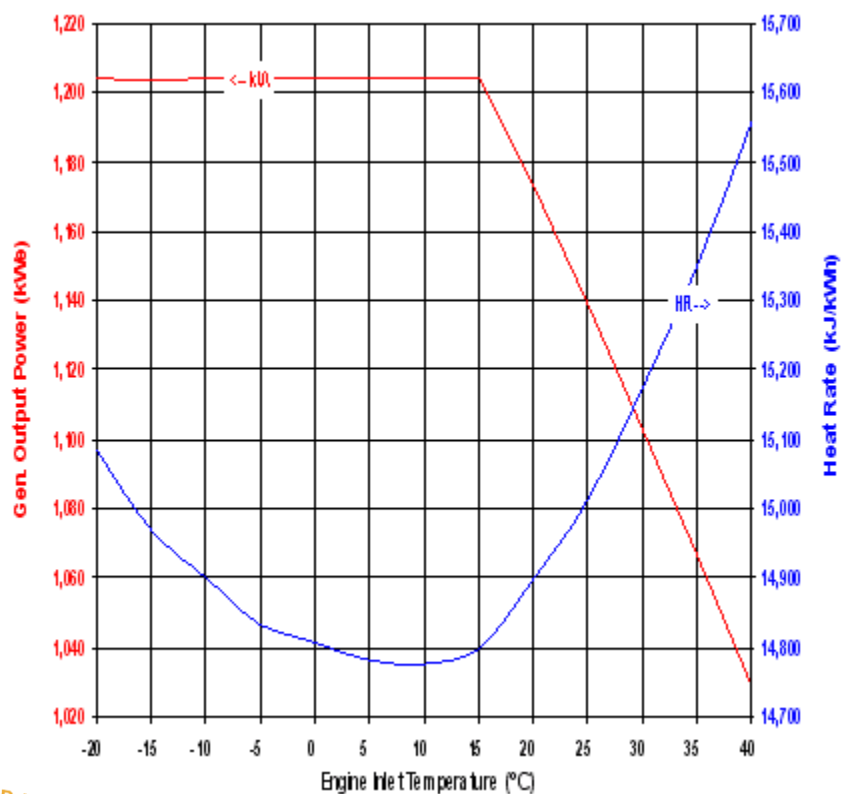
Se pueden usar enfriadores mecánicos, evaporativos o de absorción; la elección final será dictada por un estudio de viabilidad.

Es interesante observar que los enfriadores de absorción pueden operar con el calor del gas de escape de la turbina como principal fuente de energía.

## Curva Característica de una TG

TURBINA DE GAS:

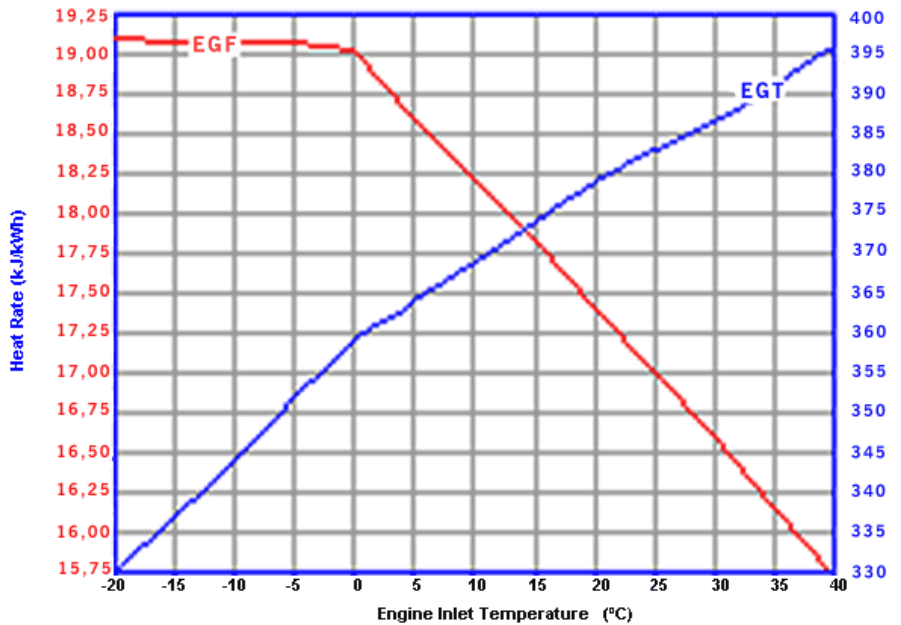
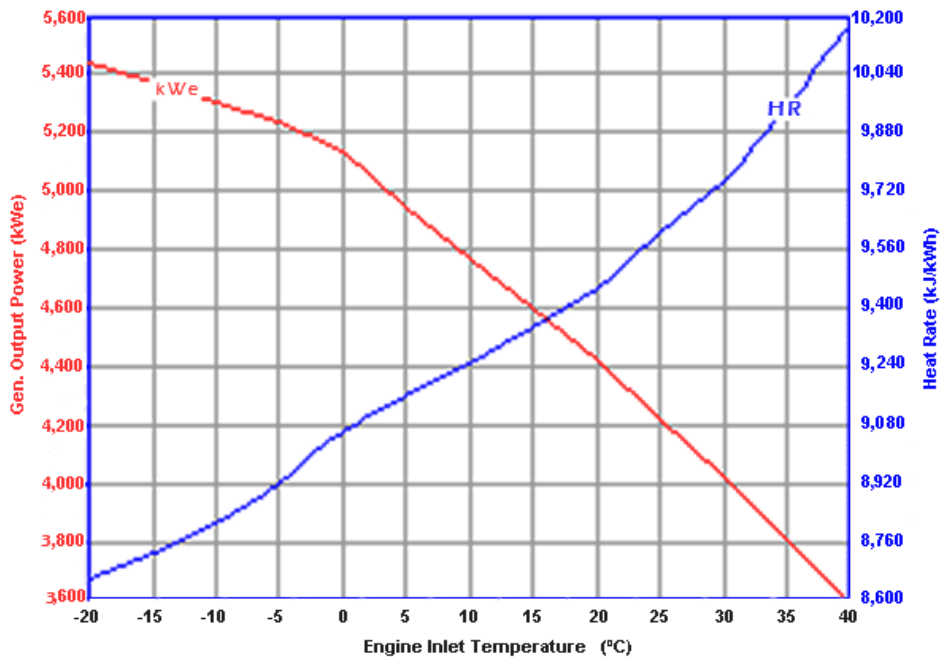
TURBOMACH SATURN 20



## Curva Característica de una TG

TURBINA DE GAS:

TURBOMACH MERCURY 50



## FUNCIONAMIENTO A CARGA PARCIAL:

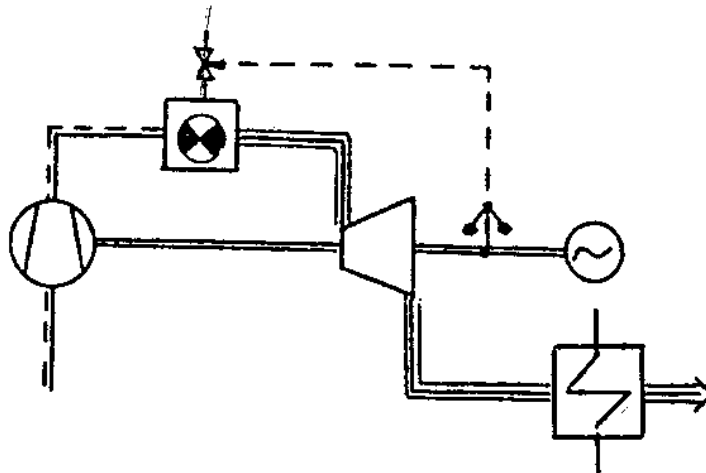
Afecta a la turbina de gas de dos maneras:

- Conforme la carga disminuye, el rendimiento térmico disminuye, aumentando la relación combustible utilizado / energía eléctrica producida, de forma que cada kWh producido implica un mayor coste de combustible.
- Por otra parte, la temperatura de escape y el caudal másico de gases disminuyen. No obstante, este efecto es parcialmente compensado por el aumento del calor que supone la disminución del rendimiento térmico

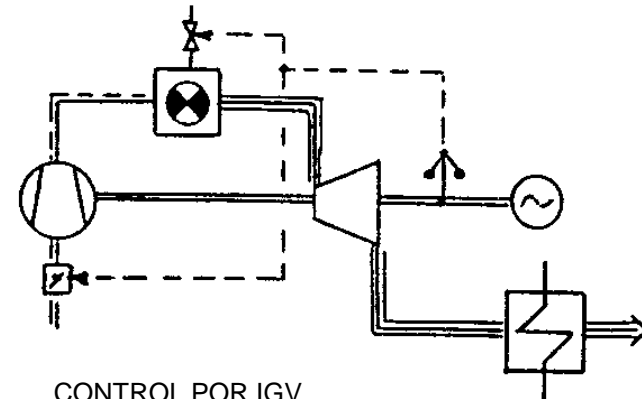
El resultado final de la operación a carga parcial puede significar un aumento importante en los costes de la electricidad generada.

## Regulación TG

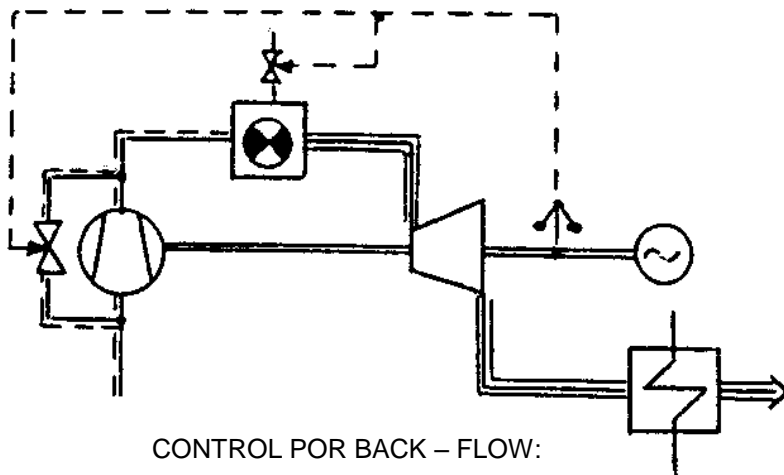
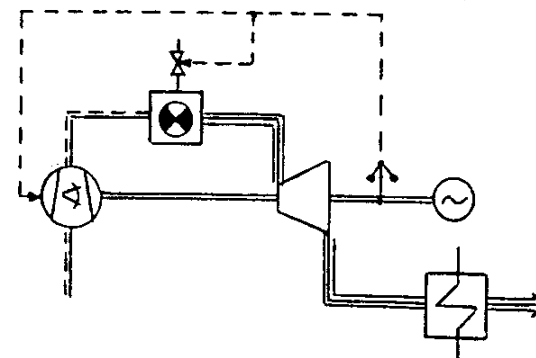
CONTROL POR TEMPERATURA ENTRADA TURBINA



CONTROL POR ESTRANGULAMIENTO ADMISION



CONTROL POR IGV



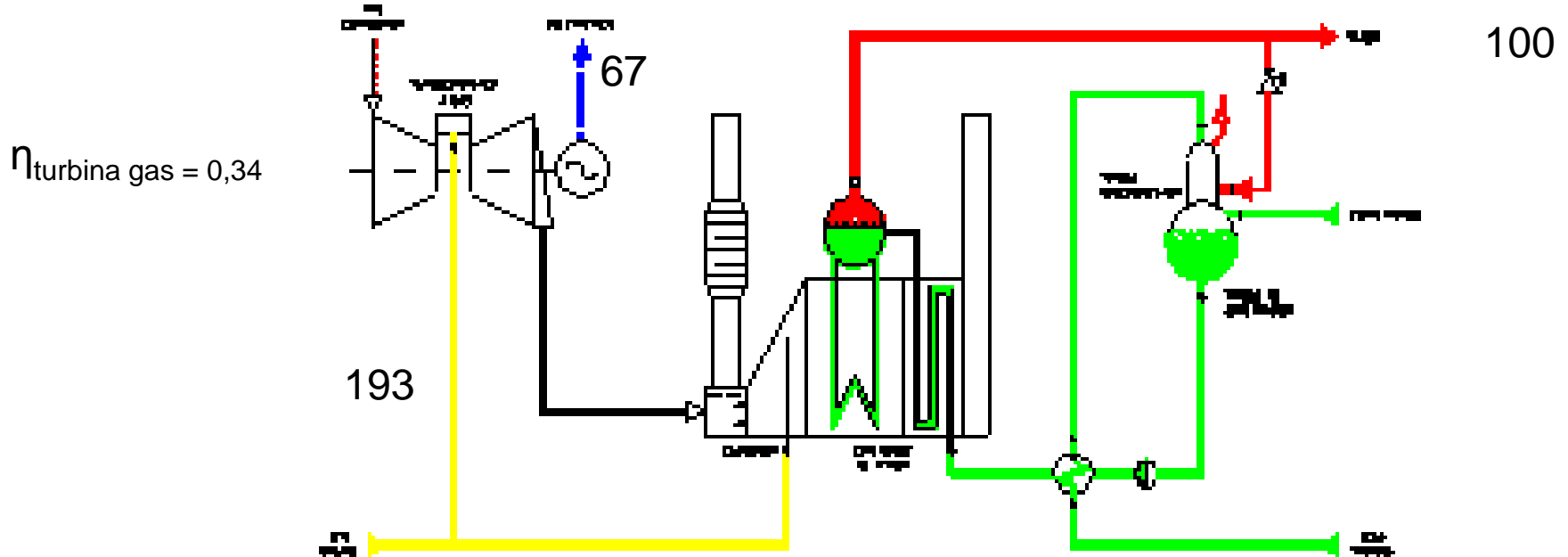
CONTROL POR BACK – FLOW:

5% BF --- 70% W

10% BF --- 35 % W

CONTROL POR ESTRANGULAMIENTO DESCARGA COMPRESOR

## Esquema de Cogeneración con Turbina de Gas



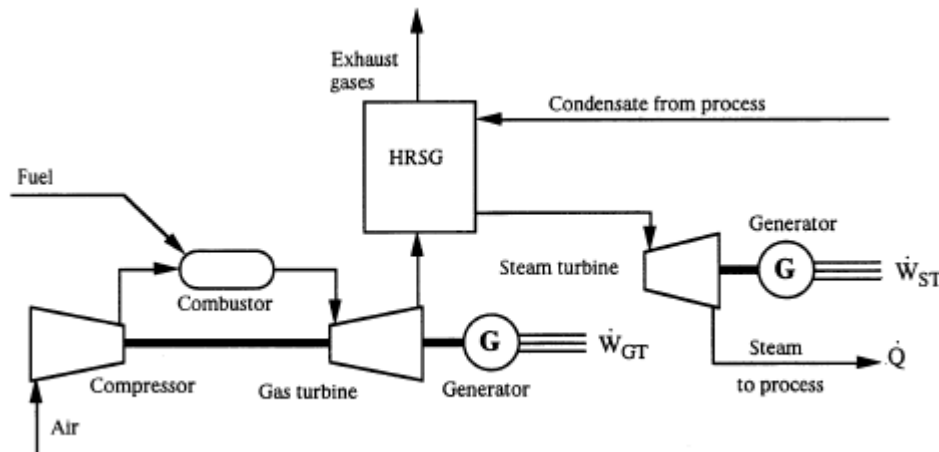
- La planta clásica de cogeneración es adecuada cuando los requisitos de vapor son importantes ( $> 10$  t/h). Esta situación se encuentra fácilmente en industrias de tipo alimentario, química y sobre todo en la papelera. Son plantas de gran fiabilidad y economía cuando están diseñadas correctamente para una aplicación determinada.
- *El diseño del sistema de recuperación de calor es crítico en este tipo de plantas, pues su economía está directamente ligada al mismo ya que a diferencia de las plantas con motores alternativos el precio del calor recuperado es esencial en un ciclo simple de turbina de gas.*
- El proceso clásico de regulación de una planta de cogeneración con TG consiste en evacuar gases a través del by-pass cuando la demanda de vapor es menor a la producción y utilizar la postcombustión cuando sucede lo contrario.

## Instalaciones de cogeneración con CC

- El término "ciclo combinado" se utiliza para sistemas que constan de dos ciclos termodinámicos, que están conectados con un fluido de trabajo y operan a diferentes niveles de temperatura. El ciclo de alta temperatura (ciclo de cabecera) cede el calor, que se recupera y utiliza por el ciclo de baja temperatura (ciclo de cola) para producir energía eléctrica (o mecánica) adicional, aumentando así la eficiencia eléctrica.

### CICLO COMBINADO TG – TV

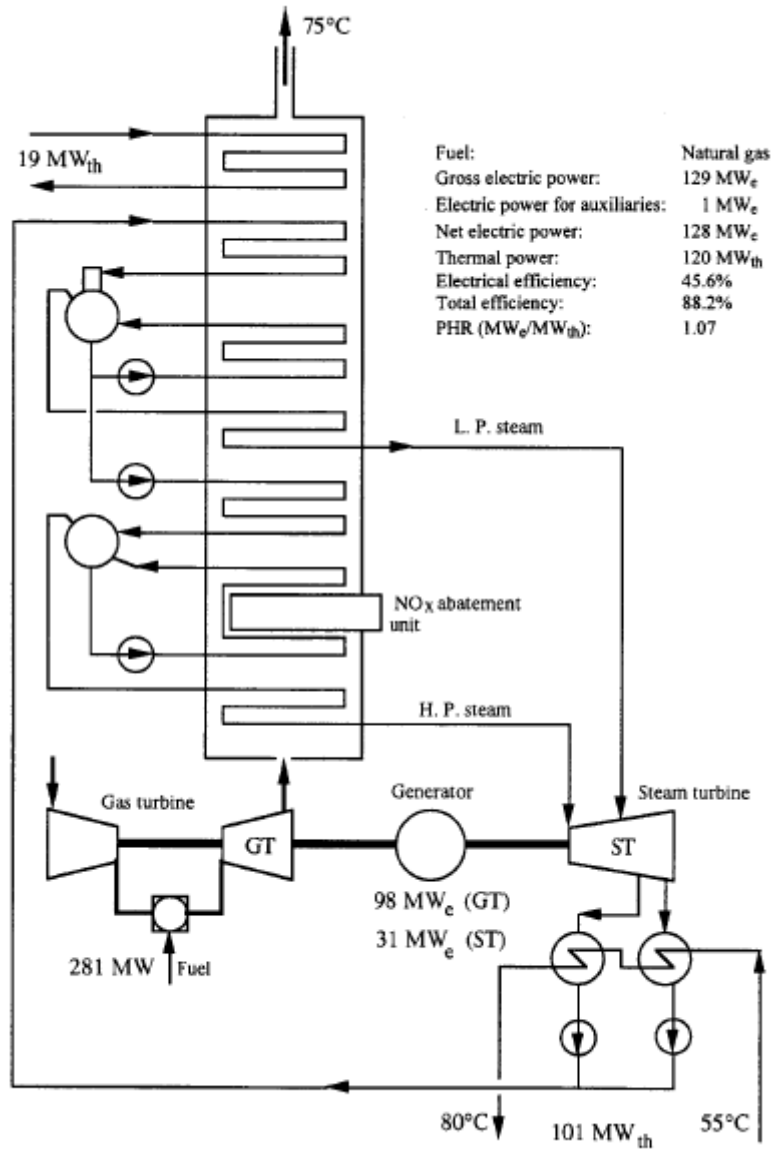
- Los más utilizados
- Las calderas de vapor de presión doble o triple mejoran la recuperación de calor y aumentan el rendimiento, pero hacen que el sistema sea más complejo; se usan en sistemas grandes.



Sistema de cogeneración con CC con turbina de contrapresión



## Instalaciones de cogeneración con CC



Sistema de cogeneración con CC con turbina de extracción / condensación

## Instalaciones de cogeneración con CC

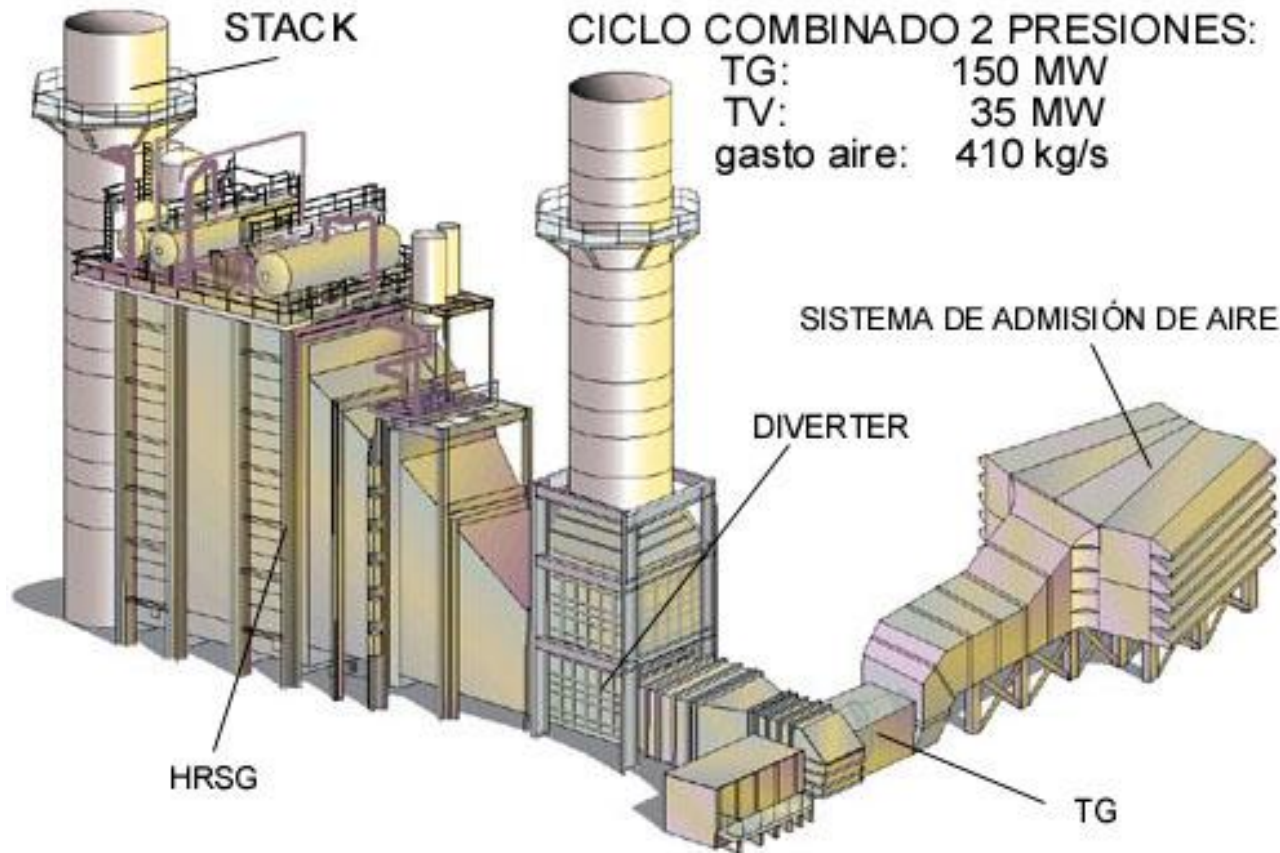
- La temperatura de vapor máxima posible sin combustión suplementaria es de 25-40 ° C más baja que la temperatura del gas de escape a la salida de la turbina de gas. Mientras que la presión del vapor puede alcanzar 80 bar.
- Si se requiere una temperatura y presión más altas, se usa una caldera de gas de escape con quemadores para quemar combustible suplementario.
- Generalmente no hay necesidad de aire suplementario, ya que los gases de escape contienen oxígeno a una concentración de 15-16%.
- Con combustión suplementaria, la temperatura del vapor puede acercarse a 540 ° C y la presión puede superar los 100 bar.
- La combustión suplementaria no solo aumenta la potencia de salida sino que también mejora su rendimiento a carga parcial.

## Instalaciones de cogeneración con CC

- Inicialmente, los CC se construyeron con potencia de salida media y alta (20-400 MW). Durante los últimos años, también se comenzaron a construir sistemas más pequeños (4-15 MW), mientras que hay una tendencia a disminuir aún más el límite de potencia
- La potencia específica de los CC es mayor que la del ciclo simple de la TG o la TV
- Con respecto a los combustibles utilizados, son válidos los utilizados para las TG
- El tiempo de instalación es de 2-3 años. Es importante tener en cuenta que se puede hacer en dos fases: primero se instala la TG, que puede estar listo para funcionar en 12-18 meses. Mientras la TG está en funcionamiento, se instala la TV.
- La fiabilidad de los CC es del 80-85%, la disponibilidad media anual es del 77-85% y el ciclo de vida económico es de 15-25 años.
- El rendimiento eléctrico está en el rango 35-45%, el rendimiento total es 70-88% y la relación de potencia a calor (PHR) es 0,6-2,0.
- El rendimiento eléctrico se puede aumentar aún más; de hecho, los CC actuales que solo producen energía eléctrica (sin calor para procesar) pueden tener eficiencias cercanas al 60%. Sin embargo, estos sistemas no califican como sistemas de cogeneración.

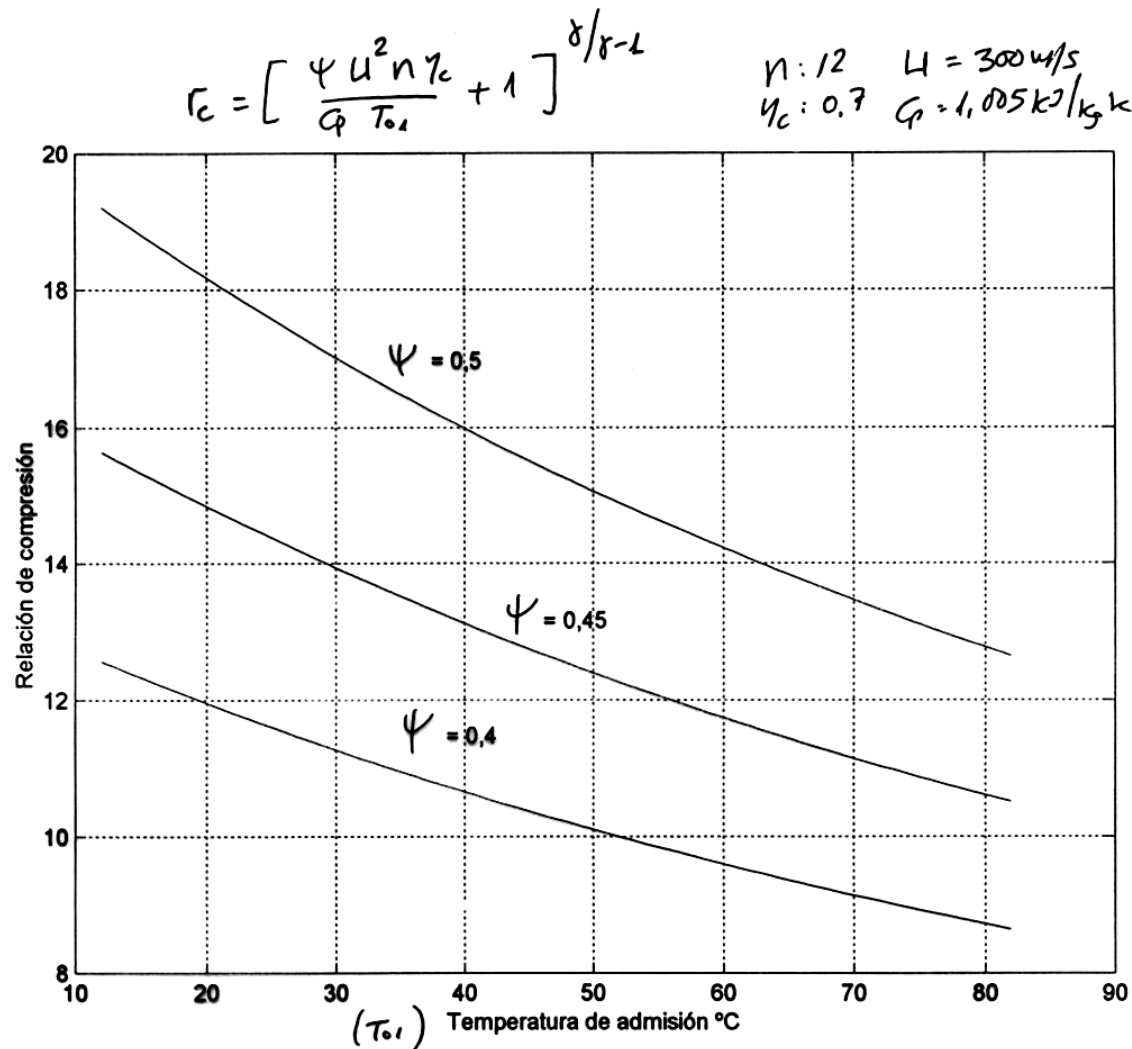
## EQUIPOS Y SISTEMAS AUXILIARES DE CC

SISTEMAS DE ADMISIÓN DE AIRE: Filtros de admisión



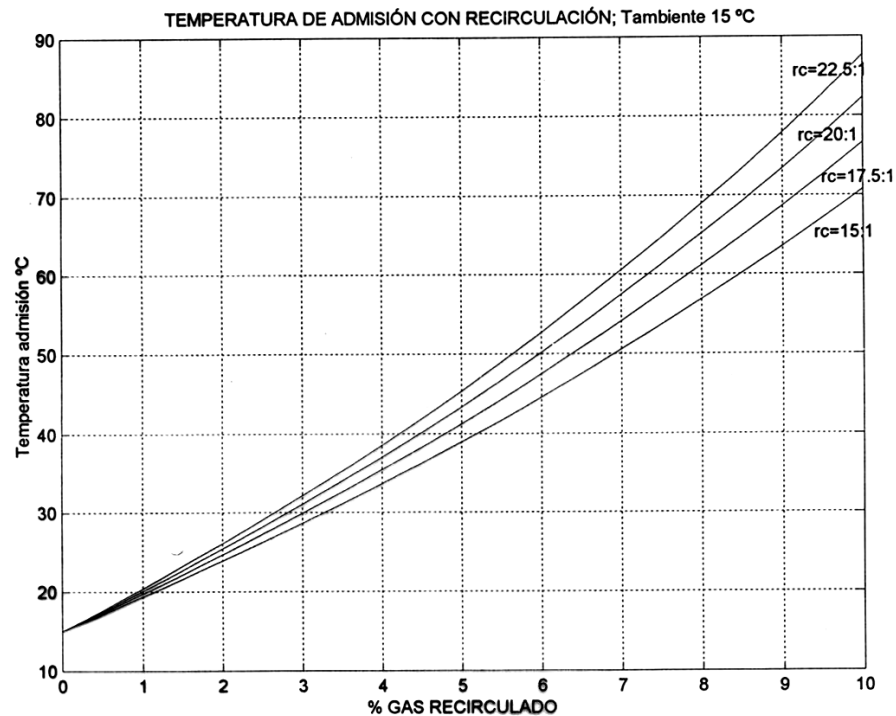
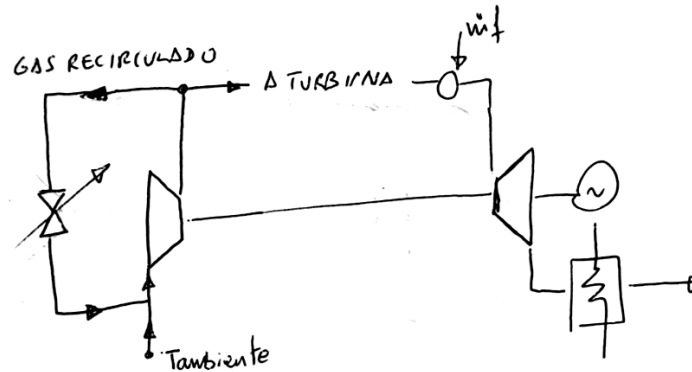
VELOCIDAD NORMAL DE ENTRADA AL SISTEMA ADMISIÓN: 1,4 – 1,8 m/s  
 VELOCIDAD NORMAL DE ENTRADA AL FILTRO: 0,012 – 0,015 m/s  
 PÉRDIDA DE CARGA TÍPICA EN LA ADMISIÓN: entre 70 y 100 mm.c.a. para su limpieza  
 EFECTO DEL  $\Delta P_{ADMISIÓN}$  SOBRE LAS PRESTACIONES DE LA GE MS7001EA:  
 $\Delta P_{ADMISIÓN} = 10 \text{ mbar} \dots \Delta P_{POTENCIA} = -1,42 \% \dots \Delta \eta = -0,45 \% \dots \Delta T_{SALIDA} 1,1 \text{ }^{\circ}\text{C}.$

## Efecto de la temperatura de admisión sobre la relación de compresión

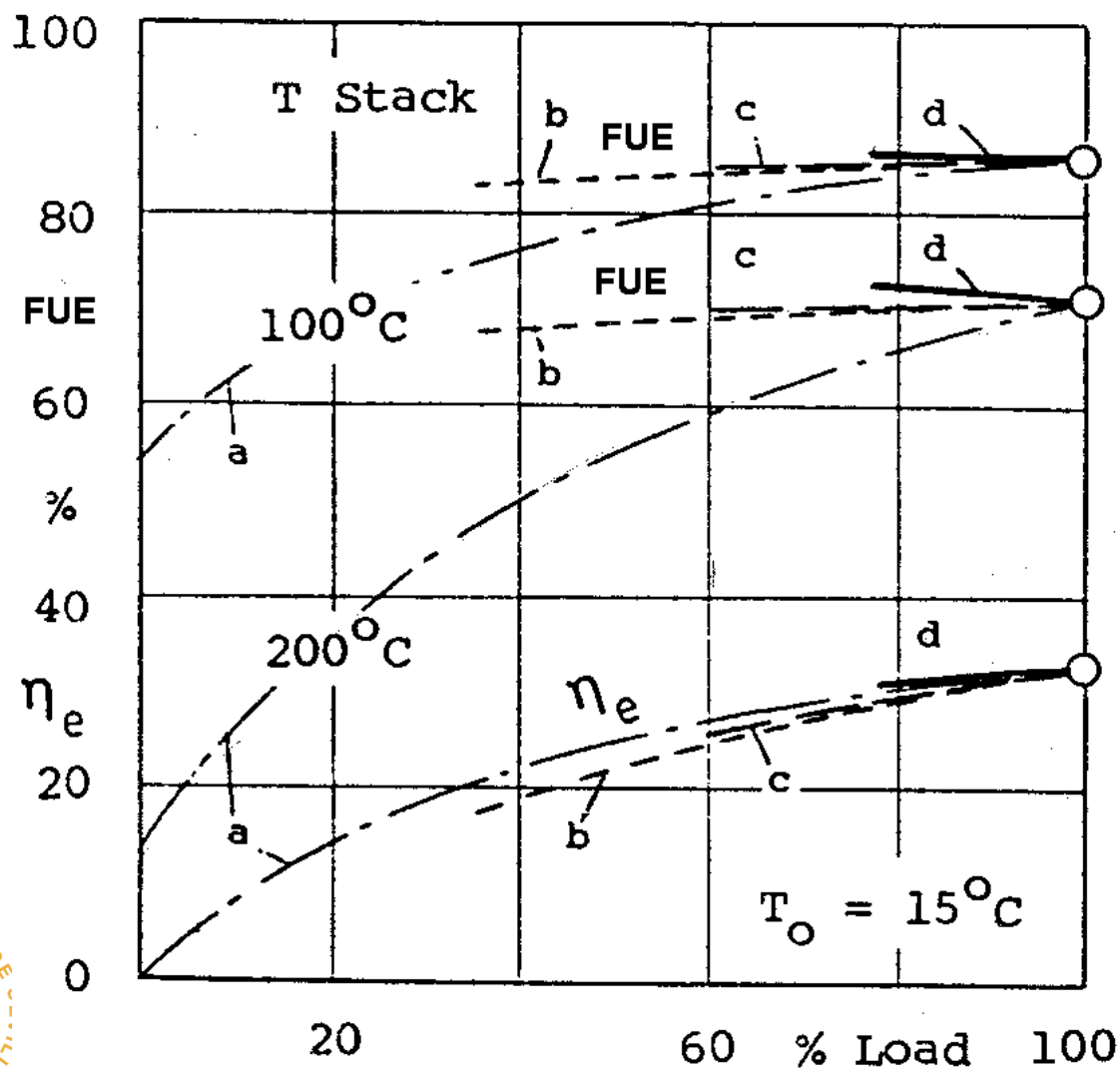


## Regulación CC

REGULACIÓN POR RECIRCULACIÓN GASES SOLIDOS COMPRESO.



## Regulación CC



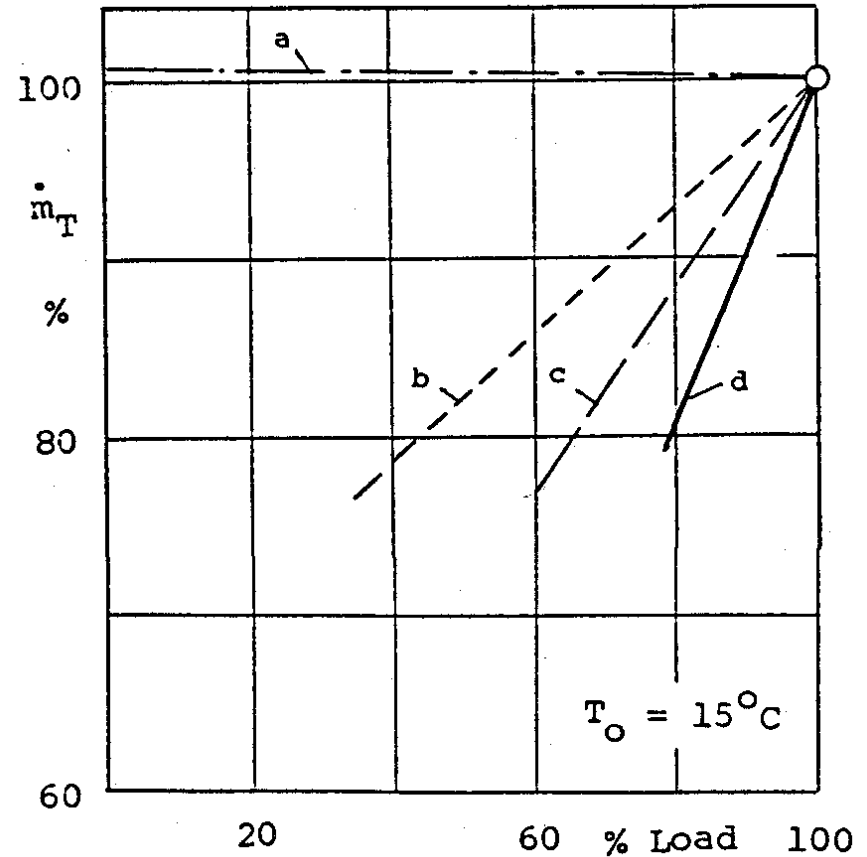
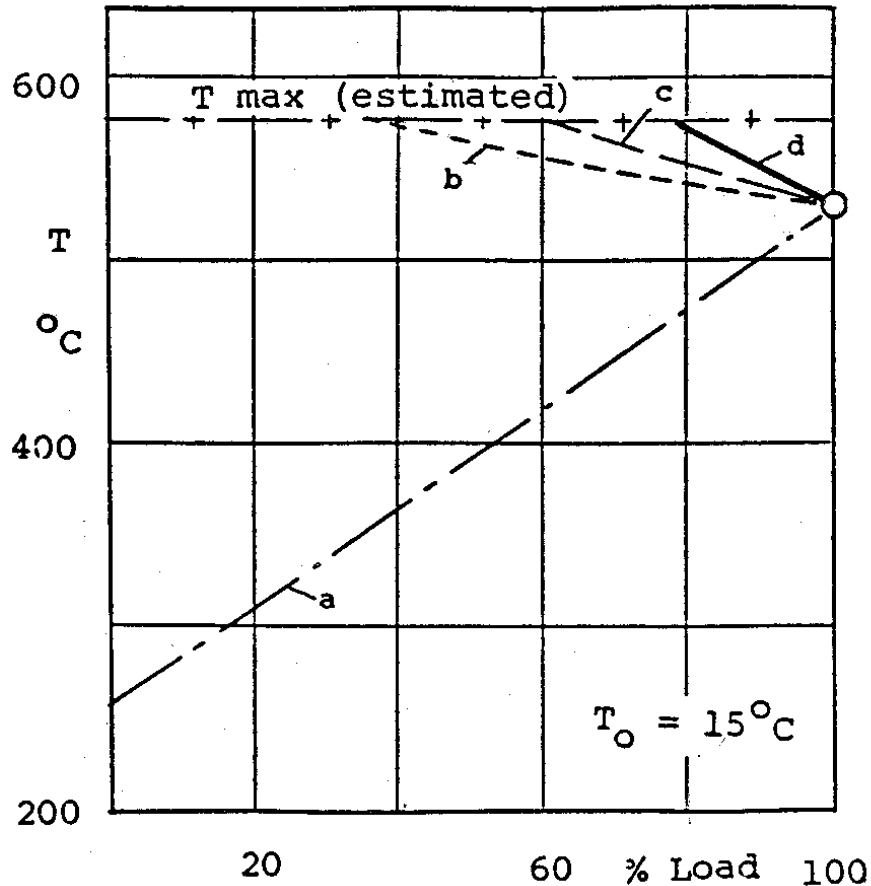
a: CONTROL POR TIT

b: CONTROL POR BACK FLOW

c: CONTROL POR ADMISIÓN

d: CONTROL POR IGV

## Regulación CC



a: CONTROL POR TIT

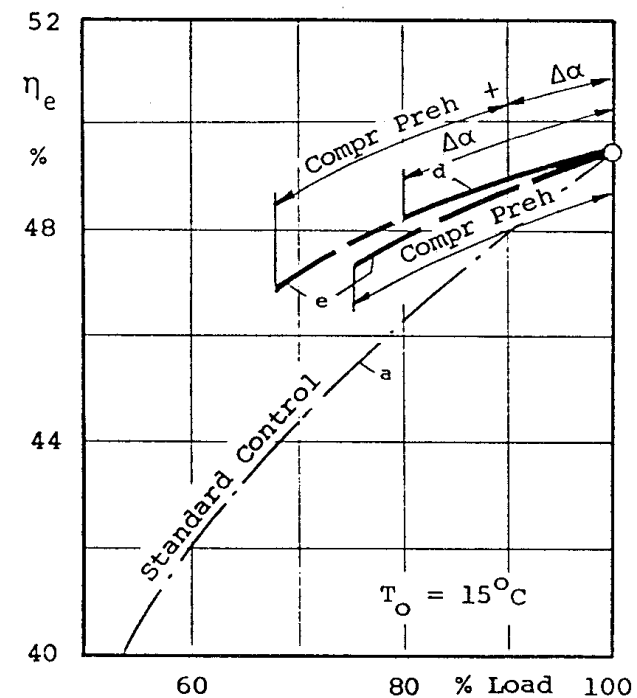
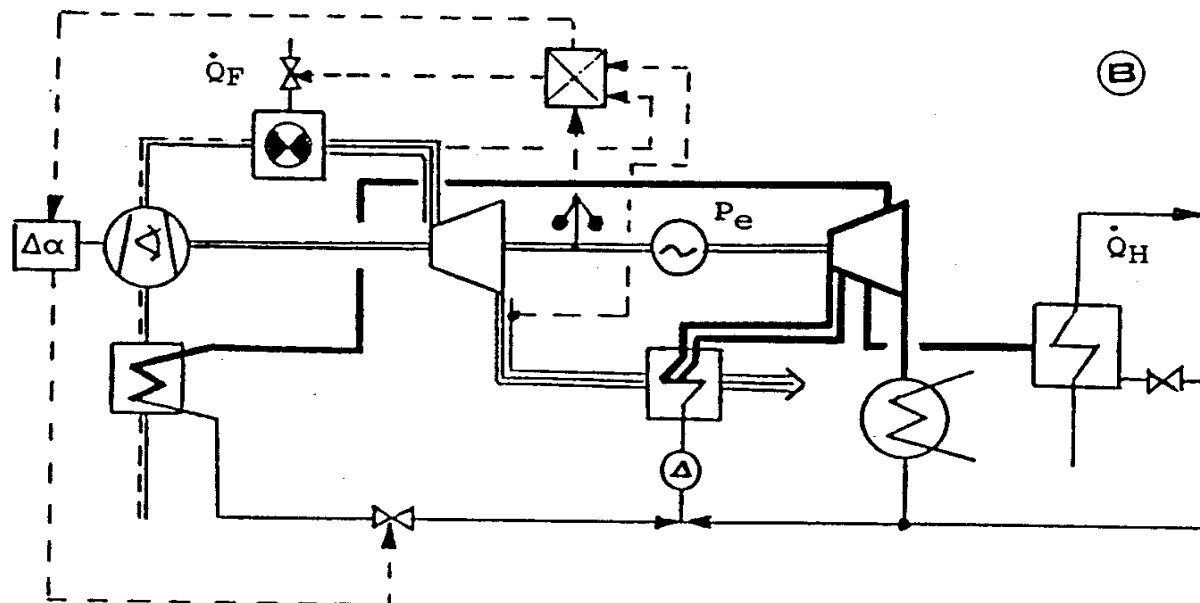
b: CONTROL POR BACK FLOW

c: CONTROL POR ADMISIÓN

d: CONTROL POR IGV

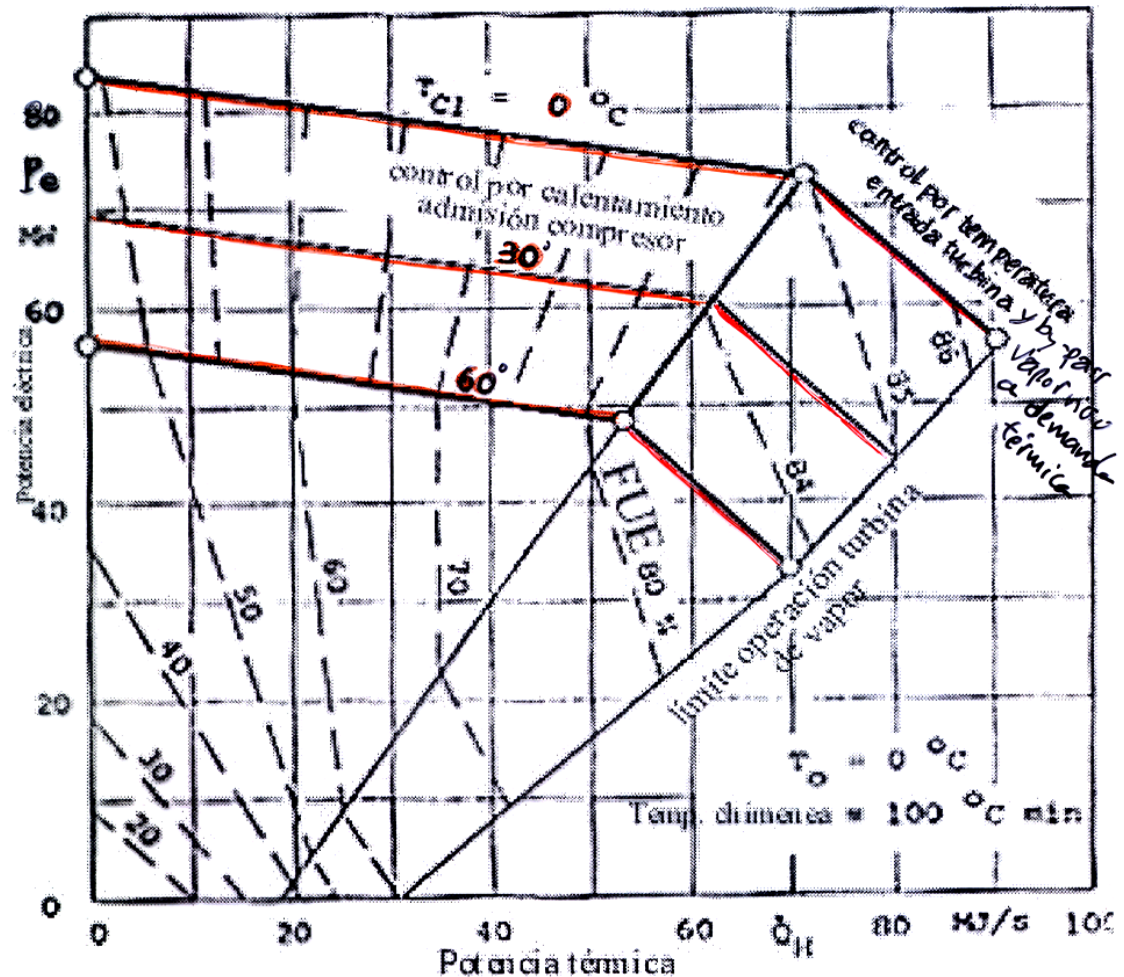


## Regulación CC

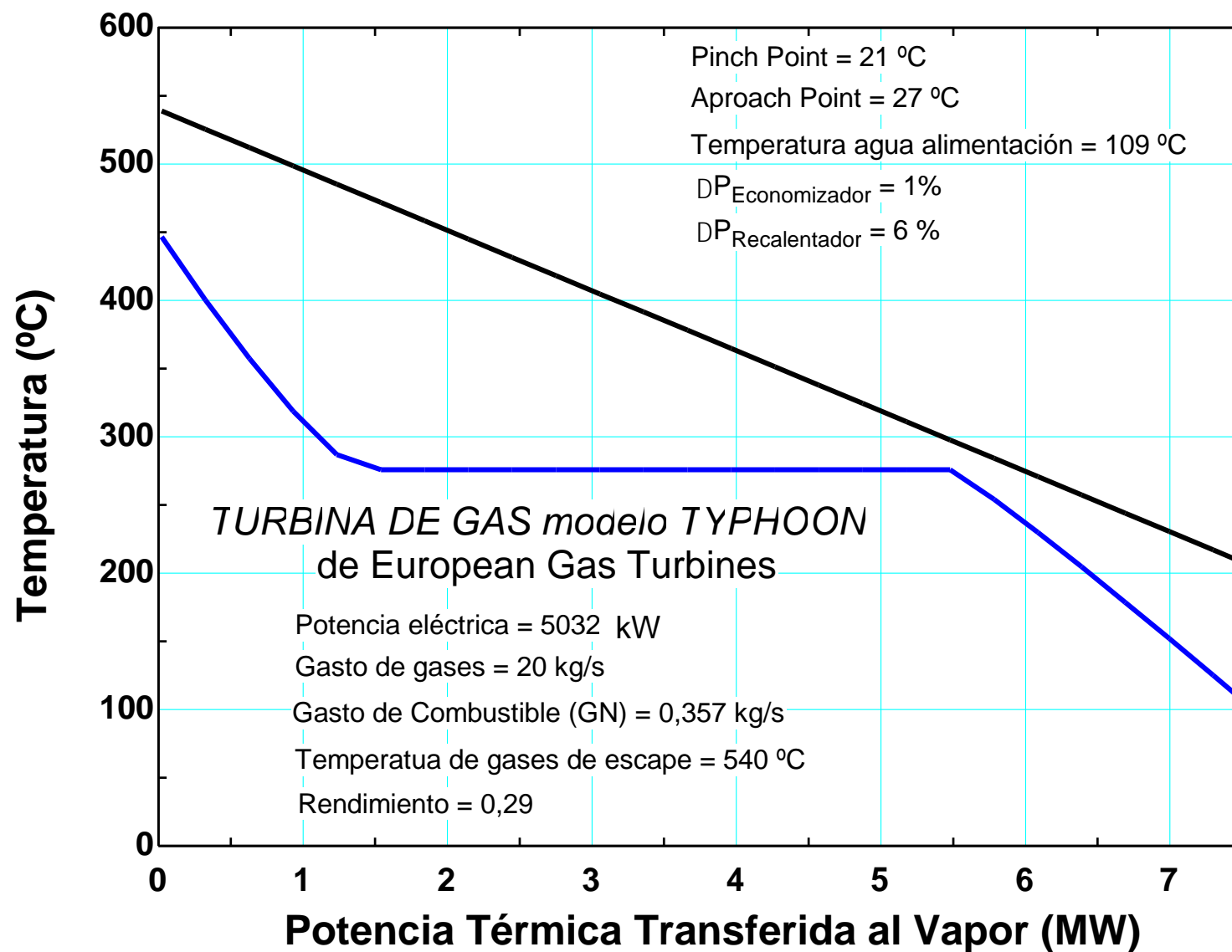


## Regulación CC

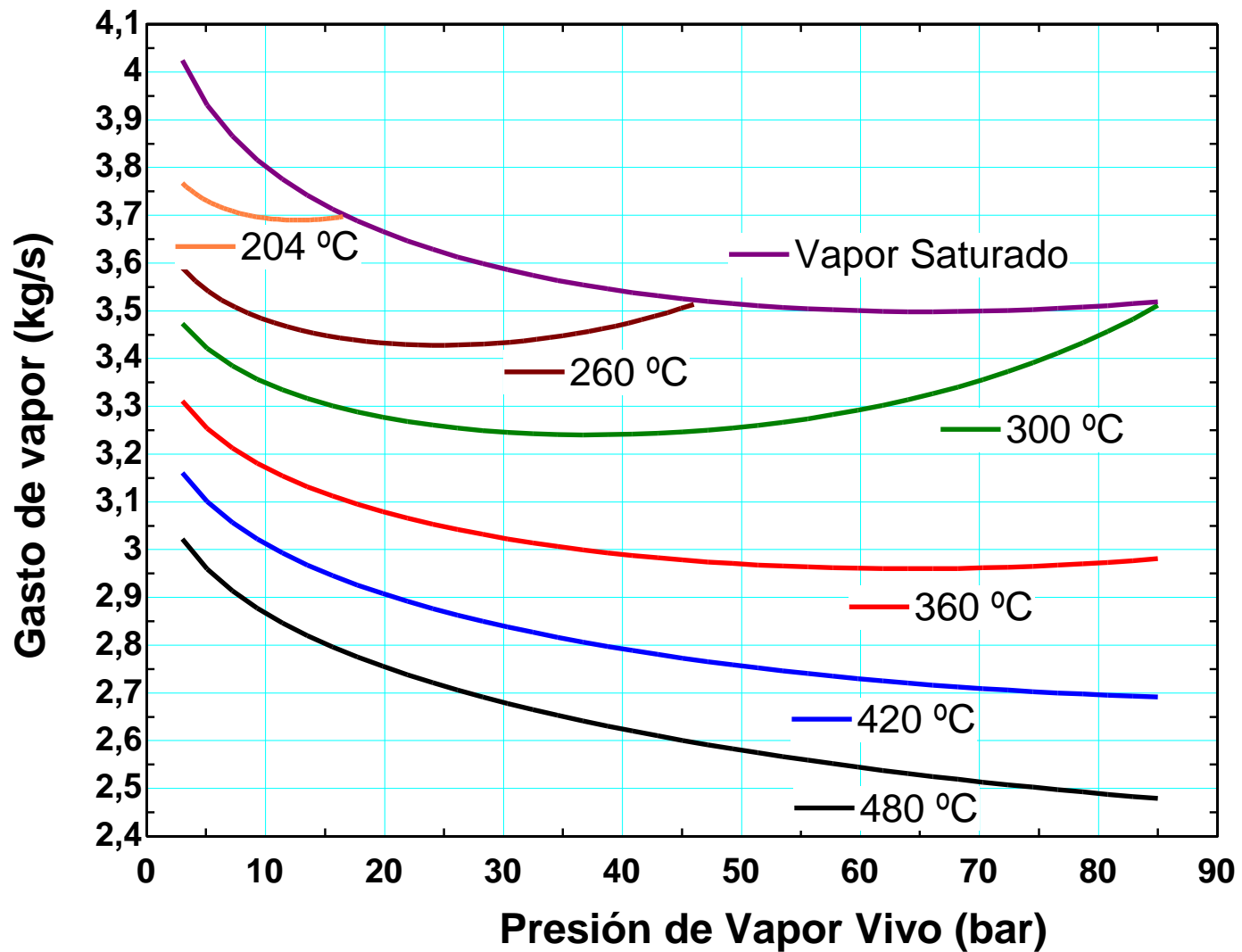
### MAPA DE ACTUACIÓN DE CICLO COMBINADO A UNA PRESIÓN CON GENERACIÓN DE CALOR. REGULACIÓN COMBINADA CALENTAMIENTO ADMISIÓN + TIT



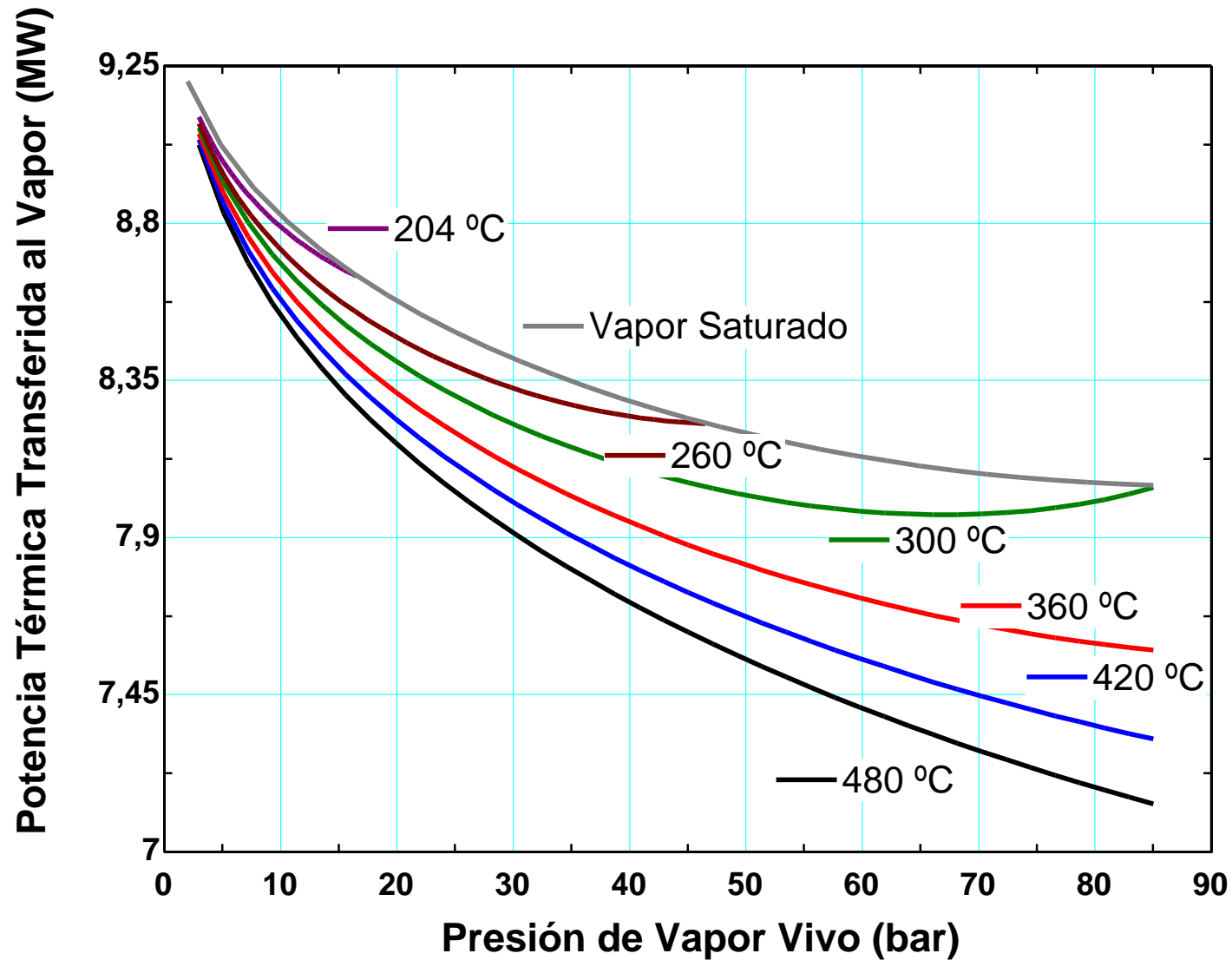
## Diagrama T-Q CC



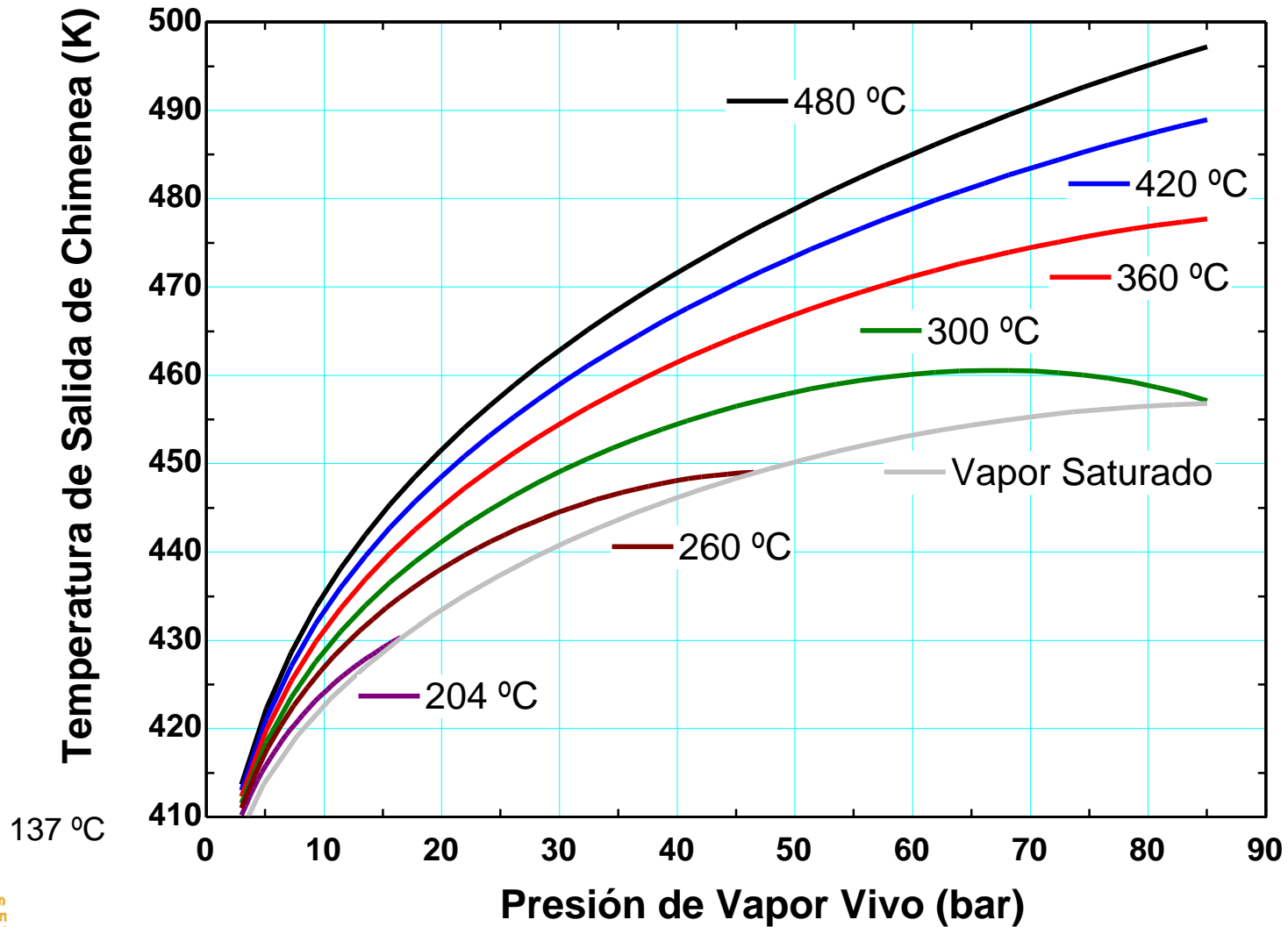
## Regulación CC



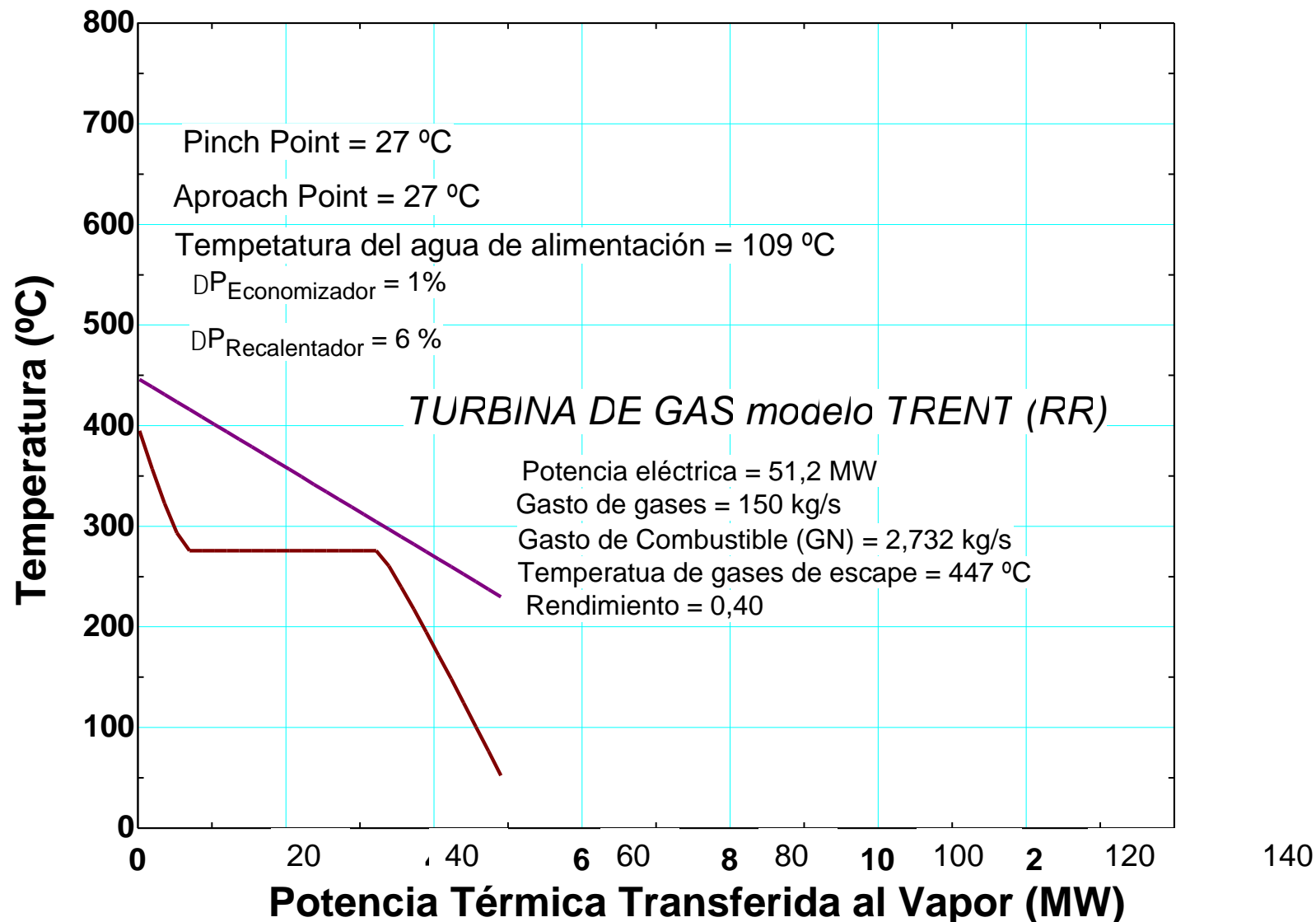
## Regulación CC



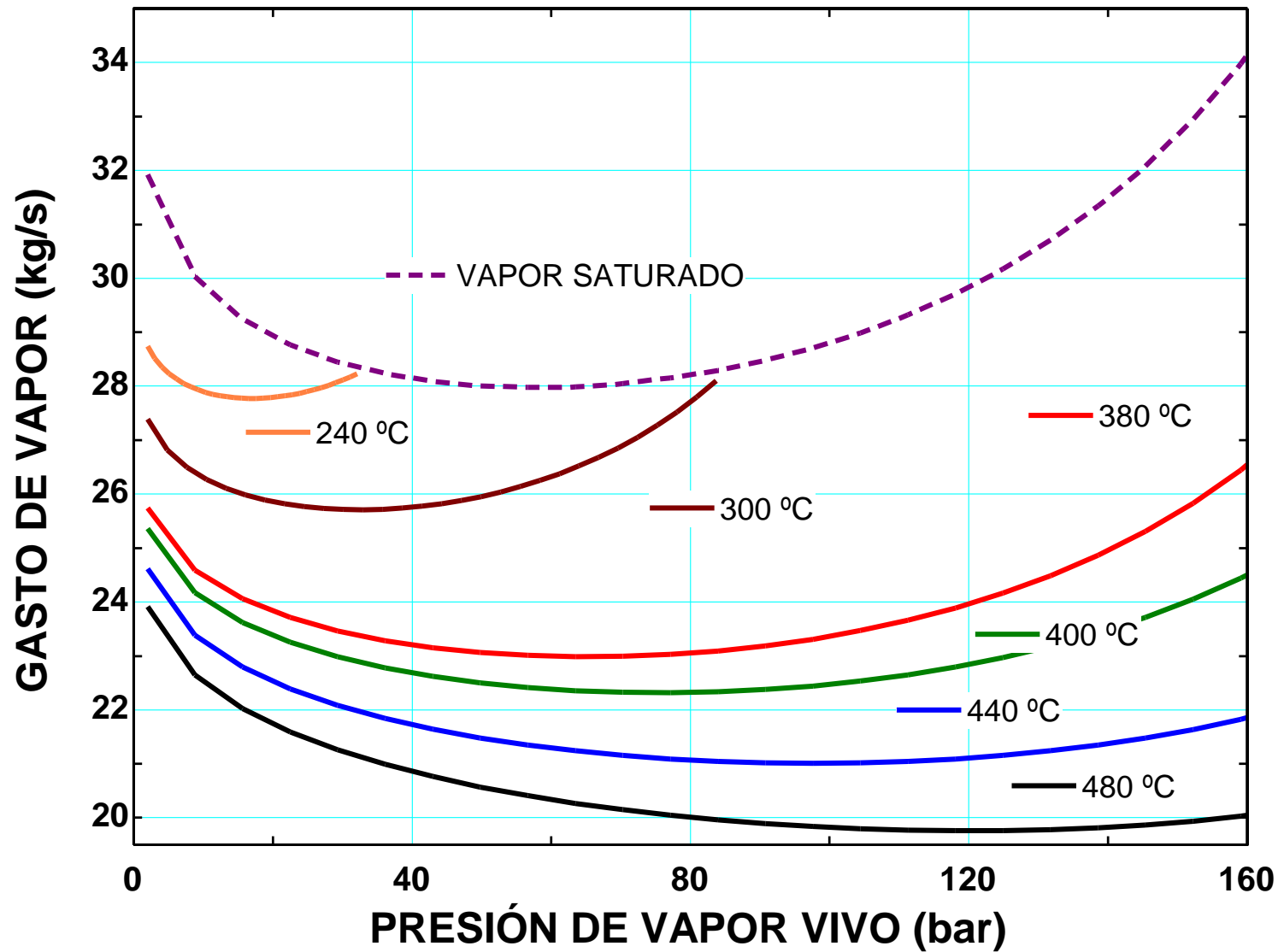
## Regulación CC



## Regulación CC

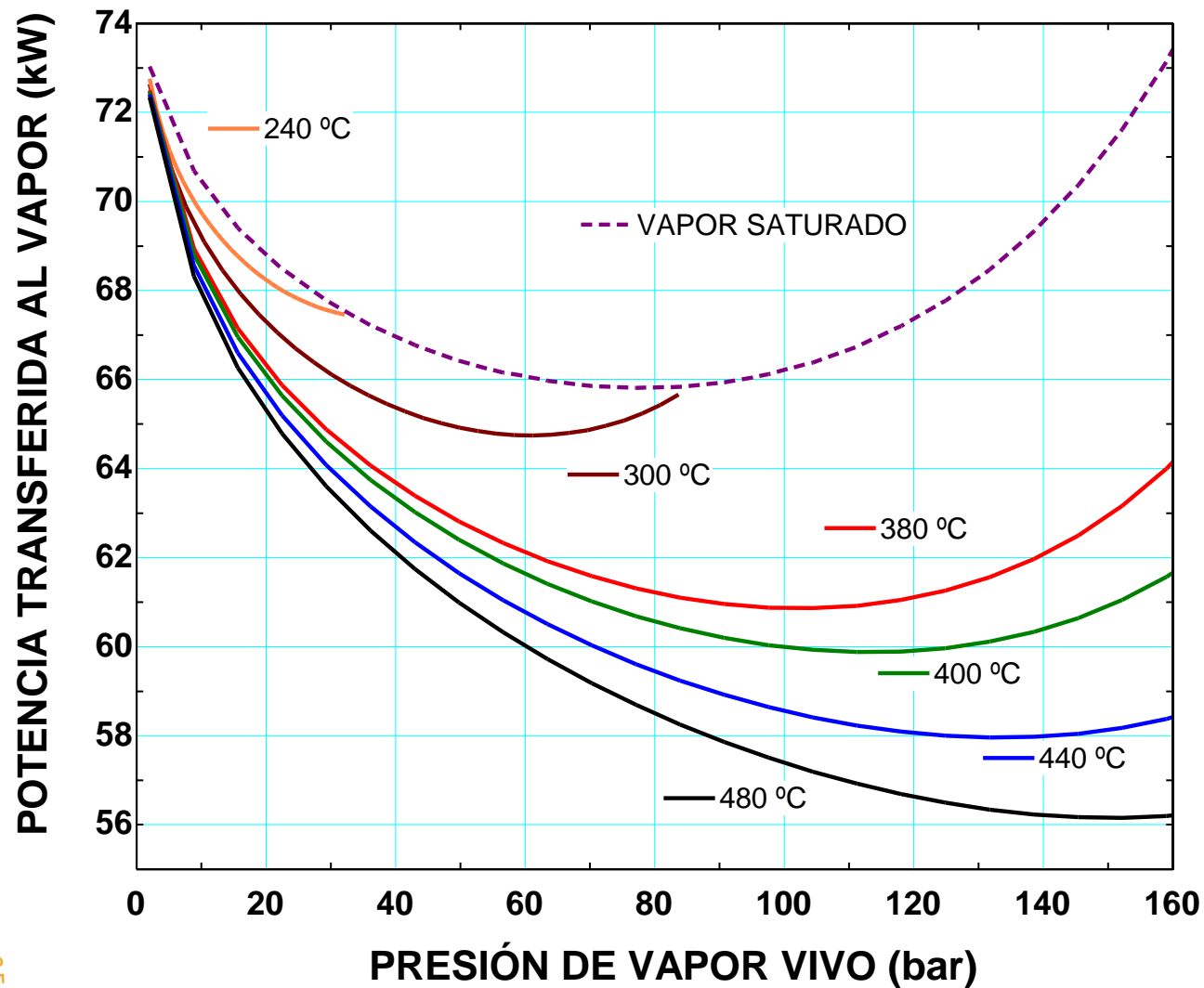


## Regulación CC

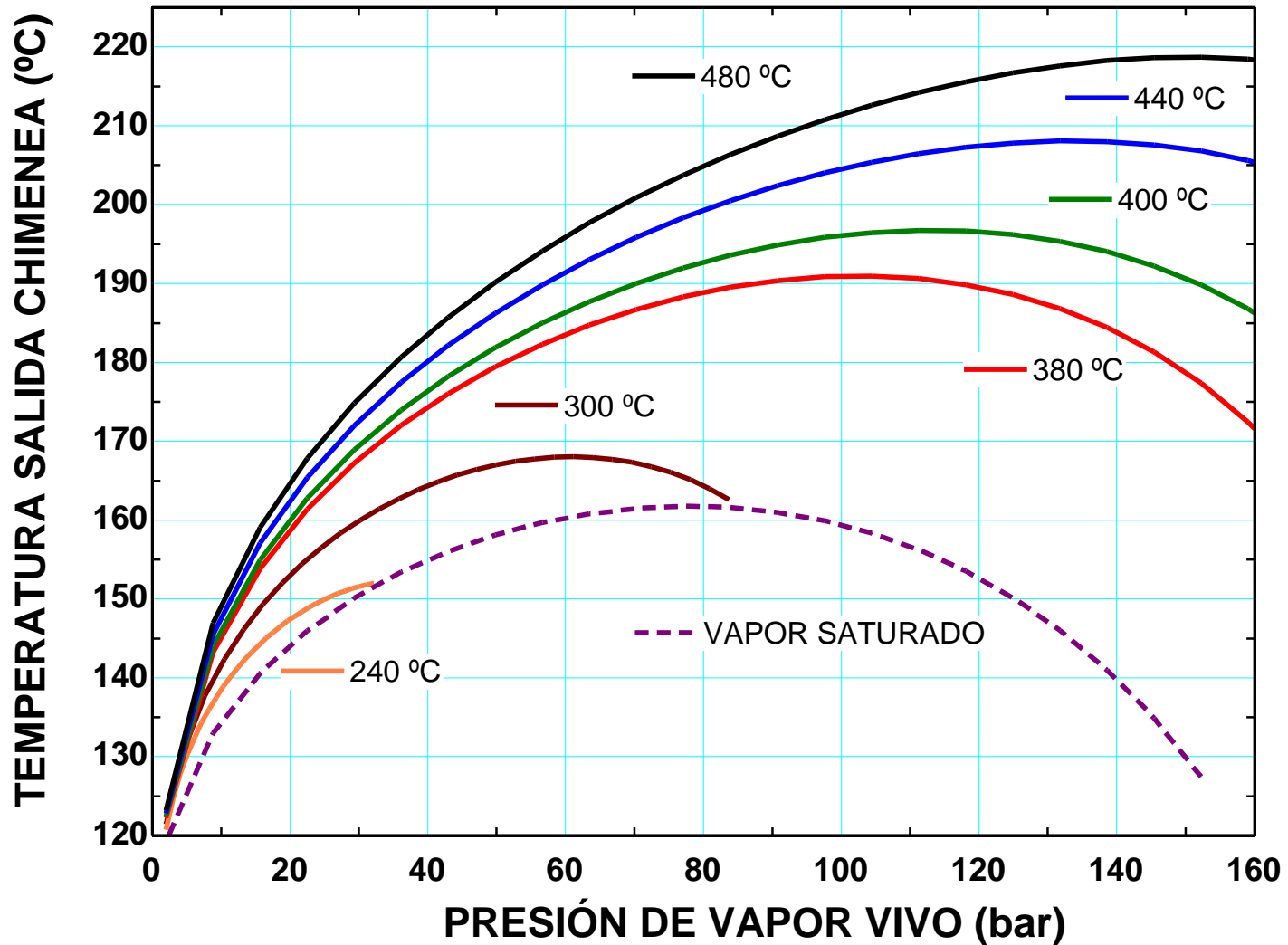




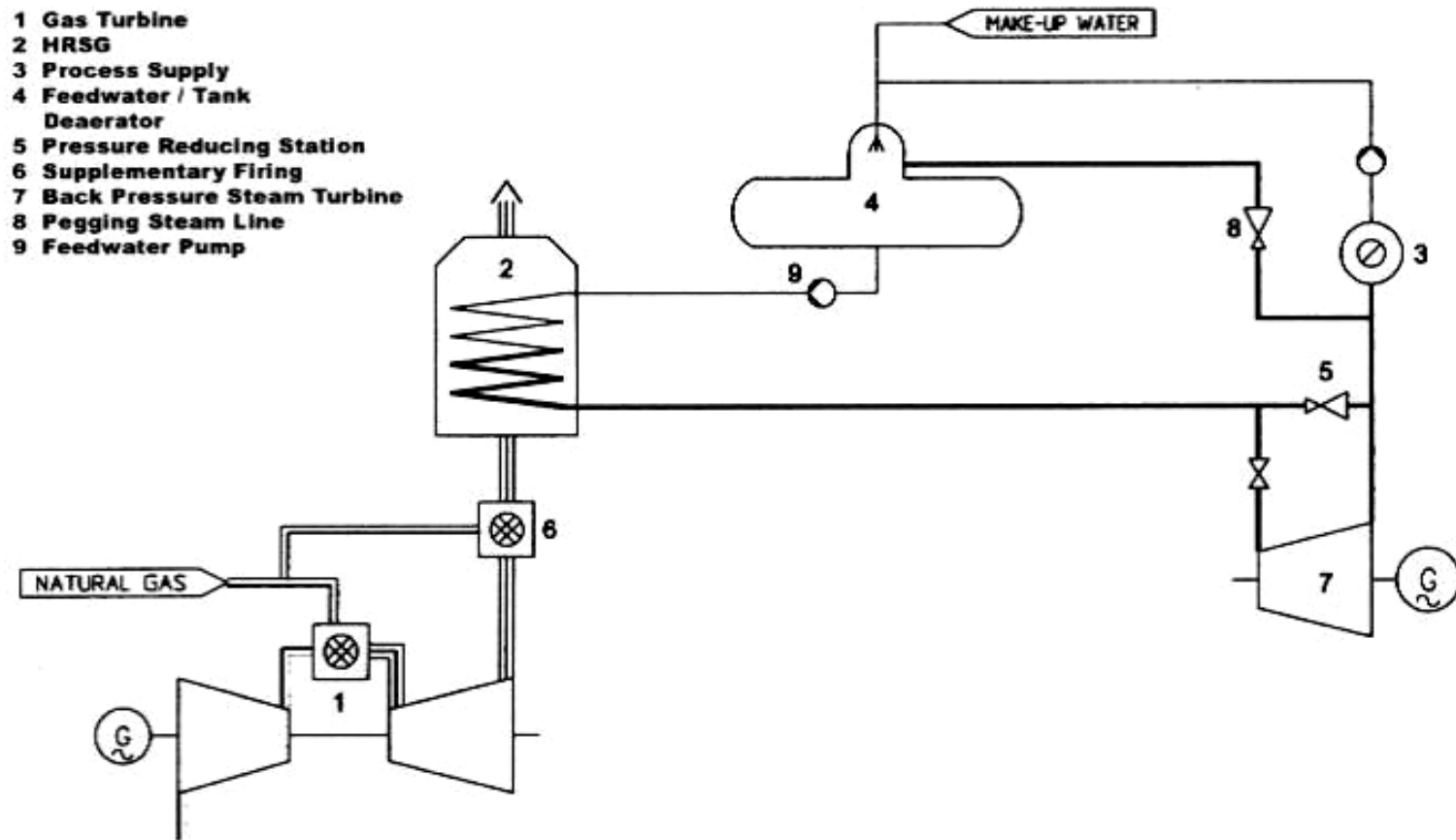
## Regulación CC



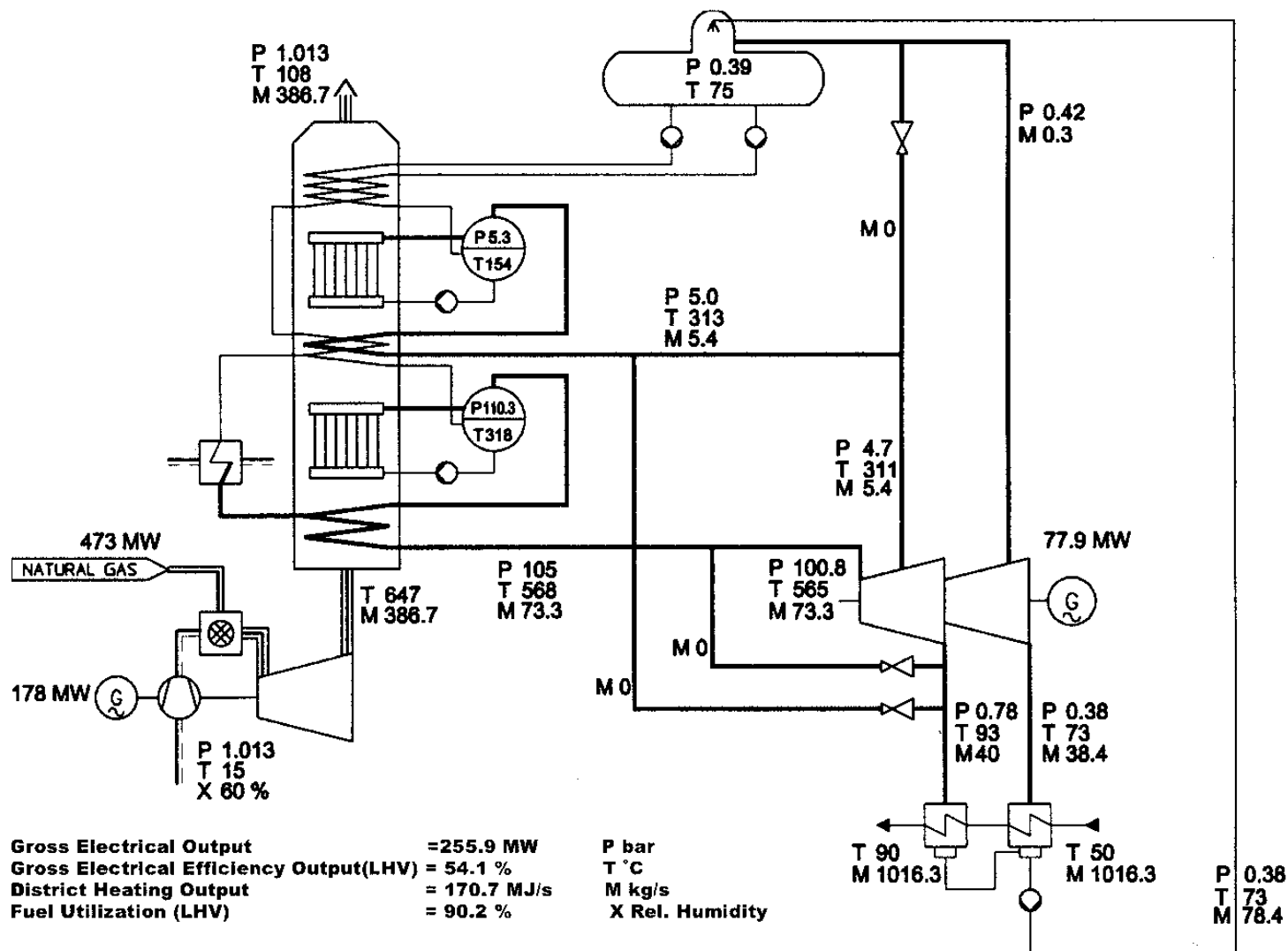
## Regulación CC



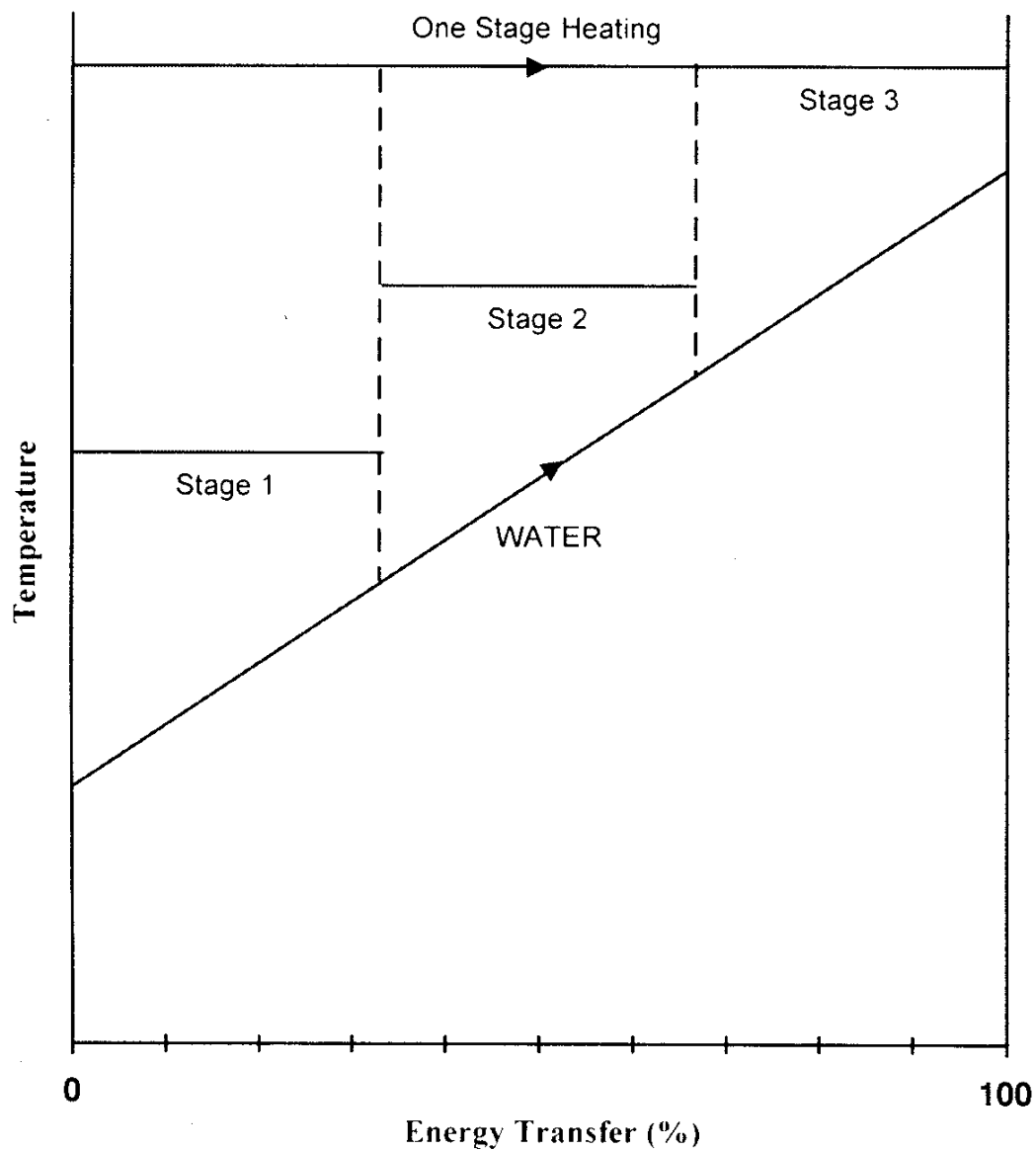
## Ciclo combinado a una presión con calor a proceso en turbina de contrapresión



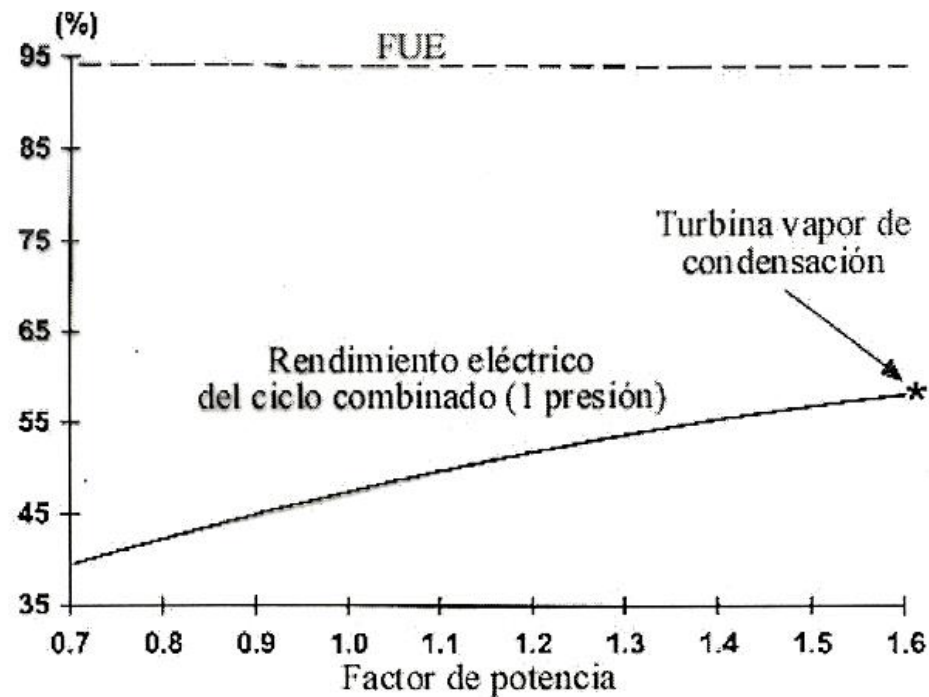
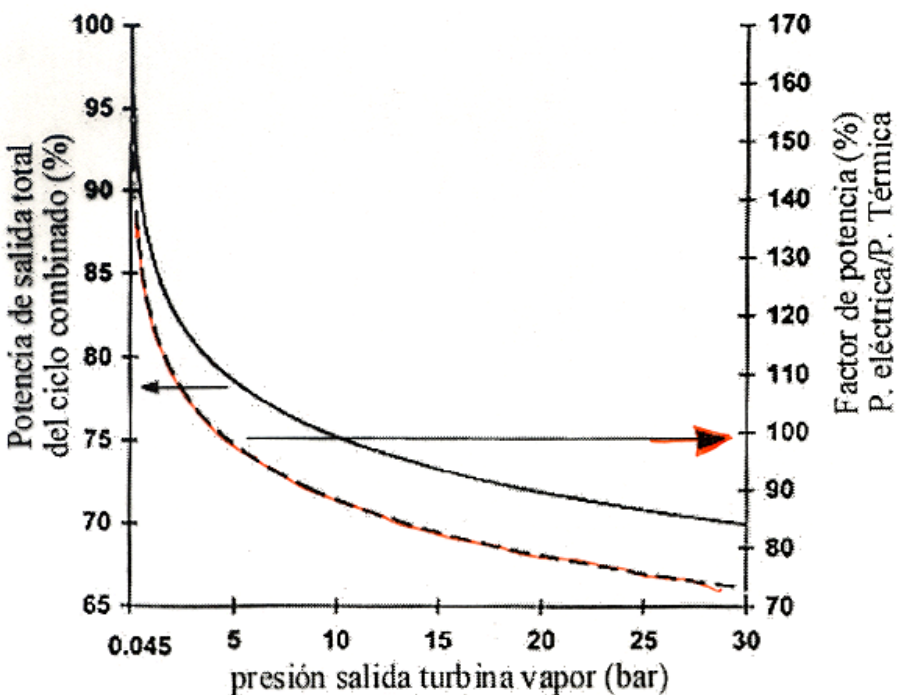
CC



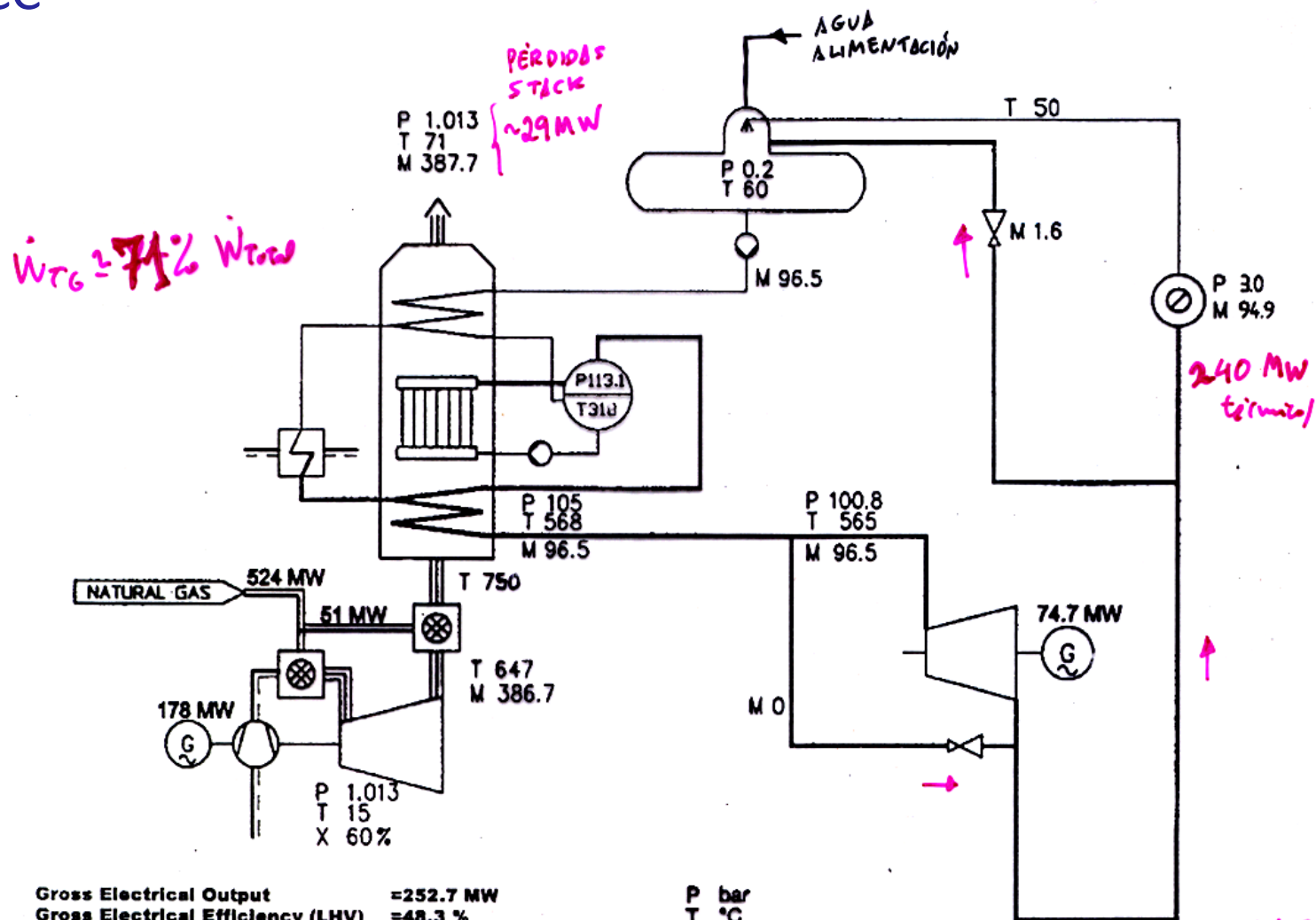
CC



CC



CC



Gross Electrical Output = 252.7 MW  
Gross Electrical Efficiency (LHV) = 48.3 %  
Process Energy = 239.7 MJ/s  
Gross Fuel Utilization (LHV) = 93.9 %

**Handwritten Note:**  $\sim 6.1\%$  Stack Energy Losses  
 $\left\{ \begin{array}{l} \text{Radiation} \\ \text{Mechanical} \end{array} \right\} \sim 3.1\%$

## L4 Tecnologías de la cogeneración. Turbina de Gas y Ciclos Combinados.



Sistemas de Potencia - Tecnología Energética  
Máster Universitario en Ingeniería Industrial  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla