



# Cap. 6.- Ciclos de turbinas de gas.



Universidad  
Carlos III de Madrid

Escuela Politécnica Superior

Profesores:

Pedro A. Rodríguez Aumente, catedrático de Máquinas y Motores Térmicos

Antonio Lecuona Neumann, catedrático de Máquinas y Motores Térmicos

Rubén Ventas Garzón, profesor visitante lector

*Autores:*  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA

## Índice:

1. [Objetivos e introducción](#)
2. [Nomenclatura](#)
3. [Ciclos de TGs. Configuraciones, procesos y modelos](#)
4. [Ciclos de TGs reversibles](#)
5. [Efecto de los rendimientos de componentes](#)
6. [Ciclos húmedos](#)
7. [Tipos de TGs](#)
8. [Operación de TGs](#)
9. [Conclusiones principales](#)
10. [Anexos](#)
11. [Ejercicios propuestos](#)
12. [Cuestiones de autoevaluación](#)
13. [Bibliografía](#)



*Autores:*  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA

# Ciclos de turbinas de gas [volver](#)

## 1. OBJETIVOS E INTRODUCCIÓN

### Objetivos:

Desarrollar un modelo de actuaciones estacionarias de los tipos más comunes de turbinas de gas de combustión interna. Analizar el efecto de parámetros de operación y diseño. Se asumen conocidas las curvas características de los componentes. Se analiza el control de las turbinas de gas.

### Introducción:

Las turbinas de gas (turborreactores) dominan la propulsión aérea por su ligereza y capacidad de altas velocidades de vuelo. Las turbinas de gas industriales son competitivas en la producción de potencia mecánica y eléctrica en grandes tamaños, perdiendo competencia frente a los MACIs por peores prestaciones a carga parcial.

Su modelización es factible con métodos computacionales modestos. **El ciclo es prácticamente adiabático.**

Se parte de la descripción de los componentes, sus parámetros funcionales y sus ecuaciones representativas, y se presentan esquemas de ciclos. Se ensamblan las ecuaciones necesarias para constituir el ciclo simple Brayton ideal de producción de potencia y propulsivo con gas ideal caloríficamente perfecto sin cambio de composición (ciclo de aire) para, a continuación, introducir componentes reales y usar gas con calores específicos variables con la temperatura y considerando cambio de composición. Se mejora el ciclo incluyendo regeneración, recalentamiento, inyección de agua y otros. Tras realizar un estudio paramétrico se procede a la optimización y a considerar el control. Finalmente se ofrecen curvas de actuaciones reales.



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

*Autores:*  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA



# 2. NOMENCLATURA

## Latinas:

- A: área
- $b_r$ : relación de derivación
- C: capacidad calorífica =  $\dot{m}c_p$
- $C_e$ : consumo específico
- CPOT: coeficiente de potencia
- $C_{pr}$ : coeficiente de presión
- $c_p$ : calor específico isobárico
- $cf$ : coeficiente de fricción
- $c_v$ : calor específico isocórico
- E: empuje
- FPG: factor de pérdida de carga
- GICP: gas ideal caloríficamente perfecto
- h: entalpía específica
- L: longitud
- $L_i$ : Poder calorífico inferior
- M: número de Mach
- $\dot{m}$ : caudal másico o gasto
- NTU: número de unidades térmicas
- n: régimen e giro
- p: presión
- Q: calor
- q: calor por unidad de masa
- $R_g$ :  $R/PM_g$
- RAC: Relación másica aire/combustible
- $r_t$ : relación de temperaturas
- $r_\tau$ : relación de trabajos
- s: entropía
- T: temperatura
- UA: producto de coeficiente global de transferencia de calor U por el área de transferencia tomada por referencia.
- V: velocidad
- W: potencia

## Griegas:

- $\alpha$ : parámetro de irreversibilidad
- $\beta$ : parámetro de irreversibilidad
- $\epsilon$ : efectividad de intercambio de calor

- $\eta$ : eficiencia o rendimiento
- $\gamma$ :  $c_p/c_v$
- $\Pi$ : relación de presiones
- $\Pi_m$ : parámetro de caudal, Cap. 5.
- $\Pi_n$ : parámetro de régimen, Cap. 5
- $\tau$ : trabajo específico
- $\theta$ :  $T_{max}/T_{min}$
- $\lambda$ : relación de cogeneración
- $\rho$ : densidad
- $\tau$ : trabajo específico

## Subíndices:

- a: aire
- b: quemador
- c: compresor
- cb: combustible
- ch: chimenea
- d: difusor; aire de dilución
- e: turbina
- e: entrada
- g: gas de combustión
- gg: generador de gas
- i: ideal
- i: ciclo irreversible
- ic: intercambiador de calor
- icc: corriente caliente del intercambio
- icf: corriente fría del intercambio
- l: turbina libre
- lm: logarítmico medio
- m: mecánico
- p: propulsivo; politrópico
- r: ciclo reversible
- s: isentrópico
- s: salida
- t: total o de remanso
- tt: total a total
- u: condiciones arbitrarias
- ue: útil en el escape
- w: agua
- I: de aire primario de combustión

## Acrónimos:

- CBE: Compressor, Burner, Expander = ciclo simple
- CBEE: Compressor, Burner, Expander, Expander = ciclo simple con turbina libre
- CBEX: Compressor, Burner, Expander, heat eXchanger
- CICBE: Compressor, Inter-Cooler, Burner, Expander
- CICBEE: Compressor, Inter-Cooler, Burner, Expander, Expander = TG regenerativa con turbina libre
- CICBEX: Compressor, Inter-Cooler, Burner, Expander, heat-eXchanger
- CGCC Ciclo combinado
- cte.: constante
- GICP: Gas ideal caloríficamente perfecto
- HRSG: recuperador de calor de escape
- MACI: Motor alternativo de combustión interna
- TBFAN: Turbofan, ciclo simple
- TBJET: Turbojet, ciclo simple o con recalentamiento
- TBPROP: Turbohélice, ciclo simple
- TG: Turbina de gas
- VIGV: álabes guía
- var: variable
- $\mu$ TG: microturbina de gas

### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA



### 3.- CICLOS DE TGs. CONFIGURACIONES, PROCESOS Y MODELOS [volver](#)

Una TG se compone de uno o más elementos de los siguientes tipos con sus correspondientes parámetros de operación:

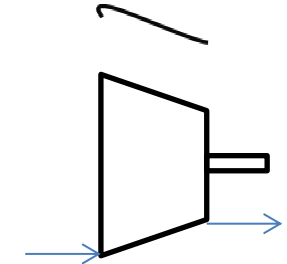
#### Difusor (*d*):

Gasto másico ( $\dot{m}_d$ ), Coeficiente de presión ( $C_{pr_d}$ ), Rendimiento ( $\eta_d$ )



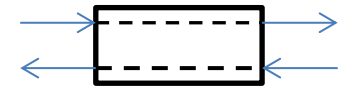
#### Compresor (*c*):

Gasto másico ( $\dot{m}_c$ ), Relación de presiones ( $\Pi_c$ ), Rendimiento ( $\eta_c$ ), Régimen de giro ( $n_c$ )



#### Intercambiador de calor (*ic*):

Gastos másicos de flujos frío y caliente ( $\dot{m}_{icf}$ ,  $\dot{m}_{icc}$ ), Capacidades térmicas ( $UA_{ic}$ ,  $C_{icf}$ ,  $C_{icc}$ ), Pérdidas de carga ( $\Delta p_{icf}$ ,  $\Delta p_{icc}$ ), Eficiencia ( $\varepsilon_{ic}$ )



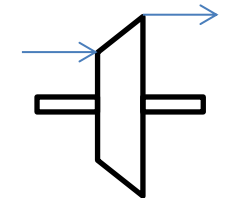
#### Cámara de combustión (*b*):

Gasto másico ( $\dot{m}_b$ ), Factor de pérdida de carga ( $FPC$ ), Rendimiento de combustión ( $\eta_b$ )



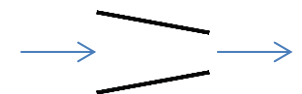
#### Expansor o turbina (*e*):

Gasto másico ( $\dot{m}_e$ ), Relación de presiones ( $\Pi_e$ ), Rendimiento ( $\eta_e$ ), Régimen de giro ( $n_e$ )



#### Tobera propulsiva (*p*):

Gasto másico ( $\dot{m}_p$ ), Coeficiente de presión ( $C_{pr_p}$ ), Rendimiento ( $\eta_p$ )



#### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

- Objetivos
- Nomenclatura
- Configuraciones, procesos y modelos**
- Ciclos reversibles
- Rendimiento de componentes
- Ciclos húmedos
- Tipos de TGs
- Operación de TGs
- Conclusiones
- Anexos
- Ejercicios
- Autoevaluación
- Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



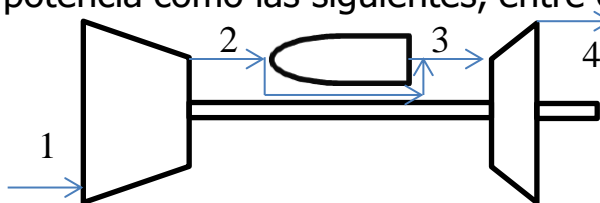
MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA



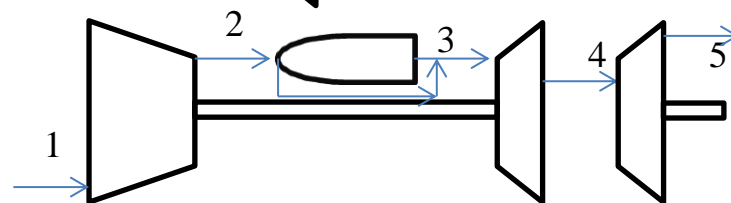
### 3.- CICLOS DE TGs. CONFIGURACIONES, PROCESOS Y MODELOS [volver](#)

Con los que se construyen plantas de potencia como las siguientes, entre otras [2]:

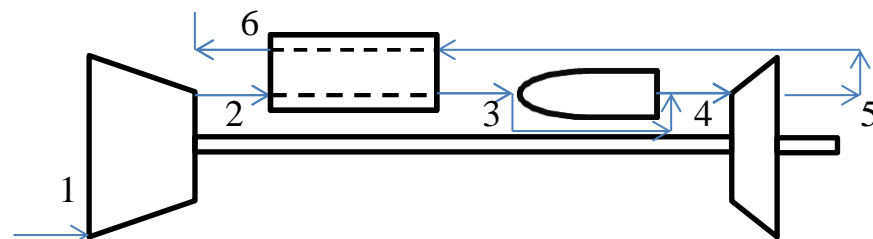
**Ciclo simple monoje CBE**  
(Compressor, **B**urner, **E**xpander)



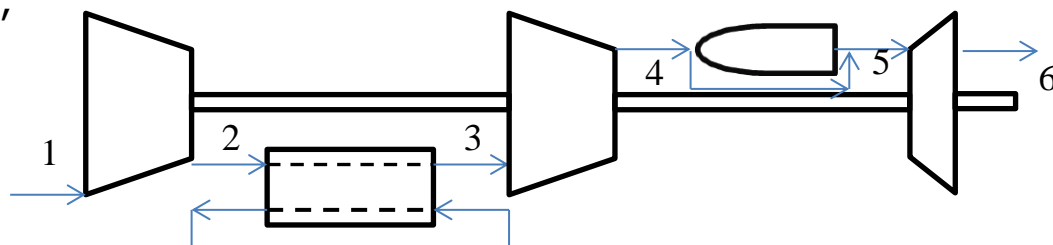
**Ciclo simple con turbina libre CBEE**  
(Compressor, **B**urner, **E**xpander, **E**xpander)



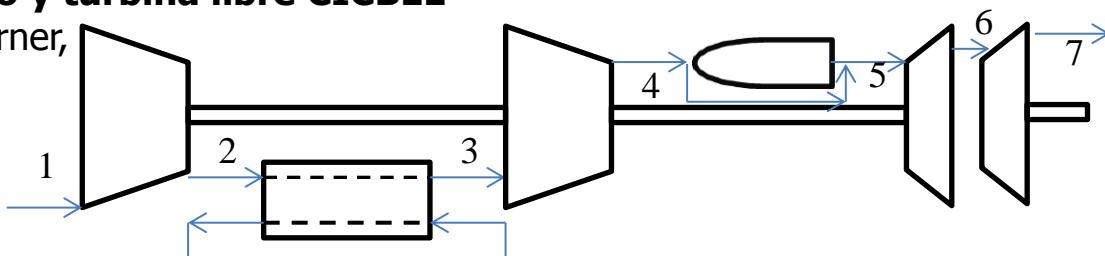
**Ciclo regenerativo (recuperador de calor) monoje CBEX**  
(Compressor, **B**urner, **E**xpander, heat-e**X**changer)



**Ciclo con interenfriamiento monoje CICBE**  
(Compressor, **I**nter-**C**ooler, **B**urner, **E**xpander)



**Ciclo con interenfriamiento y turbina libre CICBEE**  
(Compressor, **I**nter-**C**ooler, **B**urner, **E**xpander, **E**xpander)



#### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

- Objetivos
- Nomenclatura
- Configuraciones, procesos y modelos**
- Ciclos reversibles
- Rendimiento de componentes
- Ciclos húmedos
- Tipos de TGs
- Operación de TGs
- Conclusiones
- Anexos
- Ejercicios
- Autoevaluación
- Bibliografía

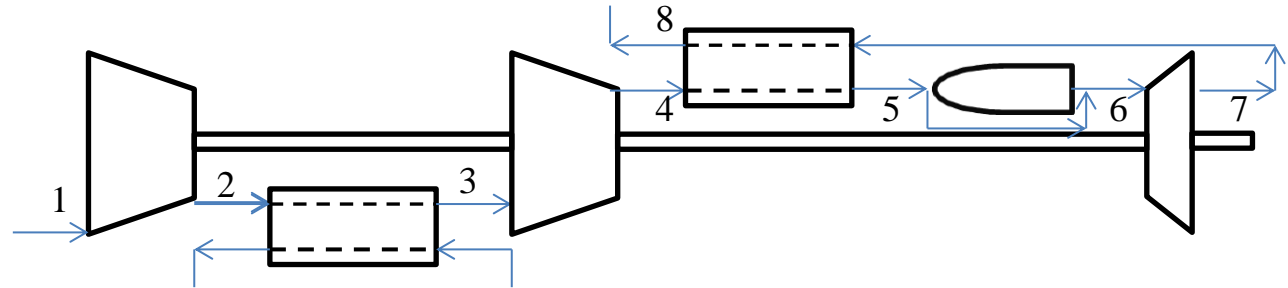
*Autores:*  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



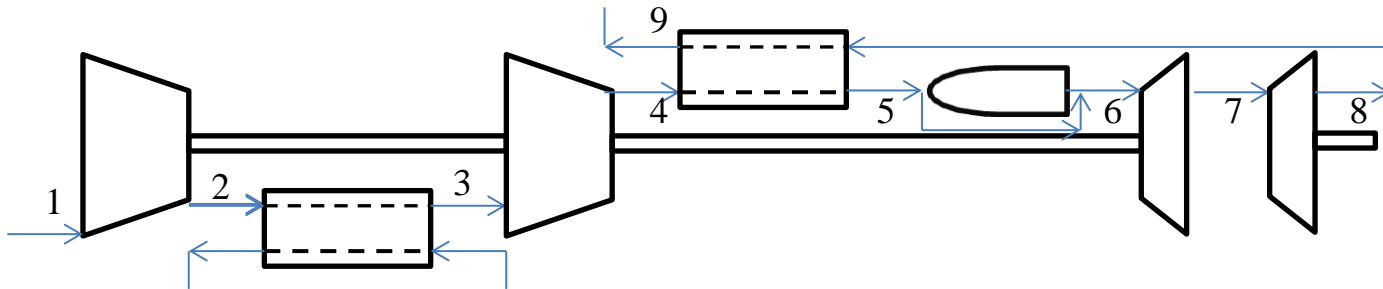
MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

### 3.- CICLOS DE TGs. CONFIGURACIONES, PROCESOS Y MODELOS [volver](#)

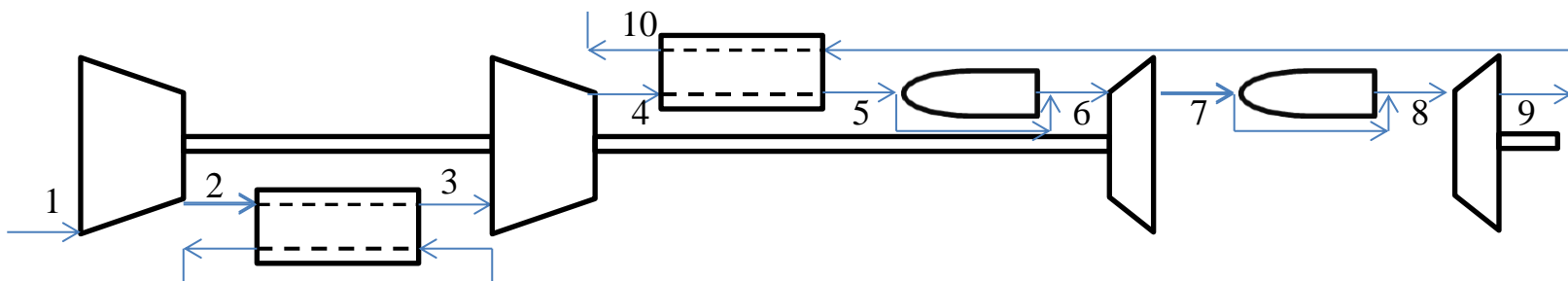
#### Ciclo regenerativo con interenfriamiento monoeje **CICBEX** (Compressor, Inter-Cooler, **B**urner, **E**xpander, heat-e**X**changer)



#### Ciclo regenerativo con interenfriamiento y turbina libre **CICBEXX** (Compressor, Inter-Cooler, **B**urner, **E**xpander, **E**xpander, heat-e**X**changer)



#### Ciclo regenerativo con interenfriamiento y recalentamiento con turbina libre **CICBEBEX** (Compressor, Inter-Cooler, **B**urner, **E**xpander, **B**urner, **E**xpander, heat-e**X**changer)



#### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas

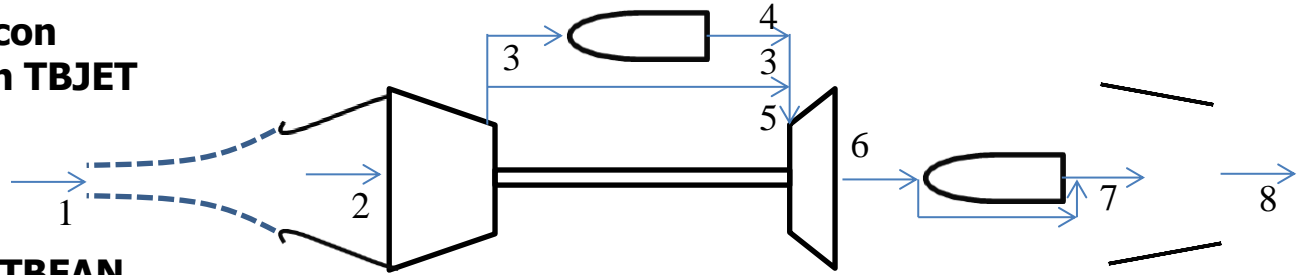


MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA

### 3.- CICLOS DE TGs. CONFIGURACIONES, PROCESOS Y MODELOS [volver](#)



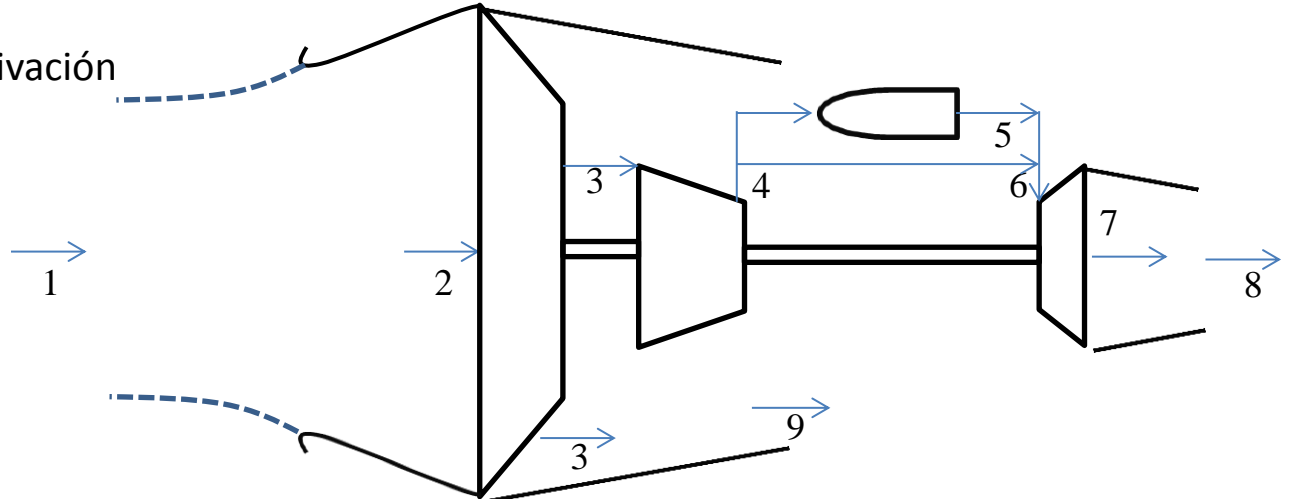
#### Ciclo turbojet con postcombustión TBJET



#### Ciclo turbofan TBFAN

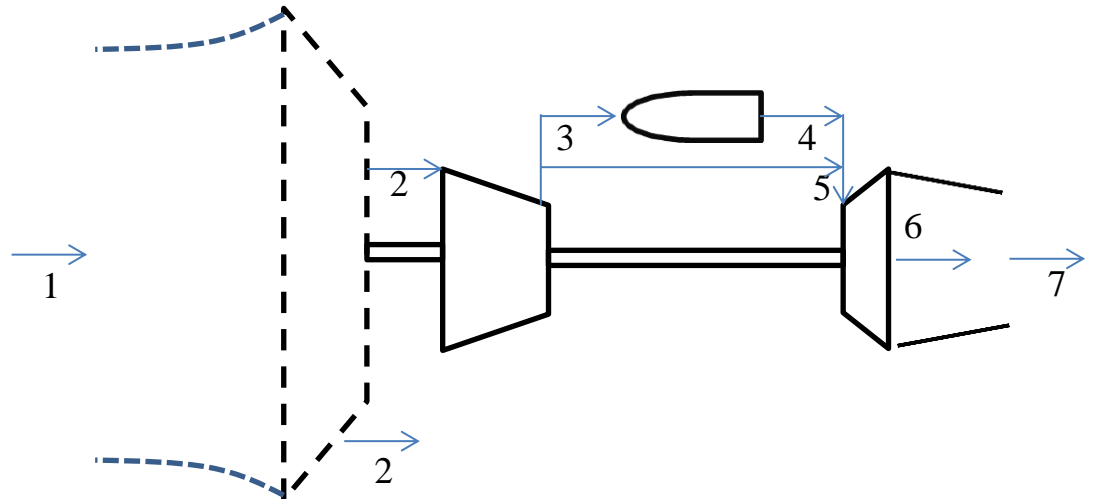
Relación de derivación (bypass ratio):

$$b_r = \frac{\dot{m}_9}{\dot{m}_4}$$



#### Ciclo turboprop TBPROP

Aparece una compresión isentrópica externa en vuelo, marcada con trazos azules



#### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA





### 3.- CICLOS DE TGs. CONFIGURACIONES, PROCESOS Y MODELOS [volver](#)

**Ecuaciones** aplicables en cada **componente** para el cálculo del ciclo:

#### Difusor (d) GICP:

Gasto másico ( $\dot{m}_d$ ), Coeficiente de presión ( $C_{prd}$ ), Rendimiento ( $\eta_d$ )

Balance de energía:  $W_{eje} = \dot{Q} + \dot{m}_d \cdot (h_{t,e} - h_{t,s}) \rightarrow h_{t,e} = h_{t,s} \rightarrow T_{t,e} = T_{t,s}$

Balance de entropía (caso ideal):  $s_e = s_s \rightarrow T_{t,e} \cdot p_{t,e}^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = T_{t,s} \cdot p_{t,s}^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \rightarrow p_{t,e} = p_{t,s}$

Coeficiente de presión (caso ideal):  $C_{pr_{d,i}} = \frac{p_s - p_e}{p_{t,e} - p_e} \approx \frac{\Delta p_d}{p_{d,e}} = \frac{\Delta p_d}{\frac{1}{2} \rho_e V_e^2} = 1 - \left( \frac{V_s}{V_e} \right)^2$

Hipótesis de flujo unidimensional:  $\dot{m}_d = \rho_e V_e A_e = \rho_s V_s A_s$

[Ver Anexo !](#)

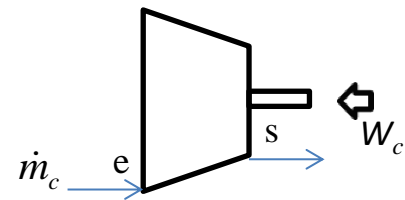
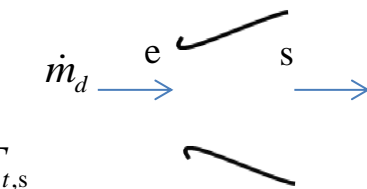
Rendimiento del difusor (efectos viscosos en capas límite y desprendimientos) [1]:  $\eta_d = \frac{C_{pr_d}}{C_{pr_{d,i}}} = f \left\langle \frac{A_s}{A_e} \right\rangle \approx 0,5 \div 0,85$

#### Compresor (c) GICP:

Gasto másico ( $\dot{m}_c$ ), Relación de presiones totales ( $\Pi_{c,tt}$ ),  $\Pi_{c,tt} = \frac{p_{t,s}}{p_{t,e}}$

Rendimiento total a total ( $\eta_c$ ), Régimen de giro ( $n_c$ )

Balance de energía (rotor +estátor):  $W_c = \dot{Q} + \dot{m}_c \cdot (h_{t,s} - h_{t,e}) = \dot{m}_c \cdot \tau_{fl,c}$



Rendimiento, [Cap.5 de turbomaquinaria](#):

$$\eta_c = \frac{\tau_{fl,c,i}}{\tau_{fl,c}} = \frac{\Delta h_{t,i}}{\Delta h_t} = \frac{T_{t,s,i} - T_{t,e}}{T_{t,s} - T_{t,e}} \quad T_{t,s} = T_{t,e} \left[ 1 + \frac{\Pi_{c,tt}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\eta_c} \right] \quad \tau_{fl,c} = \frac{c_p \cdot T_{t,e}}{\eta_c} \left\{ \Pi_{c,tt}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right\}$$

#### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA



### 3.- CICLOS DE TGs. CONFIGURACIONES, PROCESOS Y MODELOS [volver](#)

Ecuaciones aplicables en cada componente para el cálculo del ciclo:

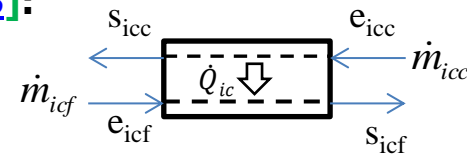
#### Intercambiador de calor (*ic*) y recuperador de calor GICP [3]:

Gastos máxicos de flujos frío y caliente ( $\dot{m}_{icf}, \dot{m}_{icc}$ ),

Capacidades térmicas ( $UA_{ic}, C_{icf}, C_{icc}$ ), Efectividad ( $\varepsilon_{ic}$ ),

Pérdidas de carga ( $\Delta p_{t,icf}, \Delta p_{t,icc}$ ),

Balance de energía:  $\dot{Q}_{ic} = C_{icc} \cdot (T_{t,e,icc} - T_{t,s,icc}) = C_{icf} \cdot (T_{t,s,icf} - T_{t,e,icf})$  ;  $C_{icc} = \dot{m}_{icc} \cdot c_{p,c}$  ;  $C_{icf} = \dot{m}_{icf} \cdot c_{p,f}$



Efectividad:  $\varepsilon_{ic} = \frac{C_{icf} \cdot (T_{t,s,icf} - T_{t,e,icf})}{C_{min} \cdot (T_{t,e,icc} - T_{t,e,icf})}$  ;  $C_{min} = \min(C_{icc}, C_{icf})$  ;  $C_{max} = \max(C_{icc}, C_{icf})$

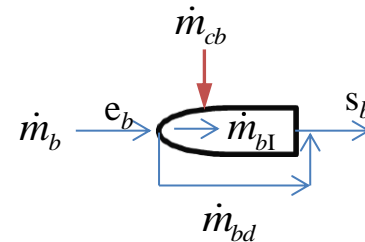
$$NTU_{ic} = \frac{UA_{ic}}{C_{min}} \quad C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad \dot{Q}_{ic} = UA_{ic} \cdot \Delta T_{lm} \quad \Delta T_{lm} = \frac{(T_{t,e,icc} - T_{t,s,icf}) - (T_{t,s,icc} - T_{t,e,icf})}{\ln \frac{(T_{t,e,icc} - T_{t,s,icf})}{(T_{t,s,icc} - T_{t,e,icf})}}$$

$$\varepsilon_{ic} = f(NTU_{ic}, C_r)$$

Pérdidas de carga:  $\Delta p_{t,icc} = (p_{t,e,icc} - p_{t,s,icc})$  ;  $\Delta p_{t,icf} = (p_{t,e,icf} - p_{t,s,icf})$  ;  $\Delta p_{ic} = \dot{m}_{ic} \cdot cf \langle Re, L \rangle$

#### Cámara de combustión (*b*) GICP [4]:

Gasto máxico de entrada ( $\dot{m}_b$ ), Gasto de dilución ( $\dot{m}_{bd}$ ), Relación Aire/Comb. ( $RAC$ ), Rendimiento de combustión ( $\eta_b$ ), Factor de pérdida de carga ( $FPC$ ).



Balance de energía:  $\dot{Q}_{cb} = \dot{m}_{cb} \cdot L_i \cdot \eta_b = \dot{m}_b \cdot c_p \cdot (T_{t,s,b} - T_{t,e,b})$  ;  $RAC_1 = \frac{\dot{m}_{b1}}{\dot{m}_{cb}}$  ;  $\eta_b = \zeta \langle RAC_1 \rangle$

Pérdida de carga:  $FPC = \frac{\Delta p_t}{p_{t,e,b} - p_{e,b}} = cte_1 + cte_2 \cdot \left( \frac{T_{t,sb}}{T_{t,eb}} - 1 \right) \rightarrow \frac{\Delta p_t}{p_{t,e,b}} = FPC \cdot \frac{R_g}{2} \cdot \left( \frac{\dot{m}_b \sqrt{T_{t,e,b}}}{A_b \cdot p_{t,e,b}} \right)^2 \approx 2-3\%$

#### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

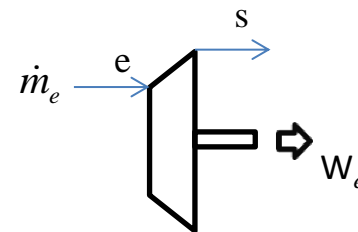


### 3.- CICLOS DE TGs. CONFIGURACIONES, PROCESOS Y MODELOS [volver](#)

Ecuaciones aplicables en cada componente para el cálculo del ciclo:

#### Expansor o turbina (e):

Gasto másico ( $\dot{m}_e$ ), Relación de presiones total a total ( $\Pi_{tt,e}$ ),  $\Pi_{tt,e} = \frac{P_{t,e}}{P_{t,s}}$   
 Rendimiento ( $\eta_e$ ), Régimen de giro ( $n_e$ )



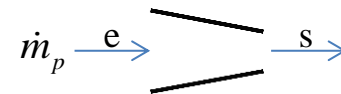
Balance de energía (rotor + estátor):  $W_e = \dot{Q} + \dot{m}_e \cdot (h_{t,s} - h_{t,e}) = \dot{m}_e \cdot \tau_{fl,e}$

Rendimiento isentrópico, total a total (de uso directo, pero se usará el politrópico como parámetro básico):

$$\eta_e = \frac{\tau_{fl,e}}{\tau_{fl,e,i}} = \frac{\Delta h_t}{\Delta h_{t,i}} = \frac{T_{t,e} - T_{t,s}}{T_{t,e} - T_{t,s,i}} \quad T_{t,s} = T_{t,e} \left\{ 1 - \eta_e \cdot \left[ 1 - \frac{1}{\Pi_{tt,e}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right] \right\} \quad \tau_{fl,e} = c_p \cdot \eta_e \cdot T_{t,e} \left\{ 1 - \frac{1}{\Pi_{tt,e}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right\}$$

#### Tobera propulsiva (p):

Gasto másico ( $\dot{m}_p$ ), Coeficiente de presión ( $Cpr_p$ ), Rendimiento ( $\eta_p$ )



Balance de energía:  $W_{fl,e} = \dot{Q} + \dot{m}_p \cdot (h_{t,e} - h_{t,s}) \rightarrow h_{t,e} = h_{t,s} \rightarrow T_{t,e} = T_{t,s}$

Balance de entropía (caso ideal):  $s_e = s_s \rightarrow T_{t,e} \cdot p_{t,e}^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = T_{t,s} \cdot p_{t,s}^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \rightarrow p_{t,e} = p_{t,s}$

Coeficiente de presión:  $Cpr_p = \frac{p_e - p_s}{p_{t,e} - p_e} \approx \frac{\Delta p_p}{\frac{1}{2} \rho_e V_e^2} = \left[ \frac{V_s}{V_e} \right]^2 - 1$

Hipótesis de flujo unidimensional:  $\dot{m}_p = \rho_e V_e A_e = \rho_s V_s A_s$

[Ver Anexo II](#)

Rendimiento de la tobera propulsiva (efectos viscosos en capas límite y desprendimientos):

$$\eta_p = \frac{T_{t,e} - T_s}{T_{t,e} - T_{s,i}} = \left[ \frac{V_s}{V_{s,i}} \right]^2 \approx 1 - \frac{p_{t,e} - p_{t,s}}{p_{t,e} - p_s} = \xi \left\langle \frac{A_s}{A_e} \right\rangle \approx 0,85 \div 0,97$$

#### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
 P.A. Rodríguez  
 A. Lecuona  
 R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

### 3.- CICLOS DE TGs. CONFIGURACIONES, PROCESOS Y MODELOS [volver](#)

#### PARÁMETROS DE ACTUACIONES:

**Turbinas de potencia:** Obviamos a partir de ahora el subíndice  $fl$  por claridad.

• Potencia neta:  $W_{eje} = \sum W_e - \sum W_c = \sum \dot{m}_e \tau_e - \sum \dot{m}_c \tau_c$

• Rendimiento energético:  $\eta_{TG} = \frac{\sum W_e - \sum W_c}{\sum \dot{Q}_{cb}} = \frac{W_{eje}}{\sum \dot{Q}_{cb}}$   $\sum \dot{Q}_{cb} = \sum \dot{m}_{cb} \cdot L_{ic}$

• Trabajo específico al eje:  $\tau_{eje} = \frac{W_{eje}}{\dot{m}}$   $\leftarrow \dot{m}_b ?$

• Consumo Específico:  $C_e = \frac{\sum \dot{m}_{cb}}{W_{eje}} = \frac{1}{L_{ic} \cdot \eta_{TG}}$

• Coeficiente de potencia:  $CPOT = \frac{\sum \tau_c}{\tau_{eje}}$

• Relación de trabajos:  $r_\tau = \frac{\sum \tau_c}{\sum \tau_e}$

#### Turborreactores [4]:

• Relación de derivación (bypass ratio):  $b_r = \frac{\dot{m}_{frio}}{\dot{m}_{caliente}} = \frac{\dot{m}_1 - \dot{m}_b}{\dot{m}_b}$

• Empuje:  $E = (\dot{m}_1 - \dot{m}_b) \cdot V_9 + \dot{m}_b \cdot V_8 - \dot{m}_1 \cdot V_1$

Ver Anexo !

Potencia propulsiva  $E \cdot V_1$

• Rendimiento propulsivo:  $\eta_{pr} = \frac{E \cdot V_1}{\frac{1}{2} \left( (\dot{m}_1 - \dot{m}_b) \cdot V_9^2 + \dot{m}_b \cdot V_8^2 - \dot{m}_1 \cdot V_1^2 \right)}$

• Rendimiento térmico:

$$\eta_t = \frac{E \cdot V_1 + \frac{1}{2} \left( (\dot{m}_1 - \dot{m}_b) \cdot (V_9 - V_1)^2 + \dot{m}_b \cdot (V_8 - V_1)^2 \right)}{\sum \dot{Q}_{cb}} = \frac{\frac{1}{2} \left( (\dot{m}_1 - \dot{m}_b) \cdot V_9^2 + \dot{m}_b \cdot V_8^2 - \dot{m}_1 \cdot V_1^2 \right)}{\sum \dot{Q}_{cb}}$$

• Rendimiento global:  $\eta_g = \eta_{pr} \cdot \eta_t = \frac{E \cdot V_1}{\sum \dot{Q}_{cb}}$



#### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas

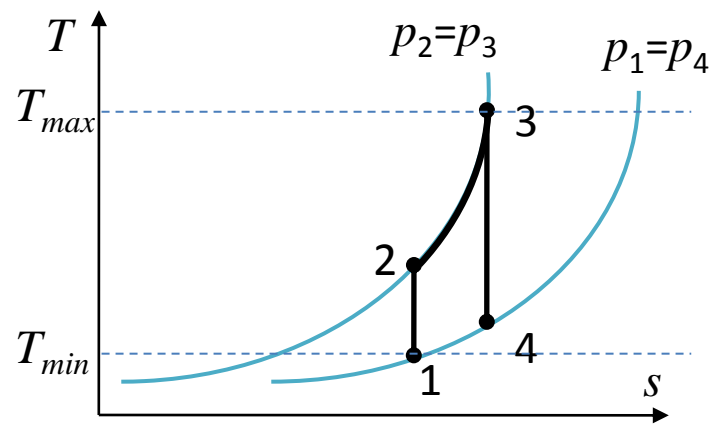
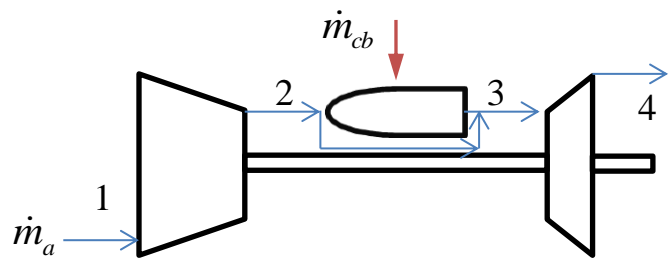


MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA



# 4.- CICLOS DE TG REVERSIBLES volver

Otros parámetros relevantes (se presenta su cálculo particularizado para CBE reversible de Brayton, denominado ciclo simple ideal o reversible):



A partir de ahora se obvia el subíndice *t* por claridad, habiéndose de aplicar la adecuada.

- Relación de presiones:  $\Pi = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_4}$
- Límite de temperaturas:  $\theta = \frac{T_{max}}{T_{min}} = \frac{T_3}{T_1}$

- Relación de temperaturas:  $r_t = \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} = \Pi^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$
- $\theta > r_t > 1$

### Parámetros de actuaciones:

- Rendimiento energético:  $\eta_{CBE_r} = 1 - \frac{1}{r_t} = 1 - \frac{1}{\Pi^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$
- Trabajo específico:  $\tau_{eje} = \tau_e - \tau_c = c_p \cdot [(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)]$
- Potencia:  $W_{eje} = \dot{m}_a \cdot \tau_{eje} = \dot{m}_a \cdot c_p \cdot [(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)]$
- Consumo Específico:  $C_e = \frac{\dot{m}_{cb}}{W_{eje}} = \frac{1}{L_i \cdot \eta_{CBE_r}}$
- Coeficiente de potencia:  $CPOT = \frac{\tau_c}{\tau_{eje}} = \frac{\tau_c}{\tau_e - \tau_c} = \frac{r_t}{\theta - r_t} > 1$
- Relación de trabajos:  $r_\tau = \frac{\tau_c}{\tau_e} = \frac{r_t}{\theta}$

### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

- Objetivos
- Nomenclatura
- Configuraciones, procesos y modelos
- Ciclos reversibles**
- Rendimiento de componentes
- Ciclos húmedos
- Tipos de TGs
- Operación de TGs
- Conclusiones
- Anexos
- Ejercicios
- Autoevaluación
- Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA



## 4.- CICLOS DE TG REVERSIBLES [volver](#)

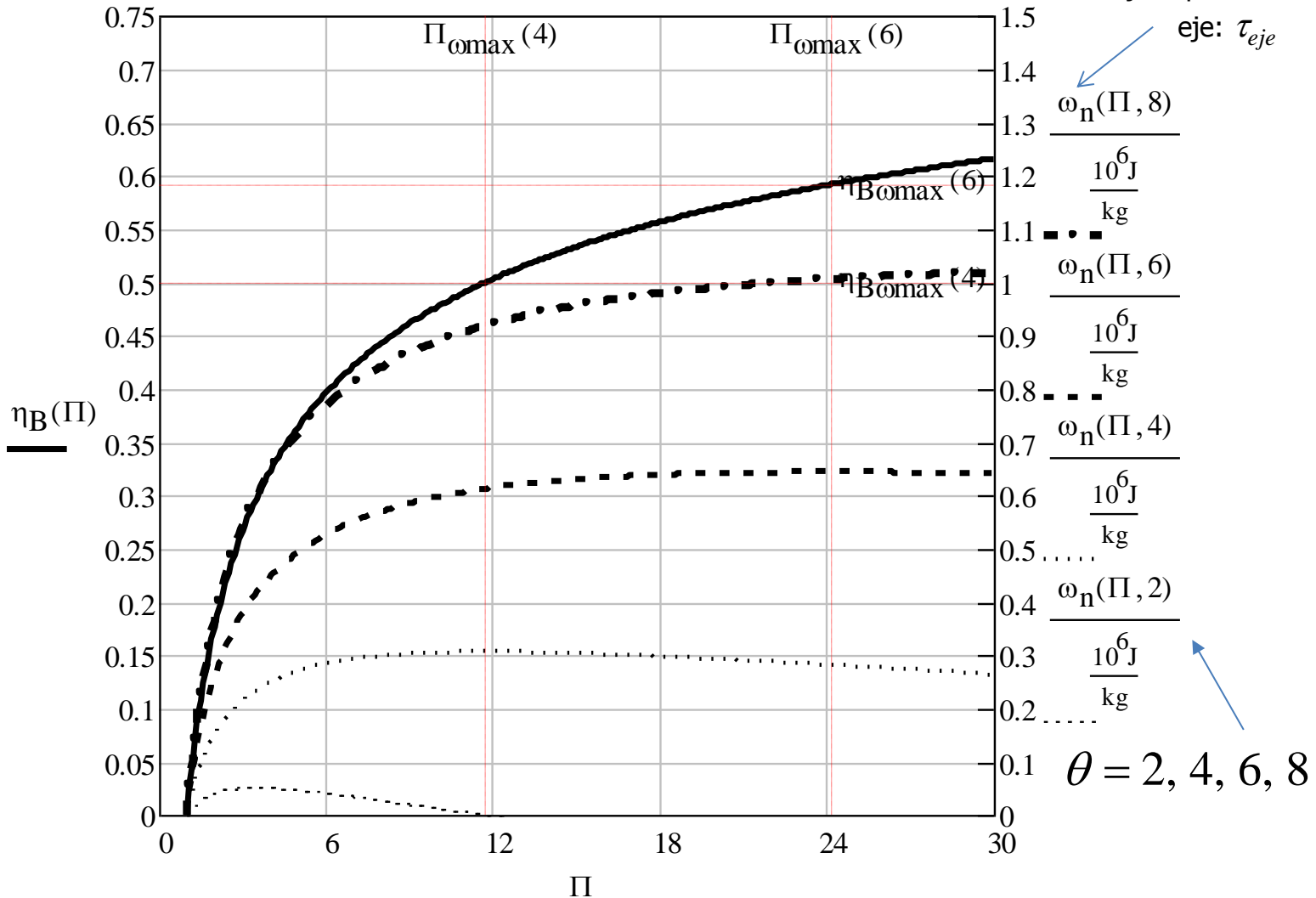
Ciclo básico de aire. CBE reversible de Brayton:  
 Parámetros de actuaciones:

$$\Pi_{\tau_{max}} = \theta^{\frac{\gamma}{2(\gamma-1)}}$$

➤ Rendimiento y trabajo específico:  $r_{t, \tau_{max}} = \sqrt{\theta}$

$$\eta_{CBE_r, \tau_{max}} = 1 - \frac{1}{\sqrt{\theta}}$$

Trabajo específico eje:  $\tau_{eje}$



$\theta = 2, 4, 6, 8$

### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
- 4. Ciclos reversibles**
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
 P.A. Rodríguez  
 A. Lecuona  
 R. Ventas



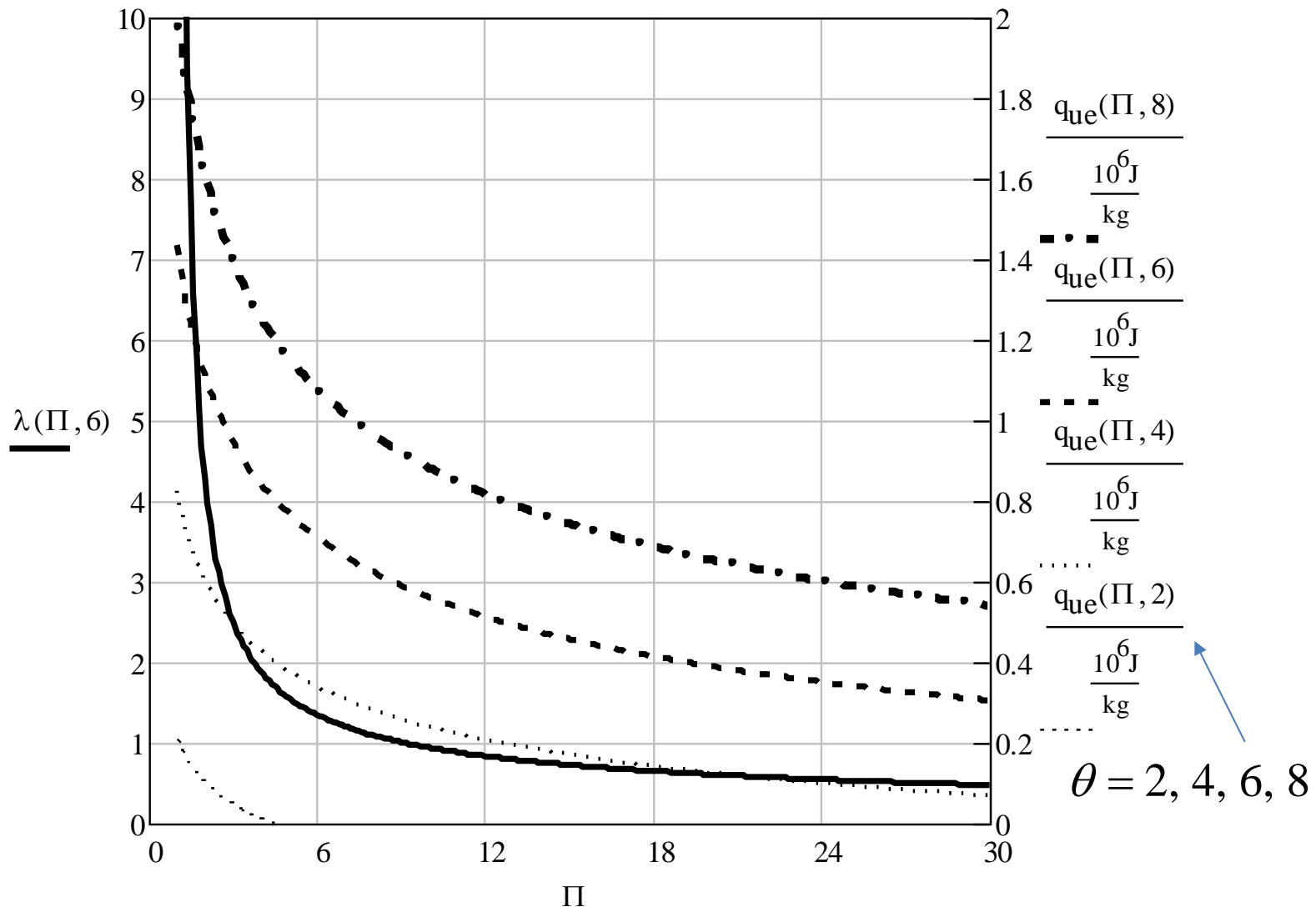
MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA



## 4.- CICLOS DE TG REVERSIBLES [volver](#)

Ciclo básico de aire. CBE reversible de Brayton:  $\lambda = \frac{q_{ue}}{\tau_{eje}}$   $T_{ch} = 120^\circ\text{C}$   
 Parámetros de actuaciones:

➤ Relación de cogeneración ( $\lambda$ ) y Calor útil:  $q_{ue} = c_p \cdot (T_4 - T_{ch})$



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
- 4. Ciclos reversibles**
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
 P.A. Rodríguez  
 A. Lecuona  
 R. Ventas

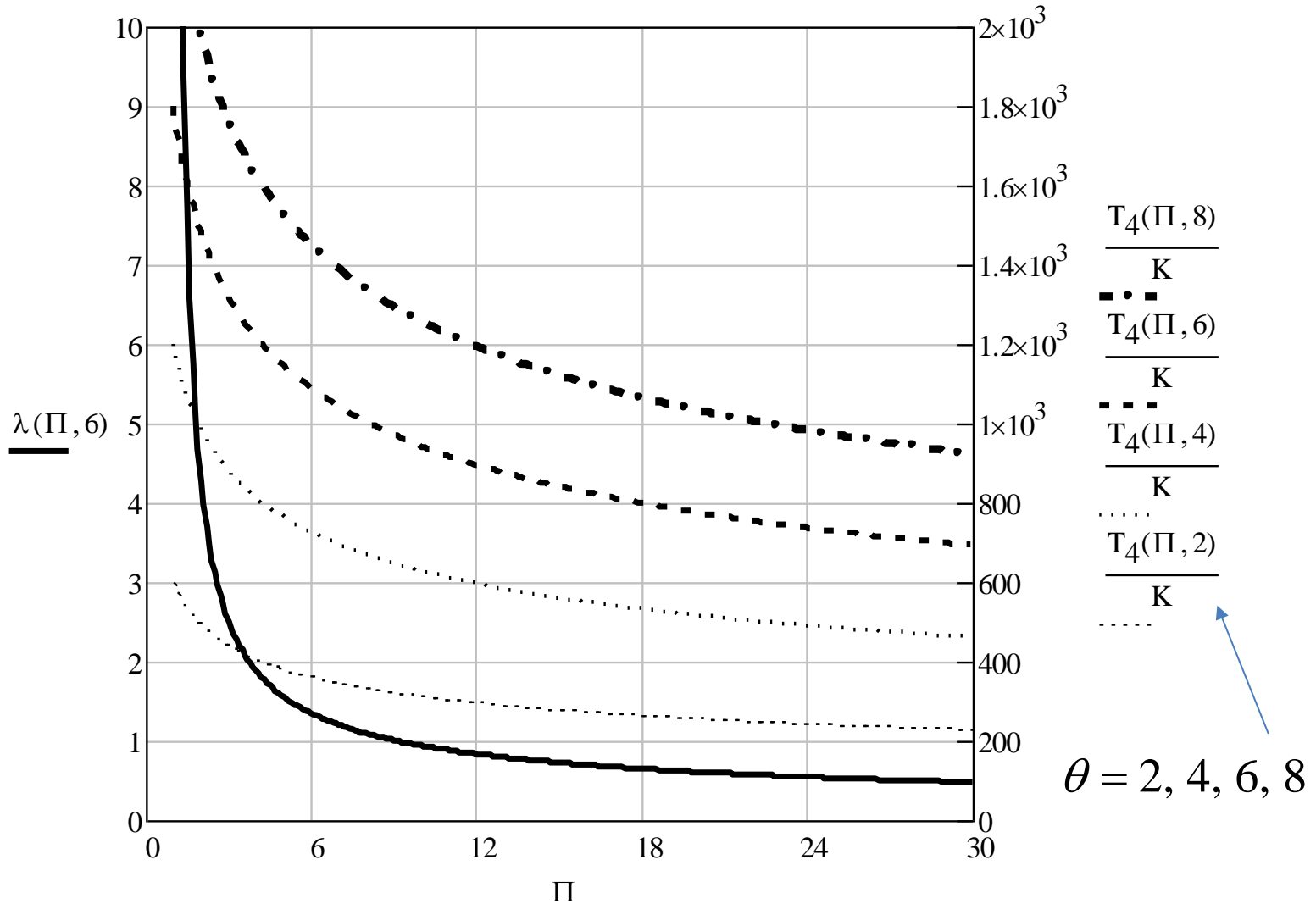


MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

## 4.- CICLOS DE TG REVERSIBLES [volver](#)

Ciclo básico de aire. CBE reversible de Brayton:  
Parámetros de actuaciones:

➤ Relación de cogeneración ( $\lambda$ ) y Temperatura de escape ( $T_4$ ):



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
- 4. Ciclos reversibles**
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

*Autores:*  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas

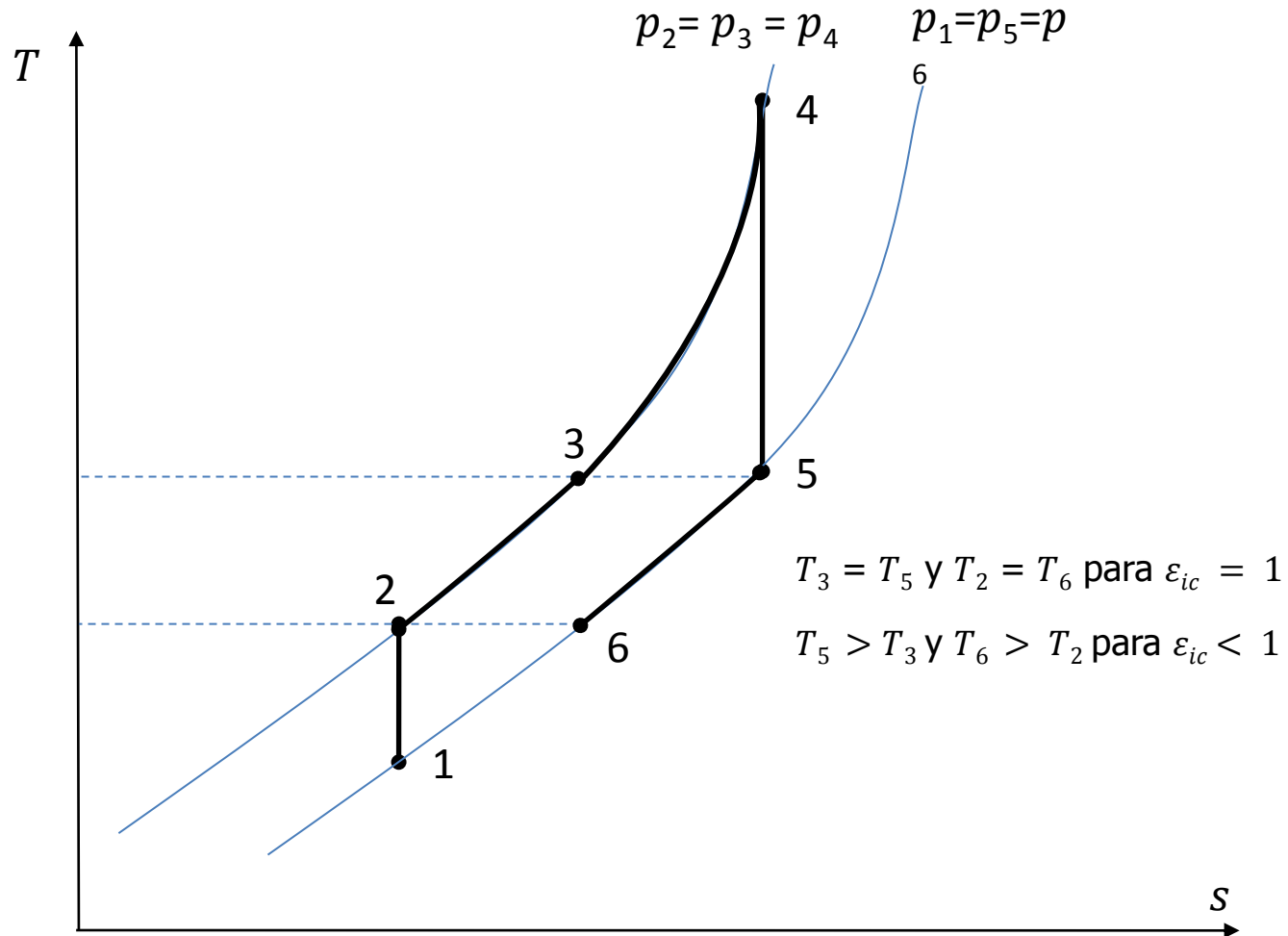
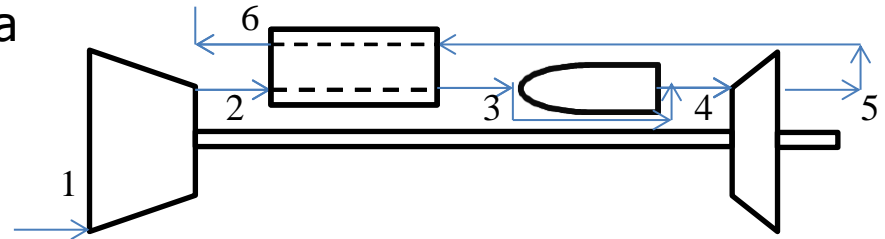


MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA



## 4.- CICLOS DE TG REVERSIBLES [volver](#)

Ciclo reversible de aire. Turbina CBEX:



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
- 4. Ciclos reversibles**
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

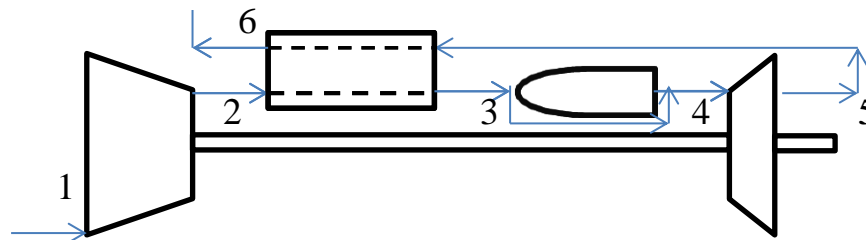
Autores:  
 P.A. Rodríguez  
 A. Lecuona  
 R. Ventas



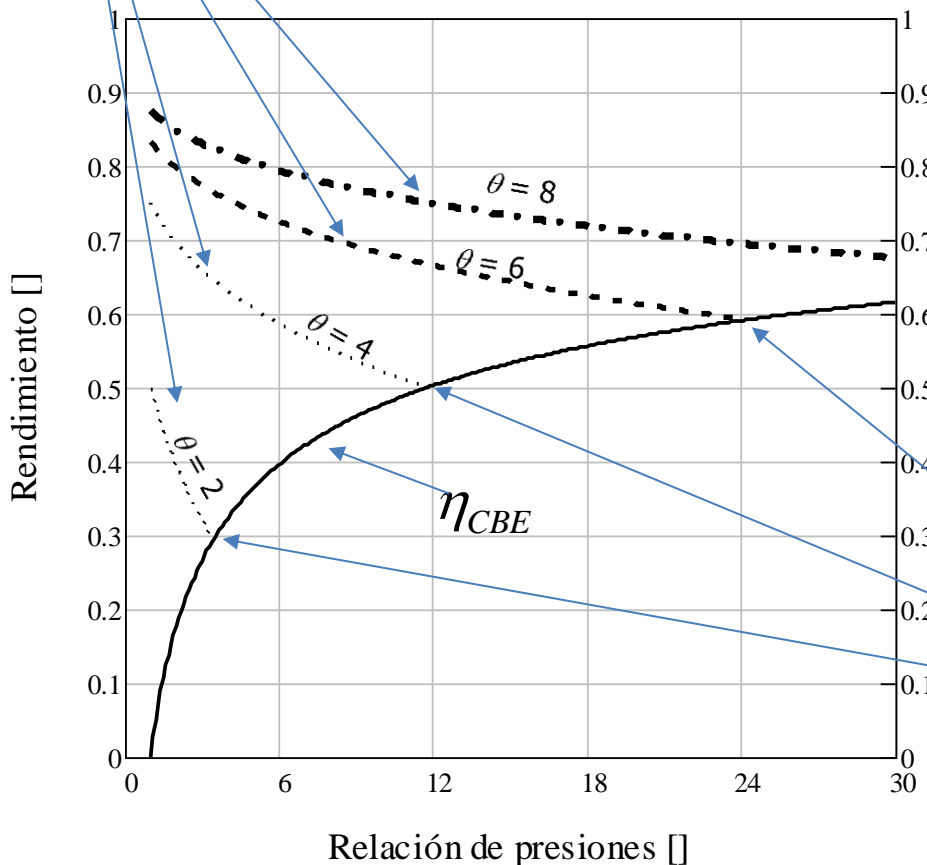
MOTORES DE  
 COMBUSTIÓN  
 INTERNA

# 4.- CICLOS DE TG REVERSIBLES [volver](#)

Ciclo reversible de aire. Turbina  
CBEX:



$$\eta_{CBEX_r} = 1 - \frac{\tau_c}{\tau_e} = 1 - \frac{r_t}{\theta}$$



Límite para la regeneración:

$$T_2 \leq T_5 \rightarrow r_{t,max} = \sqrt{\theta} = r_{t,\tau_{max}}$$

$$r_{t,max} = \Pi_{max}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \Rightarrow$$

$$\Pi_{max} = \theta^{\left(\frac{\gamma}{2(\gamma-1)}\right)}$$



CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
- 4. Ciclos reversibles**
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

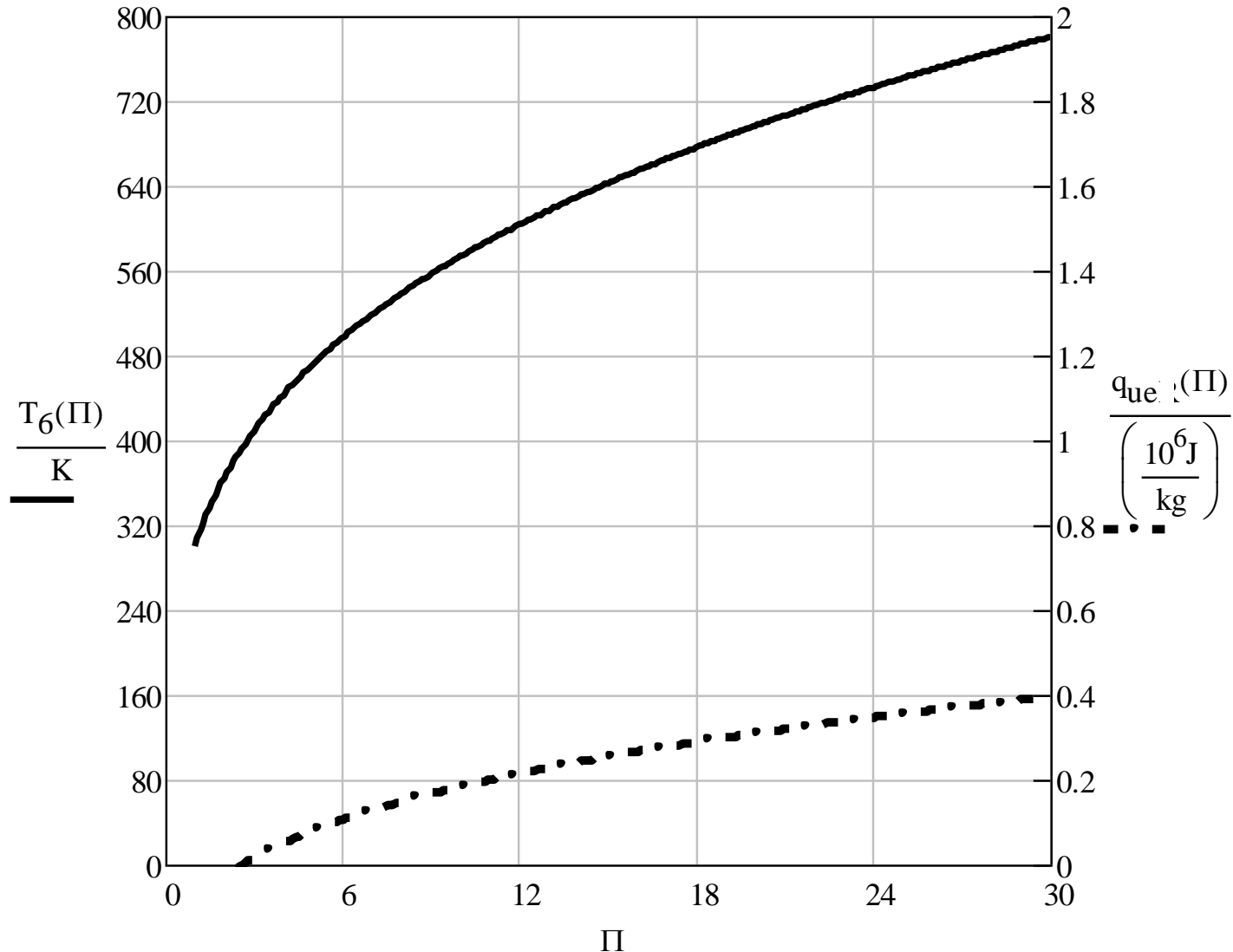
## 4.- CICLOS DE TG REVERSIBLES [volver](#)

Ciclo reversible de aire. Turbina CBEX:

$$T_{ch} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$$

Temperatura y energía del gas de escape  
(no dependen de  $\theta$ ):

$$q_{ue} = c_p \cdot (T_6 - T_{ch})$$



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
- 4. Ciclos reversibles**
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

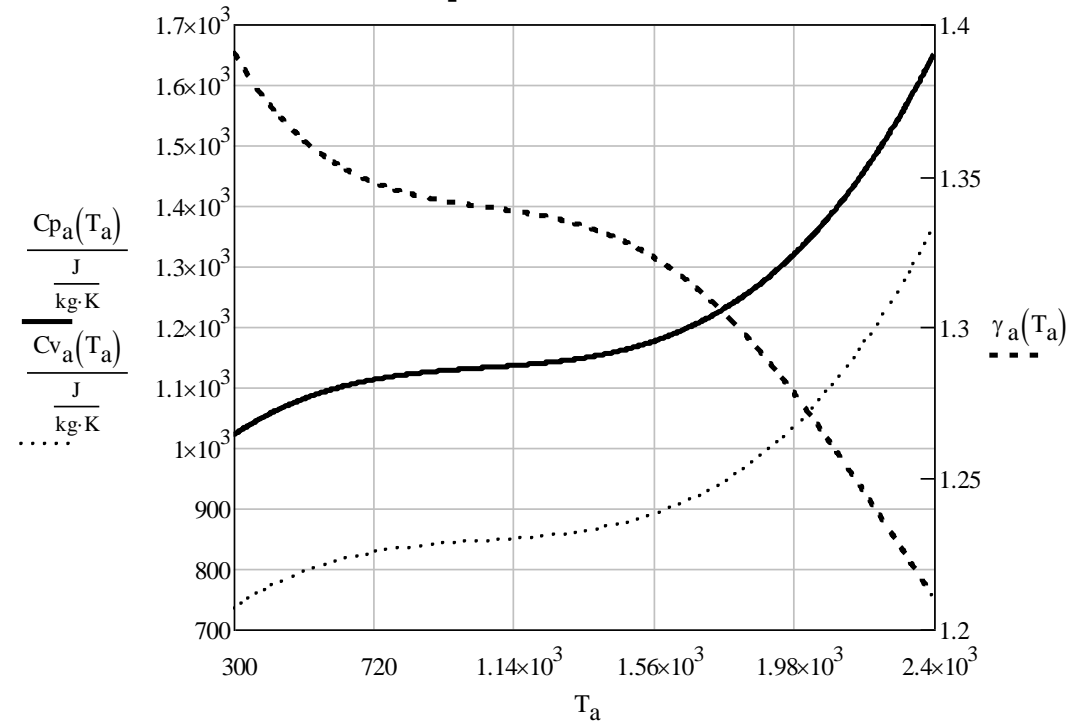
*Autores:*  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA

## 4.- CICLOS DE TG REVERSIBLES [volver](#)

Ciclo CBE reversible ( $r$ ) de aire. **Calores específicos variables con  $T$ :**



Propiedades del aire:

Balances de energía:

$$\tau_{eje} = \tau_e - \tau_c = \Delta h_{t,e} - \Delta h_{t,c} = \int_{T_3}^{T_4} c_p \langle T \rangle dT - \int_{T_1}^{T_2} c_p \langle T \rangle dT \quad q_b = \Delta h_{t,b} = \int_{T_2}^{T_3} c_p \langle T \rangle dT$$

Procesos isoentrópicos en compresor y turbina, **Cap.5 de turbomaquinaria:**

$$0 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_p \langle T \rangle}{T} dT - R_{g,a} \cdot \ln(\Pi) \quad 0 = \int_{T_3}^{T_4} \frac{c_p \langle T \rangle}{T} dT - R_{g,a} \cdot \ln\left(\frac{1}{\Pi}\right)$$



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
- 4. Ciclos reversibles**
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA

# 4.- CICLOS DE TG REVERSIBLES [volver](#)

Ciclo CBE reversible ( $r$ ) de aire. **Calores específicos variables** con  $T$ :  
 Parámetros de actuaciones:



## CICLOS DE TURBINAS DE GAS

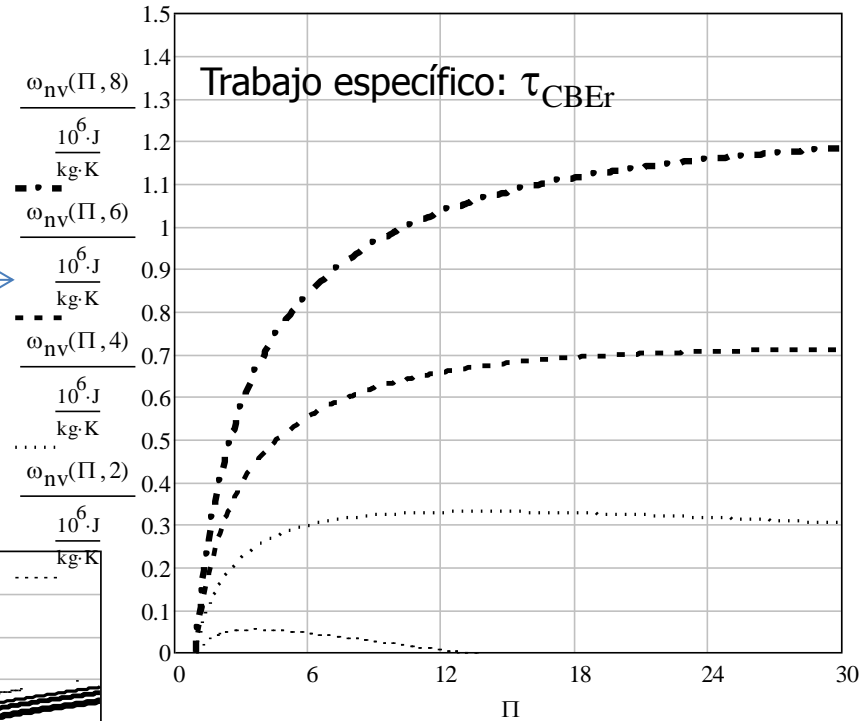
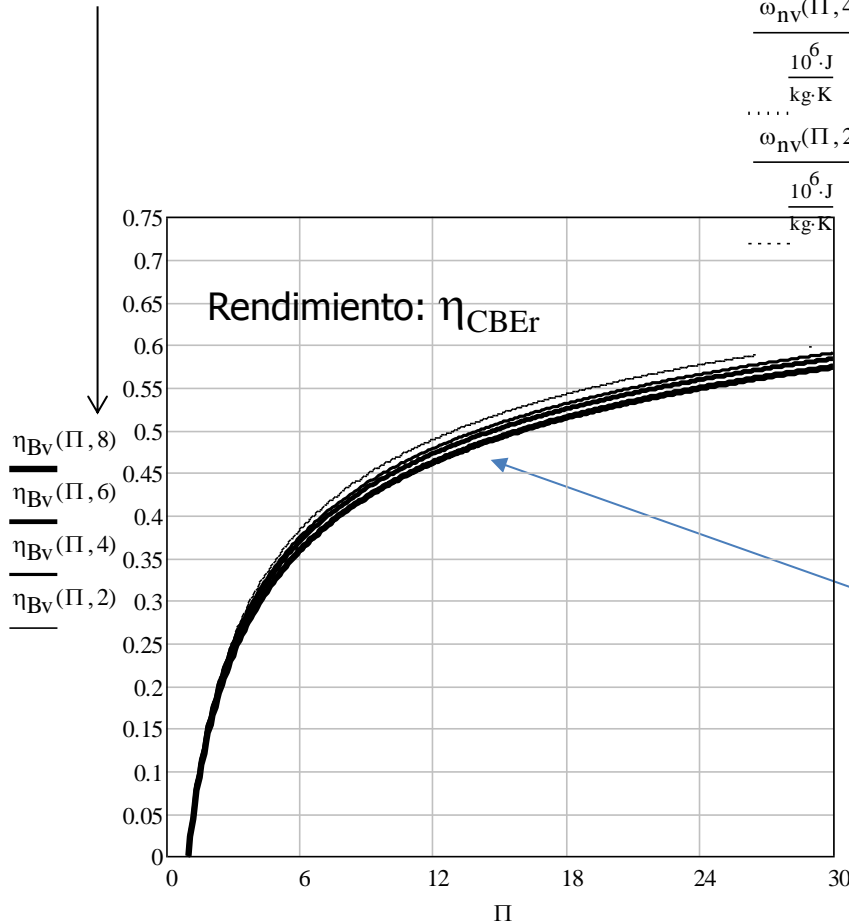
1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
- 4. Ciclos reversibles**
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

*Autores:*  
 P.A. Rodríguez  
 A. Lecuona  
 R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

$\theta = 2, 4, 6, 8$



El rendimiento del ciclo ideal (reversible) depende principalmente de  $\Pi$ .

## 4.- CICLOS DE TG REVERSIBLES *volver*

Ciclo CBE reversible ( $r$ ) de aire. **Calores específicos variables** con  $T$ :

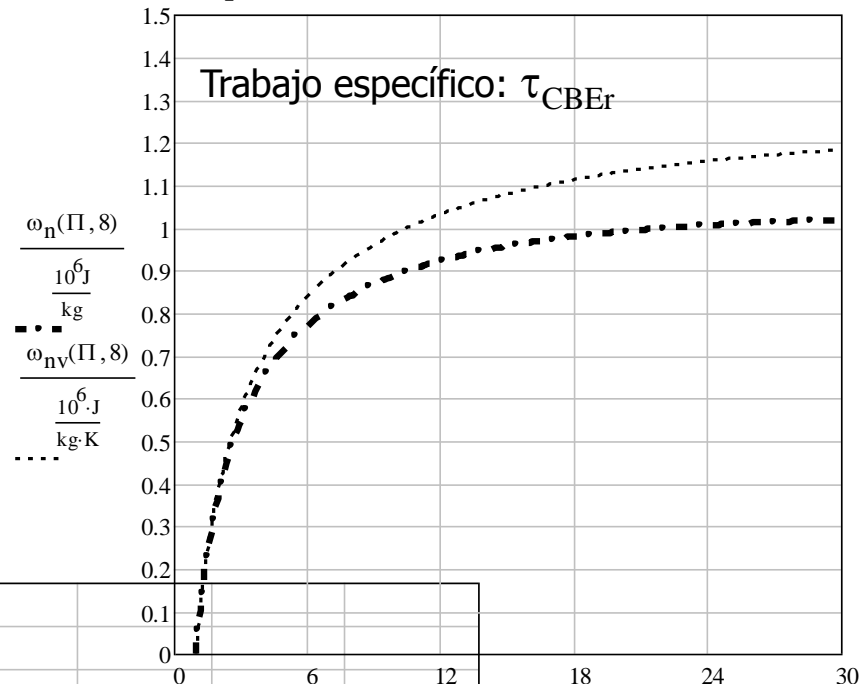
Parámetros de actuaciones:

➤ Trabajo específico :

$$\theta = 8$$

$$c_p = \text{cte.} \longrightarrow$$

$$c_p = \text{var.} \longrightarrow$$



➤ Rendimiento energético :

$$c_p = \text{cte.}$$

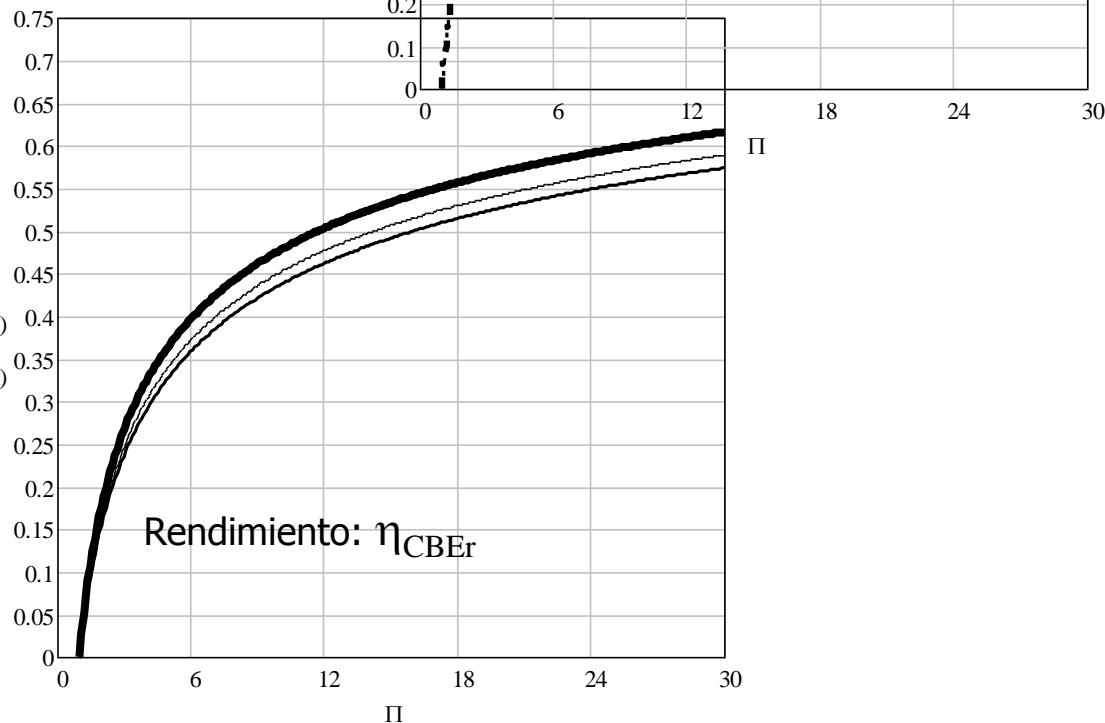
$$\theta = 4, 8$$

$$c_p = \text{var.}$$

$$\eta_B(\Pi)$$

$$\eta_{Bv}(\Pi, 8)$$

$$\eta_{Bv}(\Pi, 4)$$



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
- 4. Ciclos reversibles**
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas

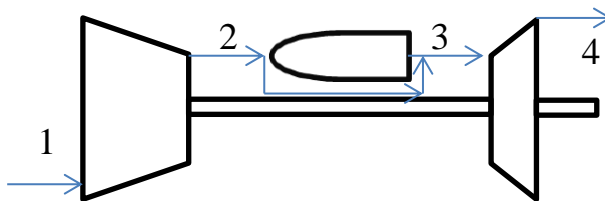


MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

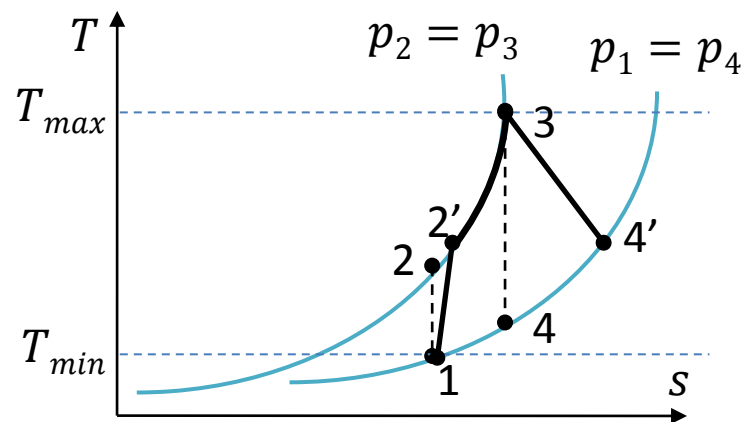


## 5.- EFECTO DE LOS RENDIMIENTOS DE COMPONENTES *volver*

Ciclo CBE **irreversible** ( $\theta$ ) de aire. **Calores específicos constantes:**



$$\theta > r_t > 1$$



- Relación de presiones:  $\Pi = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_4}$
- Límite de temperaturas:  $\theta = \frac{T_{max}}{T_{min}} = \frac{T_3}{T_1}$

- Relación de temperaturas:  $r_t = \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} = \Pi^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$

Los parámetros básicos se definen como en CBE reversible

**Rendimiento isoentrópico y trabajo específico de una máquina compresora:**

$$\eta_c = \frac{\tau_{fl,c,s}}{\tau_{fl,c}} = \frac{\Delta h_{t,s}}{\Delta h_t} = \frac{\overbrace{T_2 - T_1}^{\text{Obviando } t}}{T_2' - T_1}$$

$$T_2' = T_1 \cdot \left\{ 1 + \frac{\Pi_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\eta_c} \right\}$$

$$\tau_{fl,c} = \frac{c_p \cdot T_1}{\eta_c} \cdot \left\{ \Pi_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right\}$$

**Rendimiento isoentrópico y trabajo específico de una máquina expansora:**

$$\eta_e = \frac{\tau_{fl,e}}{\tau_{fl,e,s}} = \frac{\Delta h_t}{\Delta h_{t,s}} = \frac{T_3 - T_4'}{T_3 - T_4}$$

$$T_4' = T_3 \cdot \left\{ 1 - \eta_e \cdot \left( 1 - \frac{1}{\Pi_e^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right) \right\}$$

$$\tau_{fl,e} = c_p \cdot \eta_e \cdot T_3 \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{\Pi_e^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right\}$$

### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

- Objetivos
- Nomenclatura
- Configuraciones, procesos y modelos
- Ciclos reversibles
- Rendimiento de componentes**
- Ciclos húmedos
- Tipos de TGs
- Operación de TGs
- Conclusiones
- Anexos
- Ejercicios
- Autoevaluación
- Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

## 5.- EFECTO DE LOS RENDIMIENTOS DE COMPONENTES [volver](#)

### Ciclo CBE irreversible ( $i$ ) de aire. **Calores específicos constantes:**

Parámetros de actuaciones:

• Parámetros de "irreversibilidad":  $\alpha = \eta_e \cdot \eta_c \cdot \theta$        $\beta = 1 + \eta_c \cdot (\theta - 1)$

• Rendimiento del ciclo irreversible:

$$\eta_{CBE_i} = \frac{\tau_{eje}}{q_b} = \frac{\tau_{fl,e} - \tau_{fl,c}}{q_b} = 1 - \frac{T_{4'} - T_1}{T_3 - T_2'}$$

$$\eta_{CBE_i} = \frac{\left(1 - \frac{1}{r_t}\right) \cdot (\alpha - r_t)}{\beta - r_t}$$

El rendimiento del ciclo irreversible depende de  $\theta \rightarrow T_{max}$

• Trabajo específico del ciclo irreversible :

$$\tau_{eje, CBE_i} = \tau_{fl,e} - \tau_{fl,c} = c_p \cdot [(T_3 - T_{4'}) - (T_2' - T_1)]$$

$$\tau_{nCBE_i} = \frac{c_p \cdot T_1}{\eta_c} \cdot \left(1 - \frac{1}{r_t}\right) \cdot (\alpha - r_t)$$

Para unos valores fijados de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  de "irreversibilidad" (i.e.  $\eta_c$ ,  $\eta_e$  y  $\theta$  están fijados), existen valores óptimos de  $r_t$  y por tanto de  $\Pi$ :

Máximo rendimiento:  $\left. \frac{d\eta_{CBE_i}}{dr_t} \right|_{\substack{\alpha=cte. \\ \beta=cte.}} = 0 \longrightarrow$

$$r_{t\eta_{CBE_i}max} = \frac{\alpha \pm \sqrt{\alpha \cdot (\alpha - \beta) \cdot (1 - \beta)}}{1 + \alpha - \beta}$$

Máximo trabajo específico:  $\left. \frac{d\tau_{nCBE_i}}{dr_t} \right|_{\substack{\alpha=cte. \\ \eta_c=cte.}} = 0 \longrightarrow$

$$r_{t\tau_{nCBE_i}max} = \sqrt{\alpha}$$



CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA



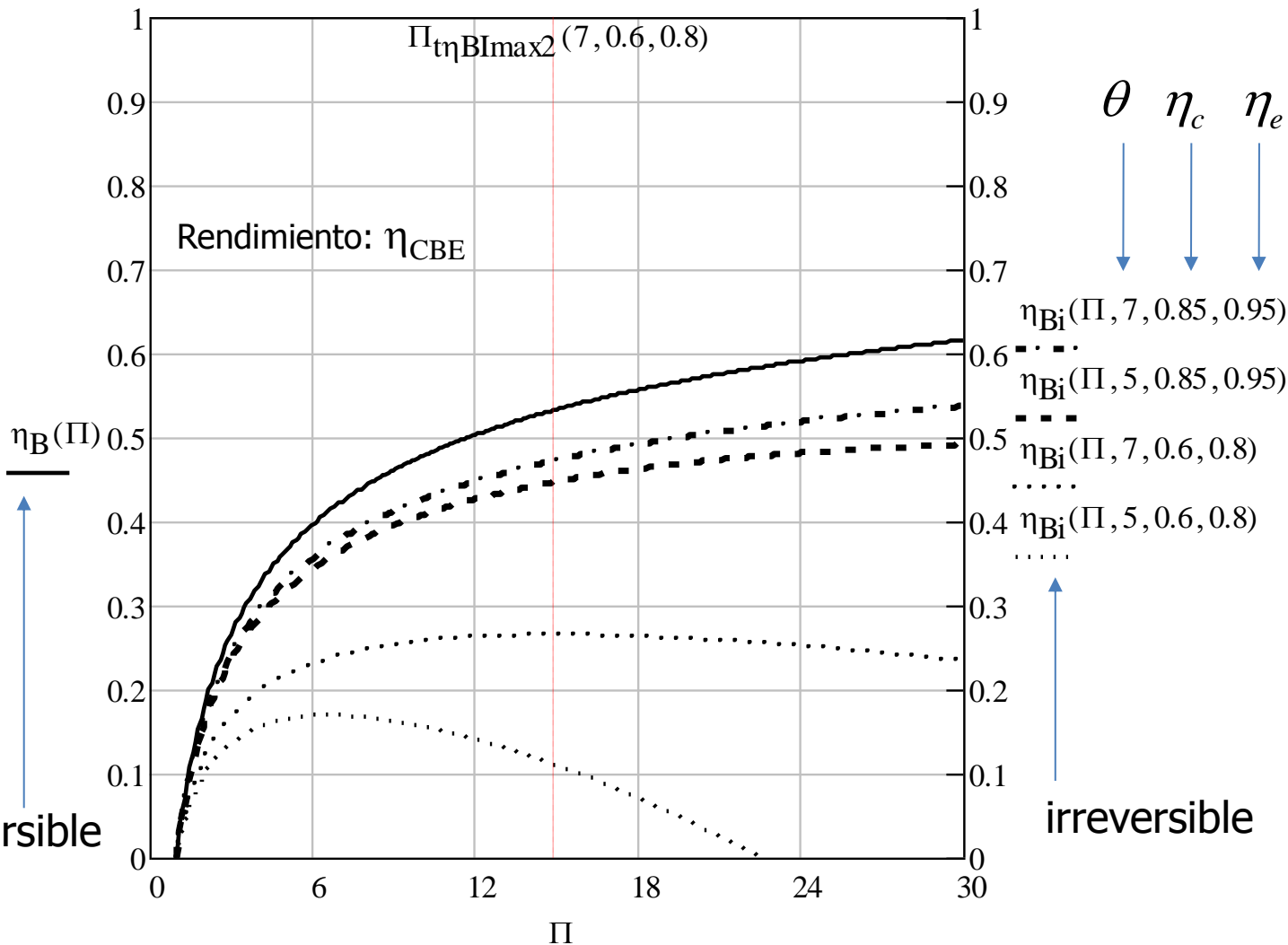


## 5.- EFECTO DE LOS RENDIMIENTOS DE COMPONENTES [volver](#)

Ciclo CBE **irreversible** de aire. **Calores específicos constantes:**

Parámetros de actuaciones: con rend. isentrópicos ctes.  $\eta$ .

➤ Rendimiento energético: significativa influencia de los rendimientos de componentes



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
- 5. Rendimiento de componentes**
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
 P.A. Rodríguez  
 A. Lecuona  
 R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

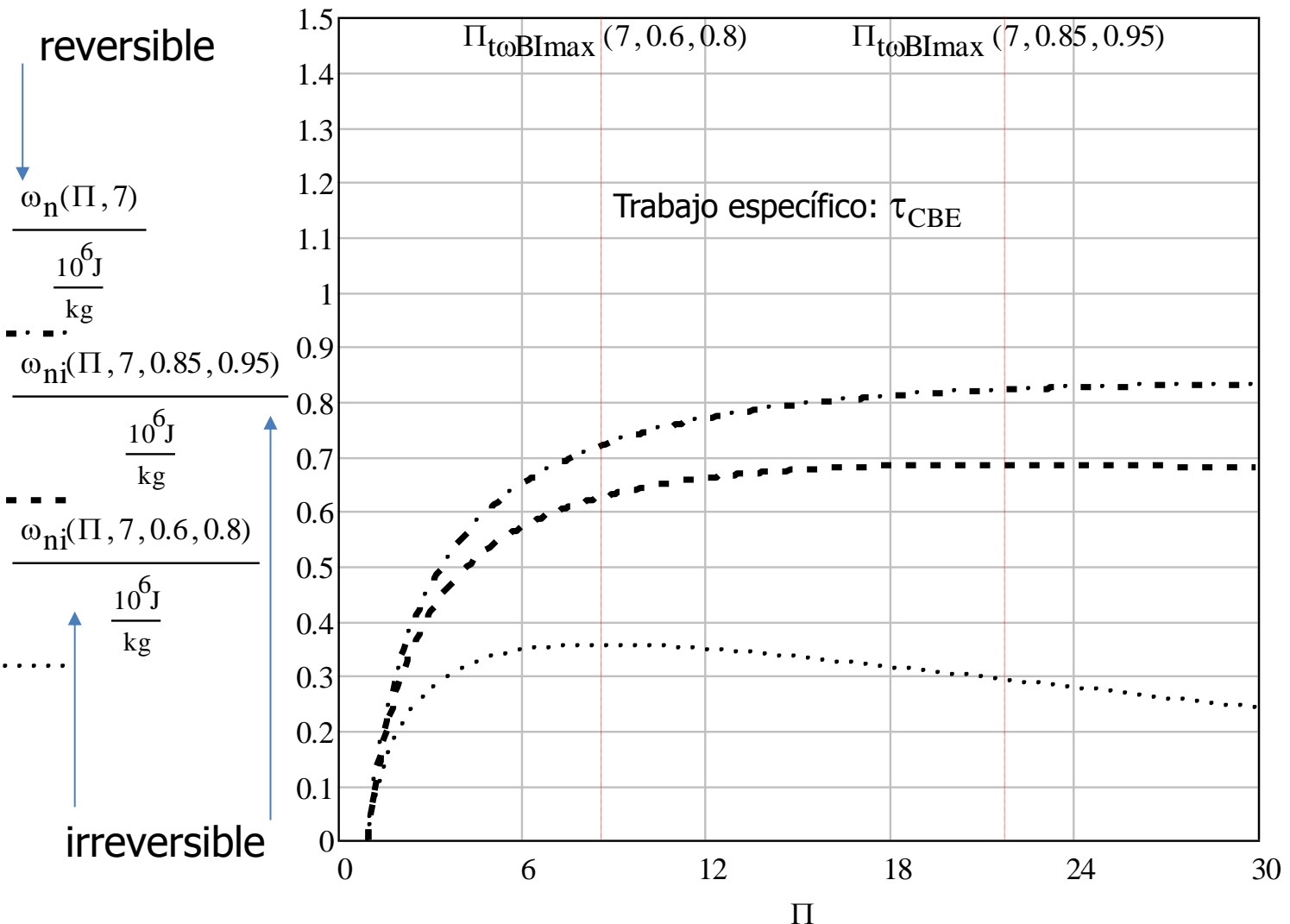


## 5.- EFECTO DE LOS RENDIMIENTOS DE COMPONENTES [volver](#)

Ciclo CBE **irreversible** de aire. **Calores específicos constantes:**

Parámetros de actuaciones: con rend. isentrópicos ctes.

➤ Trabajo específico: significativa influencia de los rendimientos de componentes



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA



# 5.- EFECTO DE LOS RENDIMIENTOS DE COMPONENTES [volver](#)

Ciclo CBE **irreversible** de aire. **Calores específicos constantes:**

Parámetros de actuaciones: con rend. isentrópicos ctes.

➤ Temperatura de escape: controlada por  $\theta$ . Depende de  $\eta_e$ .

$\eta_e$  (reversible)

$$\frac{T_{4i}(\Pi, 6, 1)}{K}$$

K

$$\frac{T_{4i}(\Pi, 6, 0.95)}{K}$$

K

$$\frac{T_{4i}(\Pi, 6, 0.8)}{K}$$

K

$$\frac{T_{4i}(\Pi, 3, 1)}{K}$$

K

$$\frac{T_{4i}(\Pi, 3, 0.95)}{K}$$

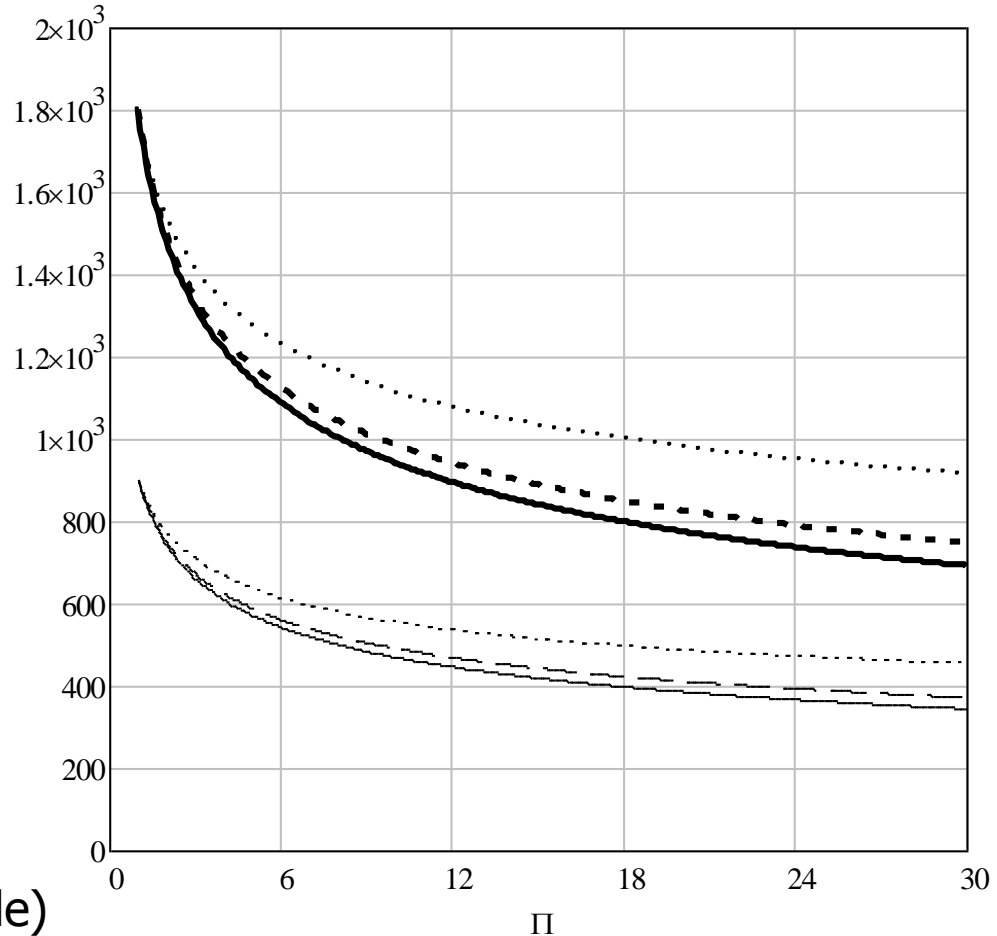
K

$$\frac{T_{4i}(\Pi, 3, 0.8)}{K}$$

K

$\theta$

$\eta_e$  (irreversible)



## CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
- 5. Rendimiento de componentes**
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

*Autores:*  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

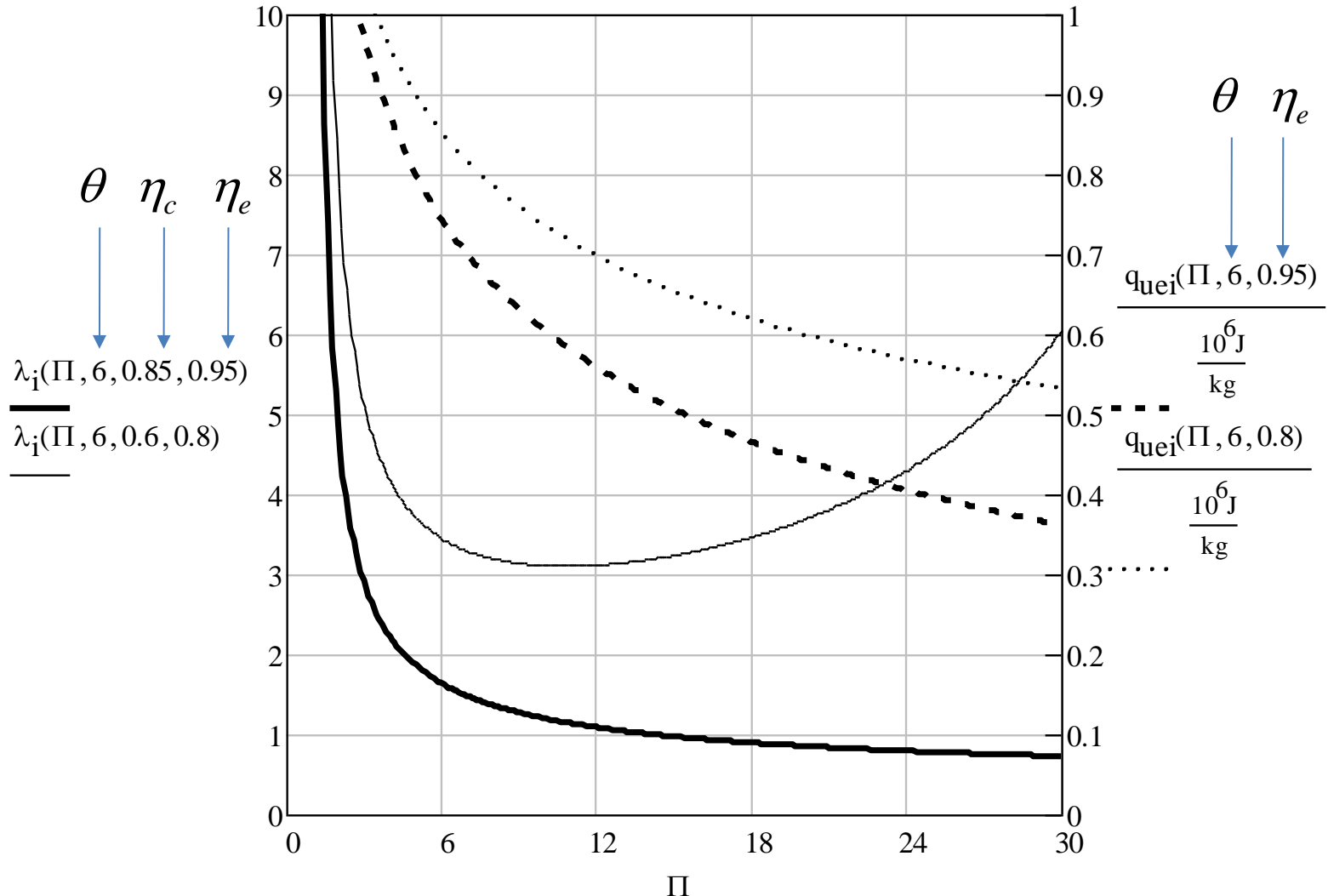


## 5.- EFECTO DE LOS RENDIMIENTOS DE COMPONENTES [volver](#)

Ciclo CBE **irreversible** de aire. **Calores específicos constantes:**

Parámetros de actuaciones: con rend. isentrópicos ctes.

➤ Relación de cogeneración ( $\lambda$ ) y energía del gas de escape:



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
- 5. Rendimiento de componentes**
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

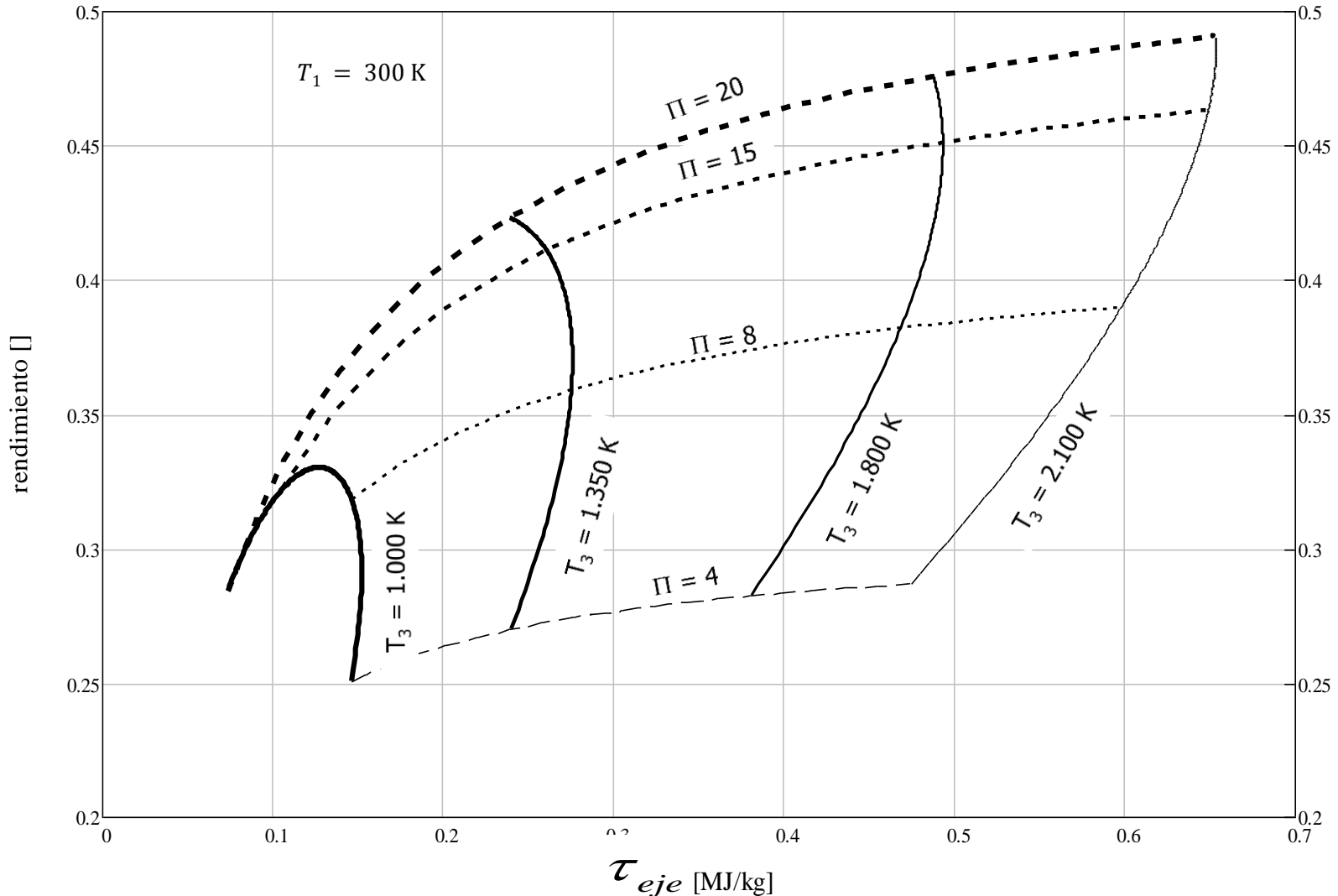


## 5.- EFECTO DE LOS RENDIMIENTOS DE COMPONENTES [volver](#)

Ciclo CBE **irreversible** de aire. **Calores específicos constantes:**

Parámetros de actuaciones: usando rend. isentrópicos ctes.

$$\eta_c = 0,8 \quad \eta_e = 0,95$$



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
- 5. Rendimiento de componentes**
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA

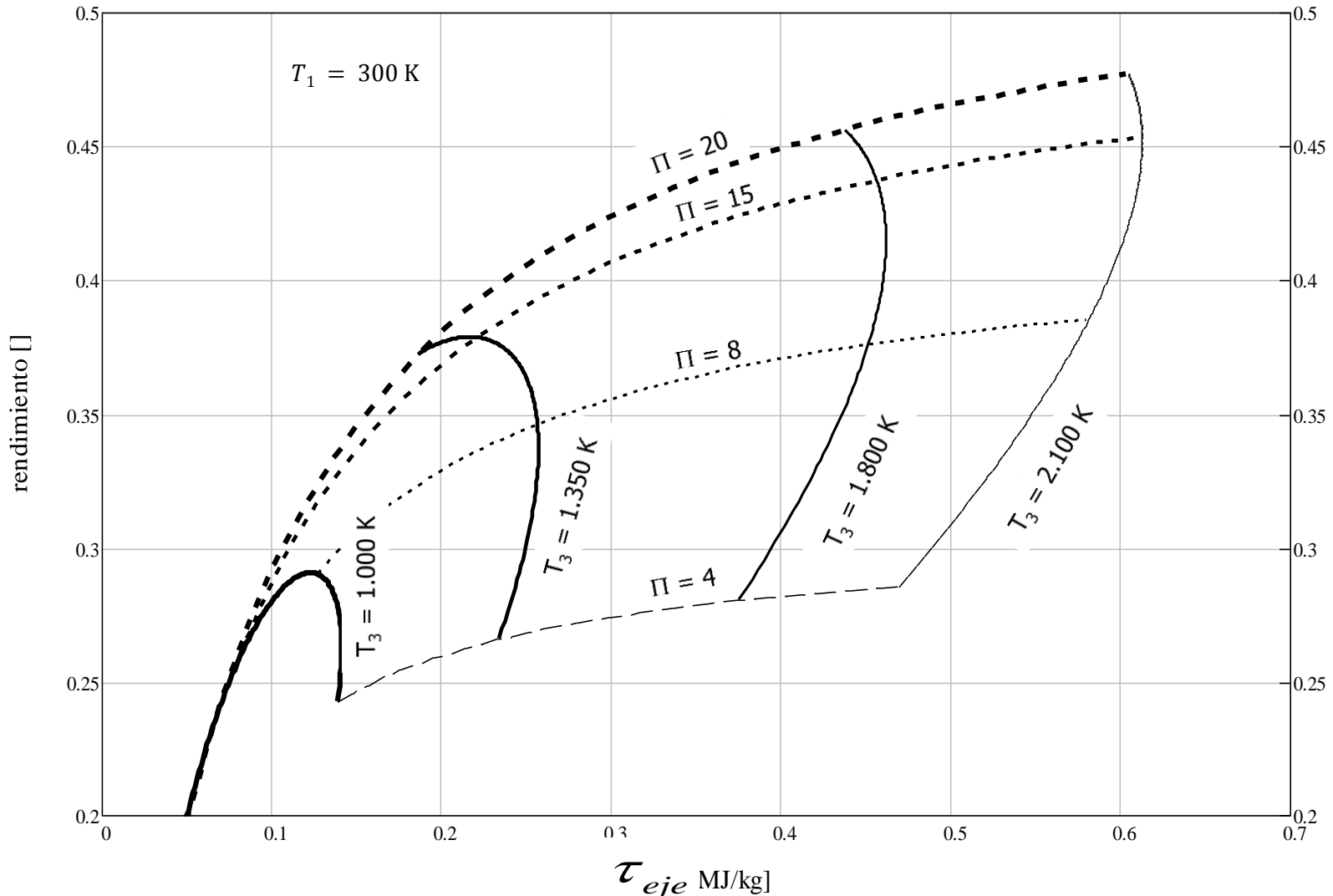


## 5.- EFECTO DE LOS RENDIMIENTOS DE COMPONENTES [volver](#)

Ciclo CBE **irreversible** de aire. **Calores específicos constantes:**

Parámetros de actuaciones: con rend. politrópicos ctes.  $\eta_p$ .

$$\eta_{c,p} = 0,8; \eta_{e,p} = 0,95 \quad \eta_c \text{ y } \eta_e \text{ dependen de } \Pi$$



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
- 5. Rendimiento de componentes**
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA

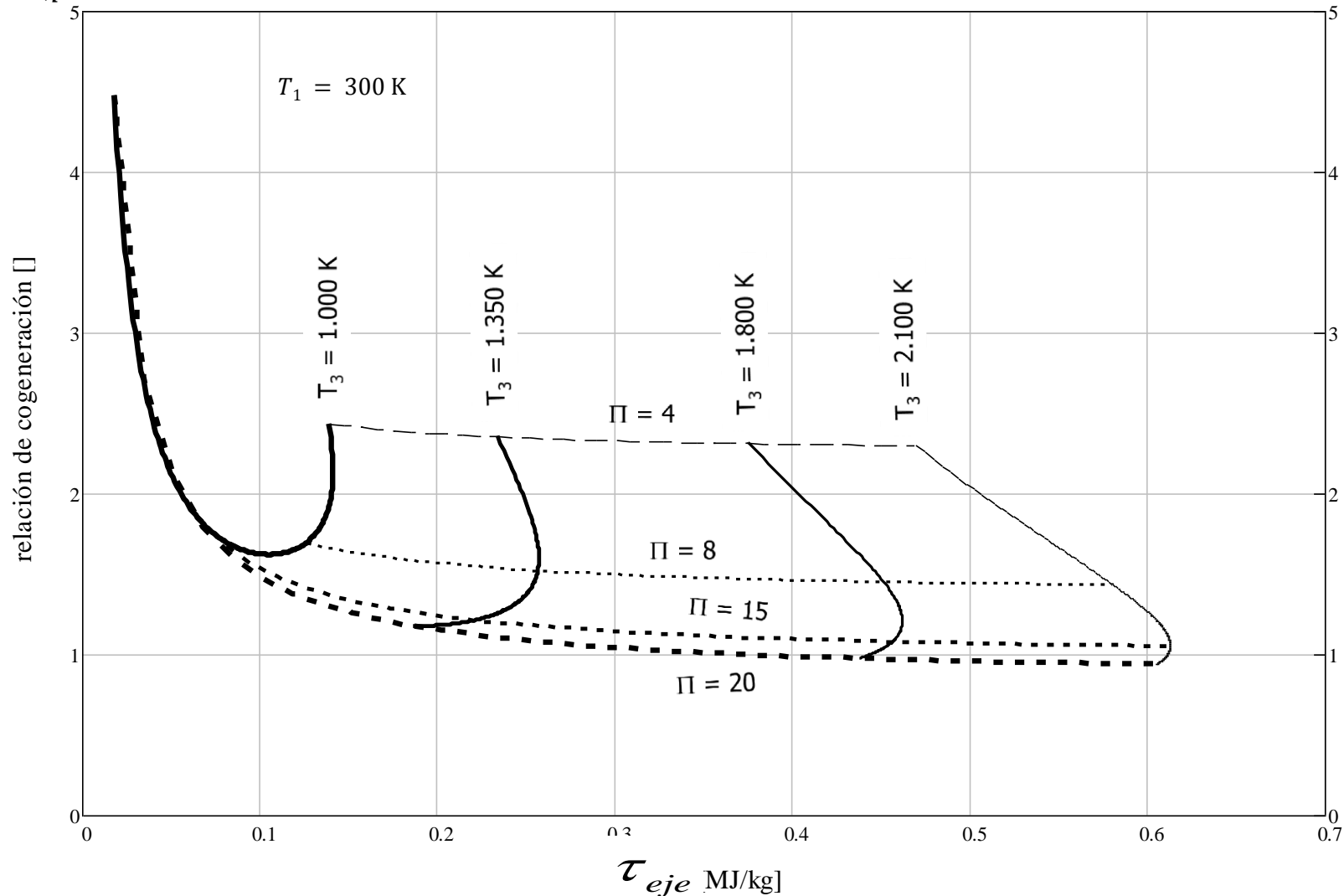


# 5.- EFECTO DE LOS RENDIMIENTOS DE COMPONENTES [volver](#)

## Ciclo CBE irreversible de aire. Calores específicos constantes:

### Parámetros de actuaciones:

$\eta_{c,p} = 0,8$  Relación de cogeneración ( $\lambda$ ) casi constante al variar la carga  
 $\eta_{e,p} = 0,95$



#### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
- 5. Rendimiento de componentes**
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA



# 5.- EFECTO DE LOS RENDIMIENTOS DE COMPONENTES [volver](#)

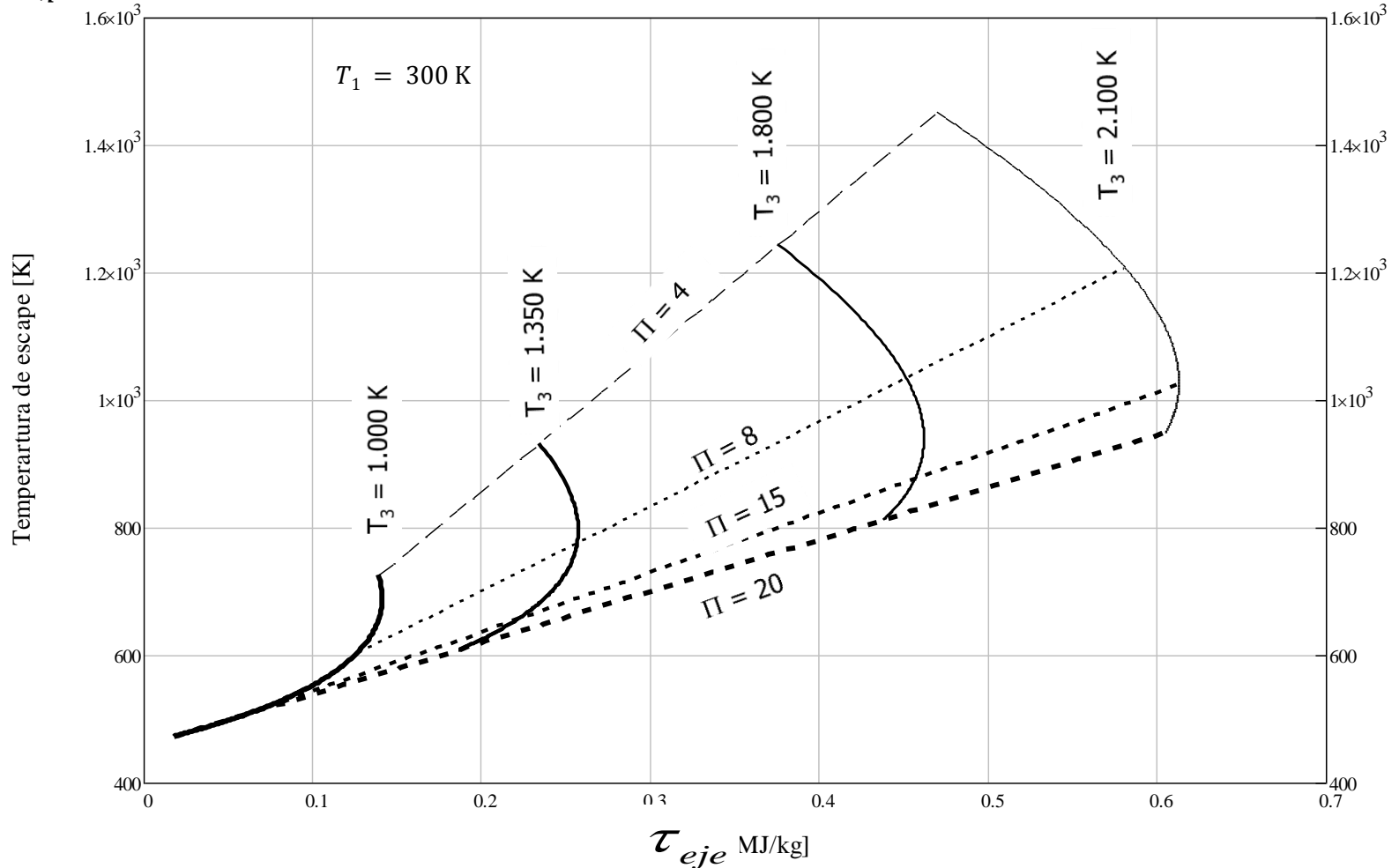
## Ciclo CBE irreversible de aire. Calores específicos constantes:

### Parámetros de actuaciones:

$$\eta_{c,p} = 0,8$$

Temperatura de escape muy dependiente de la carga

$$\eta_{e,p} = 0,95$$



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
- 5. Rendimiento de componentes**
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

*Autores:*  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



**MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA**





# 5.- EFECTO DE LOS RENDIMIENTOS DE COMPONENTES [volver](#)

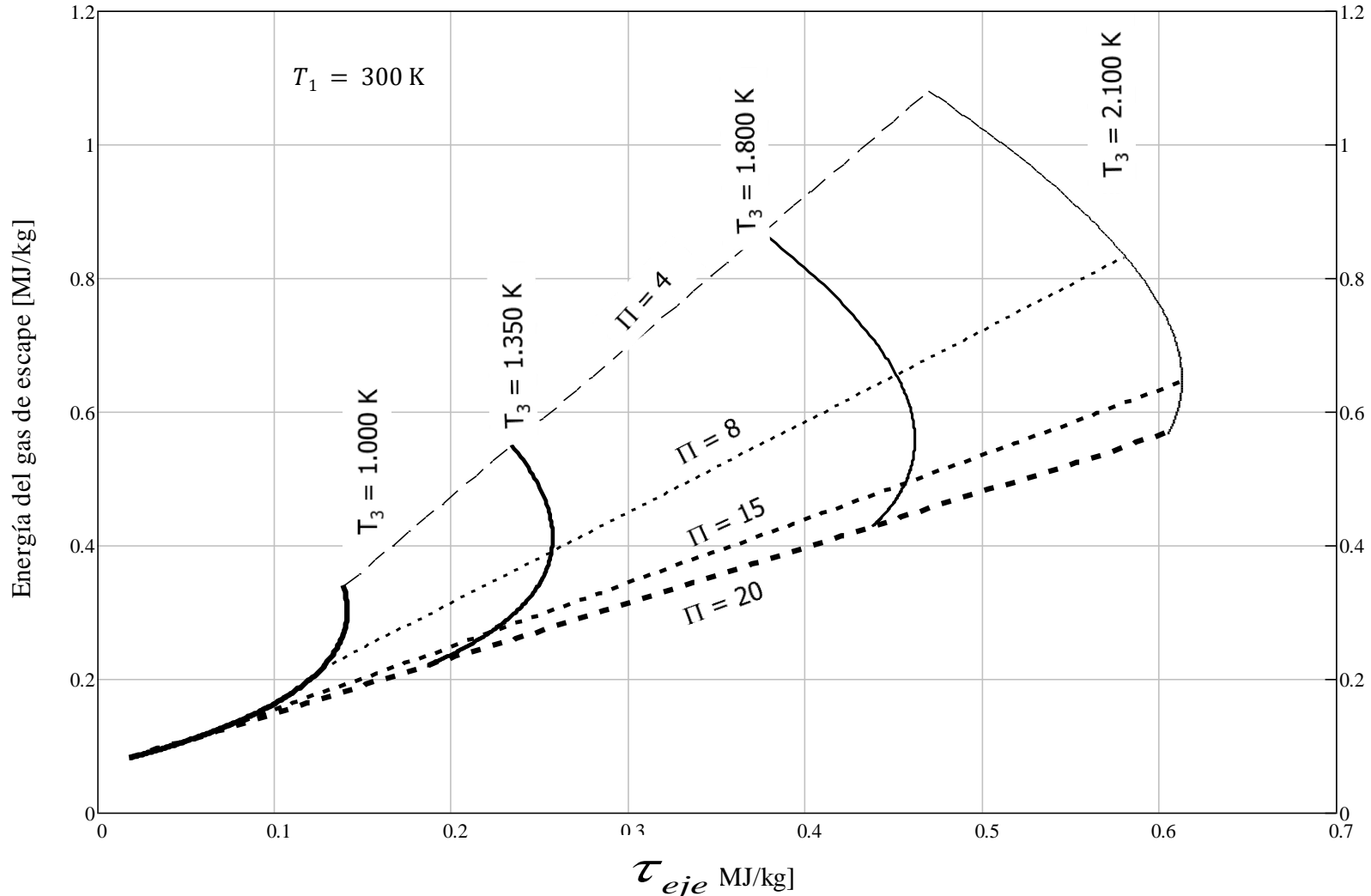
Ciclo CBE **irreversible** de aire. **Calores específicos constantes:**

Parámetros de actuaciones:

$$\eta_{c,p} = 0,8$$

Energía en el gas de escape

$$\eta_{e,p} = 0,95$$



## CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
- 5. Rendimiento de componentes**
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

*Autores:*  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



**MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA**



## 5.- EFECTO DE LOS RENDIMIENTOS DE COMPONENTES [volver](#)

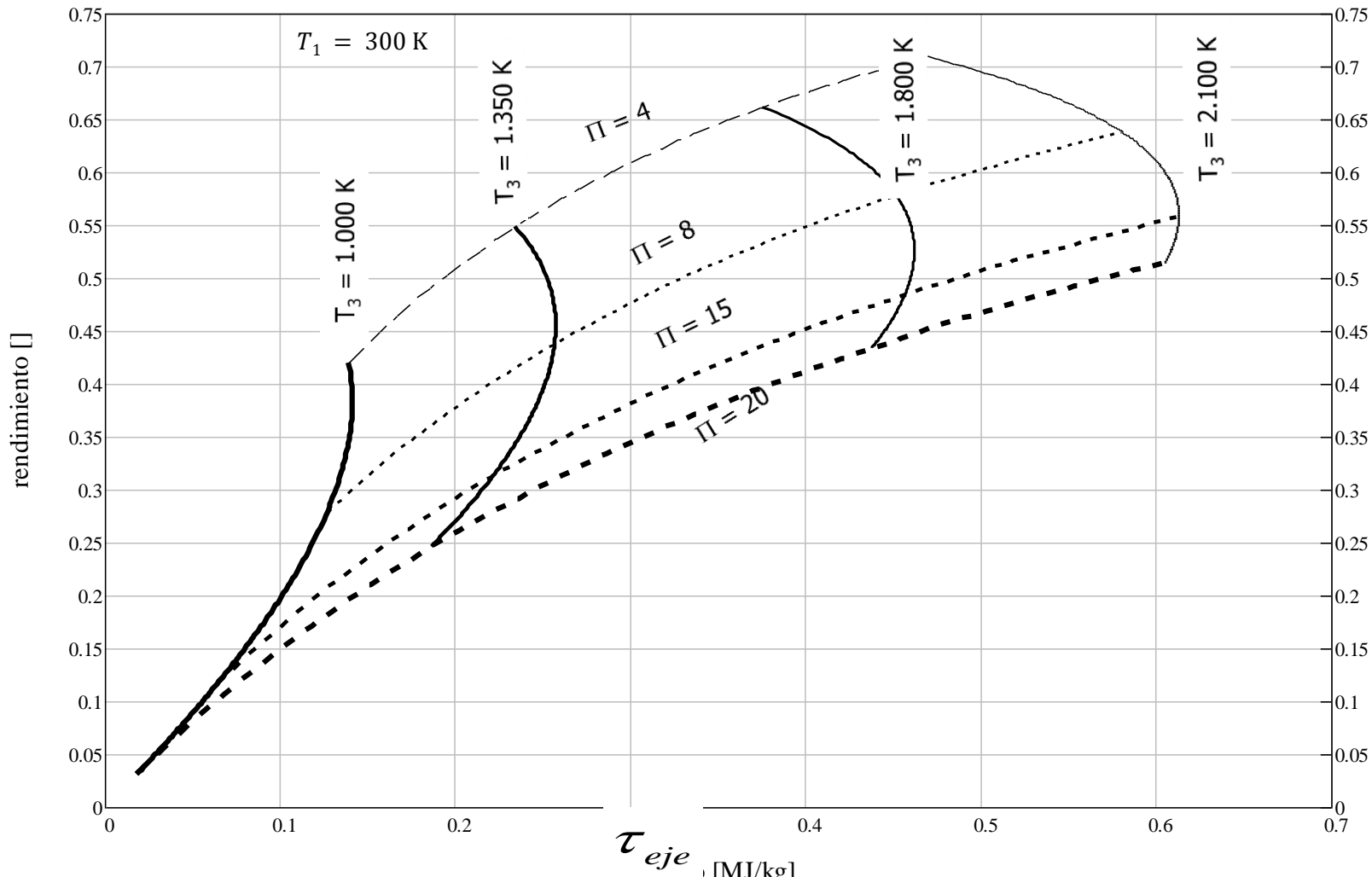
Ciclo CBEX **irreversible** de aire. **Calores específicos constantes:**

Parámetros de actuaciones de **turbina regenerativa:**

$$\eta_{c,p} = 0,8$$

$$\eta_{e,p} = 0,95$$

Rendimiento:



1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA



## 5.- EFECTO DE LOS RENDIMIENTOS DE COMPONENTES [volver](#)

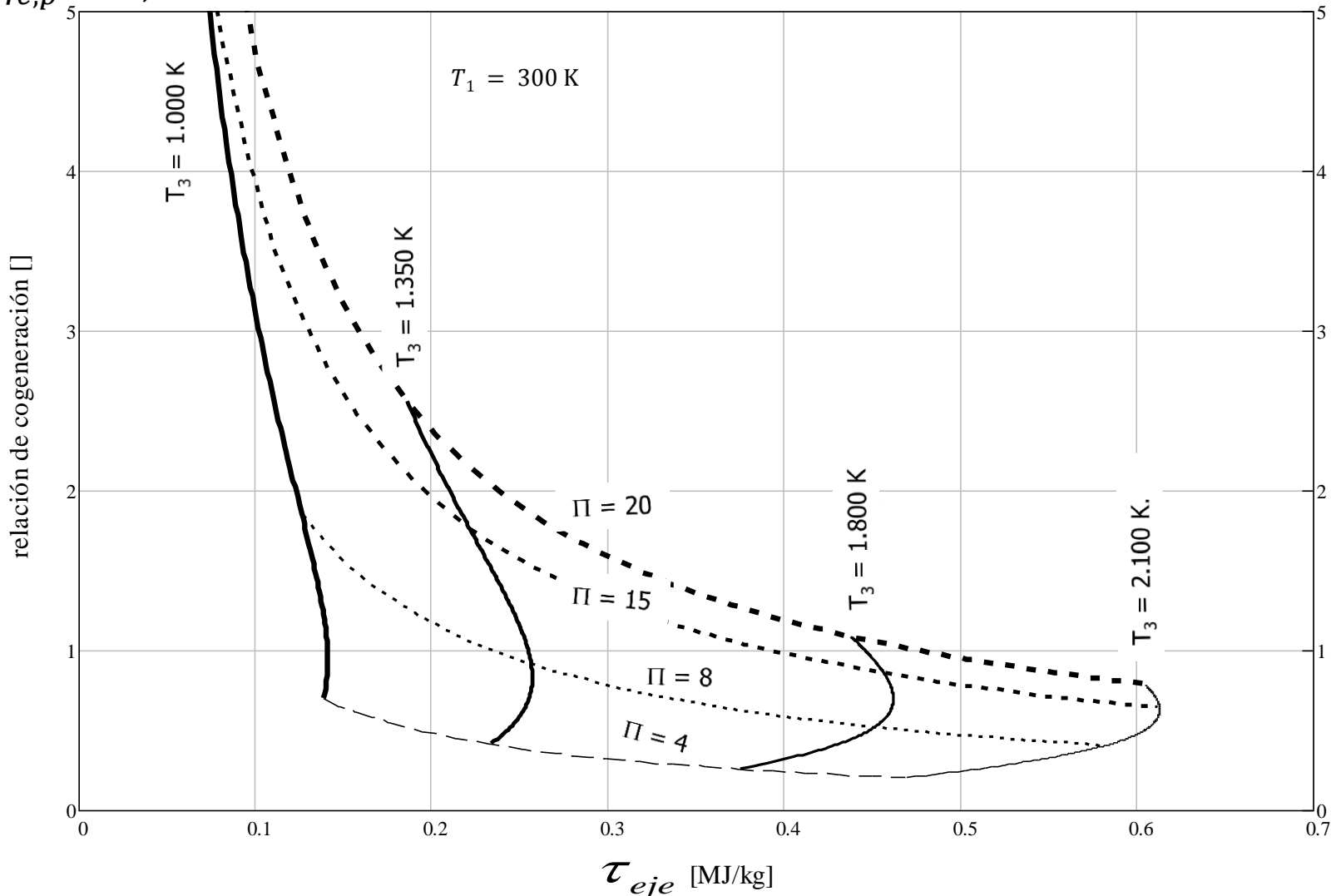
Ciclo CBEX **irreversible** de aire. **Calores específicos constantes:**

Parámetros de actuaciones de **turbina regenerativa:**

$$\eta_{c,p} = 0,8$$

Relación de cogeneración ( $\lambda$ ) muy dependiente de la carga

$$\eta_{e,p} = 0,95$$



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
- 5. Rendimiento de componentes**
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

*Autores:*  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



**MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA**



## 5.- EFECTO DE LOS RENDIMIENTOS DE COMPONENTES [volver](#)

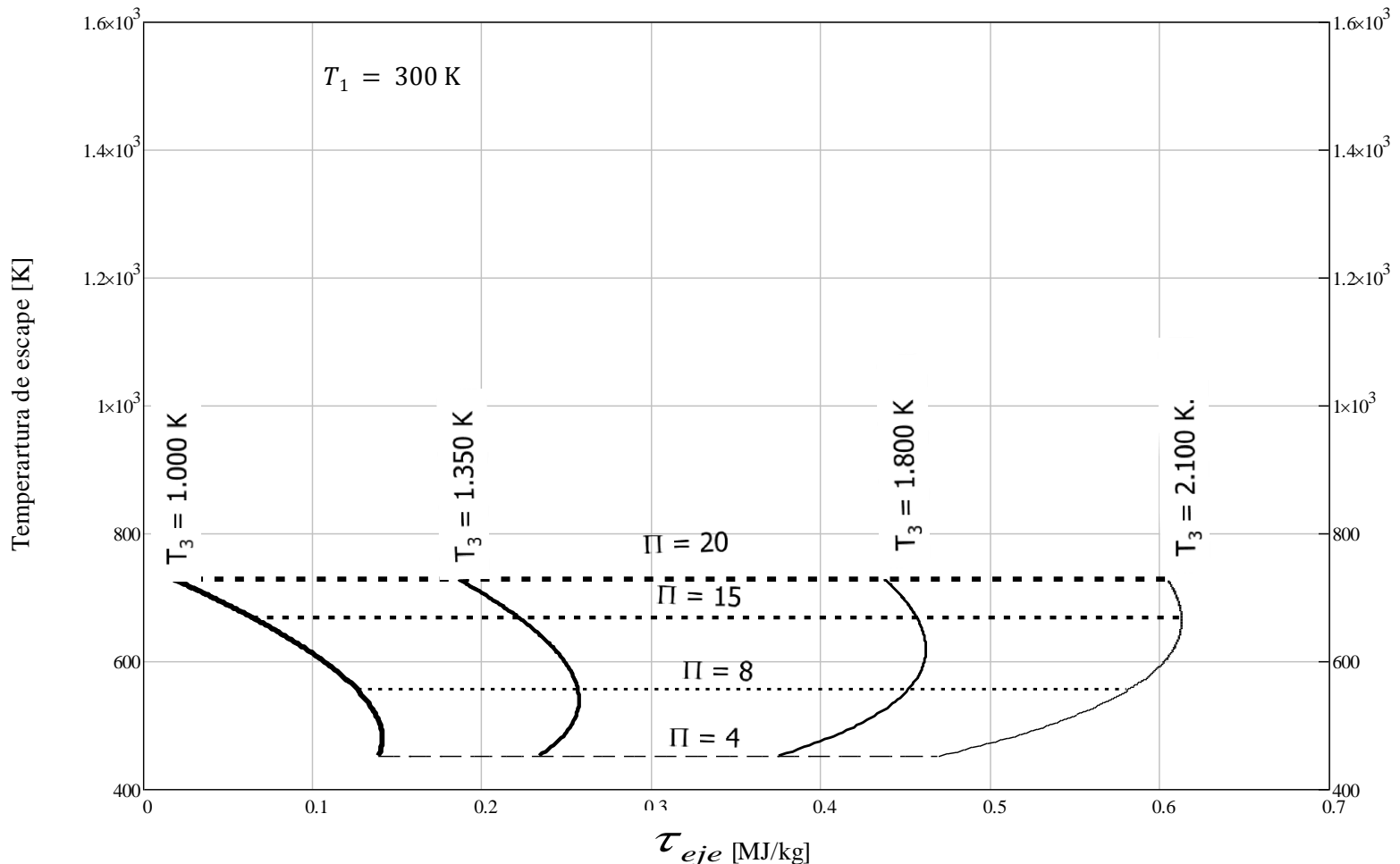
Ciclo CBEX **irreversible** de aire. **Calores específicos constantes:**

Parámetros de actuaciones de **turbina regenerativa:**

$$\eta_{c,p} = 0,8$$

$$\eta_{e,p} = 0,95$$

Temperatura de escape independiente de la carga



CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
- 5. Rendimiento de componentes**
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA



# 5.- EFECTO DE LOS RENDIMIENTOS DE COMPONENTES [volver](#)

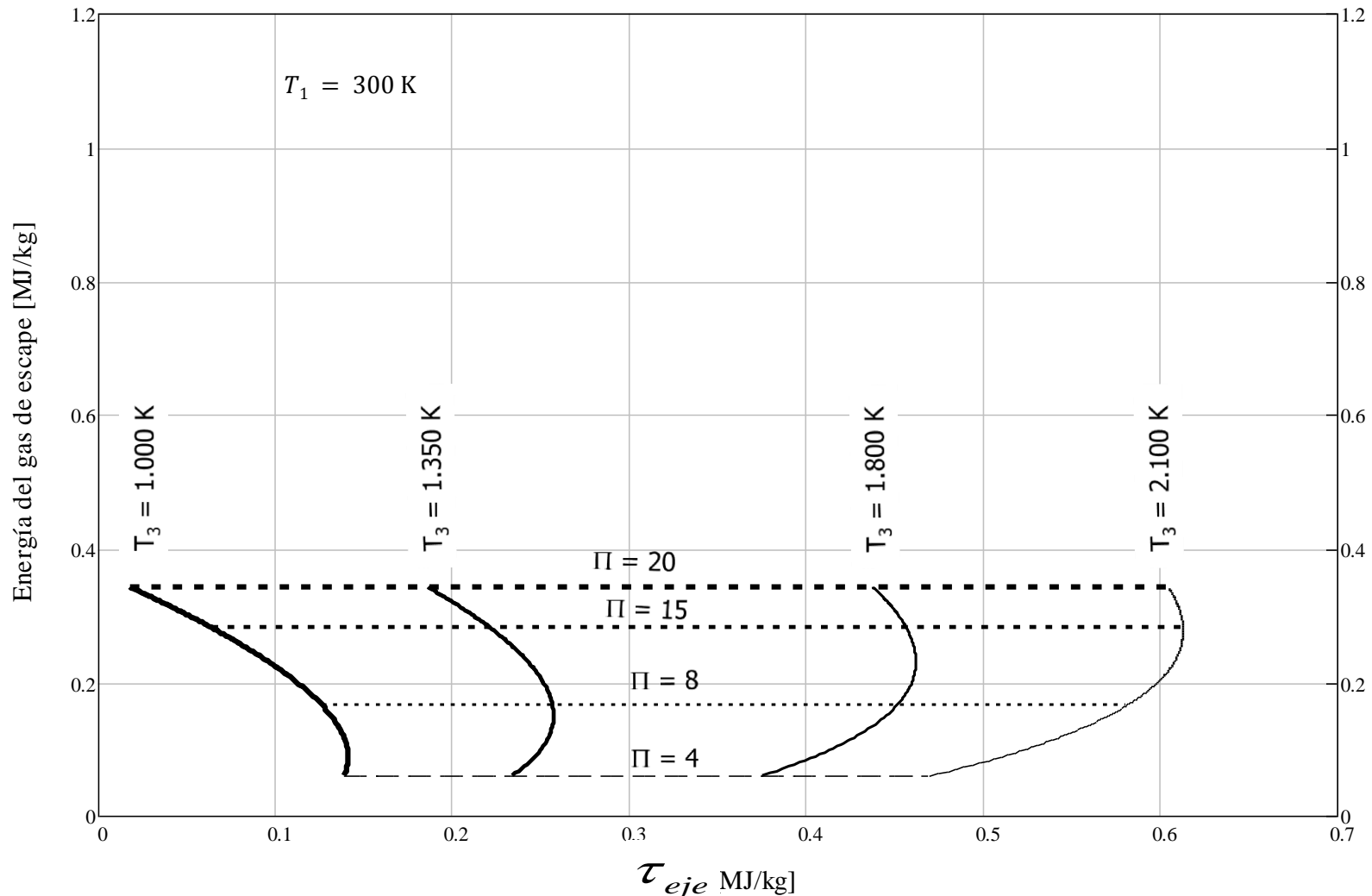
Ciclo CBEX **irreversible** de aire. **Calores específicos constantes:**

Parámetros de actuaciones de **turbina regenerativa:**

$$\eta_{c,p} = 0,8$$

Energía del gas de escape

$$\eta_{e,p} = 0,95$$



1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
- 5. Rendimiento de componentes**
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

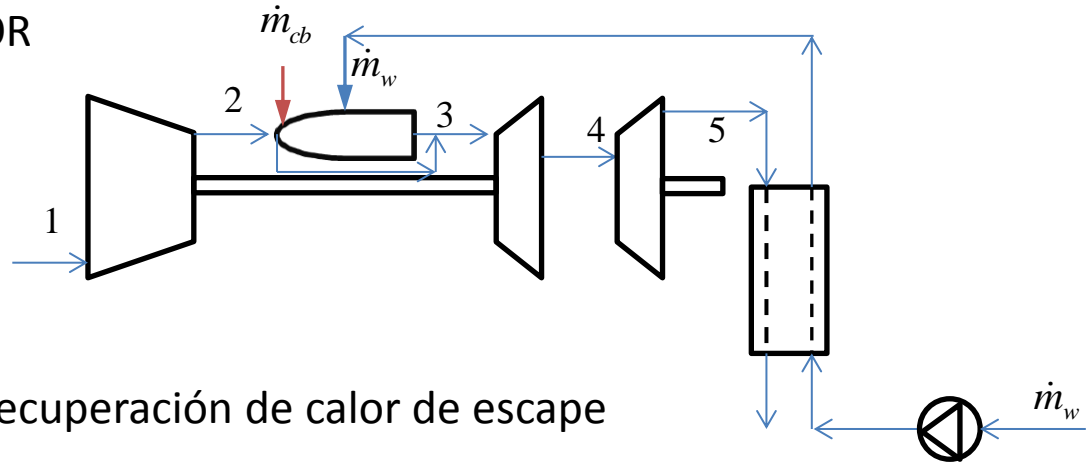
Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA

## 6.- CICLOS HÚMEDOS [volver](#)

### INYECCIÓN DE VAPOR



Se logra una cierta recuperación de calor de escape

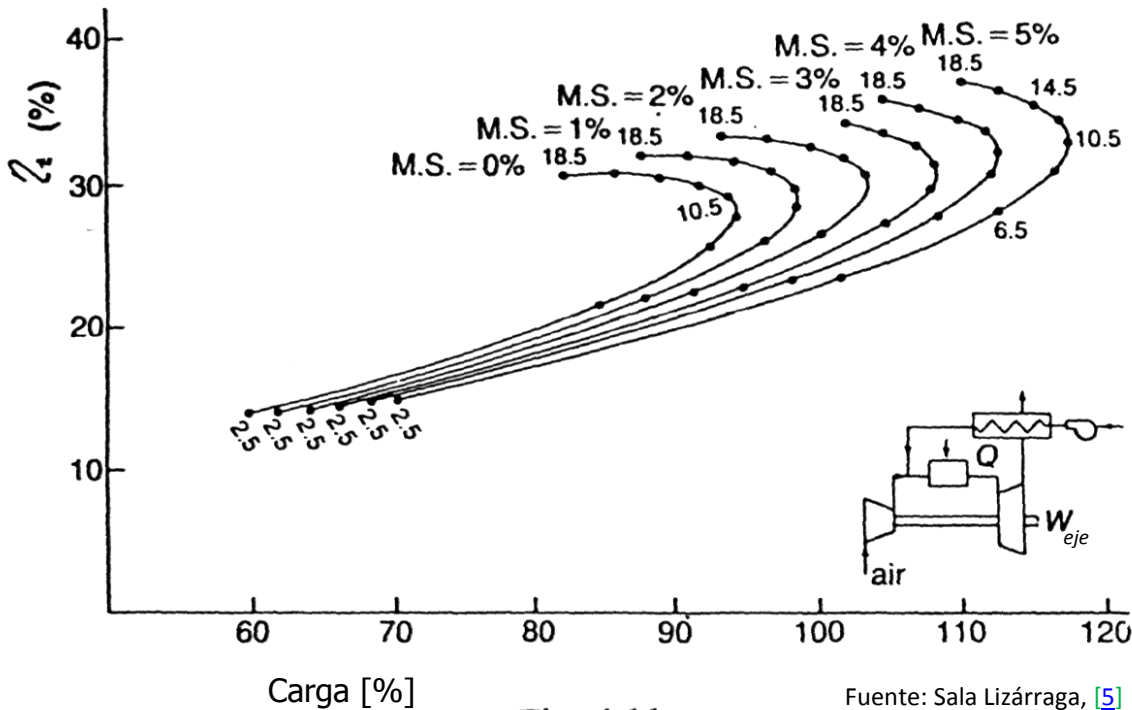


Fig. 4.11

Fuente: Sala Lizárraga, [5]



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
- 6. Ciclos húmedos**
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA

## 6.- CICLOS HÚMEDOS [volver](#)

### INYECCIÓN DE VAPOR

- Ventajas:

- De fácil implementación y puesta en servicio.
- Ayuda a reducir las emisiones de NOx.
- Incrementa la potencia respecto del ciclo básico de TG  $\approx 20\%$ .
- Rendimiento energético mayor que el ciclo básico de TG.
- El coste de inversión es inferior al de una CGCC.

- Inconvenientes:

- Se requiere un suministro constante de agua purificada.
  - Hay que añadir un recuperador de calor (HRSG).
  - La inyección de agua líquida puede producir la extinción de la llama en la cámara de combustión (total o parcial).
  - Problemas de corrosión.
- La proporción de vapor inyectado suele ser del 2% al 5%.
  - El vapor ha de inyectarse en condiciones de vapor sobrecalentado.
  - Puede hacerse otra inyección de vapor a la entrada de la 2ª turbina.



#### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

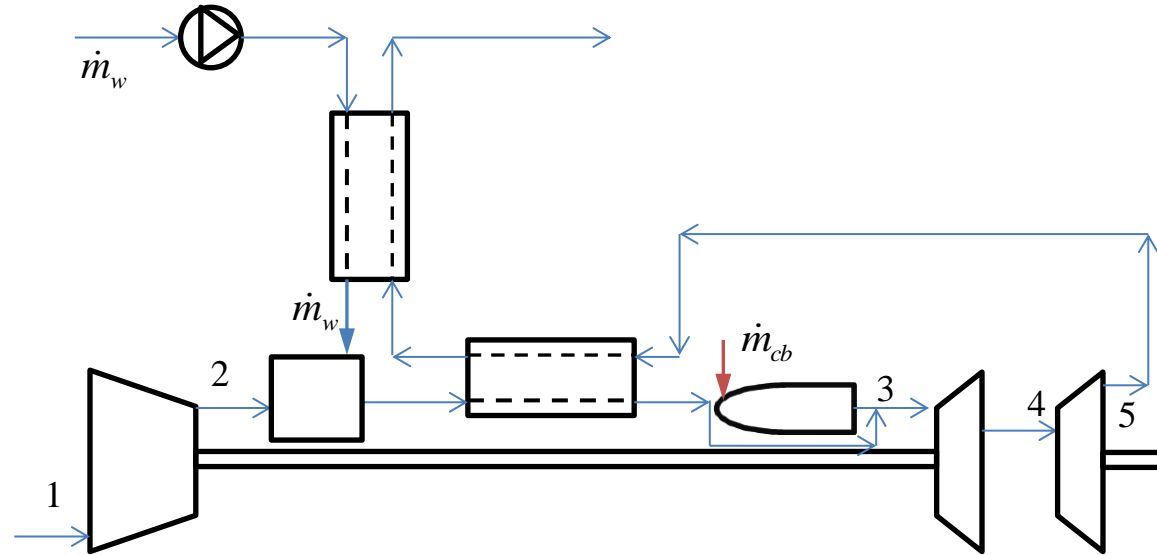
*Autores:*  
*P.A. Rodríguez*  
*A. Lecuona*  
*R. Ventas*



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA

## 6.- CICLOS HÚMEDOS *volver*

### CICLO REGENERATIVO EVAPORATIVO



- Se inyecta agua en fase líquida después del compresor.
- La bajada de temperatura conseguida, aconseja el precalentamiento regenerativo.
- Temperatura de gases de escape más baja. Puede no interesar en ciertas aplicaciones de cogeneración donde se requiera una temperatura elevada.
- Mismas ventajas que en sistema de inyección de vapor, pero con mayor rendimiento, para  $\Pi$  más baja que el ciclo básico de TG.
- Los inconvenientes son del mismo tipo que en el sistema de inyección de vapor.



#### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:

P.A. Rodríguez

A. Lecuona

R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA

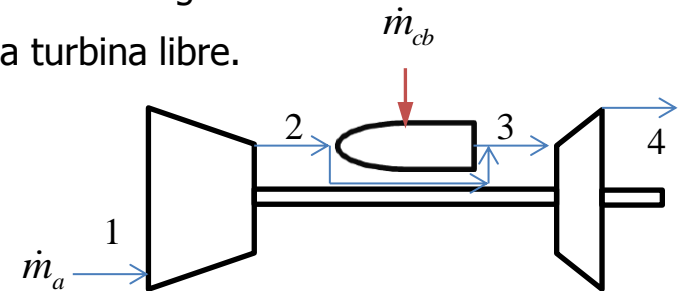


## 7.- TIPOS DE TGs [volver](#)

El tipo de TG determina la operación. Según su configuración:

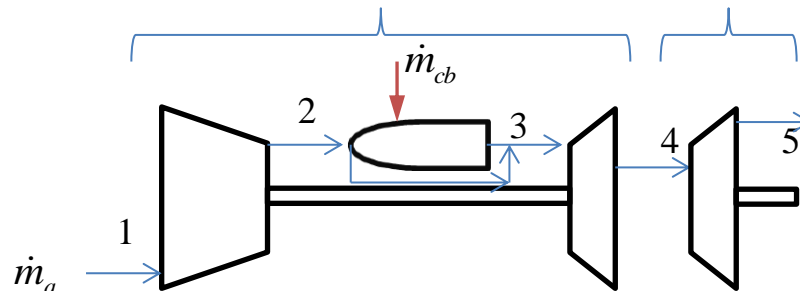
- **Turbina monoeje:**

- Muy utilizadas en cogeneración por su sencillez mecánica.
- Baja flexibilidad de operación.
- Importante disminución del rendimiento con la carga.
- Menor riesgo de embalamiento que en la turbina libre.
- Potencia de arranque elevada.



- **Turbina libre:**

- Dos turbinas: generador de gas y turbina de potencia.



- Se puede suprimir el reductor de velocidad en algunos casos.
- Alta flexibilidad de operación, mejorando a carga parcial c. r. a la monoeje.
- Permite optimizar la recuperación de calor residual a carga parcial, regulando el caudal y con ello la temperatura de los gases de escape.



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA

### Tipos de turbinas. Según su construcción

- Turbina industriales:
  - Diseño “inspirado” en las turbinas de vapor.
  - Grandes espesores de paredes y álabes → **gran inercia.**
  - Cámara de combustión de gran diámetro y en disposición lateral respecto del eje de la turbina.
  - Elevada sección frontal.
  - Relación de presiones:  $\Pi \approx 10$  a 23.
  - Larga vida.
  - Elevada disponibilidad.
  - Mayor coste inicial y menor coste de mantenimiento que las aeroderivadas.
  - Tiempo entre revisiones: de 25.000 h a 100.000 h.
  - Revisiones in-situ.
  - Nivel de ruido más bajo que en las aeroderivadas.
  - Se usan potencias nominales hasta unos 400 MW.



#### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
- 7. Tipos de TGs**
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

*Autores:*  
*P.A. Rodríguez*  
*A. Lecuona*  
*R. Ventas*



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA

## 7.- TIPOS DE TGs *volver*



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

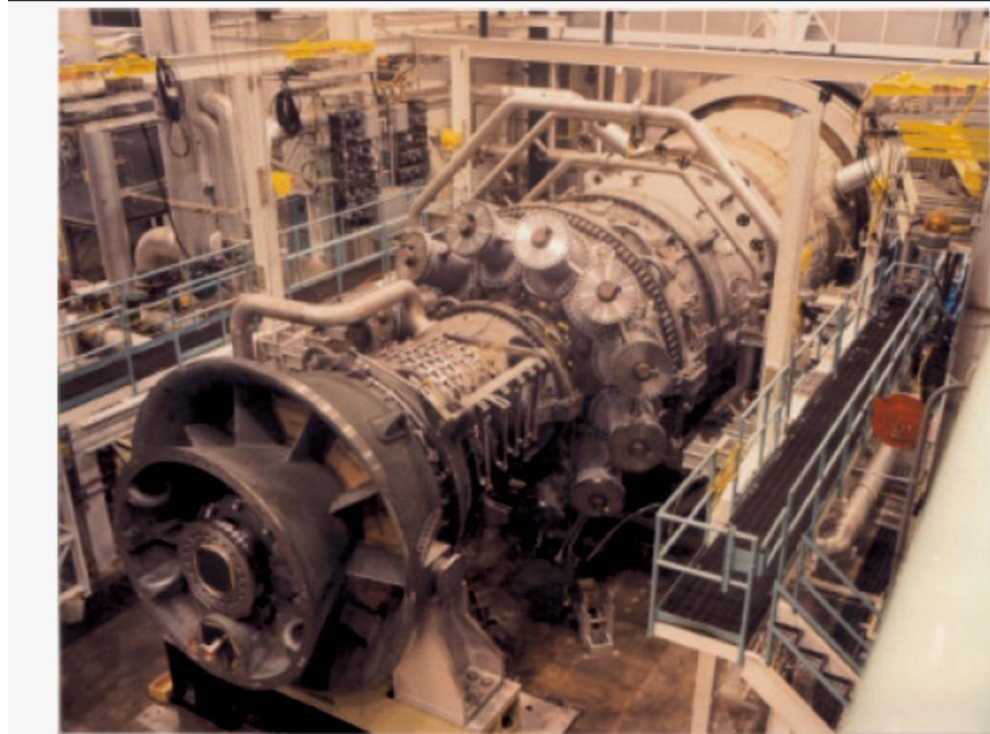
1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
- 7. Tipos de TGs**
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

*Autores:*  
 P.A. Rodríguez  
 A. Lecuona  
 R. Ventas



MOTORES DE  
 COMBUSTIÓN  
 INTERNA

Turbina industrial:



**Figure 23.** 7H gas turbine being installed in test stand

Fuente: por cortesía de General Electric

<https://www.ge-distributedpower.com/products/power-generation>

	<u>9FA</u>	<u>9H</u>
<i>Firing Temperature Class, F (C)</i>	2400 (1316)	2600 (1430)
<i>Air Flow, lb/sec (kg/sec)</i>	1376 (625)	1510 (685)
<i>Pressure Ratio</i>	15	23
<i>Combined Cycle Net Output, MW</i>	391	480
<i>Net Efficiency, %</i>	56.7	60
<i>NO<sub>x</sub> (ppmvd at 15% O<sub>2</sub>)</i>	25	25

$\theta \approx 5,7$

**Table 1.** H Technology performance characteristics (50 Hz)

## 7.- TIPOS DE TGs [volver](#)

### Tipos de turbinas. Según su construcción

- Turbinas aeroderivadas:
  - Derivadas de las turbinas de gas para aplicaciones aeronáuticas.
  - Requieren modificaciones para operar en régimen continuo.
  - Ligeras → **de rápida respuesta.**
  - Más económicas de adquisición.
  - Relación de presiones:  $\Pi \approx 18$  a 40.
  - Tiempo entre revisiones de 10.000 h a 40.000 h.
  - Revisiones en el fabricante.
  - Se usan hasta potencias nominales del orden de 100 a 300 MW.
- Microturbinas
  - Derivadas de turbos de automoción.
  - 1 escalón centrífugo y 1 escalón centrípeto. Regenerativo.
  - Generador eléctrico directamente arrastrado.
  - Potencias nominales de 30 a 200 kW.



#### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

*Autores:*  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA

## 8.- OPERACIÓN DE TGs *volver*

**MONOEJE.** Ecuaciones de acoplamiento entre compresor y turbina:

- Seleccionar una velocidad de giro del compresor. Un punto de dicha gráfica fija los siguientes parámetros:

$$\overbrace{\dot{m}_c \frac{\sqrt{T_1}}{p_1}}^{\Pi_{m,c}} \quad ; \quad \Pi_c = \frac{p_2}{p_1} \approx \frac{p_3}{p_4} = \Pi_e \quad ; \quad \eta_c \quad ; \quad \frac{n_c}{\sqrt{T_1}} \quad \Pi_{n,c}$$

Se pueden usar variables estáticas o totales, ver transformación en [Cap. 5](#) de turbomaquinaria.

- El punto de funcionamiento de la turbina se obtiene imponiendo la compatibilidad de relación de presiones, velocidades...:

$$n_e = n_c \rightarrow \frac{n_e}{\sqrt{T_3}} = \frac{n_c}{\sqrt{T_1}} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{T_3}} = \frac{n_c}{\sqrt{T_1}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\theta}}$$

- ...y gastos:

$$\dot{m}_e = \dot{m}_c \rightarrow \dot{m}_e \frac{\sqrt{T_3}}{p_3} = \dot{m}_c \frac{\sqrt{T_1} \cdot p_1 \cdot p_2}{p_1 \cdot p_2 \cdot p_3} \sqrt{\frac{T_3}{T_1}} \approx \dot{m}_c \frac{\sqrt{T_1} \cdot \sqrt{\theta}}{p_1 \cdot \Pi_c}$$

- ... lo que permite determinar el valor de  $T_3$  que satisface simultáneamente la identidad de gastos y velocidades.
- Calcular parámetros de actuaciones (potencias y rendimientos).
- Compatibilizar con la carga.



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas

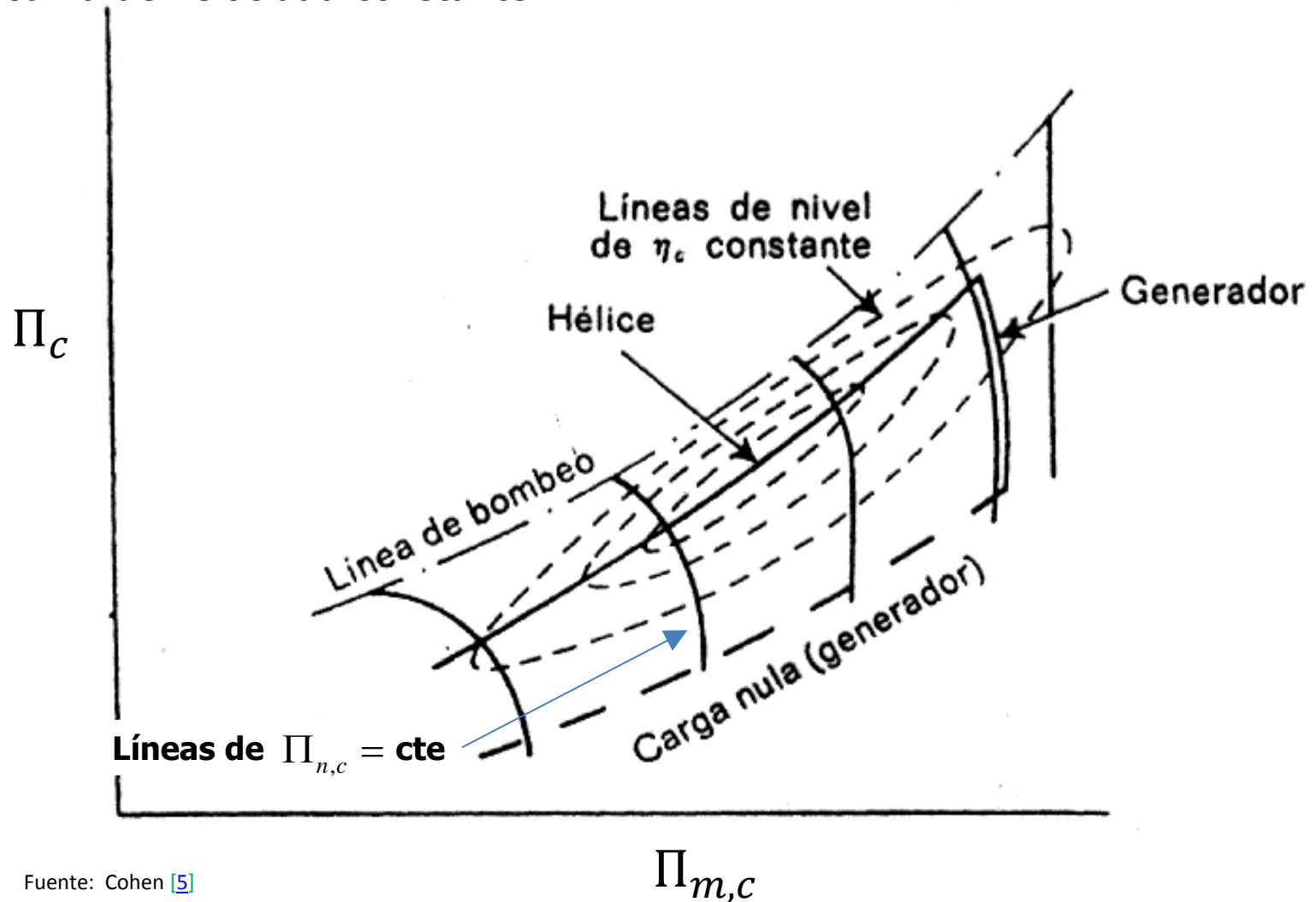


MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA

## 8.- OPERACIÓN DE TGs [volver](#)

### MONOEJE. Operación del compresor:

La línea de funcionamiento de un generador eléctrico corresponde a una curva de velocidad constante.



Fuente: Cohen [5]

Figura 8.5 Líneas de funcionamiento en equilibrio.



#### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
- 8. Operación de TGs**
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

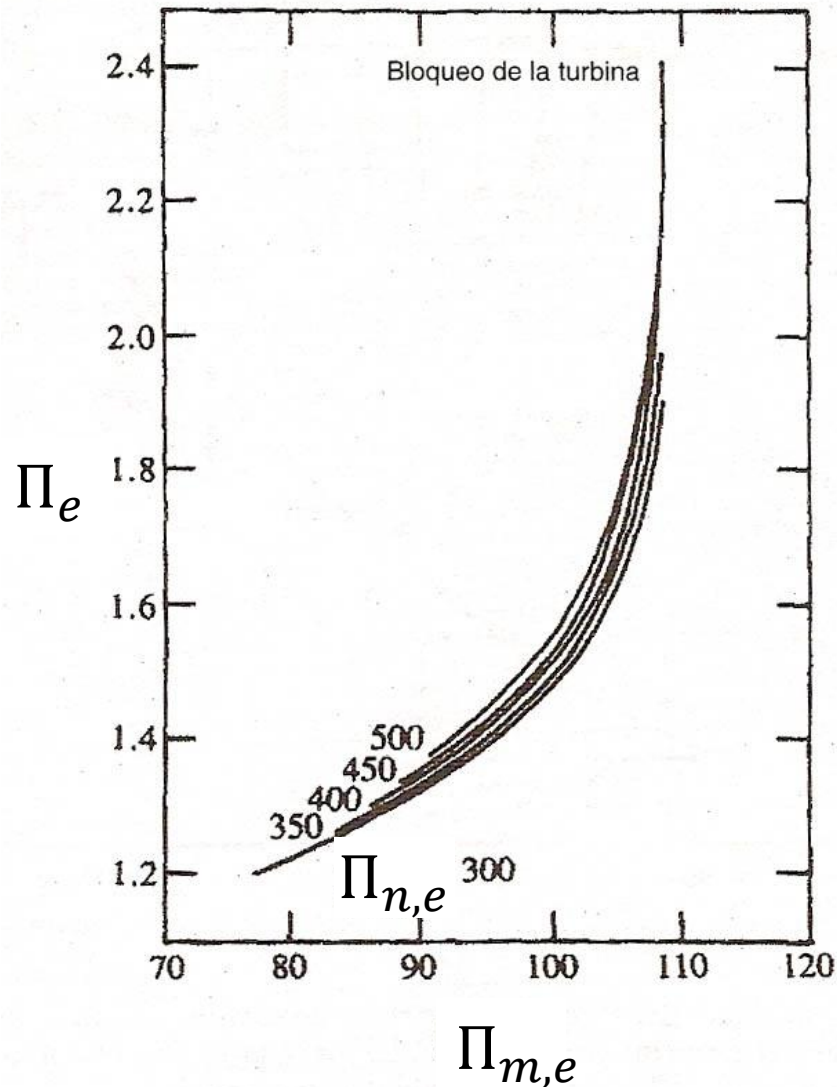
Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA

## 8.- OPERACIÓN DE TGs [volver](#)

**MONOEJE.** Operación de la turbina axial: recorre la estrecha franja operativa:



Fuente: Lecuona [1]



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
- 8. Operación de TGs**
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

*Autores:*  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas

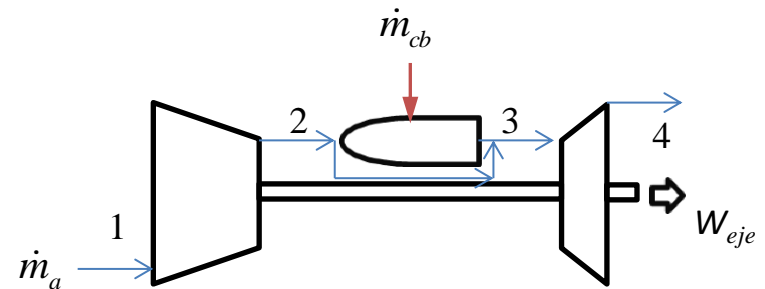


MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA



## Maneras de modificar la potencia de una TG.

### • TGs monoeje:



#### • Cambia $\theta$ y no cambia $\Pi$ :

- Si la carga impone la velocidad de giro (p.e. generador eléctrico), se actúa sobre  $T_3$  variando la cantidad de combustible ( $\dot{m}_{cb} \rightarrow RAC$ ). Repercusiones sobre el rendimiento al cambiar  $\theta$ .

#### • Cambia $\Pi$ y cambia poco o no cambia $\theta$ :

- Modificando  $\dot{m}_a$  mediante álabes de inclinación variable a la entrada del compresor: VIGV (**V**ariable **I**nlet **G**uide **V**anes).
- Si la carga permite variaciones de velocidad (p.e. hélice propulsora), se puede variar  $\dot{m}_a$  sin modificar  $T_3$ .

Los álabes de turbina no varían su inclinación por la elevada temperatura.

#### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
- 8. Operación de TGs**
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA



## Maneras de modificar la potencia de una TG.

**Con turbina libre.** Operación del generador de gas:

- Seleccionar una velocidad de giro del compresor. Un punto de dicha gráfica fija los siguientes parámetros:

$$\dot{m}_c \frac{\sqrt{T_1}}{p_1} \quad ; \quad \Pi_c = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_4} \cdot \frac{p_4}{p_5} = \Pi_{e,gg} \cdot \Pi_{e,l} \quad ; \quad \eta_c \quad ; \quad \frac{n_c}{\sqrt{T_1}}$$

- La condición de acoplamiento entre compresor y turbina del generador de gas se establece igualando las velocidades y los trabajos específicos (lo que permite determinar la relación de presiones en la turbina del generador de gas  $\Pi_{e,gg} = p_3/p_4$ ) ...:

$$\frac{n_{e,gg}}{\sqrt{T_3}} = \frac{n_c}{\sqrt{T_1}} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{T_3}} = \frac{n_c}{\sqrt{T_1}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\theta}}$$

$$\tau_c = \tau_{e,gg} \cdot \eta_{m,gg} \rightarrow \frac{c_{p,a} \cdot T_1}{\eta_c} \cdot \left( \frac{\gamma_a^{-1}}{\Pi_c^{\gamma_a}} - 1 \right) = c_{p,g} \cdot T_3 \cdot \eta_{e,gg} \cdot \eta_{m,gg} \cdot \left( 1 - \frac{1}{\frac{\Pi_{e,gg}^{\gamma_g}}{\gamma_g^{-1}}} \right)$$

↙ estimado

- ... y los gastos, lo que permite determinar la temperatura de entrada a la turbina del generador de gas ( $T_3$ ). Iterar para nuevo valor de  $\Pi_{e,gg}$

$$\dot{m}_{e,gg} \frac{\sqrt{T_3}}{p_3} = \dot{m}_c \frac{\sqrt{T_1}}{p_1} \cdot \frac{p_1}{p_2} \cdot \frac{p_2}{p_3} \cdot \sqrt{\frac{T_3}{T_1}} \approx \dot{m}_c \frac{\sqrt{T_1}}{p_1} \cdot \frac{\sqrt{\theta}}{\Pi_c} \rightarrow T_3$$



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

- Objetivos
- Nomenclatura
- Configuraciones, procesos y modelos
- Ciclos reversibles
- Rendimiento de componentes
- Ciclos húmedos
- Tipos de TGs
- 8. Operación de TGs**
- Conclusiones
- Anexos
- Ejercicios
- Autoevaluación
- Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA

**Maneras de modificar la potencia de una TG. Con turbina libre.**

Acoplamiento del generador de gas a la turbina libre:

- La velocidad de la turbina libre la determina la carga:  $n_{e,l}$
- El acoplamiento se basa en calcular la relación de expansión disponible para la turbina libre ...:

$$\Pi_{e,l} = \frac{p_4}{p_5} = \frac{p_4}{p_1} = \frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{p_3}{p_2} \cdot \frac{p_4}{p_3} \approx \frac{\Pi_c}{\Pi_{e,gg}}$$

- ... e igualar los gastos másicos:

$$\dot{m}_{e,l} \cdot \frac{\sqrt{T_4}}{p_4} = \dot{m}_c \cdot \frac{\sqrt{T_1}}{p_1} \cdot \frac{p_1}{p_4} \cdot \sqrt{\frac{T_4}{T_1}} = \dot{m}_c \cdot \frac{\sqrt{T_1}}{p_1} \cdot \frac{1}{\Pi_{e,l}} \cdot \sqrt{\frac{T_4}{T_1}} \rightarrow T_4$$

- Línea de funcionamiento en equilibrio del generador de gas, independiente de la carga.
- Calcular parámetros de actuaciones.

**CICLOS DE TURBINAS DE GAS**

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
- 8. Operación de TGs**
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

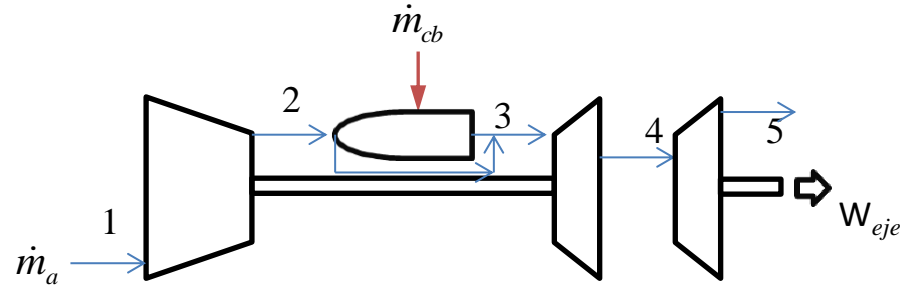
Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA

### Maneras de modificar la potencia de una TG. Con turbina libre.

#### Resultado:



- Se puede modificar la velocidad del generador de gas con lo que la actuación sobre  $T_3$  variando la cantidad de combustible ( $\dot{m}_{cb} \rightarrow RAC$ ) no es tan necesaria, aunque también es aplicable. Menor repercusión sobre el rendimiento.
- Modificando  $\dot{m}_a$  mediante álabes de inclinación variable a la entrada del compresor: VIGV (**V**ariable **I**nlet **G**uide **V**anes), los cuales imponen un giro "swirl" a la entrada del rotor del compresor, positivo o negativo  $V_{\theta 1} \rightarrow$  cambia  $\tau_{c1}$ , [ver Cap.5 de turbomaquinaria](#).



#### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA

## 8.- OPERACIÓN DE TGs *volver*



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
- 8. Operación de TGs**
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

*Autores:*  
 P.A. Rodríguez  
 A. Lecuona  
 R. Ventas



MOTORES DE  
 COMBUSTIÓN  
 INTERNA

MONOEJE vs TURBINA LIBRE	MONOEJE	TURBINA LIBRE
Línea de funcionamiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La carga impone el régimen de giro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Régimen del generador de gas libre</li> </ul>
Aumento de potencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Riesgo de bombeo</li> <li>• Aumenta <math>T_3</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumenta gasto de aire y/o <math>T_3</math></li> </ul>
Aumento de temperatura ambiente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disminuye</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se puede aumentar <math>n_{gg}</math></li> </ul>
Válvulas de sangrado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lejos del bombeo a carga parcial</li> <li>• Hacen falta durante el arranque</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede necesitarse a carga parcial</li> <li>• Hacen falta durante el arranque</li> </ul>
Par motor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>n</math> y Par están ligados, salvo que se varíe <math>T_3</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El Par puede variar a <math>n_{e,l}</math> constante, variando el gasto de aire</li> </ul>
Arranque	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hay que mover la carga</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sólo se mueve el generador de gas</li> </ul>
Embalamiento por desconexión de la carga	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 😐</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 😞 ☠️</li> </ul>



MONOEJE

Fuente: por cortesía de Rolls-Royce plc.

<http://intpower.com/wp-content/uploads/2012/10/Engine-Spec-501KB7.pdf>

$$SHP = W_{eje}$$

$$TT2 = T_{t1}$$

$$TIT = T_{t3}$$

## 8.- OPERACIÓN DE TGs *volver*

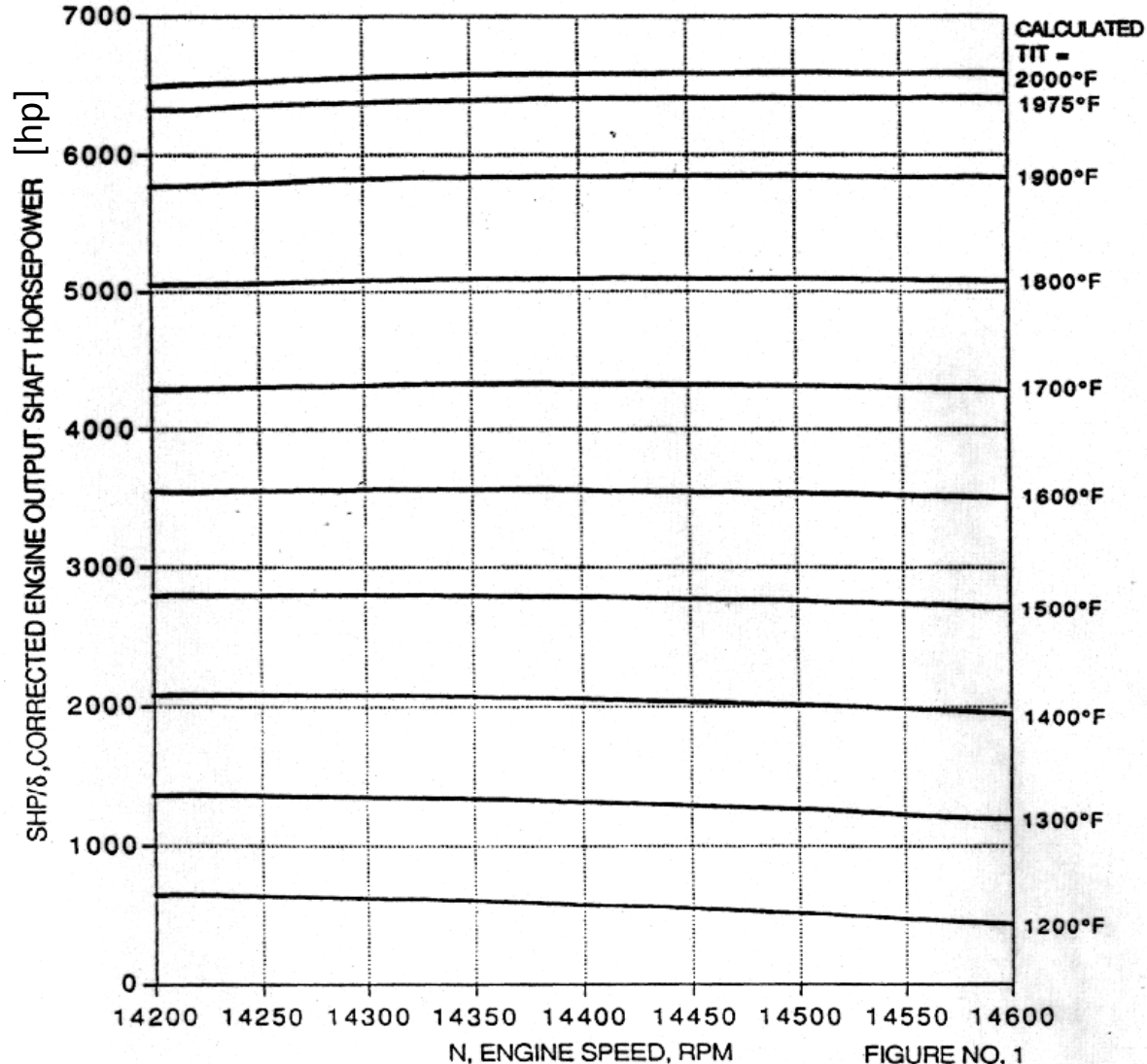
PROPRIETARY

ESTIMATED PERFORMANCE  
ALLISON MODEL 501-KB7

SPEC. NO. 984

PERFORMANCE FOR  $TT2 = 59^\circ\text{F}$   
 $\delta = \text{INLET PRESSURE (PSIA)}/14.7 \text{ (PSIA)}$   
 ENGINE OUTPUT SHAFT HORSEPOWER  
 PERFORMANCE SHOWN FOR LIQUID FUEL

PERFORMANCE SHOWN IS BASED ON DIFFUSER EXIT AREA = 1100 SQ. IN.



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

- Objetivos
- Nomenclatura
- Configuraciones, procesos y modelos
- Ciclos reversibles
- Rendimiento de componentes
- Ciclos húmedos
- Tipos de TGs
- 8. Operación de TGs**
- Conclusiones
- Anexos
- Ejercicios
- Autoevaluación
- Bibliografía

Autores:  
 P.A. Rodríguez  
 A. Lecuona  
 R. Ventas



MOTORES DE  
 COMBUSTIÓN  
 INTERNA



## 8.- OPERACIÓN DE TGs *volver*

PROPRIETARY

ESTIMATED PERFORMANCE  
ALLISON MODEL NO. 501-KF

SPEC. NO. 875A

CON TURBINA LIBRE

Fuente: General Motors

<http://intpower.com/wp-content/uploads/1986/10/501-brochure.pdf>

### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
- 8. Operación de TGs**
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

CTIT =  $T_{t3}$  corregida.

*Autores:*  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas

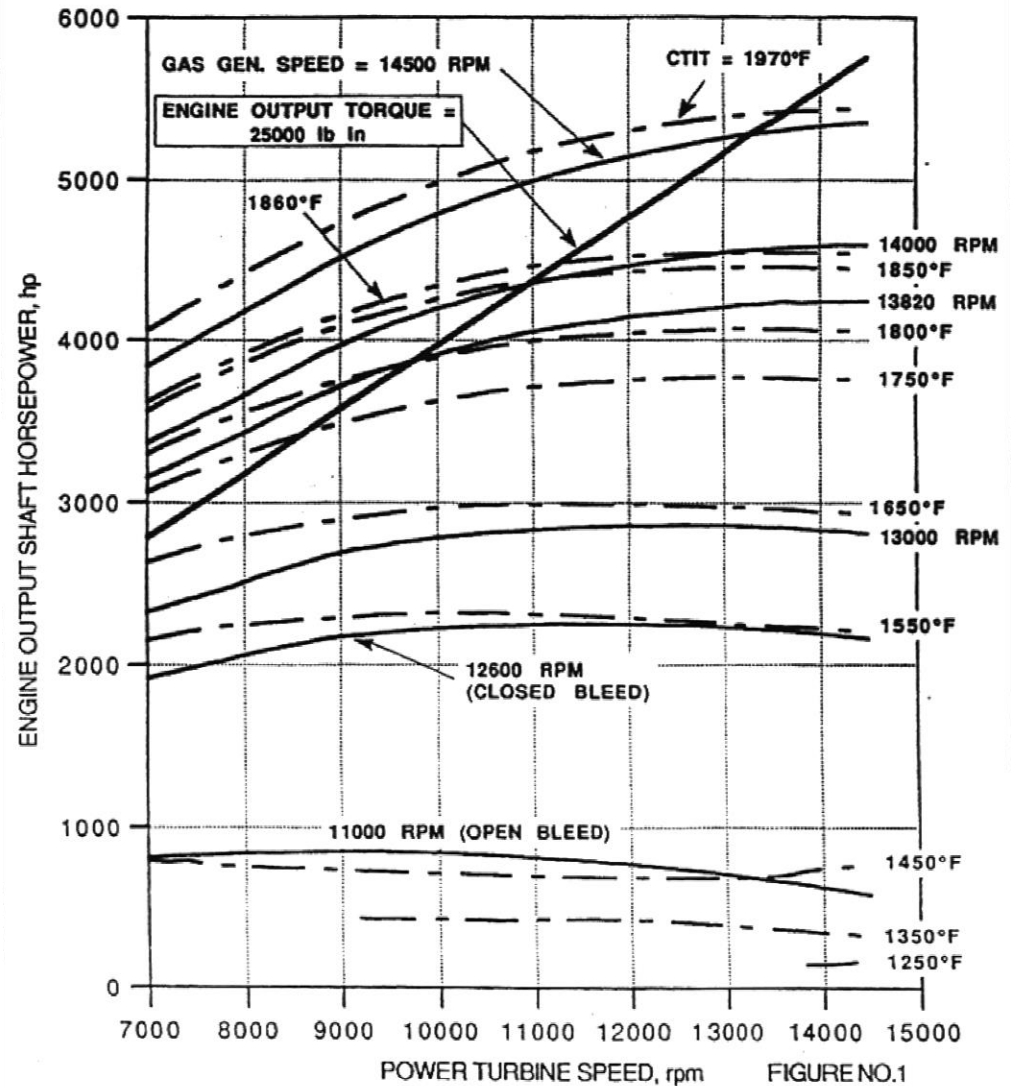


MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA

### ENGINE OUTPUT SHAFT HORSEPOWER

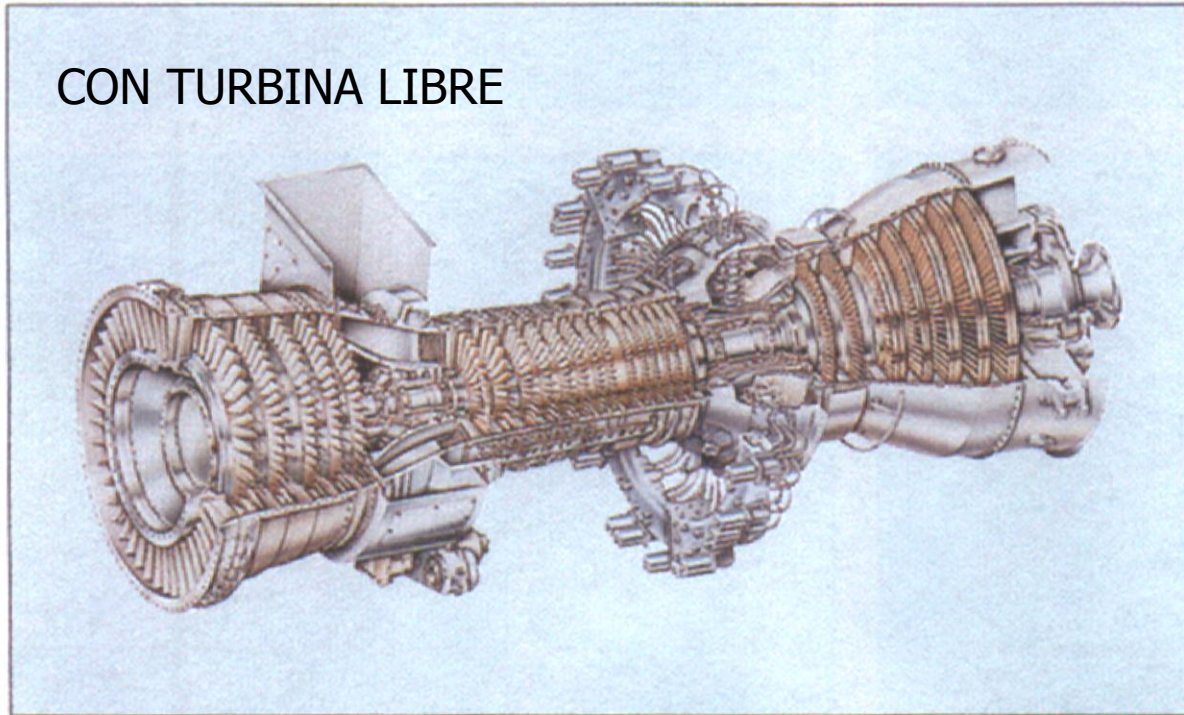
ENGINE INLET TEMPERATURE = -59°F ENGINE INLET PRESSURE = 14.7 PSIA

NOTE: SEE PARA. 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 AND 5.2 FOR OPERATING LIMITATIONS



## 8.- OPERACIÓN DE TGs [volver](#)

### CON TURBINA LIBRE



<https://www.ge-distributedpower.com/products/power-generation>

#### Performance, Gas Turbine:

Fuente: por cortesía de General Electric

		LM6000PC	LM6000PC with water-injection for 150 mg/Nm <sup>3</sup> NO <sub>x</sub>	LM6000PD DLE
Power-turbine speed	rpm	3,600	3,600	3,600
Power output, shaft	kW	43,958	44,029	43,093
Heat rate	kJ/kWh	8,490	8,671	8,523
Efficiency, mech.	%	42.4	41.5	42.2
Pressure ratio	-	27.5	27.7	27.6
Exhaust-gas flow	kg/s	125.6	126.6	124.7
Exhaust-gas temperature	°C	451	441	449

$\dot{q}_{ue}$



#### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
- 8. Operación de TGs**
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA



# 8.- OPERACIÓN DE TGs *volver*

## CON TURBINA LIBRE

### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

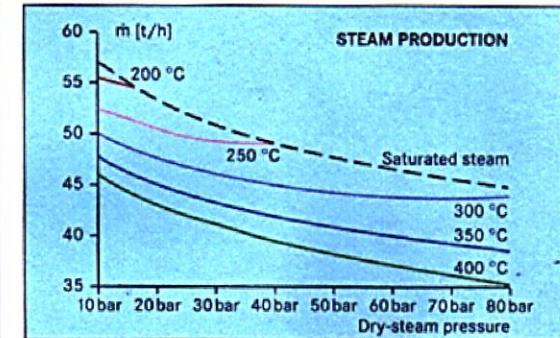
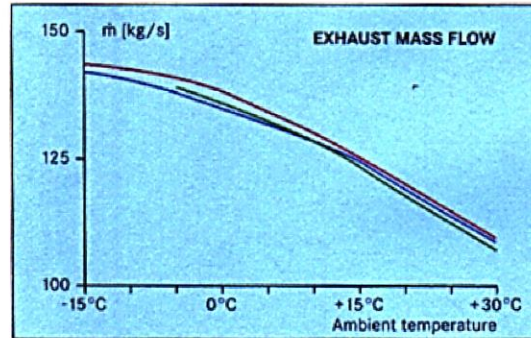
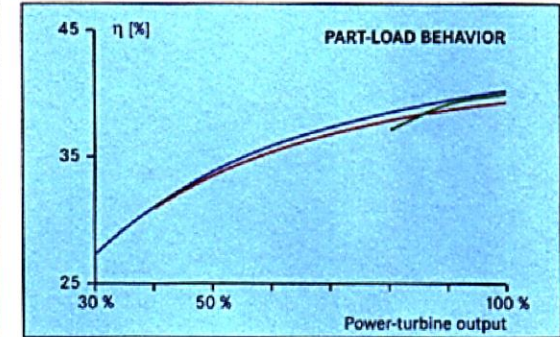
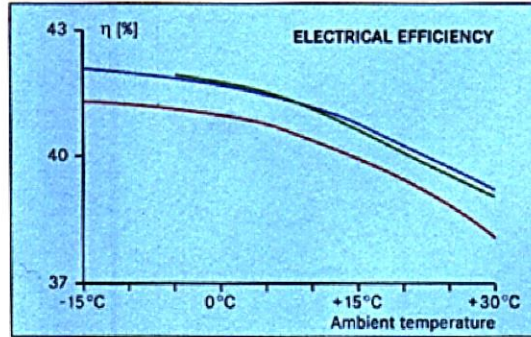
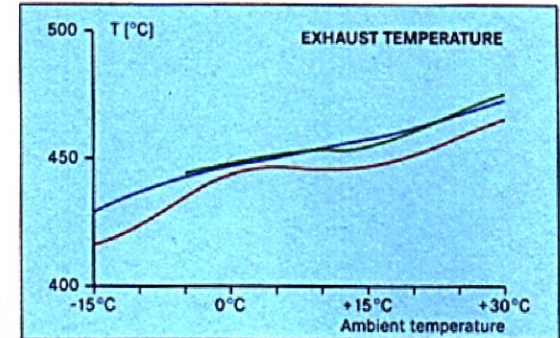
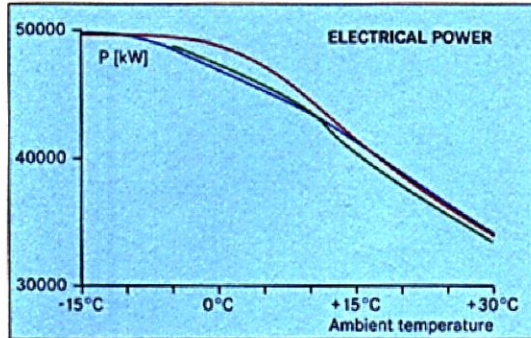
1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
- 8. Operación de TGs**
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

*Autores:*  
*P.A. Rodríguez*  
*A. Lecuona*  
*R. Ventas*



**MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA**

Fuente: Por cortesía de General Electric



— LM6000PC  
 — LM6000PC with water-injection for 150 mg/Nm<sup>3</sup> NO<sub>x</sub>  
 — LM6000PD DLE

All information based on:

Natural gas operation  
 Site altitude 0 m a.s.l.  
 Inlet pressure drop 10 mbar



# CORRECCIÓN DE ACTUACIONES DE TGs CON LAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
- 8. Operación de TGs**
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



- **Condiciones nominales:** Presión y temperatura de entrada con las que se han obtenido las curvas características de la turbomáquina.

- Compresores:  $p_{ref} = 962 \text{ mbar}$  ;  $T_{ref} = 303 \text{ K}$

- Turbinas:  $p_{ref} = 1013 \text{ mbar}$  ;  $T_{ref} = 288 \text{ K}$

Fuente: Garrett <http://www.turbobygarrett.com/>

- Operación en **condiciones diferentes** ( $_u$ ) de las nominales:

$$\dot{m}_{corregido} = \dot{m}_u \frac{\sqrt{\varphi}}{\delta} \quad n_{corregida} = \frac{n_u}{\sqrt{\varphi}} \quad \varphi = \frac{T_u}{T_{ref}} \quad ; \quad \delta = \frac{p_u}{p_{ref}}$$



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
- 8. Operación de TGs**
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

*Autores:*  
*P.A. Rodríguez*  
*A. Lecuona*  
*R. Ventas*



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA

## RESUMEN DE ASPECTOS RELEVANTES

- Es necesaria una valuación precisa de rendimientos de componentes.
- Influencia de las condiciones de operación sobre dichos rendimientos.
- La composición y calores específicos influyen y son variables con  $T$ .
- Cambios en el rendimiento durante la operación a carga parcial.
- Influencia sobre las actuaciones de las condiciones ambiente (presión y temperatura).
- Control de la TG: modo en que se transfiere la demanda de carga al sistema de combustible. Influencia del tipo de TG (monoeje y turbina libre).
- Valoración de los beneficios conseguidos con elementos recuperadores de calor.
- Capacidad de adaptación a la demanda de calor útil en cogeneración (temperatura y gasto másico).
- Cálculo sencillo del calor residual en el escape (motor adiabático).

## 9.- CONCLUSIONES PRINCIPALES [volver](#)



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
- 9. Conclusiones**
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:

P.A. Rodríguez

A. Lecuona

R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA

- El asumir GICP permite obtener expresiones analíticas, que facilitan el análisis.
- Al aumentar la temperatura el aire aumenta su  $c_p$  y baja  $\gamma$ , afectando negativamente al ciclo. Los elevados  $RAC \approx 30 \div 60$  hacen que sus propiedades cambien poco tras la combustión.
- El ciclo Brayton simple irreversible proporciona rendimientos moderados debido a la limitación de:
  - $T_3 < 1.000 \text{ }^\circ\text{C}$  para aplicaciones generales  $\theta < 4,25$
  - $T_3 < 1.300 \text{ }^\circ\text{C}$  para aplicaciones industriales y de aviación  $\theta < 5,25$
  - $T_3 < 1.500 \text{ }^\circ\text{C}$  para aplicaciones militares  $\theta < 6,0$
- Mayores  $T_3$  no son prácticas por el excesivo sangrado de aire del compresor para refrigerar los álabes de la turbina y excesivo coste .
- El ciclo Brayton es muy sensible a los rendimientos de los componentes, compresor, turbina, cámara de combustión y recuperador de calor.
- Las mejoras del ciclo Brayton permiten mejorar el rendimiento y el trabajo específico, a costa de complejidad, lo cual es impracticable en propulsión aérea.

## 9.- CONCLUSIONES PRINCIPALES [volver](#)

- Grandes  $\Pi$  solo son beneficiosas con ciclo simple y componentes muy eficientes. Actualmente se llega hasta  $\Pi = 40$  sin contar posible compresión externa.
- El ciclo regenerativo permite operar con bajos  $\Pi$  y buen rendimiento, pero el regenerador es un elemento complejo y costoso, salvo en tamaños muy pequeños, por eso se usa en microturbinas.
- La adiabaticidad del ciclo permite un fácil aprovechamiento del calor residual del escape. [Un ejemplo](#). Contrasta con los MACI donde el calor residual emana de diversos circuitos: refrigeración, escape, aceite y posenfriamiento del turbo.
- A mayor rendimiento del ciclo, menor temperatura de escape y por ello menor interés en la cogeneración.
- Tanto la sensibilidad del compresor y de la turbina al ángulo de incidencia de la corriente, como la sensibilidad del ciclo a  $\Pi$  y  $\theta$  hace que las TGs no sean tan apropiadas para parcializar la carga como los MACI. Por otra parte  $\Pi$  es muy sensible al régimen, véase [Cap. 5 de turbomaquinaria](#). Incluso en instalaciones de gran tamaño se procura operar a cargas altas y poco variables para evitar distorsiones térmicas transitorias.



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

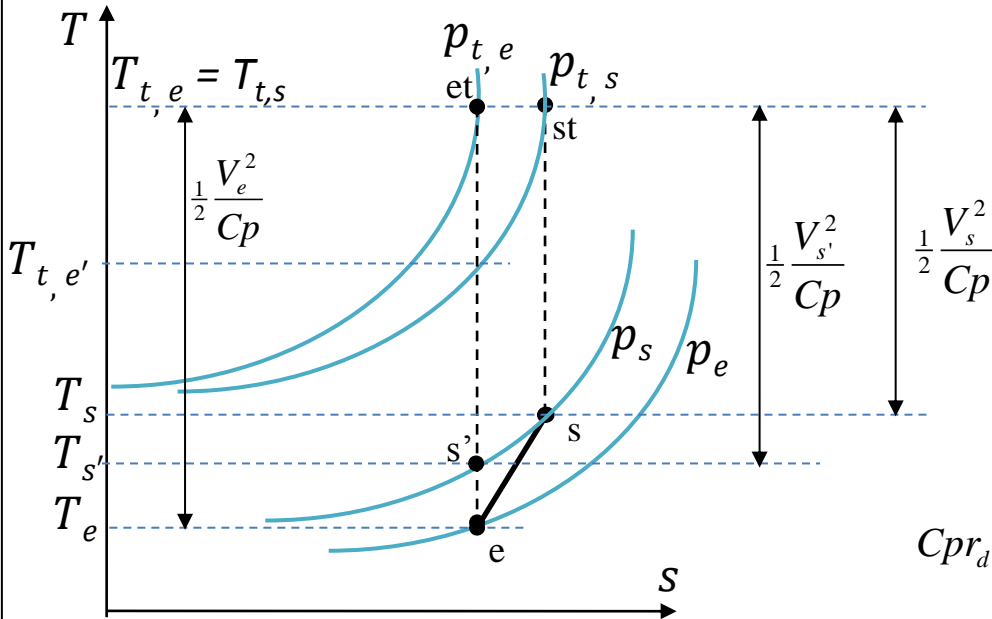
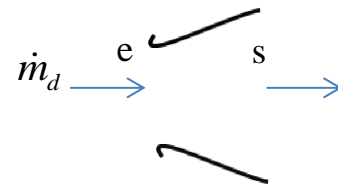
1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
- 9. Conclusiones**
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

*Autores:*  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA

### Anexo I: Cálculos en un difusor.



Para determinar las condiciones en las que opera un difusor, es necesario fijar, además de las condiciones de entrada, **dos parámetros,  $Cpr_d$  y  $\eta_d$** :

$$Cpr_d = \frac{p_s - p_e}{p_{t,e} - p_e}$$

$$\eta_d = \frac{Cpr_d}{Cpr_{d,i}}$$

$$Cpr_d = Cpr_{d,i} - \frac{\Delta p_t}{p_{t,e} - p_e} \quad \Delta p_t = p_{t,e} - p_{t,s}$$

El rendimiento de la difusión se relaciona por lo tanto con una disminución de la presión de remanso ( $\Delta p_t$ ) que repercute tanto en  $p_s$  como en  $V_s$ . En efecto las propiedades de salida se calculan así:

$$p_s = p_e + Cpr_d \cdot (p_{t,e} - p_e)$$

$$p_{t,s} = p_{t,e} - (1 - \eta_d) \cdot (p_{t,e} - p_e)$$

Y si se considera densidad constante:

$$Cpr_{d,i} = \frac{Cpr_d}{\eta_d} \approx 1 - \left( \frac{V_s}{V_e} \right)^2 \rightarrow V_s = V_e \sqrt{1 - \frac{Cpr_d}{\eta_d}} \rightarrow T_s = T_{t,e} - \frac{1}{2} \frac{V_s^2}{Cp}$$

En [1] y [3] puede hallarse una definición alternativa de  $\eta_d$ :

$$\eta_d = \frac{T_{t,e'} - T_e}{T_{t,e} - T_e}$$

Su valor coincide con el proporcionado por la definición anterior.

Esta forma de expresar  $\eta_d$  permite calcular  $p_{t,s}$  así:

$$p_{t,s} = p_e \cdot \left[ 1 + \eta_d \cdot \frac{1}{2} \frac{V_e^2}{Cp \cdot T_e} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$



#### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

- Objetivos
- Nomenclatura
- Configuraciones, procesos y modelos
- Ciclos reversibles
- Rendimiento de componentes
- Ciclos húmedos
- Tipos de TGs
- Operación de TGs
- Conclusiones

#### 10. Anexos

- Ejercicios
- Autoevaluación
- Bibliografía

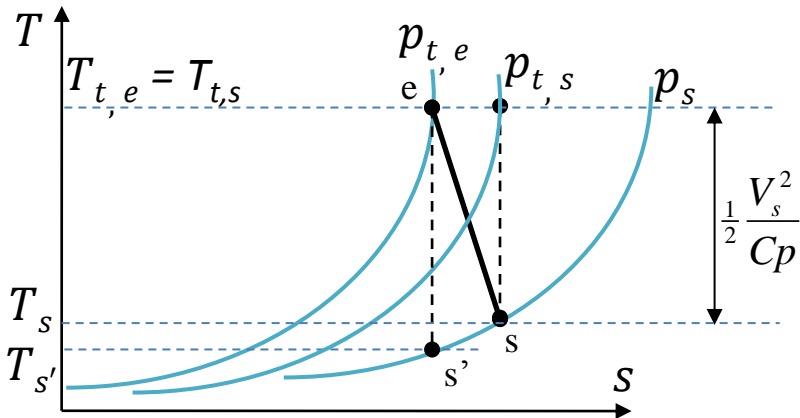
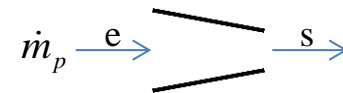
Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

# 10.- ANEXOS *volver*

## Anexo II: Cálculos con tobera propulsiva bloqueada.



Para determinar las condiciones en las que opera una tobera, es necesario fijar, además de las condiciones de entrada, **dos parámetros,  $p_s$  y  $\eta_p$** :

- Respecto de  $p_s$  hay dos posibilidades:  
 $p_s = p_0$  (flujo subsónico) ;  $p_s = p_c$  (tobera bloqueada)
- De la definición de  $\eta_p$  se deduce:

$$T_{t,e} - T_s = T_{t,s} - T_s = \frac{1}{2} \frac{V_s^2}{C_p} = \eta_p T_{t,e} \left[ 1 - \left( \frac{p_s}{p_{t,e}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]$$

Se define la relación de expansión crítica ( $p_{t,e}/p_c$ ) como aquella para la cual  $M_s = 1$ . En el gráfico se identificaría con  $p_s = p_c$ . Trabajando con la definición de las propiedades de remanso se obtiene, para un proceso isoentrópico (e-s'):

$$\frac{T_{t,e}}{T_c} = \left[ \frac{\gamma+1}{2} \right] \quad \frac{p_{t,e}}{p_c} = \left[ \frac{\gamma+1}{2} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

Pero si el proceso no lo es, ya que  $\eta_p < 1$  implica irreversibilidad, una expansión hasta  $p_c$  no conduce a una temperatura  $T_c$  identificable con  $T_{s'}$  en el gráfico, sino a otra más alta, identificable en el gráfico con  $T_s$ . Su valor puede calcularse en función de  $\eta_p$ :

$$T_{t,e} - T_s = \eta_p T_{t,e} \left[ 1 - \frac{T_{s'}}{T_{t,e}} \right] \rightarrow T_s = T_{t,e} \left[ 1 - \eta_p \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \right]$$

Esta elevación de temperatura conduce a una velocidad del sonido más alta y con ello un valor más bajo del número de Mach a la salida, en comparación con lo que sucedería en una tobera isoentrópica. También puede verse como una pérdida de presión de remanso debida a la irreversibilidad, de modo que  $p_{t,s} < p_{t,e}$ . Siendo  $p_{t,s}/p_s$  la relación de expansión a comparar con la crítica:



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

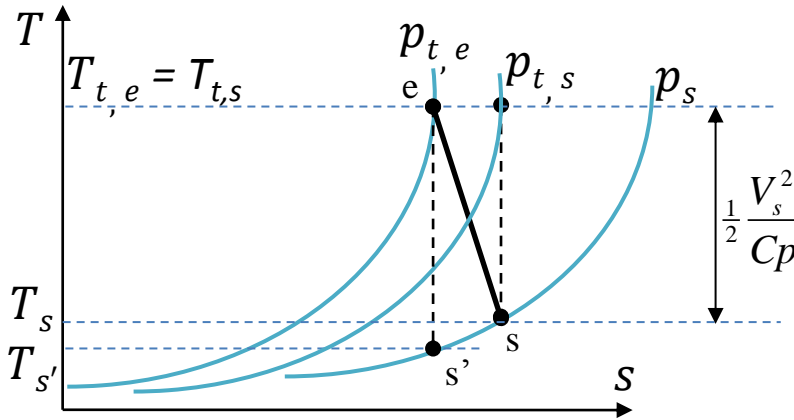
- Objetivos
- Nomenclatura
- Configuraciones, procesos y modelos
- Ciclos reversibles
- Rendimiento de componentes
- Ciclos húmedos
- Tipos de TGs
- Operación de TGs
- Conclusiones
- 10. Anexos**
- Ejercicios
- Autoevaluación
- Bibliografía

Autores:  
 P.A. Rodríguez  
 A. Lecuona  
 R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

**Anexo II: Cálculos con tobera propulsiva bloqueada (cont.).**



$$\frac{p_{t,s}}{p_c} = \frac{1}{\left[1 - \eta_p \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}\right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}} < \frac{p_{t,e}}{p_c} = \left[\frac{\gamma + 1}{2}\right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

En definitiva, la comprobación de si se alcanzan condiciones críticas a la salida de una tobera propulsiva de rendimiento  $\eta_p$  ha de hacerse comprobando si la relación de expansión de la tobera  $p_{t,e}/p_s$  supera la relación de expansión crítica  $p_{t,e}/p_c$  calculada así, lo que permite calcular la presión en la sección de salida de la tobera cuando está bloqueada:

$$\frac{p_{t,e}}{p_c} = \frac{1}{\left[1 - \frac{1}{\eta_p} \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}\right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}} > \left[\frac{\gamma + 1}{2}\right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \Rightarrow \boxed{p_s = p_c = p_{t,e} \left[1 - \frac{1}{\eta_p} \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}\right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}}$$

Cuando la presión de salida de la tobera ( $p_c$  si está bloqueada) sea diferente a la presión ambiente que rodea al motor, es necesario añadir al empuje el término  $A_s \cdot (p_c - p_0)$ , donde  $A_s$  es el área de salida de la tobera y  $p_0$  la presión ambiente:

$$\boxed{E = (\dot{m}_1 - \dot{m}_b) \cdot V_9 + \dot{m}_b \cdot V_8 - \dot{m}_1 \cdot V_1 + A_s \cdot (p_c - p_0)}$$



**CICLOS DE TURBINAS DE GAS**

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones

**10. Anexos**

11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas

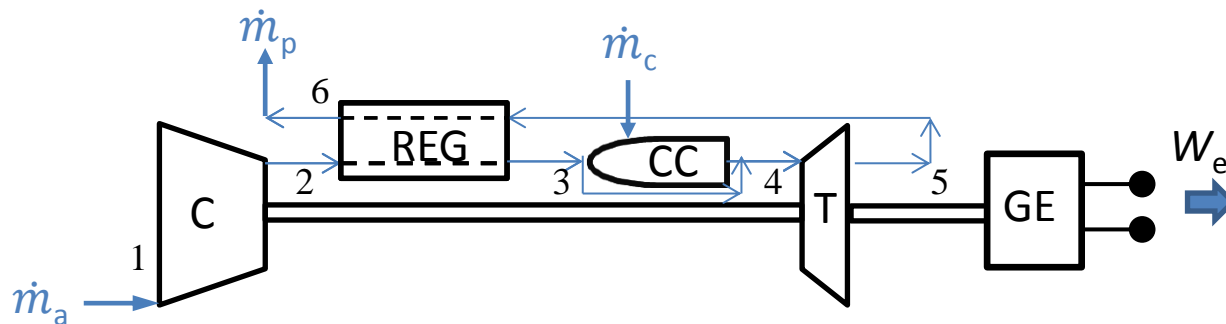


MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA



# 11.- Ejercicios propuestos [volver](#)

**Ejercicio I.-** Se pretende describir el comportamiento de una  $\mu$ TG para aplicaciones de cogeneración. Dicha planta de potencia tiene el siguiente esquema de componentes, típico de un ciclo CBEX:



Para ese propósito se elaborará un modelo termodinámico del cual se calcularán las propiedades termodinámicas de todos los puntos del ciclo, indicados en la figura. A partir de dichos valores se deducirán los de determinados parámetros de actuaciones como la potencia ( $W_e$ ) y el rendimiento.

Se dispone de los siguientes datos de la planta:

- Relación de presión del compresor de la  $\mu$ TG:  $\Pi_{TG} = 2,5$
- Gasto másico de gases de escape:  $\dot{m}_p = 0,3 \text{ kg/s}$
- Temperatura de entrada a la turbina:  $T_4 = 1320 \text{ K}$
- Temperatura de los gases de escape:  $T_6 = 579 \text{ K}$
- Pérdida de carga en la cámara de combustión:  $C_{\Delta pcc} = (p_3 - p_4) / p_3 = 0,02$
- Pérdida de carga en el regenerador (igual en ambos lados):  $C_{\Delta preg} = (p_2 - p_3) / p_2 = (p_5 - p_6) / p_5 = 0,03$
- Condiciones ambiente para el aire de admisión de la  $\mu$ TG:  $T_0 = 288 \text{ K}$  ;  $p_0 = 1,013 \text{ bar}$

**Propiedades del aire:** Para calcular las propiedades del aire en cada condición que se necesite, se empleará el siguiente modelo:

• El aire se considera Gas Ideal: 
$$\rho_a(p_a, T_a) := \frac{p_a}{R_{g_a} \cdot T_a}$$

- A su paso por cada componente de la planta se considerarán propiedades constantes, iguales a las calculadas a la entrada del mismo.

## CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA



# 11.- Ejercicios propuestos volver

## Ejercicio I (cont.)

### Propiedades del aire:

- Para calcular el valor del calor específico  $Cp_a$  [J/(kg·K)] a presión constante se empleará la siguiente expresión, donde la temperatura ha de introducirse en K:

$$Cp_a(T_a) := \left[ 1.926 \cdot 10^{-7} \cdot \left( \frac{T_a}{K} \right)^3 - 6.098 \cdot 10^{-4} \cdot \left( \frac{T_a}{K} \right)^2 + 0.681 \cdot \left( \frac{T_a}{K} \right) + 866.375 \right] \cdot \frac{J}{kg \cdot K}$$

- La constante del gas a usar en la ecuación de estado es:  $Rg_a = 287$  J/(kg·K)
- El cociente de calores específicos del aire  $\gamma_a(T_a)$  se calculará como sigue:

$$\gamma_a(T_a) := \frac{Cp_a(T_a)}{Cp_a(T_a) - Rg_a}$$

### Propiedades del combustible (Gas Natural):

- Poder calorífico inferior:  $L_i = 42$  MJ/kg
- Relación Aire Combustible estequiométrica:  $RAC_{eGN} = 14,5$

**Propiedades de los productos de la combustión:** Para calcular las propiedades de los productos de combustión en cada condición que se necesite, se empleará el siguiente modelo:

- Se consideran Gas Ideal:

$$\rho_p(p_p, T_p) := \frac{p_p}{Rg_p \cdot T_p}$$

- A su paso por cada componente de la planta se considerarán propiedades constantes, iguales a las calculadas a la entrada del mismo.

- La constante del gas a usar en la ecuación de estado es:  $Rg_p = 287$  J/(kg K)

- Su cociente de calores específicos  $\gamma_p(T_p)$  se calculará como sigue:  $\gamma_p(T_p) := \gamma_a(T_p) - 0.045 \cdot FRestim_{\mu TG}$

Se requiere para ello una estimación del dosado de operación de la  $\mu TG$  calculado a partir de un valor asimismo estimado de la  $RAC$ :

$$RAC_{estim} := 90$$

$$FRestim_{\mu TG} := \frac{RAC_{eGN}}{RAC_{estim}} = 0.161$$

- Para calcular el valor del calor específico  $Cp_p$  [J/(kg·K)] a presión constante se empleará la siguiente expresión, donde la temperatura ha de introducirse en [K]:

$$Cp_p(T_p) := \frac{\gamma_p(T_p)}{\gamma_p(T_p) - 1} \cdot Rg_p$$

Con el propósito de determinar las propiedades del gas a su paso por la mTG para describir en detalle su ciclo de trabajo, proceda como sigue:



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

- Objetivos
- Nomenclatura
- Configuraciones, procesos y modelos
- Ciclos reversibles
- Rendimiento de componentes
- Ciclos húmedos
- Tipos de TGs
- Operación de TGs
- Conclusiones
- Anexos
- 11. Ejercicios**
- Autoevaluación
- Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

# 11.- Ejercicios propuestos [volver](#)

## Ejercicio I (cont.)

### 1. Determine las propiedades termodinámicas del fluido a la entrada y a la salida de la planta:

Las condiciones de entrada coinciden con las ambiente. No se considera pérdida de carga en la toma:

$$T_1 := T_0 \quad \theta := \frac{T_4}{T_1} = 4.581 \quad p_1 := p_0 \quad \rho_1 := \rho_a(p_1, T_1) \quad \boxed{T_1 = 288.15 \text{ K}} \quad \boxed{p_1 = 1.013 \cdot \text{bar}} \quad \boxed{\rho_1 = 1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

Para calcular las condiciones de salida (productos de la combustión) no se considera contrapresión del sistema de evacuación o chimenea de escape:

$$T_6 := T_{\text{esc}} \quad T_6 = 579.15 \text{ K} \quad p_6 := p_0 \quad \rho_6 := \rho_p(p_6, T_6) \quad \boxed{T_6 = 579.15 \text{ K}} \quad \boxed{p_6 = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}} \quad \boxed{\rho_6 = 0.609 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

### 2. Determine las presiones en el resto de puntos del ciclo y la relación de presión de la turbina:

$$p_2 := p_1 \cdot \Pi_{\text{TG}} \quad \boxed{p_2 = 2.532 \times 10^5 \text{ Pa}} \quad p_4 := p_3 \cdot (1 - C_{\Delta p_{\text{cc}}}) \quad \boxed{p_4 = 2.407 \times 10^5 \text{ Pa}} \quad \Pi_t := \frac{p_4}{p_5} \quad \boxed{\Pi_t = 2.305}$$

$$p_3 := p_2 \cdot (1 - C_{\Delta p_{\text{reg}}}) \quad \boxed{p_3 = 2.457 \times 10^5 \text{ Pa}} \quad p_5 := \frac{p_6}{1 - C_{\Delta p_{\text{reg}}}} \quad \boxed{p_5 = 1.044 \times 10^5 \text{ Pa}}$$

Nótese que la relación de presión en la turbina es diferente a la del compresor debido a las pérdidas de carga inherentes a los otros componentes (regenerador y cámara de combustión).

### 3. Estimando para el compresor y para la turbina de la $\mu\text{TG}$ los siguientes rendimientos politrópicos, calcule los rendimientos isoentrópicos de compresor y de turbina:

$$\eta_{\text{cp}} := 0.8 \quad \eta_{\text{tp}} := 0.7$$

$$r_{\text{Tc}} := \Pi_{\text{TG}} \frac{\gamma_a(T_1) - 1}{\gamma_a(T_1)} \quad r_{\text{Tc}} = 1.295 \quad \eta_c := \frac{r_{\text{Tc}} - 1}{\frac{\gamma_a(T_1) - 1}{\Pi_{\text{TG}} \gamma_a(T_1) \eta_{\text{cp}} - 1}} \quad \boxed{\eta_c = 0.773}$$

$$r_{\text{Tt}} := \Pi_t \frac{\gamma_p(T_4) - 1}{\gamma_p(T_4)} \quad r_{\text{Tt}} = 1.228 \quad \eta_t := \frac{- (\gamma_p(T_4) - 1) \cdot \eta_{\text{tp}}}{\gamma_p(T_4) (1 - \Pi_t)} \quad \boxed{\eta_t = 0.721}$$

$$\eta_t := \frac{1 - \Pi_t}{1 - \frac{1}{r_{\text{Tt}}}}$$



CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA



# 11.- Ejercicios propuestos [volver](#)

## Ejercicio I (cont.)

### 4. Calcule las propiedades termodinámicas del aire a la salida del compresor:

$$T_2 := T_1 \cdot \left[ 1 + \frac{(r_{Tc} - 1)}{\eta_c} \right]$$

$$p_2 := p_1 \cdot \Pi_{TG}$$

$$\rho_2 := \rho_a(p_2, T_2)$$

$$T_2 = 125.004 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$p_2 = 2.532 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$\rho_2 = 2.216 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

### 5. Determine las propiedades termodinámicas del fluido a la salida de la turbina:

$$T_5 := T_4 \cdot \left[ 1 - \eta_t \cdot \left( 1 - \frac{1}{r_{Tt}} \right) \right]$$

$$\rho_5 := \rho_p(p_5, T_5)$$

$$T_5 = 869.768 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$p_5 = 1.044 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$\rho_5 = 0.318 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

### 6. Calcule las propiedades termodinámicas del aire a la entrada de la cámara de combustión y la eficiencia del regenerador:

Si se desprecian las pérdidas de calor del regenerador hacia el ambiente, un balance de energía en el mismo proporciona el modo de calcular la temperatura de salida del aire  $T_3$ :

$$T_3 := T_2 + \left( 1 + \frac{1}{\text{RAC}_{\text{estim}}} \right) \cdot \frac{C_{p_p}(T_5)}{C_{p_a}(T_2)} \cdot (T_5 - T_6) = 1.023 \times 10^3 \text{ K}$$

$$\rho_3 := \rho_a(p_3, T_3)$$

$$T_3 = 749.86 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$p_3 = 2.457 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$\rho_3 = 0.837 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Un cálculo simplificado considerando la misma capacidad térmica de flujo para ambos lados del regenerador daría lo siguiente:

$$T_{3\text{simple}} := T_5 - (T_6 - T_2) = 961.922 \text{ K}$$

$$T_{3\text{simple}} = 688.772 \cdot ^\circ\text{C}$$

Como se ve, la diferencia en la temperatura de salida del aire es considerable, por lo que no es conveniente hacer esta simplificación.

#### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

- Objetivos
- Nomenclatura
- Configuraciones, procesos y modelos
- Ciclos reversibles
- Rendimiento de componentes
- Ciclos húmedos
- Tipos de TGs
- Operación de TGs
- Conclusiones
- Anexos
- Ejercicios**
- Autoevaluación
- Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA



# 11.- Ejercicios propuestos [volver](#)

## Ejercicio I (cont.)

De modo que el cálculo de la eficiencia del regenerador debe hacerse como sigue:

$$m_a := m_p \cdot \frac{RAC_{estim}}{RAC_{estim} + 1}$$

$$m_a = 0.297 \frac{kg}{s}$$

$$C_a := m_a \cdot C_{pa} \left( \frac{T_2 + T_3}{2} \right) = 329.78 \cdot \frac{W}{K}$$

$$m_p = 0.3 \frac{kg}{s}$$

$$C_p := m_p \cdot C_{pp} \left( \frac{T_5 + T_6}{2} \right) = 342.496 \cdot \frac{W}{K}$$

$$C_{max} := \max(C_a, C_p)$$

$$C_{min} := \min(C_a, C_p)$$

$$\epsilon_r := \frac{C_a \cdot (T_3 - T_2)}{C_{min} \cdot (T_5 - T_2)} = 0.839$$

$$T_6 - T_2 = 180.996 K$$

$$T_5 - T_3 = 119.908 K$$

## 7. Calcule las propiedades termodinámicas del fluido a la salida de la cámara de combustión y represente la evolución de todas las propiedades termodinámicas a lo largo del ciclo:

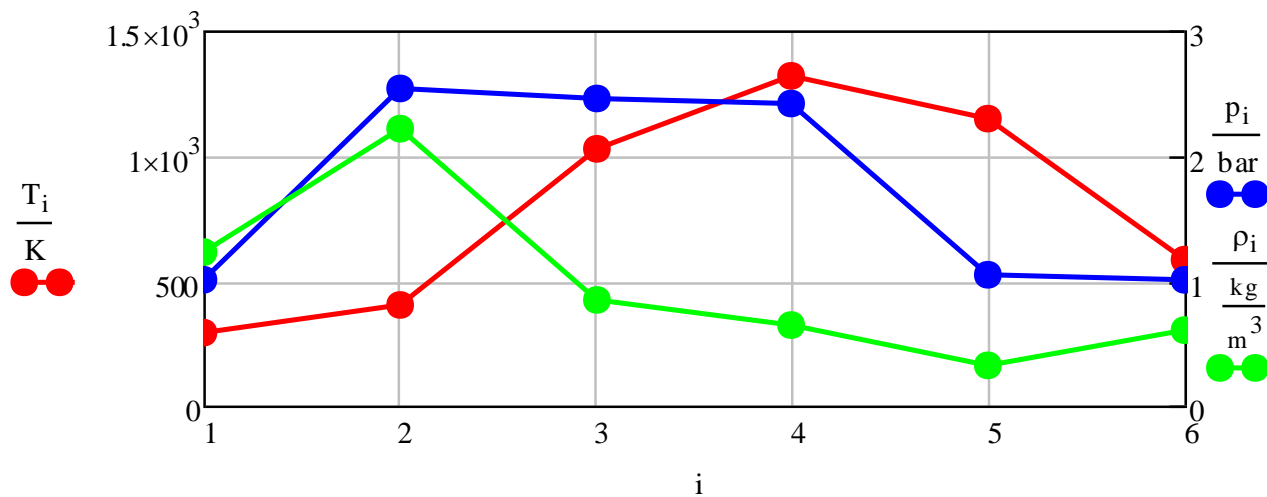
Solamente falta por determinar la densidad a la salida de la cámara de combustión:

$$\rho_4 := \rho_p(p_4, T_4)$$

$$T_4 = 1.047 \times 10^3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$p_4 = 2.407 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$\rho_4 = 0.635 \frac{kg}{m^3}$$



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

- Objetivos
- Nomenclatura
- Configuraciones, procesos y modelos
- Ciclos reversibles
- Rendimiento de componentes
- Ciclos húmedos
- Tipos de TGs
- Operación de TGs
- Conclusiones
- Anexos
- 11. Ejercicios**
- Autoevaluación
- Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

# 11.- Ejercicios propuestos volver

## Ejercicio I (cont.)

8. Calcule el trabajo específico obtenido de la turbina, el suministrado al compresor y el trabajo específico neto de la  $\mu$ TG, así como la potencia entregada en el eje de la misma:

$$\omega_t := C_{pP} \left( \frac{T_4 + T_5}{2} \right) \cdot (T_4 - T_5)$$

$$\omega_t = 0.205 \cdot \frac{10^6 \cdot \text{J}}{\text{kg}}$$

$$\omega_c := C_{pA} \left( \frac{T_1 + T_2}{2} \right) \cdot (T_2 - T_1)$$

$$\omega_c = 0.114 \cdot \frac{10^6 \cdot \text{J}}{\text{kg}}$$

$$\omega_{nTG} := \omega_t - \frac{RAC_{estim}}{RAC_{estim} + 1} \cdot \omega_c$$

$$\omega_{nTG} = 0.092 \cdot \frac{10^6 \cdot \text{J}}{\text{kg}}$$

$$W_{nTG} := \omega_{nTG} \cdot m_p$$

$$W_{nTG} = 27.741 \cdot \text{kW}$$

9. Si el rendimiento de la combustión es  $\eta_{comb} = 0,98$ , calcule el consumo de combustible y la RAC (Relación Aire / Combustible) con la que opera la  $\mu$ TG:

$$q_{cc} := C_{pP} \left( \frac{T_3 + T_4}{2} \right) \cdot (T_4 - T_3)$$

$$q_{cc} = 0.343 \cdot \frac{10^6 \cdot \text{J}}{\text{kg}}$$

$$Q_{cc} := q_{cc} \cdot m_p$$

$$Q_{cc} = 102.959 \cdot \text{kW}$$

$$m_c := \frac{Q_{cc}}{L_i \cdot \eta_{comb}}$$

$$m_c = 2.501 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$RAC_{\mu TG} := \frac{m_p}{m_c} - 1 = 118.932$$

Aunque este valor parece muy elevado, es necesario tener en cuenta el aire de dilución. Al respecto, en [4] se indica lo siguiente: “Debe mantenerse la combustión en el seno de una corriente de aire que se mueve a una velocidad alta del orden de 30 a 60 m/s, requiriéndose un funcionamiento estable a lo largo de un amplio margen de relaciones combustible/aire, desde plena carga a condiciones de marcha en vacío. La relación combustible/aire puede variar desde alrededor de 60:1 hasta 120:1 en turbinas de gas simples y desde 100:1 hasta 200:1 si se utiliza un cambiador de calor. La elevada dilución que estas cifras implican resulta necesaria para satisfacer el primer requisito.” El primer requisito al que se refiere es el siguiente: “El nivel de temperatura de los gases después de la combustión debe ser comparativamente bajo, como conviene a los materiales altamente solicitados de la turbina.”

El dosado relativo que le corresponde a ese valor de RAC es el siguiente:

$$FR_{\mu TG} := \frac{RAC_{eGN}}{RAC_{\mu TG}} = 0.122$$



CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

# 11.- Ejercicios propuestos [volver](#)

## Ejercicio I (cont.)

10. Sabiendo que el rendimiento del generador eléctrico es  $\eta_{gen} = 0,95$  calcule el rendimiento de la  $\mu$ TG, así como potencia y rendimiento eléctricos:

- Rendimiento de la  $\mu$ TG:  $\eta_{\mu TG} := \frac{W_{nTG}}{m_c \cdot L_i}$   $\eta_{\mu TG} = 0.264$
- Potencia eléctrica producida:  $W_{e\mu TG} := W_{nTG} \cdot \eta_{gen}$   $W_{e\mu TG} = 26.354 \cdot kW$
- Rendimiento eléctrico:  $\eta_{electrico} := \eta_{\mu TG} \cdot \eta_{gen}$   $\eta_{electrico} = 0.251$

A efectos de comprobación de la validez de los cálculos efectuados, compárelos con los siguientes datos, obtenidos del catálogo de una microturbina regenerativa para cogeneración de las mismas características (relación de presión, gasto másico de gases de escape, temperatura de escape y rendimiento del generador eléctrico) que la estudiada aquí:

- Rendimiento de la  $\mu$ TG (de catálogo):  $\eta_{\mu TGcat} = 0.263$
- Potencia eléctrica producida (de catálogo):  $W_{e\mu TGcat} := 26 \cdot kW$
- Rendimiento eléctrico (de catálogo):  $\eta_{\mu TGcat} = 0.263$



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

- Objetivos
- Nomenclatura
- Configuraciones, procesos y modelos
- Ciclos reversibles
- Rendimiento de componentes
- Ciclos húmedos
- Tipos de TGs
- Operación de TGs
- Conclusiones
- Anexos
- 11. Ejercicios**
- Autoevaluación
- Bibliografía

*Autores:*  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas

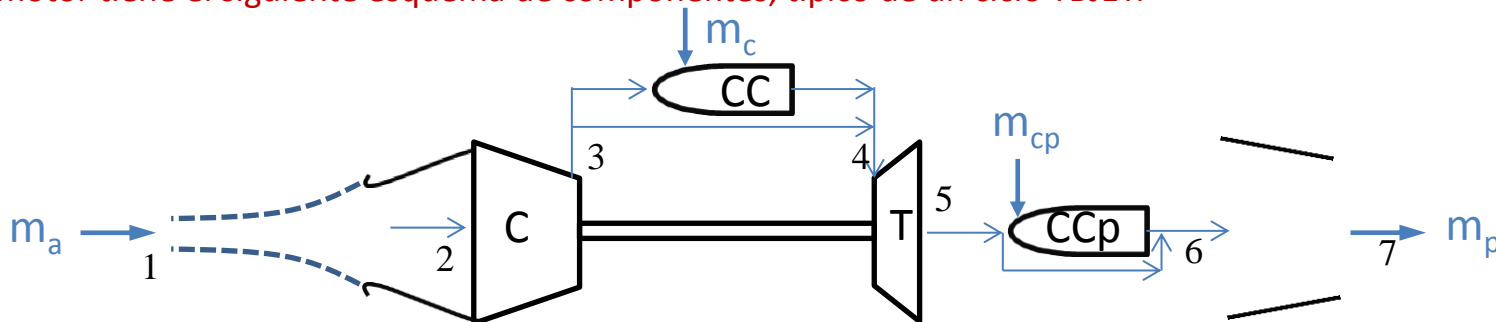


MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA



# 11.- Ejercicios propuestos [volver](#)

**Ejercicio II.-** Se pretende describir el comportamiento de un aerorreactor equipado con un sistema de postcombustión para incrementar su empuje, en aplicaciones de propulsión de una aeronave. Dicho motor tiene el siguiente esquema de componentes, típico de un ciclo TBJET:



Para ese propósito se elaborará un modelo termodinámico del cual se calcularán las propiedades termodinámicas, estáticas y de remanso, de todos los puntos del ciclo, indicados en la figura. A partir de dichos valores se deducirán los de determinados parámetros de actuaciones como el empuje y los rendimientos propulsivo, térmico y global.

Se dispone de los siguientes datos del motor:

- Velocidad de vuelo:  $V_1 = 200 \text{ m/s}$
- Gasto másico de gases de aire:  $\dot{m}_a = 200 \text{ kg/s}$
- Coeficiente de presión de la difusión en la toma (incluye la difusión exterior):  $C_{prd} = 0,5$
- Rendimiento de la difusión en la toma (incluye la difusión exterior):  $\eta_d = 0,93$
- Relación de presión de remanso del compresor:  $\Pi_{tc} = 30$
- Pérdida de carga en la cámara de combustión principal:  $C_{\Delta pcc} = (p_3 - p_4)/p_3 = 0,03$
- Rendimiento de la combustión principal:  $\eta_{cc} = 0,98$
- Rendimiento mecánico del generador de gases (conjunto compresor – turbina):  $\eta_{mgg} = 0,99$
- Temperatura de entrada a la turbina:  $T_4 = 1300 \text{ K}$
- Pérdida de carga en la cámara de postcombustión:  $C_{\Delta ppc} = (p_5 - p_6)/p_5 = 0,02$
- Temperatura de entrada a la tobera con postcombustión activada:  $T_{6p} = 1400 \text{ K}$
- Rendimiento de combustión del postcombustor:  $\eta_{ccp} = 0,98$
- Rendimiento de la tobera propulsiva:  $\eta_p = 0,95$
- Condiciones ambiente para el aire de admisión al motor, correspondientes a una altura de vuelo de 5000 m en atmósfera estándar:  $T_0 = 256 \text{ K}$ ;  $p_0 = 0,541 \text{ bar}$

## CICLOS DE TURBINAS DE GAS

- Objetivos
- Nomenclatura
- Configuraciones, procesos y modelos
- Ciclos reversibles
- Rendimiento de componentes
- Ciclos húmedos
- Tipos de TGs
- Operación de TGs
- Conclusiones
- Anexos
- 11. Ejercicios**
- Autoevaluación
- Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA

# 11.- Ejercicios propuestos volver

## Ejercicio II (cont.)

**Propiedades del aire:** Para calcular las propiedades del aire en cada condición que se necesite, se empleará el siguiente modelo:

- El aire se considera Gas Ideal:  $\rho_a(p_a, T_a) := \frac{p_a}{R_{g_a} \cdot T_a}$

- A su paso por cada componente de la planta se considerarán propiedades constantes, iguales a las calculadas a la entrada del mismo.
- Para calcular el valor del calor específico  $C_{p_a}$  [J/(kg·K)] a presión constante se empleará la siguiente expresión, donde la temperatura ha de introducirse en K:

$$C_{p_a}(T_a) := \left[ 1.926 \cdot 10^{-7} \cdot \left( \frac{T_a}{K} \right)^3 - 6.098 \cdot 10^{-4} \cdot \left( \frac{T_a}{K} \right)^2 + 0.681 \cdot \left( \frac{T_a}{K} \right) + 866.375 \right] \cdot \frac{J}{kg \cdot K}$$

- La constante del gas a usar en la ecuación de estado es:  $R_{g_a} = 287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
- El cociente de calores específicos del aire  $\gamma_a(T_a)$  se calculará como sigue:

$$\gamma_a(T_a) := \frac{C_{p_a}(T_a)}{C_{p_a}(T_a) - R_{g_a}}$$

### Propiedades del combustible (Keroseno de aviación tipo Jet A-1):

- Poder calorífico inferior:  $L_i = 42,8 \text{ MJ}/\text{kg}$
- Relación Aire Combustible estequiométrica:  $RAC_e = 14,5$

**Propiedades de los productos de la combustión:** Para calcular las propiedades de los productos de combustión en cada condición que se necesite, se empleará el siguiente modelo:

- Se consideran Gas Ideal:  $\rho_p(p_p, T_p) := \frac{p_p}{R_{g_p} \cdot T_p}$

- A su paso por cada componente de la planta se considerarán propiedades constantes, iguales a las calculadas a la entrada del mismo.
- La constante del gas a usar en la ecuación de estado es:  $R_{g_p} = 287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
- Su cociente de calores específicos  $\gamma_p(T_p)$  se calculará como sigue:  $\gamma_p(T_p) := \gamma_a(T_p) - 0.045 \cdot FR_{estim}$

Se requiere para ello una estimación del dosado de operación del motor calculado a partir de un valor asimismo estimado de la  $RAC$ :

$$RAC_{estim} := 70$$

$$FR_{estim} := \frac{RAC_e}{RAC_{estim}} = 0.207$$



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

- Objetivos
- Nomenclatura
- Configuraciones, procesos y modelos
- Ciclos reversibles
- Rendimiento de componentes
- Ciclos húmedos
- Tipos de TGs
- Operación de TGs
- Conclusiones
- Anexos
- 11. Ejercicios**
- Autoevaluación
- Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA



# 11.- Ejercicios propuestos volver

## Ejercicio II (cont.)

### Propiedades de los productos de la combustión (cont.):

- Para calcular el valor del calor específico  $C_{p_p}$  [J/(kg · K)] a presión constante se empleará la siguiente expresión, donde la temperatura ha de introducirse en K:

$$C_{p_p}(T_p) := \frac{\gamma_p(T_p)}{\gamma_p(T_p) - 1} \cdot R_{g_p}$$

A lo largo del ejercicio se emplean repetidamente las siguientes expresiones, que permiten calcular las propiedades de remanso, y otras relacionadas con ellas. En los apartados del ejercicio se muestran de forma abreviada, dándose aquí su definición detallada:

Velocidad del sonido del aire:  $a_a(T_a) := \sqrt{\gamma_a(T_a) \cdot R_{g_a} \cdot T_a}$

Número del Mach del flujo de aire:  $M_a(V_a, T_a) := \frac{V_a}{a_a(T_a)}$

Variables de remanso del aire:

$$T_{ta}(T_a, V_a) := T_a \cdot \left[ 1 + \frac{1}{2} \cdot (\gamma_a(T_a) - 1) \cdot M_a(V_a, T_a)^2 \right]$$

$$P_{ta}(P_a, T_a, V_a) := P_a \cdot \left[ 1 + \frac{1}{2} \cdot (\gamma_a(T_a) - 1) \cdot M_a(V_a, T_a)^2 \right]^{\frac{\gamma_a(T_a)}{\gamma_a(T_a) - 1}}$$

$$\rho_{ta}(\rho_a, T_a, V_a) := \rho_a \cdot \left[ 1 + \frac{1}{2} \cdot (\gamma_a(T_a) - 1) \cdot M_a(V_a, T_a)^2 \right]^{\frac{1}{\gamma_a(T_a) - 1}}$$

Velocidad del sonido de los productos de la combustión:  $a_p(T_p) := \sqrt{\gamma_p(T_p) \cdot R_{g_p} \cdot T_p}$

Número del Mach del flujo de productos de la combustión:  $M_p(V_p, T_p) := \frac{V_p}{a_p(T_p)}$

Variables de remanso de los productos de la combustión:

$$T_{tp}(T_p, V_p) := T_p \cdot \left[ 1 + \frac{1}{2} \cdot (\gamma_p(T_p) - 1) \cdot M_p(V_p, T_p)^2 \right]$$

$$P_{tp}(P_p, T_p, V_p) := P_p \cdot \left[ 1 + \frac{1}{2} \cdot (\gamma_p(T_p) - 1) \cdot M_p(V_p, T_p)^2 \right]^{\frac{\gamma_p(T_p)}{\gamma_p(T_p) - 1}}$$

$$\rho_{tp}(\rho_p, T_p, V_p) := \rho_p \cdot \left[ 1 + \frac{1}{2} \cdot (\gamma_p(T_p) - 1) \cdot M_p(V_p, T_p)^2 \right]^{\frac{1}{\gamma_p(T_p) - 1}}$$



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

- Objetivos
- Nomenclatura
- Configuraciones, procesos y modelos
- Ciclos reversibles
- Rendimiento de componentes
- Ciclos húmedos
- Tipos de TGs
- Operación de TGs
- Conclusiones
- Anexos
- 11. Ejercicios**
- Autoevaluación
- Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA

# 11.- Ejercicios propuestos [volver](#)

## Ejercicio II (cont.)

Con el propósito de determinar las propiedades del gas a su paso por el aerorreactor, para describir en detalle su ciclo de trabajo, proceda como sigue:

**1.- Determine las propiedades termodinámicas estáticas y de remanso del fluido, antes de entrar en el aerorreactor, referidas a un sistema de referencia ligado al mismo:**

Las variables estáticas de entrada coinciden con las condiciones ambiente:

$$T_1 := T_0 \quad \theta := \frac{T_4}{T_1} = 5.084 \quad p_1 := p_0 \quad \rho_1 := \rho_a(p_1, T_1) \quad a_1 := a_a(T_1)$$

$$T_1 = 255.7 \text{ K}$$

$$p_1 = 0.54 \cdot \text{bar}$$

$$\rho_1 = 0.737 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$a_1 = 320.572 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Las variables de remanso, y las relacionadas con ellas son las siguientes:

$$V_1 = 200 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad M_1 := M_a(V_1, T_1) \quad T_{t_1} := T_{ta}(T_1, V_1) \quad p_{t_1} := p_{ta}(p_1, T_1, V_1) \quad \rho_{t_1} := \rho_{ta}(\rho_1, T_1, V_1)$$

$$T_{t_1} = 275.623 \text{ K}$$

$$p_{t_1} = 0.703 \cdot \text{bar}$$

$$\rho_{t_1} = 0.888 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$V_1 = 200 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$M_1 = 0.624$$

Suponiendo flujo unidimensional en cada sección del motor **se puede estimar** el área de paso de fluido en cada una de ellas:

$$A_1 := \frac{m_a}{\rho_1 \cdot V_1}$$

$$A_1 = 1.358 \text{ m}^2$$



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
- 11. Ejercicios**
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA

# 11.- Ejercicios propuestos volver

## Ejercicio II (cont.)

### 2.- Determine las propiedades estáticas y de remanso a la entrada del compresor, así como la velocidad de entrada al mismo:

De la definición del coeficiente de presión del difusor se obtiene la presión estática en dicho punto, e incluyendo la del rendimiento de la difusión, se calcula la presión de remanso a la entrada del compresor. El balance de energía en el difusor da como resultado la conservación de la entalpía de remanso, y con ello la de la correspondiente temperatura de remanso.

La velocidad se obtiene a partir de su relación con el coeficiente de presión ideal, considerando despreciables las variaciones de densidad en el difusor, lo que permite calcular la temperatura estática.

$$p_2 := p_1 + C_{\text{prd}} \cdot p_{t_1} - p_1 \quad p_{t_2} := p_{t_1} - (1 - \eta_d) \cdot p_{t_1} - p_1 \quad T_{t_2} := T_{t_1} \quad C_{\text{prid}} := \frac{C_{\text{prd}}}{\eta_d} = 0.538 \quad V_2 := V_1 \cdot \sqrt{1 - C_{\text{prid}}}$$

Lo que permite calcular la temperatura estática:  $T_2 := T_{t_2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{(V_2)^2}{C_{p_a}(T_1)}$

Y con ello el resto de propiedades estáticas y de remanso:

$$\rho_2 := \rho_a(p_2, T_2) \quad a_2 := a_a(T_2) \quad M_2 := M_a(V_2, T_2) \quad \rho_{t_2} := \rho_{ta}(\rho_2, T_2, V_2)$$

$$T_2 = 266.411 \text{ K}$$

$$p_2 = 0.622 \cdot \text{bar}$$

$$\rho_2 = 0.813 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$a_2 = 326.938 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$T_{t_2} = 275.623 \text{ K}$$

$$p_{t_2} = 0.691 \cdot \text{bar}$$

$$\rho_{t_2} = 0.885 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$V_2 = 135.995 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$M_2 = 0.416$$

Y con la hipótesis de flujo unidimensional:

$$A_2 := \frac{m_a}{\rho_2 \cdot V_2}$$

$$A_2 = 1.809 \text{ m}^2$$



CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

# 11.- Ejercicios propuestos volver

## Ejercicio II (cont.)

3.- Determine el rendimiento isoentrópico del compresor así como las propiedades estáticas y de remanso a su salida. Considere que la velocidad axial a la salida del compresor se mantiene en un valor similar al de la entrada. Calcule también el trabajo específico del compresor. Considere que el rendimiento politrópico del compresor vale  $\eta_{cp} = 0,895$ .

$$r_{Ttc} := \Pi_{tc}^{\frac{\gamma_a(T_2)-1}{\gamma_a(T_2)}}$$

$$r_{Ttc} = 2.633$$

$$\eta_c := \frac{r_{Ttc} - 1}{\Pi_{tc}^{\frac{\gamma_a(T_2)-1}{\gamma_a(T_2) \cdot \eta_{cp}} - 1}}$$

$$\eta_c = 0.838$$

$$T_{t_3} := T_{t_2} \cdot \left[ 1 + \frac{(r_{Ttc} - 1)}{\eta_c} \right]$$

$$p_{t_3} := p_{t_2} \cdot \Pi_{tc}$$

$$\rho_{t_3} := \rho_a \cdot p_{t_3} / T_{t_3}$$

$$V_3 := V_2 \quad T_3 := T_{t_3} - \frac{1}{2} \cdot \frac{(V_3)^2}{C_{p_a} \left( \frac{T_2 + T_{t_3}}{2} \right)}$$

$$a_3 := a_a(T_3) \quad M_3 := M_a(V_3, T_3)$$

$$p_3 := \frac{p_{t_3}}{\left[ 1 + \frac{1}{2} \cdot (\gamma_a(T_3) - 1) \cdot M_a(V_3, T_3)^2 \right]^{\frac{\gamma_a(T_3)}{\gamma_a(T_3) - 1}}}$$

$$\rho_3 := \rho_a(p_3, T_3)$$

$$A_3 := \frac{m_a}{\rho_3 \cdot V_3}$$

$$A_3 = 0.17 \text{ m}^2$$

$$T_3 = 804.6 \text{ K}$$

$$p_3 = 19.93 \cdot \text{bar}$$

$$\rho_3 = 8.631 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$a_3 = 557.221 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$T_{t_3} = 813.111 \text{ K}$$

$$p_{t_3} = 20.74 \cdot \text{bar}$$

$$\rho_{t_3} = 8.888 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$V_3 = 135.995 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$M_3 = 0.244$$

$$\omega_c := C_{p_a} \left( \frac{T_2 + T_3}{2} \right) \cdot (T_{t_3} - T_{t_2})$$

$$\omega_c = 0.584 \cdot \frac{10^6 \cdot \text{J}}{\text{kg}}$$



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

# 11.- Ejercicios propuestos [volver](#)

## Ejercicio II (cont.)

**4.- Considerando que no hay diferencias significativas de sección transversal entre la entrada y la salida de la cámara de combustión, calcule los valores de las propiedades estáticas y de remanso a la salida de la misma.**

$$p_4 := p_3 \cdot (1 - C_{\Delta p_{cc}}) \quad T_4 = 1.3 \times 10^3 \text{ K} \quad \rho_4 := \rho_p(p_4, T_4)$$

Si no hay diferencias en la sección transversal de entrada y salida de la cámara de combustión (aunque en su interior si las haya), ello conduce a un incremento de la velocidad de los gases ya que su densidad disminuye:

$$V_4 := V_3 \cdot \frac{\rho_3}{\rho_4} \quad a_4 := a_p(T_4) \quad M_4 := M_p(V_4, T_4) \quad T_{t4} := T_{tp}(T_4, V_4) \quad p_{t4} := p_{tp}(p_4, T_4, V_4) \quad \rho_{t4} := \rho_{tp}(\rho_4, T_4, V_4)$$

$$T_4 = 1.3 \times 10^3 \text{ K}$$

$$p_4 = 19.332 \cdot \text{bar}$$

$$\rho_4 = 5.182 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$a_4 = 703.23 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$T_{t4} = 1.322 \times 10^3 \text{ K}$$

$$p_{t4} = 20.697 \cdot \text{bar}$$

$$\rho_{t4} = 5.455 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$V_4 = 226.524 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$M_4 = 0.322$$

Suponiendo flujo unidimensional:  $A_4 := \frac{m_a}{\rho_4 \cdot V_4} \quad A_4 = 0.17 \text{ m}^2$

**5.- Determine la Relación Aire Combustible RAC con la que opera el aerorreactor.**

$$q_{cc} := C_{p_p} \left( \frac{T_3 + T_4}{2} \right) \cdot (T_{t4} - T_{t3}) \quad q_{cc} = 0.588 \cdot \frac{10^6 \cdot \text{J}}{\text{kg}} \quad Q_{cc} := q_{cc} \cdot m_a \quad Q_{cc} = 117.646 \cdot 10^6 \cdot \text{W}$$

$$m_c := \frac{Q_{cc}}{L_c \cdot \eta_{cc}} \quad m_c = 2.805 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad RAC_{TBJET} := \frac{m_a}{m_c} \quad RAC_{TBJET} = 71.306$$



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
- 11. Ejercicios**
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

# 11.- Ejercicios propuestos volver

## Ejercicio II (cont.)

6.- Mediante un balance de energía en el generador de gases (i.e. el conjunto compresor - turbina), determine las condiciones de salida y el trabajo específico de ésta última. Considere que las diferencias de velocidad entre la entrada y la salida de la turbina son pequeñas. Considere un rendimiento politrópico para la turbina de valor  $\eta_{tp} = 0,89$

$$W_c := m_a \cdot \omega_c$$

$$W_t := \frac{W_c}{\eta_{mgs}}$$

$$m_p := m_a + m_c$$

$$\omega_t := \frac{W_t}{m_p}$$

$$\omega_t = 0.581 \cdot 10^6 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

Si se desprecian variaciones de energía cinética entre la entrada y la salida de la turbina:  $v_5 := v_4$

$$T_{t5} := T_{t4} - \frac{\omega_t}{C_{p,p}(T_{t4})} \quad T_5 := T_{t5} - \frac{1}{2} \cdot \frac{(v_5)^2}{C_{p,a} \left( \frac{T_4 + T_{t5}}{2} \right)} \quad a_5 := a_p(T_5) \quad M_5 := M_p(v_5, T_5)$$

Para calcular la variación de presión en la turbina es necesario conocer su rendimiento. Puede hacerse una estimación del mismo considerando para la misma una relación de presiones igual a la del compresor:

$$\Pi_{tc} = 30 \quad r_{Ttest} := \Pi_{tc} \quad r_{Ttest} = 2.327 \quad \eta_{test} := \frac{1 - \Pi_{tc} \cdot \frac{-\left(\gamma_p \left(\frac{T_4 + T_5}{2}\right) - 1\right) \cdot \eta_{tp}}{\gamma_p \left(\frac{T_4 + T_5}{2}\right)}}{1 - \frac{1}{r_{Ttest}}} \quad \eta_{test} = 0.927$$

Y ahora, a partir de la expresión del trabajo específico de la turbina, puede obtenerse su verdadera relación de presiones:

$$\Pi_{ttest} := \left( 1 - \frac{\omega_t}{C_{p,p}(T_{t4}) \cdot \eta_{test} \cdot T_{t4}} \right)^{\frac{-\gamma_p \left(\frac{T_4 + T_5}{2}\right)}{\gamma_p \left(\frac{T_4 + T_5}{2}\right) - 1}} \quad \Pi_{ttest} = 8.151$$



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

# 11.- Ejercicios propuestos [volver](#)

## Ejercicio II (cont.)

En vista de la diferente relación de presiones de compresor y de turbina, debe recalcularse el rendimiento de la turbina y su relación de presiones:

$$r_{Tt} := \frac{\gamma_p \left( \frac{T_4 + T_5}{2} \right)^{-1}}{\gamma_p \left( \frac{T_4 + T_5}{2} \right)} \quad r_{Tt} = 1.684$$

$$\eta_t := \frac{1 - \Pi_{ttest}}{1 - \frac{1}{r_{Tt}}} \quad \eta_t = 0.914$$

$$\Pi_{tt} := \left( 1 - \frac{\omega_t}{C_{pp}(T_4) \cdot \eta_t \cdot T_{t4}} \right) \quad \Pi_{tt} = 8.476$$

$$p_{t5} := \frac{p_{t4}}{\Pi_{tt}}$$

Con lo que ya pueden calcularse el resto de propiedades en la sección de salida de la turbina:

$$p_5 := \frac{p_{t5}}{\left[ 1 + \frac{1}{2} \cdot \left( \gamma_p \left( \frac{T_4 + T_5}{2} \right) - 1 \right) \cdot M_p \left( v_5, \frac{T_4 + T_5}{2} \right)^2 \right]} \quad \rho_5 := \rho_p(p_5, T_5) \quad \rho_{t5} := \rho_{tp}(\rho_5, T_5, v_5)$$

$$A_5 := \frac{m_a}{\rho_5 \cdot v_5} \quad A_5 = 0.905 \text{ m}^2$$

$$T_5 = 801.931 \text{ K}$$

$$p_5 = 2.245 \text{ bar}$$

$$\rho_5 = 0.975 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$a_5 = 554.381 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$T_{t5} = 824.585 \text{ K}$$

$$p_{t5} = 2.442 \text{ bar}$$

$$\rho_{t5} = 1.059 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$v_5 = 226.524 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$M_5 = 0.409$$



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

# 11.- Ejercicios propuestos [volver](#)

## Ejercicio II (cont.)

**7.- Considere en primer lugar la operación del aerorreactor en el caso de no operar la postcombustión. Determine las propiedades estáticas y de remanso a la salida de la tobera propulsiva, sabiendo que su área de salida variable está adaptada para esas condiciones de operación (i.e. la presión en la sección de salida coincide con la atmosférica). Calcule también el coeficiente de presión de la tobera propulsiva.**

Si no hay postcombustión:  $T_6 := T_5$      $p_6 := p_5$      $\rho_6 := \rho_5$      $V_6 := V_5$      $A_6 := \frac{m_a}{\rho_6 \cdot V_6}$

$T_{t6} := T_{t5}$      $p_{t6} := p_{t5}$      $\rho_{t6} := \rho_{t5}$      $a_6 := a_5$      $M_6 := M_5$

$$A_6 = 0.905 \text{ m}^2$$

Adaptando convenientemente el área de salida de la tobera:  $p_7 := p_0$

El balance de energía en la tobera permite concluir que se conserva la temperatura de remanso:  $T_{t7} := T_{t6}$

Aplicando la definición de  $\eta_p$  pueden calcularse la velocidad y la temperatura estática a la salida:

$$V_7 := \sqrt{2 \cdot C_{pP}(T_6) \cdot \eta_p \cdot T_{t6} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_7}{p_{t6}} \right)^{\frac{\gamma_p(T_6)-1}{\gamma_p(T_6)}} \right]}$$

$$T_7 := T_{t7} - \frac{1}{2} \cdot \frac{(V_7)^2}{C_{pP}(T_6)}$$

Y el resto de propiedades:

$$a_7 := a_p(T_7) \quad M_7 := \frac{V_7}{a_7} \quad \rho_7 := \rho_p(p_7, T_7) \quad \rho_{t7} := \rho_{tp}(p_7, T_7, V_7) \quad p_{t7} := p_{tp}(p_7, T_7, V_7)$$

$$T_7 = 577.622 \text{ K}$$

$$p_7 = 0.54 \cdot \text{bar}$$

$$\rho_7 = 0.326 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$a_7 = 472.476 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$V_7 = 751.304 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$A_7 := \frac{m_a}{\rho_7 \cdot V_7}$$

$$T_{t7} = 824.585 \text{ K}$$

$$p_{t7} = 2.218 \cdot \text{bar}$$

$$\rho_{t7} = 0.93 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$V_7 = 751.304 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$M_7 = 1.59$$

$$A_7 = 0.816 \text{ m}^2$$

Aplicando la definición de  $C_{pr_p}$ :  $C_{pr_p} := \frac{p_6 - p_7}{p_{t6} - p_6}$      $C_{pr_p} = 8.645$



CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
- 11. Ejercicios**
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA



# 11.- Ejercicios propuestos volver

## Ejercicio II (cont.)

### Cálculos con tobera convergente bloqueada:

Si  $M_7 > 1$  significa que necesitaríamos una tobera convergente-divergente para igualar la presión de salida con la ambiente (tobera adaptada). Cuando el motor dispone de una tobera convergente, la expansión sólo se produce hasta la presión crítica, que corresponde a  $M_7 = 1$ , procurando, mediante la variación de la sección de salida, que dicha condición se produzca en dicha sección de salida. Éste es el caso del problema que nos ocupa. Para describir lo que sucede, el primer paso es determinar la presión crítica a la salida (ver [Anexo II](#)). Si la tobera fuera reversible, i.e. con rendimiento igual a la unidad, la relación de expansión crítica valdría:

$$C_{expcritideal} := \left( \frac{\gamma_p(T_6) + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma_p(T_6)}{\gamma_p(T_6) - 1}} \quad C_{expcritideal} = 1.854 \quad P_{critideal_7} := \frac{P_{t_6}}{C_{expcritideal}} \quad P_{critideal_7} = 1.317 \cdot \text{bar}$$

Las irreversibilidades en la tobera retrasan la criticidad:

$$C_{expcritareal} := \frac{1}{\left[ 1 - \frac{1}{\eta_p} \cdot \frac{(\gamma_p(T_6) - 1)}{(\gamma_p(T_6) + 1)} \right]^{\frac{\gamma_p(T_6)}{(\gamma_p(T_6) - 1)}}} \quad C_{expcritareal} = 1.92 \quad P_{creal_7} := \frac{P_{t_6}}{C_{expcritareal}} \quad P_{creal_7} = 1.271 \cdot \text{bar}$$

Esta situación requiere recalcular las condiciones de salida, correspondientes a la tobera convergente bloqueada:

$$P_7 := P_{creal_7} \quad T_{t_7} := T_{t_6}$$

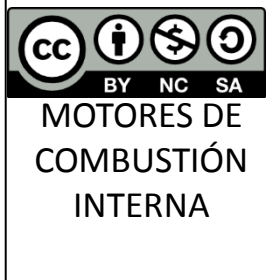
$$V_7 := \sqrt{2 \cdot C_{p_p}(T_6) \cdot \eta_p \cdot T_{t_6} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{P_7}{P_{t_6}} \right)^{\frac{(\gamma_p(T_6) - 1)}{\gamma_p(T_6)}} \right]} \quad T_7 := T_{t_7} - \frac{1}{2} \cdot \frac{(V_7)^2}{C_{p_p} \left( \frac{T_6 + T_{t_6}}{2} \right)}$$



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
- 11. Ejercicios**
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

*Autores:*  
 P.A. Rodríguez  
 A. Lecuona  
 R. Ventas





# 11.- Ejercicios propuestos [volver](#)

## Ejercicio II (cont.)

Y el resto de las propiedades estáticas y de remanso a la salida de la tobera:

$$a_7 := a_p(T_7) \quad M_7 := \frac{V_7}{a_7} \quad \rho_7 := \rho_p(p_7, T_7) \quad \rho_{t7} := \rho_{tp}(\rho_7, T_7, V_7) \quad P_{t7} := P_{tp}(p_7, T_7, V_7)$$

$$T_7 = 706.264 \text{ K}$$

$$p_7 = 1.271 \cdot \text{bar}$$

$$\rho_7 = 0.627 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$a_7 = 520.967 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$V_7 = 520.23 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$T_{t7} = 824.585 \text{ K}$$

$$p_{t7} = 2.356 \cdot \text{bar}$$

$$\rho_{t7} = 0.994 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$V_7 = 520.23 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$M_7 = 0.999$$

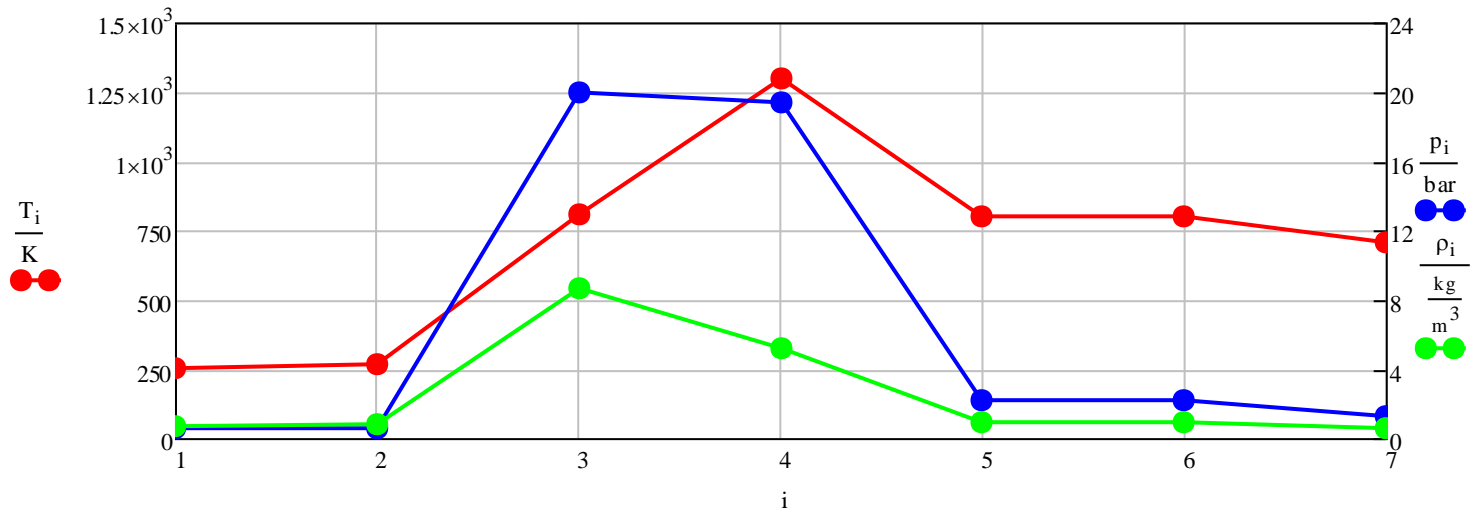
$$C_{pr_{pc}} := \frac{p_6 - p_7}{p_{t6} - p_6}$$

$$C_{pr_{pc}} = 4.937$$

$$A_7 := \frac{m_p}{\rho_7 \cdot V_7}$$

$$A_7 = 0.621 \text{ m}^2$$

**8.- Represente gráficamente las propiedades estáticas y de remanso del ciclo completo para el motor operando sin postcombustión.**



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

- Objetivos
- Nomenclatura
- Configuraciones, procesos y modelos
- Ciclos reversibles
- Rendimiento de componentes
- Ciclos húmedos
- Tipos de TGs
- Operación de TGs
- Conclusiones
- Anexos
- 11. Ejercicios**
- Autoevaluación
- Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA



# 11.- Ejercicios propuestos [volver](#)

## Ejercicio II (cont.)

8.- Represente gráficamente las propiedades estáticas y de remanso del ciclo completo para el motor operando sin postcombustión.

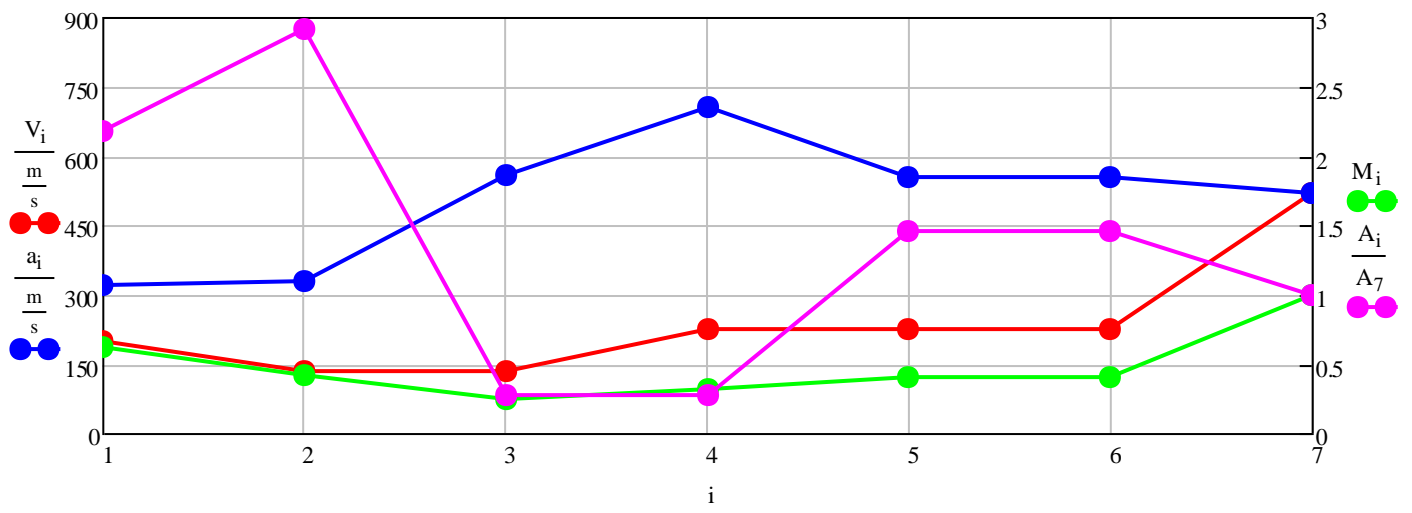
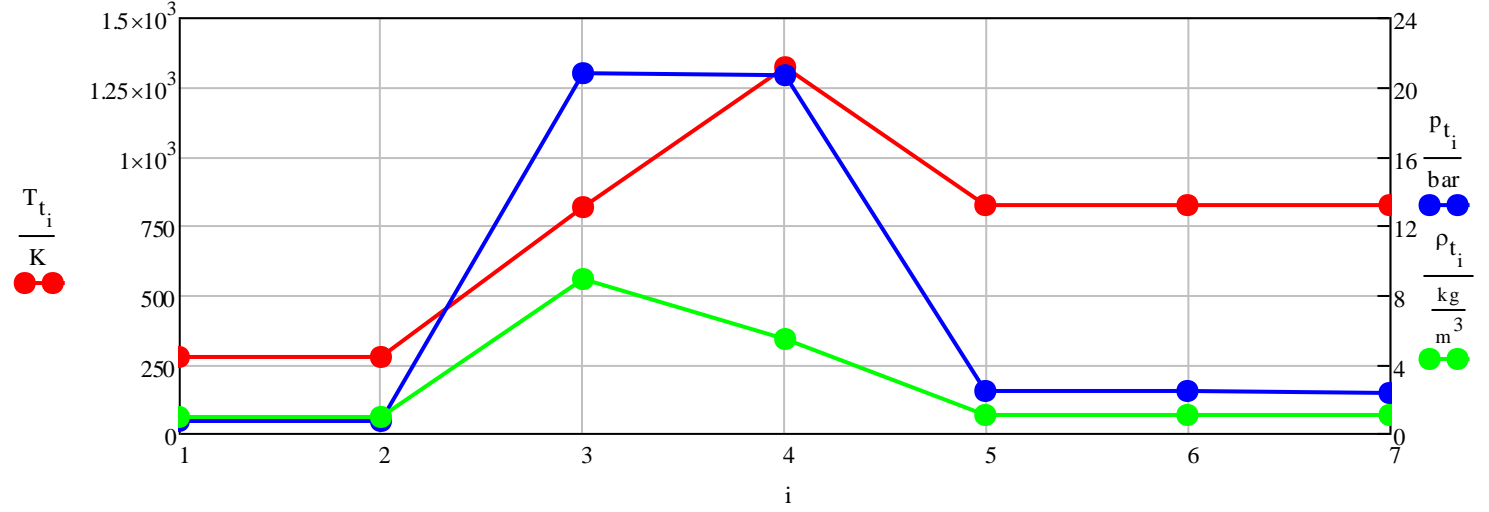
### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
- 11. Ejercicios**
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
 P.A. Rodríguez  
 A. Lecuona  
 R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA





# 11.- Ejercicios propuestos [volver](#)

## Ejercicio II (cont.)

9.- Calcule el empuje y la potencia propulsiva producidos por el aerorreactor así como los rendimientos propulsivo, térmico y global para el motor operando sin postcombustión.

Empuje y potencia:

$$E := m_p \cdot V_7 - m_a \cdot V_1 + A_7 \cdot (P_{c\text{real } 7} - P_0)$$

$$E = 1.109 \times 10^5 \text{ N}$$

$$W_{\text{prop}} := E \cdot V_1$$

$$W_{\text{prop}} = 2.219 \times 10^7 \text{ W}$$

$$A_7 \cdot (P_{c\text{real } 7} - P_0) = 4.543 \times 10^4 \text{ N}$$

Empuje específico:

$$E_s := \frac{E}{m_a}$$

$$E_s = 554.671 \cdot \frac{\text{N}}{\frac{\text{kg}}{\text{s}}}$$

$$E_s = 554.671 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Rendimientos:

- Rendimiento propulsivo:

$$\eta_{\text{prop}} := \frac{W_{\text{prop}}}{\frac{1}{2} \cdot [m_p \cdot (V_7)^2 - m_a \cdot (V_1)^2]}$$

$$\eta_{\text{prop}} = 0.946$$

- Rendimiento térmico:

$$\eta_{\text{ter}} := \frac{\left[ \frac{1}{2} \cdot [m_p \cdot (V_7)^2 - m_a \cdot (V_1)^2] \right]}{Q_{\text{cc}}}$$

$$\eta_{\text{ter}} = 0.199$$

- Rendimiento global:

$$\eta_{\text{global}} := \eta_{\text{prop}} \cdot \eta_{\text{ter}}$$

$$\eta_{\text{global}} = 0.189$$

### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

- Objetivos
- Nomenclatura
- Configuraciones, procesos y modelos
- Ciclos reversibles
- Rendimiento de componentes
- Ciclos húmedos
- Tipos de TGs
- Operación de TGs
- Conclusiones
- Anexos
- 11. Ejercicios**
- Autoevaluación
- Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA



# 11.- Ejercicios propuestos volver

## Ejercicio II (cont.)

**10.- Considere ahora la operación del aerorreactor con postcombustión. Determine las propiedades estáticas y de remanso a la salida de la cámara de postcombustión.**

Si hay postcombustión:  $T_6 := T_{6p}$        $p_6 := p_5 \cdot (1 - C_{\Delta ppc})$        $\rho_6 := \rho_p(p_6, T_6)$

Consideramos que la sección transversal del conducto donde se realiza la postcombustión es uniforme a lo largo del mismo. Eso conduce a un incremento de la velocidad de los gases ya que su densidad disminuye:

$$V_6 := V_5 \cdot \frac{p_5}{\rho_6} \quad a_6 := a_p(T_6) \quad M_6 := \frac{V_6}{a_6} \quad T_{t6} := T_{tp}(T_6, V_6) \quad p_{t6} := p_{tp}(p_6, T_6, V_6) \quad \rho_{t6} := \rho_{tp}(p_6, T_6, V_6)$$

$$T_6 = 1.4 \times 10^3 \text{ K}$$

$$p_6 = 2.2 \cdot \text{bar}$$

$$\rho_6 = 0.547 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$a_6 = 728.838 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$V_6 = 403.533 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$T_{t6} = 1.469 \times 10^3 \text{ K}$$

$$p_{t6} = 2.681 \cdot \text{bar}$$

$$\rho_{t6} = 0.636 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$V_6 = 403.533 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$M_6 = 0.554$$

$$A_6 := \frac{m_a}{\rho_6 \cdot V_6}$$

$$A_6 = 0.905 \text{ m}^2$$

**11- Calcule el consumo de combustible del postcombustor y la RAC del aerorreactor.**

$$q_{ccp} := C_{pp} \left( \frac{T_5 + T_6}{2} \right) \cdot (T_{t6} - T_{t5}) \quad q_{ccp} = 0.746 \cdot \frac{10^6 \cdot \text{J}}{\text{kg}} \quad Q_{ccp} := q_{ccp} \cdot m_a \quad Q_{ccp} = 1.493 \times 10^5 \cdot \text{kW}$$

$$m_{cp} := \frac{Q_{ccp}}{L_c \cdot \eta_{ccp}}$$

$$m_{cp} = 3.559 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$m_{ppc} := m_a + m_c + m_{cp}$$

$$RAC_{pcomb} := \frac{m_a}{m_c + m_{cp}} = 31.429$$

### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
- 11. Ejercicios**
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA



# 11.- Ejercicios propuestos [volver](#)

## Ejercicio II (cont.)

**12.- Sabiendo que el área de salida de la tobera propulsiva es variable y que está adaptada para esas condiciones de operación, calcule las propiedades estáticas y de remanso en la sección de salida. Calcule también el coeficiente de presión de la tobera propulsiva.**

Adaptando convenientemente el área de salida de la tobera:  $p_7 := p_0$

El balance de energía en la tobera permite concluir que se conserva la temperatura de remanso:  $T_{t7} := T_{t6}$

Aplicando la definición de  $\eta_p$  pueden calcularse la velocidad y la temperatura estática a la salida:

$$V_7 := \sqrt{2 \cdot C_{pp}(T_6) \cdot \eta_p \cdot T_{t6} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_7}{p_{t6}} \right)^{\frac{\gamma_p(T_6)-1}{\gamma_p(T_6)}} \right]}$$

$$T_7 := T_{t7} - \frac{1}{2} \cdot \frac{(V_7)^2}{C_{pp}(T_6)}$$

Y el resto de propiedades:

$$a_7 := a_p(T_7) \quad M_7 := \frac{V_7}{a_7} \quad \rho_7 := \rho_p(p_7, T_7) \quad \rho_{t7} := \rho_{tp}(p_7, T_7, V_7) \quad p_{t7} := p_{tp}(p_7, T_7, V_7)$$

$$T_7 = 1.02 \times 10^3 \text{ K} \quad p_7 = 0.54 \cdot \text{bar} \quad \rho_7 = 0.185 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad a_7 = 624.107 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad V_7 = 1.031 \times 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$T_{t7} = 1.469 \times 10^3 \text{ K} \quad p_{t7} = 2.417 \cdot \text{bar} \quad \rho_{t7} = 0.569 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad V_7 = 1.031 \times 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad M_7 = 1.651$$

Aplicando la definición de  $C_{pp}$ :

$$C_{pp} := \frac{p_6 - p_7}{p_{t6} - p_6} \quad C_{pp} = 3.449$$

### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
- 11. Ejercicios**
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

# 11.- Ejercicios propuestos [volver](#)

## Ejercicio II (cont.)

### Cálculos con tobera convergente bloqueada:

Si  $M_7 > 1$  significa que necesitaríamos una tobera convergente-divergente para igualar la presión de salida con la ambiente (tobera adaptada). Cuando el motor dispone de una tobera convergente, la expansión sólo se produce hasta la presión crítica, que corresponde a  $M_7 = 1$ , procurando, mediante la variación de la sección de salida, que dicha condición se produzca en dicha sección de salida. Éste es el caso del problema que nos ocupa. Para describir lo que sucede, el primer paso es determinar la presión crítica a la salida (ver [Anexo II](#)). Si la tobera fuera reversible, i.e. con rendimiento igual a la unidad, la relación de expansión crítica valdría:

$$C_{expcritideal_p} := \left( \frac{\gamma_p(T_6) + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma_p(T_6)}{\gamma_p(T_6) - 1}} \quad C_{expcritideal_p} = 1.846 \quad P_{critideal_7} := \frac{P_{t_6}}{C_{expcritideal_p}} \quad P_{critideal_7} = 1.452\text{-bar}$$

Las irreversibilidades en la tobera retrasan la criticidad:

$$C_{expcriticareal_p} := \frac{1}{\left[ 1 - \frac{1}{\eta_p} \cdot \frac{(\gamma_p(T_6) - 1)}{(\gamma_p(T_6) + 1)} \right]^{\frac{\gamma_p(T_6)}{\gamma_p(T_6) - 1}}} \quad C_{expcriticareal_p} = 1.911 \quad P_{creal_7} := \frac{P_{t_6}}{C_{expcriticareal_p}} \quad P_{creal_7} = 1.403\text{-bar}$$

Esta situación requiere recalcular las condiciones de salida, correspondientes a la tobera convergente bloqueada:  $P_7 := P_{creal_7} \quad T_{t_7} := T_{t_6}$

$$V_7 := \sqrt{2 \cdot C_{p_p}(T_6) \cdot \eta_p \cdot T_{t_6} \left[ 1 - \left( \frac{P_7}{P_{t_6}} \right)^{\frac{\gamma_p(T_6) - 1}{\gamma_p(T_6)}} \right]} \quad T_7 := T_{t_7} - \frac{1}{2} \cdot \frac{(V_7)^2}{C_{p_p}(T_6)}$$



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
- 11. Ejercicios**
12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA



# 11.- Ejercicios propuestos [volver](#)

## Ejercicio II (cont.)

Y el resto de las propiedades estáticas y de remanso a la salida de la tobera:

$$a_7 := a_p(T_7) \quad M_7 := \frac{V_7}{a_7} \quad \rho_7 := \rho_p(p_7, T_7) \quad \rho_{t_7} := \rho_{tp}(p_7, T_7, V_7) \quad p_{t_7} := p_{tp}(p_7, T_7, V_7)$$

$$T_7 = 1.265 \times 10^3 \text{ K}$$

$$p_7 = 1.403 \cdot \text{bar}$$

$$\rho_7 = 0.386 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$a_7 = 694.033 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$V_7 = 692.903 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$T_{t_7} = 1.469 \times 10^3 \text{ K}$$

$$p_{t_7} = 2.588 \cdot \text{bar}$$

$$\rho_{t_7} = 0.613 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$V_7 = 692.903 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$M_7 = 0.998$$

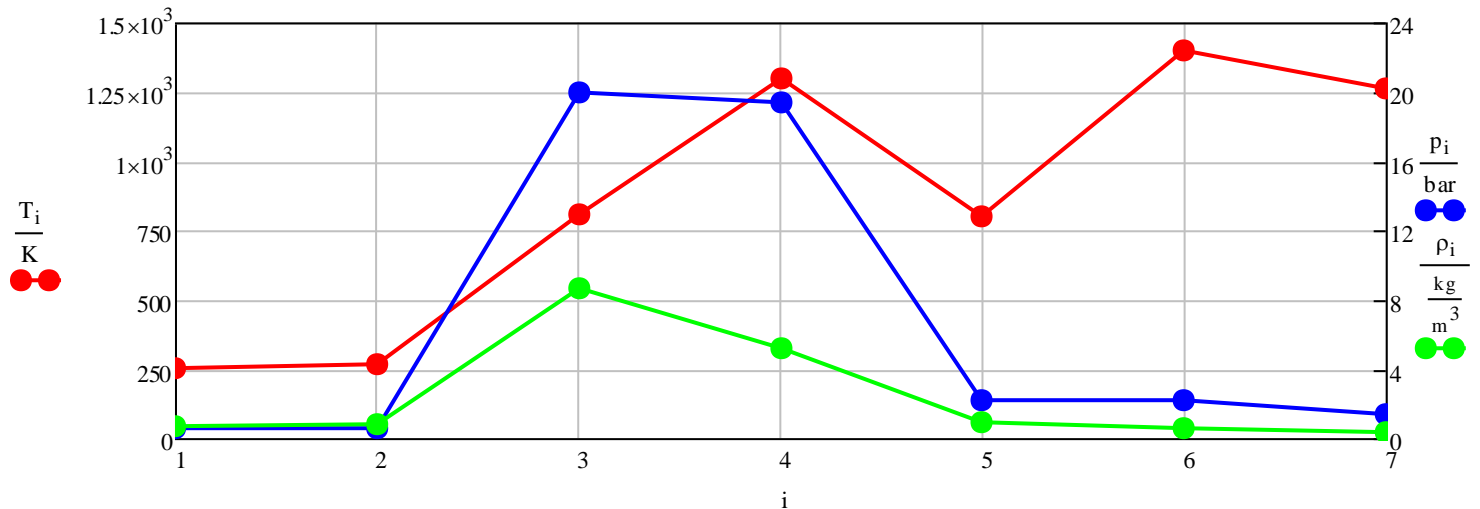
$$C_{pr\_ppc} := \frac{p_6 - p_7}{p_{t_6} - p_6}$$

$$C_{pr\_ppc} = 1.657$$

$$A_7 := \frac{m_p}{\rho_7 \cdot V_7}$$

$$A_7 = 0.771 \text{ m}^2$$

## 13.- Represente gráficamente las propiedades estáticas y de remanso del ciclo completo para el motor operando con postcombustión.



### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

- Objetivos
- Nomenclatura
- Configuraciones, procesos y modelos
- Ciclos reversibles
- Rendimiento de componentes
- Ciclos húmedos
- Tipos de TGs
- Operación de TGs
- Conclusiones
- Anexos
- 11. Ejercicios**
- Autoevaluación
- Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA





# 11.- Ejercicios propuestos [volver](#)

## Ejercicio II (cont.)

13.- Represente gráficamente las propiedades estáticas y de remanso del ciclo completo para el motor operando con postcombustión.

### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos

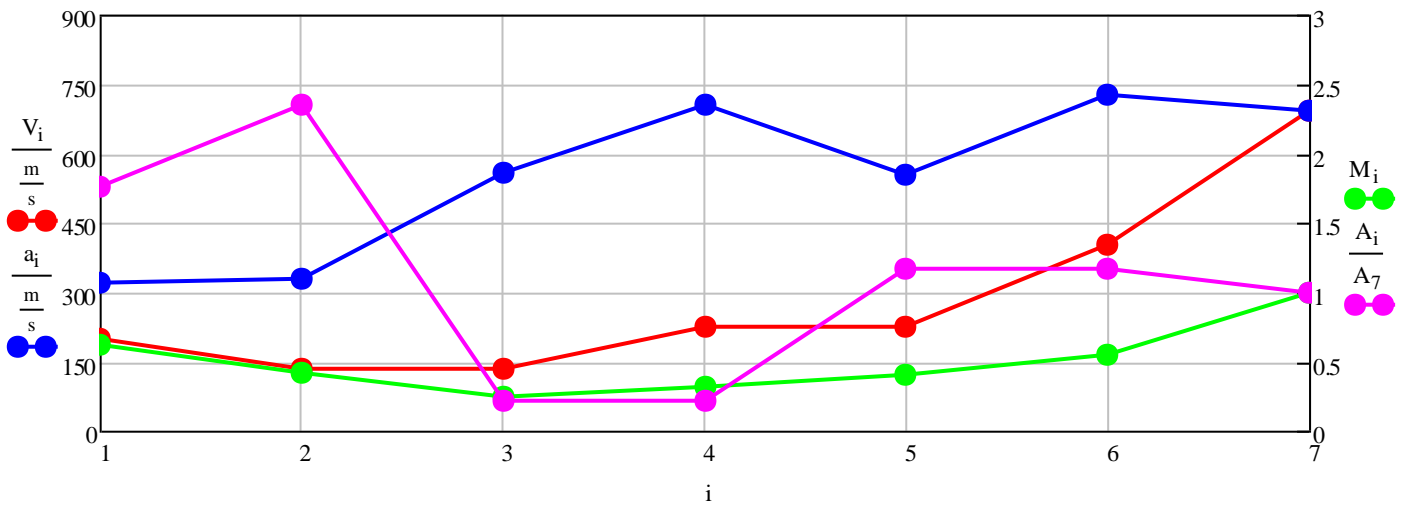
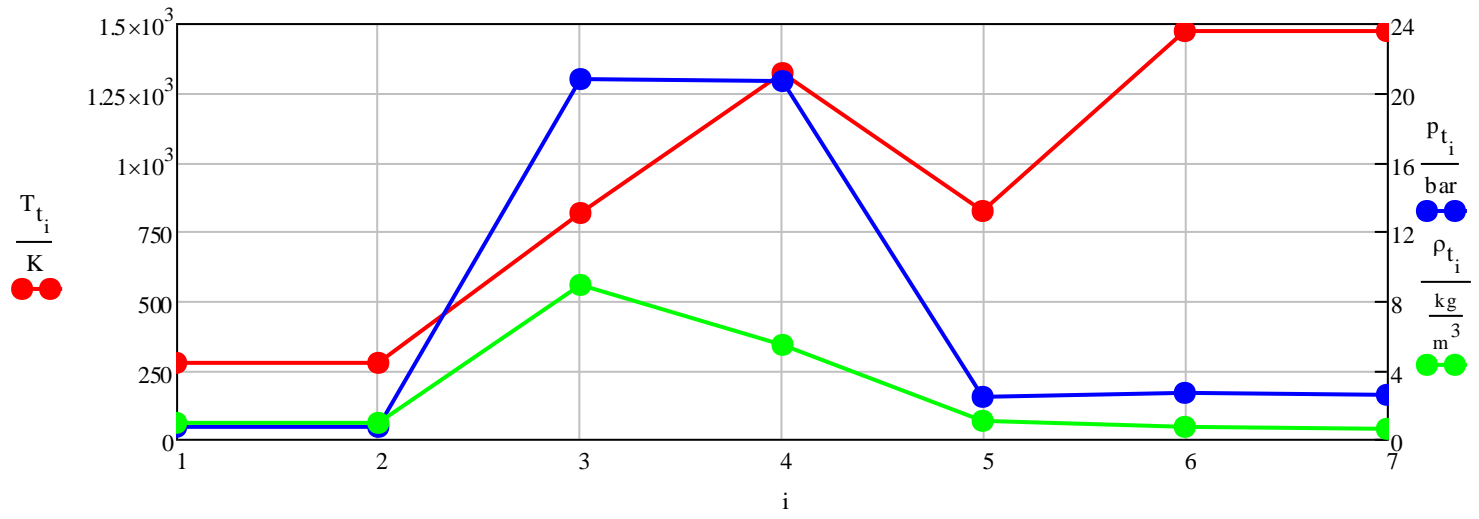
### 11. Ejercicios

12. Autoevaluación
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA





# 11.- Ejercicios propuestos [volver](#)

## Ejercicio II (cont.)

**14.- Calcule el empuje y la potencia propulsiva producidos por el aerorreactor así como los rendimientos propulsivo, térmico y global para el motor operando con postcombustión.**

Empuje y potencia:

$$E_{pc} := m_{ppc} \cdot V_7 - m_a \cdot V_1 + A_7 \cdot P_{c\text{real}7} - p_0 \quad \boxed{E_{pc} = 1.683 \times 10^5 \text{ N}} \quad W_{\text{proppc}} := E \cdot V_1 \quad \boxed{W_{\text{proppc}} = 2.219 \times 10^7 \text{ W}}$$

$$A_7 \cdot P_{c\text{real}7} - p_0 = 6.533 \times 10^4 \text{ N}$$

Empuje específico:

$$E_{\text{spc}} := \frac{E_{pc}}{m_a} \quad \boxed{E_{\text{spc}} = 841.605 \cdot \frac{\text{N}}{\frac{\text{kg}}{\text{s}}}} \quad E_{\text{spc}} = 841.605 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Rendimientos:

- Rendimiento propulsivo:

$$\eta_{\text{proppc}} := \frac{W_{\text{proppc}}}{\frac{1}{2} \cdot [m_{ppc} \cdot (V_7)^2 - m_a \cdot (V_1)^2]} \quad \boxed{\eta_{\text{proppc}} = 0.487}$$

- Rendimiento térmico:

$$\eta_{\text{terpc}} := \frac{\left[ \frac{1}{2} \cdot [m_{ppc} \cdot (V_7)^2 - m_a \cdot (V_1)^2] \right]}{Q_{cc} + Q_{ccp}} \quad \boxed{\eta_{\text{terpc}} = 0.171}$$

- Rendimiento global:

$$\eta_{\text{globalpc}} := \eta_{\text{proppc}} \cdot \eta_{\text{terpc}} \quad \boxed{\eta_{\text{globalpc}} = 0.083}$$

### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

- Objetivos
- Nomenclatura
- Configuraciones, procesos y modelos
- Ciclos reversibles
- Rendimiento de componentes
- Ciclos húmedos
- Tipos de TGs
- Operación de TGs
- Conclusiones
- Anexos
- 11. Ejercicios**
- Autoevaluación
- Bibliografía

*Autores:*  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA

## 12.- CUESTIONES DE AUTOEVALUACIÓN [volver](#)

### Preguntas:

1. El coeficiente de presión ideal del difusor de una turbina de gas (TG) se calcula **de manera exacta** como la unidad menos el cociente entre la velocidad de salida y la velocidad de entrada, elevado al cuadrado.
2. El rendimiento del difusor de una TG tiene en cuenta las irreversibilidades presentes en el flujo que lo recorre.
3. La temperatura de remanso a la salida de un compresor, para un valor determinado de su relación de presiones de remanso, es tanto mayor cuanto mayor sea su rendimiento isoentrópico.
4. La potencia requerida por un compresor, para conseguir una determinada relación de presiones en un determinado flujo de gas, es tanto mayor cuanto mayor es la temperatura de entrada al mismo.
5. ¿Qué parámetros de entrada, obtenidos del ciclo termodinámico de una TG, se emplean para el dimensionado de un intercambiador de calor (sea interenfriador o regenerador)? ¿Qué parámetros de salida han de obtenerse de dicho dimensionado?
6. El aire que circula por la cámara de combustión de una TG está dividido al menos en dos flujos, denominados aire primario y aire de dilución. ¿Cuál es papel principal de cada uno de ellos?
7. La temperatura de remanso a la salida de una turbina, para un valor determinado de su relación de presiones de remanso, es tanto mayor cuanto mayor sea su rendimiento isoentrópico.



#### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
- 12. Autoevaluación**
13. Bibliografía

*Autores:*  
*P.A. Rodríguez*  
*A. Lecuona*  
*R. Ventas*



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA



## 12.- CUESTIONES DE AUTOEVALUACIÓN [volver](#)

### Preguntas:

8. La potencia obtenida de una turbina, operando con una determinada relación de presión y un determinado flujo de aire, es tanto mayor cuanto mayor es la temperatura de entrada a la misma.
9. La tobera propulsiva de un turborreactor se emplea para incrementar la entalpía de remanso de la corriente de gases, incrementándose con ello el empuje obtenido con el mismo.
10. El coeficiente de presión ideal de una tobera propulsiva se define de manera exacta como la diferencia de presión estática entre la entrada y la salida, dividida por la presión dinámica a la entrada.
11. ¿Cómo se define el rendimiento energético de una TG de potencia, i.e. para una planta fija en tierra?
12. ¿Cómo se relaciona el empuje de un turborreactor con su rendimiento propulsivo?
13. ¿Cómo se define el rendimiento térmico de un turborreactor?
14. El rendimiento global de un turborreactor es el cociente entre la potencia propulsiva y la energía primaria suministrada con el combustible.
15. El rendimiento y el trabajo específico de un ciclo CBE reversible de Brayton dependen exclusivamente de su relación de presiones y del cociente de calores específicos del gas, supuestos constantes.
16. La relación de cogeneración de un ciclo CBE reversible de Brayton con calores específicos constantes es creciente con su relación de presiones.

### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
- 12. Autoevaluación**
13. Bibliografía

*Autores:*  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA



## 12.- CUESTIONES DE AUTOEVALUACIÓN [volver](#)

### Preguntas:

17. El rendimiento de un ciclo regenerativo CBEX reversible con calores específicos constantes aumenta cuando lo hace su relación de presiones.
18. El rendimiento de un ciclo regenerativo CBEX reversible con calores específicos constantes depende de la relación de presiones y el cociente de calores específicos del gas, así como de la relación de temperaturas máxima y mínima del mismo.
19. El rendimiento de un ciclo regenerativo CBEX reversible con calores específicos constantes es mayor que el de un ciclo CBE reversible de Brayton para el mismo valor de la relación de presiones.
20. El rendimiento de un ciclo CBE reversible con calores específicos variables con la temperatura, depende de la relación de temperaturas máxima y mínima.
21. El rendimiento de un ciclo CBE irreversible presenta un máximo para un determinado valor de la relación de presiones.
22. Las curvas características de una TG de ciclo CBE irreversible muestran que su rendimiento disminuye con la carga, cuando ésta se modifica a relación de presiones constante.
23. Las curvas características de una TG regenerativa de ciclo CBEX irreversible muestran un descenso acusado del rendimiento cuando lo hace la carga de la TG, en mayor medida que el de una TG de ciclo CBE.
24. La relación de cogeneración de una TG con ciclo CBEX irreversible disminuye cuando aumenta la carga de la TG, si se mantiene constante la relación de presiones.

### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
- 12. Autoevaluación**
13. Bibliografía

*Autores:*  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA



## 12.- CUESTIONES DE AUTOEVALUACIÓN [volver](#)

### Preguntas:

25. La inyección de agua o de vapor en la cámara de combustión de una TG (ciclos húmedos) se emplea para aumentar la potencia proporcionada por la TG.
26. ¿Qué parámetros se emplean para la selección del punto de funcionamiento de una TG monoeje?
27. ¿Cómo se determina el punto de funcionamiento de la turbina de una TG monoeje a partir de los parámetros correspondientes al punto de operación del compresor?
28. Indique las opciones de que se dispone para modificar el grado de carga de una TG monoeje.
29. Indique las opciones de que se dispone para modificar el grado de carga de una TG con turbina libre o de potencia.
30. ¿Cómo afectan las condiciones ambiente a las prestaciones de las TGs?

### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
- 12. Autoevaluación**
13. Bibliografía

*Autores:*  
*P.A. Rodríguez*  
*A. Lecuona*  
*R. Ventas*



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA



## 12.- CUESTIONES DE AUTOEVALUACIÓN [volver](#)

### Respuestas:

1. Incorrecto. Se trata de un cálculo aproximado basado en despreciar la variación de densidad del gas entre la entrada y la salida, lo que conduce a calcular dicho coeficiente como la diferencia de presión estática entre la salida y la entrada, dividida por la presión dinámica a la entrada del difusor.
2. Correcto. A tal efecto se define como el cociente entre el coeficiente de presión real y el coeficiente de presión ideal, resultando con ello inferior a la unidad.
3. Incorrecto. Un rendimiento isoentrópico menor indica una existencia mayor de irreversibilidades, y con ello una mayor degradación de la energía suministra al compresor, lo que ocasiona un mayor incremento de la temperatura del fluido.
4. Afirmativo. Su trabajo específico es proporcional a la temperatura de entrada. La potencia requerida por el compresor es el producto de dicho trabajo específico por el gasto másico de aire cuya presión se desea elevar.
5. En general se conocen las 4 temperaturas que se desean obtener, así como los gastos másicos y las capacidades caloríficas de ambos flujos. Con ellos es posible calcular la efectividad del intercambiador, y a partir de él, el Número de Unidades de Transferencia *NTU* y el valor de *UA* (producto del coeficiente global de transferencia de calor por el área de intercambio). Esto último permite dimensionar el intercambiador de calor. Adicionalmente, una comprobación de la pérdida de carga producida en cada uno de los flujos es indispensable para determinar las secciones de paso adecuadas.

### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
- 12. Autoevaluación**
13. Bibliografía

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA



## 12.- CUESTIONES DE AUTOEVALUACIÓN [volver](#)

### Respuestas:

6. El aire primario es el que participa de manera directa en la combustión, reaccionando con el combustible inyectado en la cámara de combustión. El aire de dilución se introduce en la cámara de combustión de forma progresiva para: a) completar la combustión, b) refrigerar las paredes de la cámara de combustión y c) disminuir la temperatura de los gases a la entrada de la turbina.
7. Incorrecto. Un rendimiento isoentrópico menor indica una existencia mayor de irreversibilidades, y con ello una mayor degradación de la energía disponible en el flujo de entrada a la turbina, lo que ocasiona una mayor temperatura del fluido a la salida de la turbina.
8. Afirmativo. Su trabajo específico es proporcional a la temperatura de entrada. La potencia obtenida de la turbina es el producto de dicho trabajo específico por el gasto másico de aire que circula por ella. Este hecho constituye el fundamento del ciclo Brayton.
9. Incorrecto. La entalpía de remanso de los gases se conserva a su paso por la tobera. Lo que se consigue en ella es acelerar la corriente a expensas del término de entalpía estática. Ello produce un empuje mayor, al depender su valor del de la velocidad de salida de los gases.
10. Correcto. Sólo si se desea expresar este coeficiente en función exclusivamente de las velocidades de entrada y salida de manera sencilla, se suele hacer la aproximación de suponer la misma densidad a la entrada que a la salida.

Autores:  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA





## 12.- CUESTIONES DE AUTOEVALUACIÓN [volver](#)

### Respuestas:

11. Es el cociente entre la potencia neta de la TG, calculada como la diferencia entre la obtenida de la (o las) turbina (s) y la consumida por el (o los) compresor (es), dividida por la energía suministrada con el combustible, calculada como el producto de su gasto másico por su poder calorífico inferior.
12. El rendimiento propulsivo se define como el cociente entre la potencia propulsiva, definida como el producto del empuje por la velocidad de vuelo de la aeronave, dividida por el incremento de energía cinética de los gases que circulan por el turborreactor entre su entrada y su salida.
13. Es el cociente entre el incremento de energía cinética conseguido en los gases que circulan por el mismo entre su entrada y su salida, y la energía primaria, i.e. la suministrada con el combustible, calculada como el producto de su gasto másico por su poder calorífico inferior.
14. Correcto. Por ello, en función de sus definiciones, se concluye que el rendimiento global de un turborreactor es el producto de su rendimiento propulsivo por su rendimiento térmico.
15. Incorrecto. Se puede afirmar eso respecto del rendimiento, pero no así del trabajo específico, que presenta un máximo cuyo valor y posición dependen de la relación de temperaturas máxima y mínima y del cociente de calores específicos del gas supuestos constantes.

### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
- 12. Autoevaluación**
13. Bibliografía

*Autores:*

*P.A. Rodríguez*

*A. Lecuona*

*R. Ventas*



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA

## 12.- CUESTIONES DE AUTOEVALUACIÓN [volver](#)

### Respuestas:

16. Incorrecto. La relación de cogeneración se define como el cociente entre la energía específica útil contenida en el gas de escape y el trabajo específico de la TG. Cuando aumenta la relación de presiones, el rendimiento del ciclo CBE reversible de Brayton con calores específicos constantes también aumenta, quedando menos energía en el escape disponible para cogenerar.
17. Incorrecto. El ciclo CBEX consigue rendimientos mayores cuando es posible precalentar los gases a la salida del compresor, empleando para ello los gases de escape de la TG. Ello es más fácil de hacer cuando la relación de presiones es baja, ya que la temperatura de salida del compresor también lo será, mientras que la de salida de la turbina será más alta, para una temperatura máxima del ciclo dada.
18. Correcto. Una relación de temperaturas máxima y mínima mayor permite un ámbito mayor para la regeneración, al aumentar la diferencia entre la temperatura de salida de la turbina y la de salida del compresor.
19. Correcto. Pero sólo hasta un valor límite de la relación de presiones, para la cual ambos ciclos, y por tanto su rendimiento, coinciden. La regeneración no es posible para relaciones de presiones mayores que esa. Este valor límite depende de la relación de temperaturas máxima y mínima del ciclo así como del cociente de calores específicos del gas.
20. Correcto. Aunque esta dependencia es mucho más débil que la que presenta con respecto a la relación de presiones.



#### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
- 12. Autoevaluación**
13. Bibliografía

*Autores:*  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA

## 12.- CUESTIONES DE AUTOEVALUACIÓN [volver](#)

### Respuestas:

21. Correcto. La posición del máximo depende de los rendimientos de componentes (compresor y turbina) así como de la relación de temperaturas máxima y mínima. Este hecho desaconseja el empleo de TGs con elevada relación de presiones cuando los rendimientos de componentes o la temperatura máxima del ciclo no sean lo suficientemente elevados.
22. Incorrecto. Las curvas muestran un crecimiento del rendimiento en función del trabajo específico neto de la TG a relación de presiones constante.
23. Correcto. Si bien, parten de valores más elevados en todo el intervalo de grados de carga, para valores similares de la relación de presiones.
24. Correcto. Ello se debe a que, para una relación de presiones dada y un rendimiento de compresor fijado, la temperatura de salida del compresor se mantiene constante. Con ello la temperatura de los gases de escape también lo es y por lo tanto lo será el calor útil de los gases de escape. Al dividir esta cantidad fija por potencias en el eje crecientes con la carga, se obtiene una relación de cogeneración decreciente con la carga.
25. Incorrecto. Aunque en ciertas condiciones de uso se consiga aumentar la potencia gracias al trabajo desarrollado por el vapor de agua al expandirse en la turbina, el beneficio no compensa la elevación de costes de operación y mantenimiento a causa de la más rápida degradación de la TG. La razón fundamental es conseguir reducir la temperatura de los gases en la cámara de combustión para emitir menos NOx.



#### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
- 12. Autoevaluación**
13. Bibliografía

*Autores:*

*P.A. Rodríguez*

*A. Lecuona*

*R. Ventas*



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA



## 12.- CUESTIONES DE AUTOEVALUACIÓN [volver](#)

### Respuestas:

26. El parámetro de gasto, la relación de presiones y el parámetro de velocidad, éste último condicionado por la carga (generador eléctrico u otros). Con ellos se fija un punto del diagrama del compresor, p. e. el de máximo rendimiento.
27. Se imponen las condiciones de identidad de relación de presiones, velocidad y gasto. Ello permite determinar el valor de la temperatura de entrada a la turbina que satisface dichas condiciones, lo que determina a su vez el gasto de combustible a suministrar a la TG. Como hay que compatibilizar la potencia entregada en el eje con la carga (generador eléctrico u otros), no siempre es posible operar la TG en las mejores condiciones desde el punto de vista de rendimiento.
28. Modificando la temperatura de salida de la cámara de combustión modificando la relación aire / combustible con la que opera la TG. En general ello conduce a una modificación de la relación de presiones de la TG, lo que en general implica un cambio en el rendimiento.
29. a) modificando la velocidad de giro del generador de gases (compuesto por el compresor, la cámara de combustión y la turbina de alta presión) variando con ello el gasto que entra en la turbina libre. b) modificando la temperatura de salida de la cámara de combustión modificando la relación aire / combustible con la que opera la TG. c) Modificando el gasto de aire que entra en la TG mediante álabes guía de inclinación variable disponibles a la entrada del compresor. d) una combinación de las anteriores.

### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
- 12. Autoevaluación**
13. Bibliografía

*Autores:*  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA



## 12.- CUESTIONES DE AUTOEVALUACIÓN [volver](#)

### Respuestas:

30. Una caída de densidad ambiente supone una caída del gasto másico de aire, reduciendo la potencia para una temperatura máxima del ciclo dada. Además, cambios en la presión y/o en la temperatura ambiente (i.e. las de entrada al compresor) suponen una alteración de los valores de los parámetros de gasto y velocidad de sus curvas características (obtenidas para unas determinadas condiciones de referencia), y con ello un cambio en el rendimiento de la turbomáquina. Las modificaciones se introducen en función de la raíz cuadrada del cociente de temperaturas ambiente y del cociente de presiones ambiente entre las condiciones actuales y las de referencia.

#### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
- 12. Autoevaluación**
13. Bibliografía

*Autores:*

*P.A. Rodríguez*

*A. Lecuona*

*R. Ventas*



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA



## 13.- BIBLIOGRAFÍA *volver*

1. Turbomáquinas. Procesos, análisis y tecnología. A. Lecuona y J.I. Nogueira. Ariel. 2000. ISBN: 84-344-8029-8.
2. The design of high-efficiency turbomachinery and gas turbines. D.G. Wilson and T. Korakianitis. Prentice Hall. 1998. ISBN: 0-13-312000-7.
3. Ingeniería Térmica. Principios de termodinámica técnica y transferencia de calor. M. Legrand, R. Ventas y P.A. Rodríguez. Garceta. 2014. ISBN: 978-84-1545-288-1.
4. Teoría de las turbinas de gas. H. Cohen. Marcombo. 1984. ISBN: 9788426704580
5. Cogeneración: Aspectos termodinámicos, tecnológicos y económicos. José María Sala Lizárraga. Universidad del País Vasco. 1.995. ISBN: 9788475855714.

### Ampliación

7. [https://ecourses.ou.edu/cgi-bin/ebook.cgi?doc&topic=th&chap\\_sec=09.1&page=theory](https://ecourses.ou.edu/cgi-bin/ebook.cgi?doc&topic=th&chap_sec=09.1&page=theory)
8. <http://www.sanfoundry.com/power-plant-engg-mcqs-brayton-cycle/>
9. [http://chemwiki.ucdavis.edu/Physical\\_Chemistry/Thermodynamics/Case\\_Studies/Case\\_Study%3A\\_Brayton\\_Cycle](http://chemwiki.ucdavis.edu/Physical_Chemistry/Thermodynamics/Case_Studies/Case_Study%3A_Brayton_Cycle)

#### CICLOS DE TURBINAS DE GAS

1. Objetivos
2. Nomenclatura
3. Configuraciones, procesos y modelos
4. Ciclos reversibles
5. Rendimiento de componentes
6. Ciclos húmedos
7. Tipos de TGs
8. Operación de TGs
9. Conclusiones
10. Anexos
11. Ejercicios
12. Autoevaluación
13. **Bibliografía**

*Autores:*  
P.A. Rodríguez  
A. Lecuona  
R. Ventas



MOTORES DE  
COMBUSTIÓN  
INTERNA