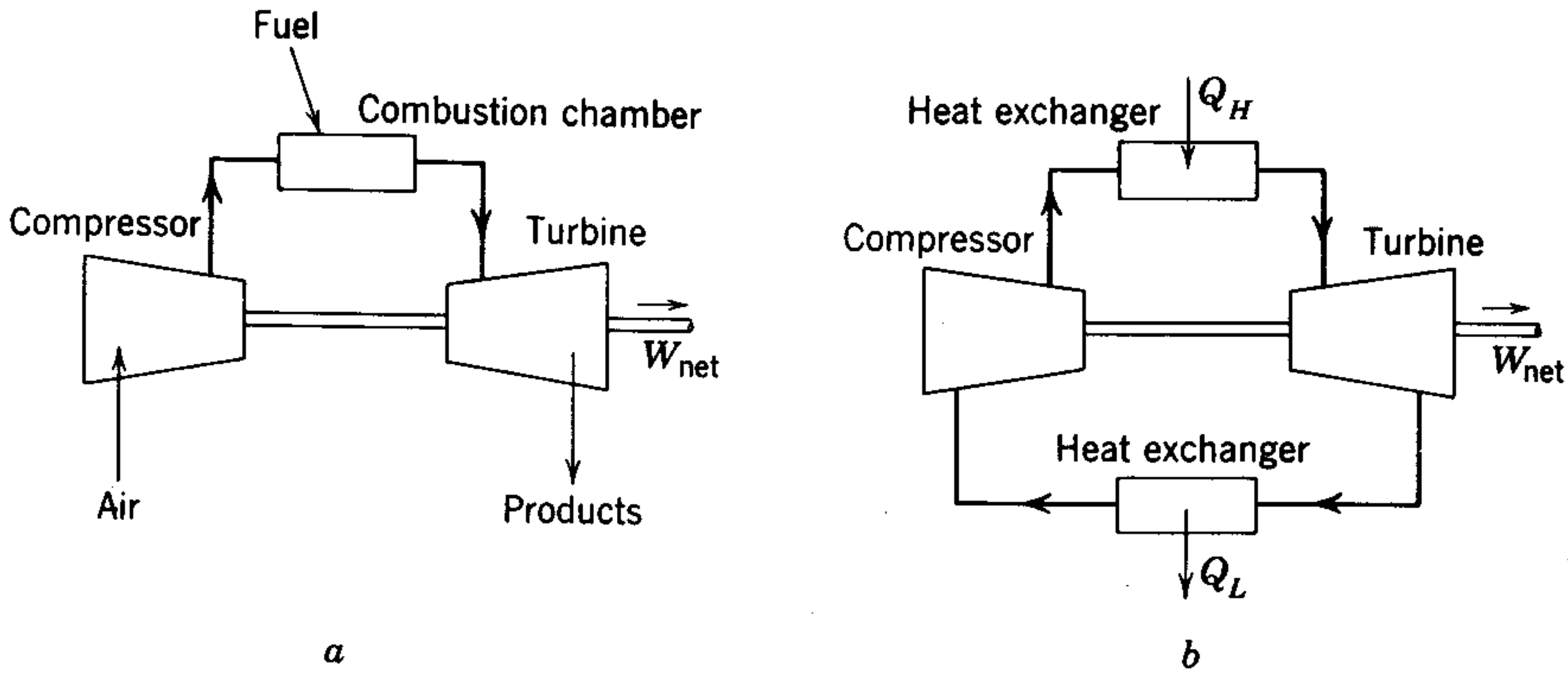
Motor de turbina a gas

ciclo abierto: combustible + aire $\rightarrow$ productos al ambiente



modelo ideal:
ciclo cerrado internamente reversible donde q_H y q_L se intercambian a presión constante

algunas aplicaciones

- generación de electricidad en centrales termoeléctricas
- generación de electricidad en centrales nucleares
- sistemas de propulsión para barcos y trenes
- sistemas de propulsión en aviones comerciales (propusión a chorro y ventichorro)

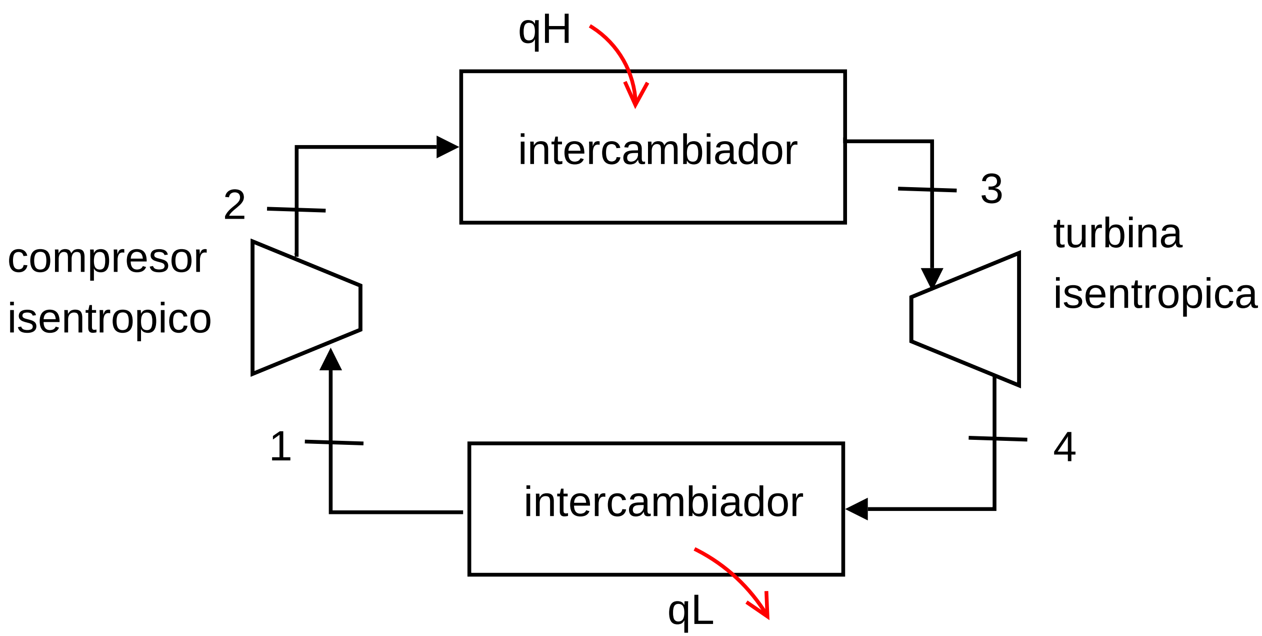
algunas ventajas:
- relativo bajo costo
- buena relación potencia/tamaño
- respuesta rápida (arranca en minutos)

algunas desventajas:
- mas caro de operar que el diesel
- una parte importante del trabajo generado se pierde para operar el compresor...

ciclo Brayton

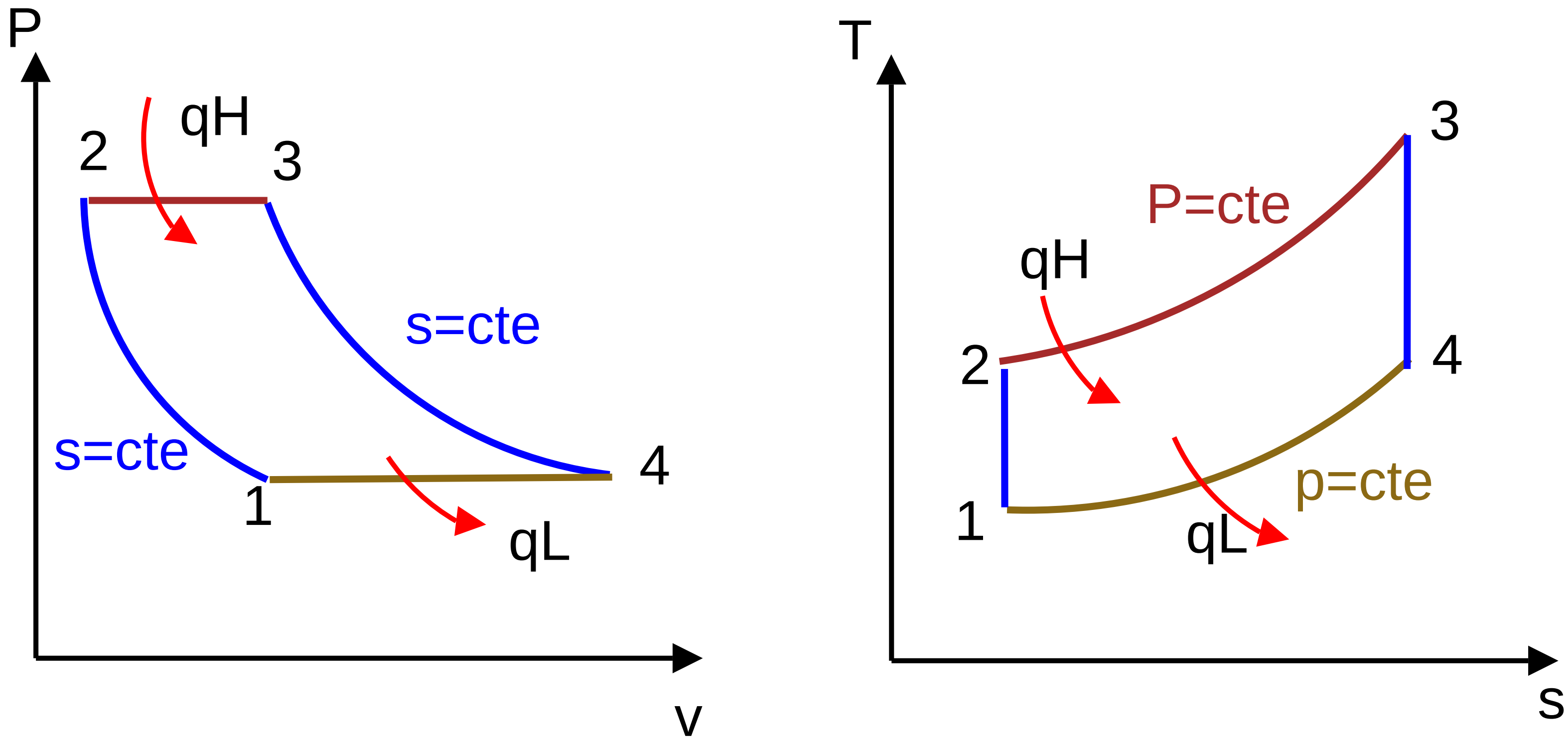
(ciclo ideal para el motor de turbina a gas)

- ciclo cerrado de aire standard
- internamente reversible
- similar a ciclo Diesel, con etapa isócora $\rightarrow$ isóbara
- similar al ciclo Rankine, pero sin cambio de fase



ciclo Brayton

(aire standard frío, $c_p =$ cte.)



el calor se transfiere en etapas isóbaras

$$\begin{aligned} q_H &= h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2) \\ q_L &= h_4 - h_1 = c_p(T_4 - T_1) \end{aligned}$$

ciclo Brayton - eficiencia

$$\eta = 1 - \frac{q_L}{q_H} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2}\left(\frac{T_4/T_1 - 1}{T_3/T_2 - 1}\right) = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

relación de presiones

$$r_p \equiv \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_{alta}}{P_{baja}} \longrightarrow \eta = 1 - 1/r_p^{\frac{k-1}{k}}$$

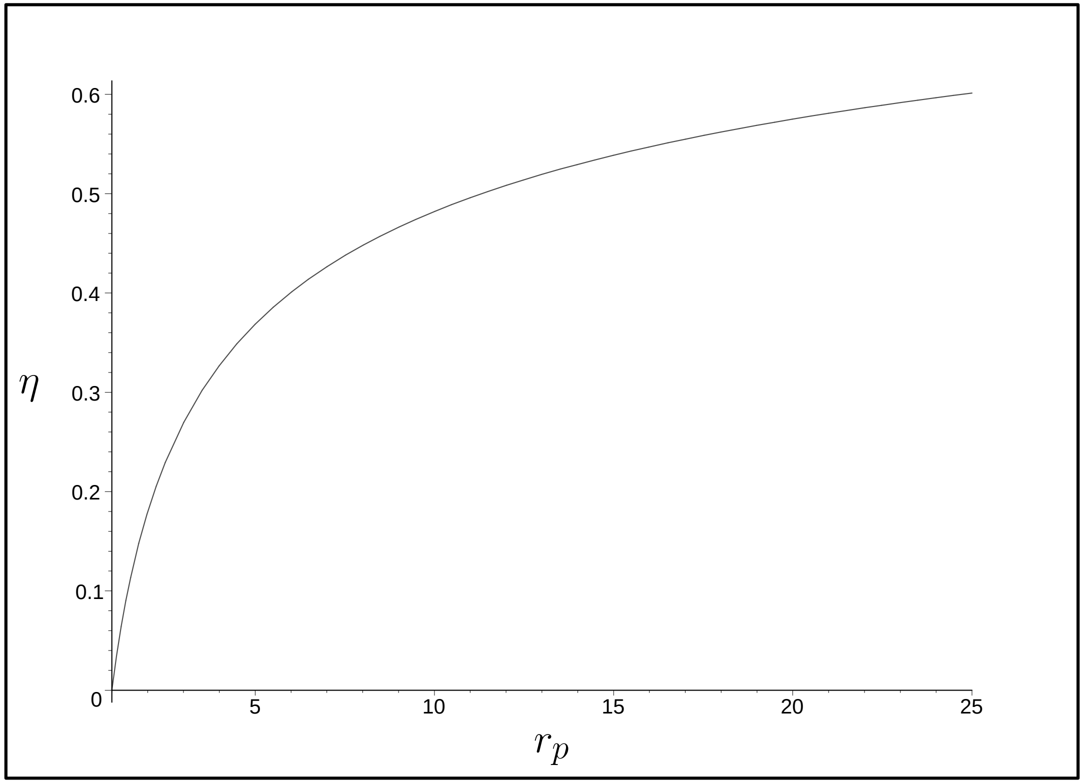
en las etapas isentrópicas:

$$\left.\begin{array}{rcl} \frac{T_1}{T_2} & = & \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\alpha_k} = 1/r_p^{\alpha_k} \\ \frac{T_3}{T_4} & = & \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\alpha_k} = r_p^{\alpha_k} \end{array}\right\} \Rightarrow \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$$

con $\alpha_k \equiv \frac{k-1}{k} \approx 0,2857$

ciclo Brayton - eficiencia

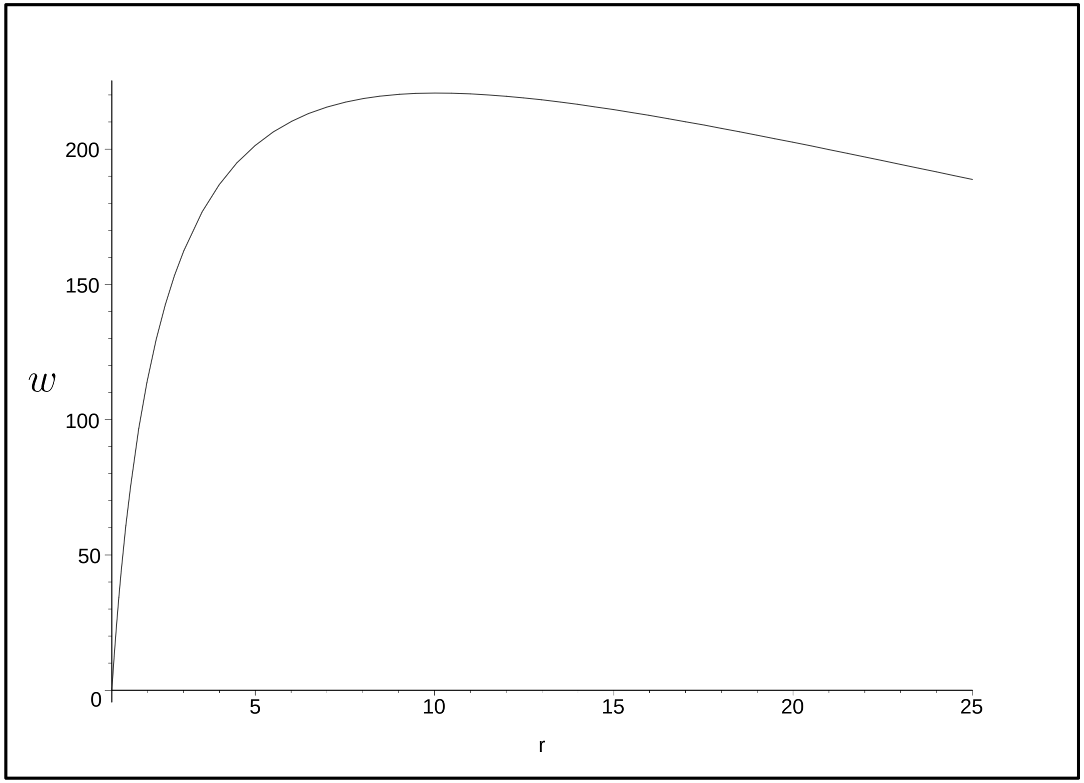
$$\eta = 1 - \frac{1}{r_p^{\alpha_k}} \qquad \qquad \alpha_k = 1 - 1/k$$



relaciones de presión típicas: $r \in [5, 20]$

trabajo neto generado

$$w = \eta q_H = \eta c_p(T_3 - T_2) = c_p T_1 \left(1 - \frac{1}{r_p^{\alpha_k}}\right)\left(\frac{T_3}{T_1} - r_p^{\alpha_k}\right)$$



$T_1 = 300$ K
$T_3 = 1000$ K

relación óptima: $r^* = (T_3/T_1)^{\frac{k}{2(k-1)}} \approx 8,2$

ejemplo: ciclo ideal vs. real

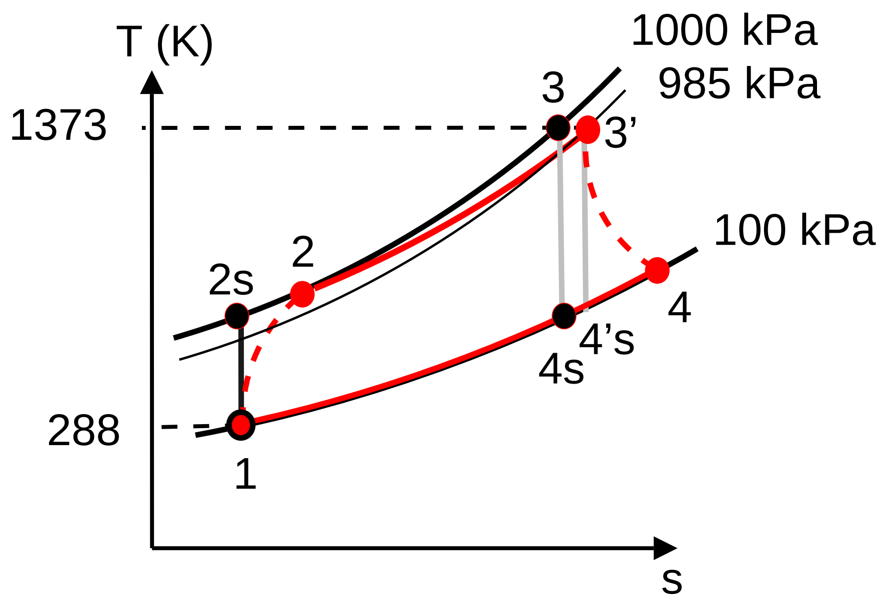
A) en un ciclo Brayton ideal con aire frío standard, el aire ingresa al compresor con 100 kPa, 15 ^oC y sale del mismo a 1 MPa. La temperatura máxima del ciclo es 1100 ^oC .

a) temperaturas en todos los puntos del ciclo.

b) trabajo neto y eficiencia

c) relación de trabajos w_c/w_t

B) idem si turbina y compresor tienen eficiencias adiabáticas $\eta_{s,t} = 0,85$ y $\eta_{s,c} = 0,80$ y hay una caída de presión de 15 kPa entre el compresor y la turbina.



ejemplo: ciclo ideal vs. real

relaciones adiabáticas, para caso ideal

$$\frac{T_{2s}}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = r_p^{\alpha_k} \quad \longrightarrow \quad T_{2s} = T_1 r_p^{\alpha_k} \simeq 557\ K$$

$$\frac{T_{4s}}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{k-1}{k}} = r_p^{-\alpha_k} \quad \longrightarrow \quad T_{4s} = T_3 r_p^{-\alpha_k} \simeq 711\ K$$

trabajos ideales

$$w_{s,c} = c_p(T_{2s} - T_1) \simeq 269\ kJ/kg \qquad w_{s,t} = c_p(T_3 - T_{4s}) \simeq 662\ kJ/kg$$

trabajo neto

$$w = w_t - w_c = 393\ kJ/kg$$

el 41% del trabajo generado se consume.
calor $q_H = c_p(T_3 - T_{2s}) \simeq 819\ kJ/kg$, la eficiencia es $(r_p = 10)$

$$\eta_{ideal} = \frac{w}{q_H} = 1 - 1/r_p^{\alpha_k} = 0,48$$

ejemplo: ciclo ideal vs. real

con $T_{4's} = T_{3'}(P_4/P_{3'})^{\alpha_k} \simeq 714\ K$, el nuevo trabajo isentrópico en la turbina es

$$w'_{s,t} = c_p(T_{3'} - T_{4's}) = 661\ kJ/kg$$

y los trabajos reales son

$$w_c = \frac{w_{s,c}}{\eta_{s,c}} \simeq 338\ kJ/kg \qquad w_t = \eta_{s,t} w_{s,t} \simeq 562\ kJ/kg$$

con esto se obtienen las temperaturas

$$T_2 = T_1 + \frac{w_c}{c_p} \simeq 625\ K \qquad T_4 = T_3 - \frac{w_t}{c_p} \simeq 813\ K$$

el trabajo neto es $w = w_t - w_c = 224\ kJ/kg$ y
la fracción usada en el compresor es $w_c/w_t \simeq 0,60$

con $q_H = c_p(T_3 - T_2) = 751\ kJ/kg$ se tiene la eficiencia:

$$\eta_{real} = \frac{w}{q_H} = 0,30$$

efecto de irreversibilidades

ideal

estado	P (kPa)	T (K)
1	100	288
2s	1000	557
3	1000	1373
4s	100	711

con pérdidas

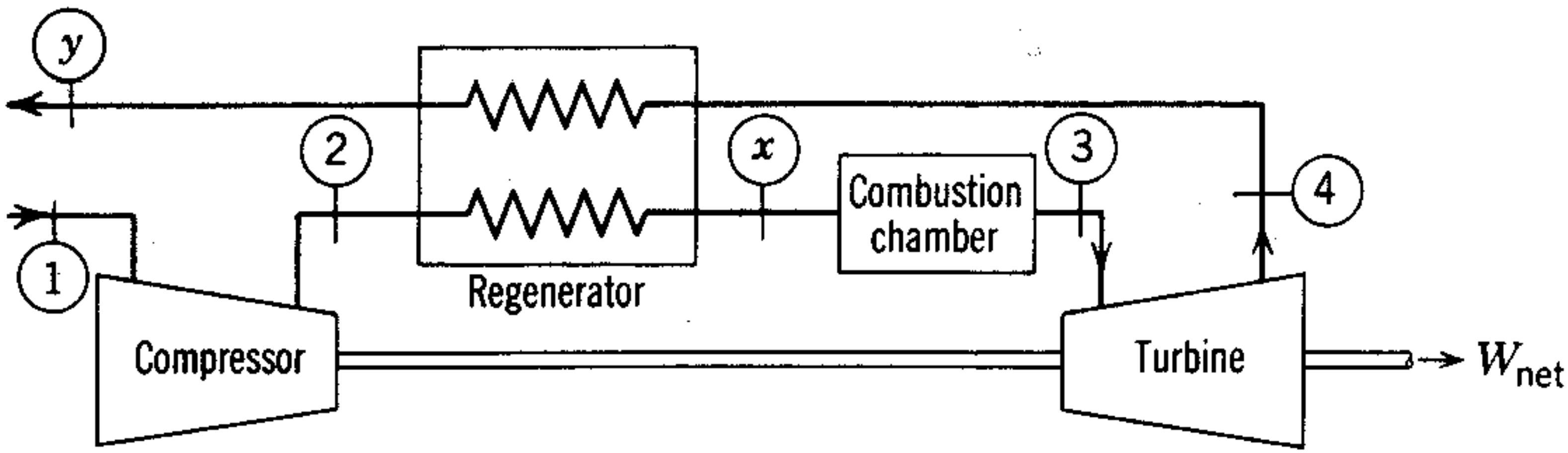
estado	P (kPa)	T (K)
1	100	288
2	1000	625
3’	985	1373
4	100	813

	w_t	w_c	w	w_c/w_t	q_H	η
ideal	662	269	393	$0,41$	819	$0,48$
real	562	338	224	$0,60$	751	$0,30$
$\Delta\%$	$-14,7$	$25,7$	$-43,0$	$46,0$	$-8,3$	$-37,5$

turbina de gas con regeneración

en un ciclo Brayton la temperatura a la salida supera a la del aire comprimido $(T_4 > T_2)$

Regeneración:
aprovechar calor de los gases de escape para precalentar el aire que entra a la cámara de combustión, usando un intercambiador cerrado a contraflujo (regenerador)



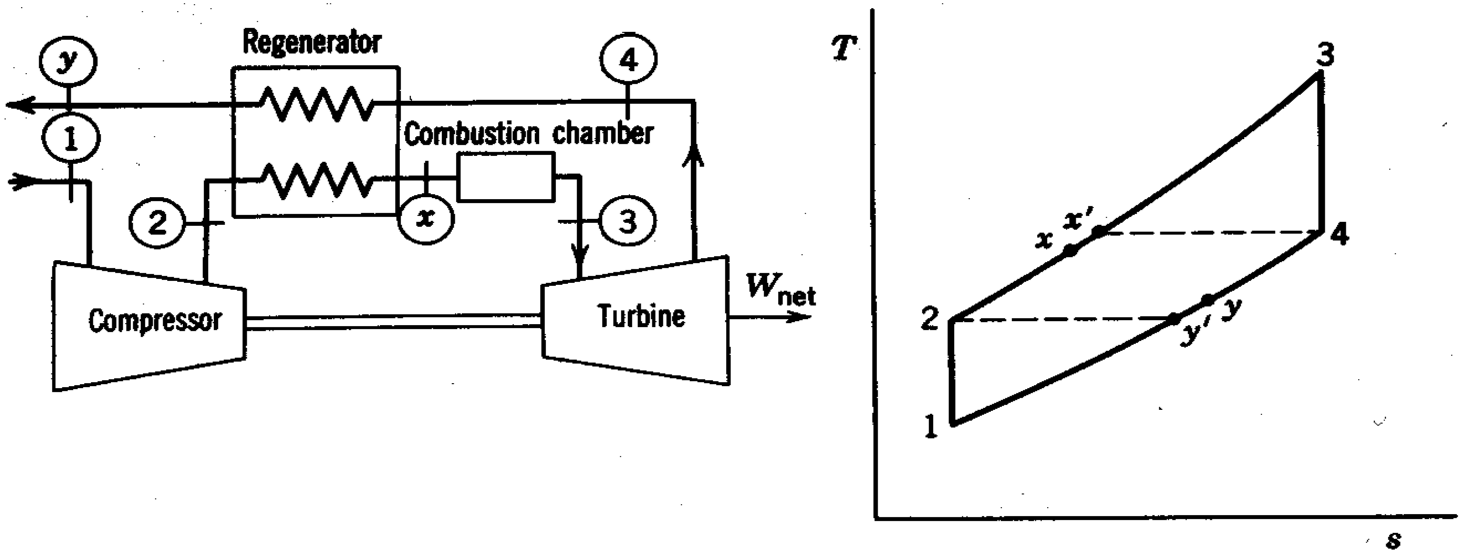
regenerador

intercambiador ideal:
(intercambio máximo)

$$T_{x'} = T_4 \qquad T_{y'} = T_2$$

intercambiador real

$$T_x < T_4 \qquad T_y > T_2$$



eficiencia de regeneración

$$\eta_{reg} = \frac{q_{real}}{q_{max}} = \frac{T_x - T_2}{T_4 - T_2}$$

eficiencia del ciclo regenerativo

con regeneración ideal $(\eta_{reg} = 1)$,

$$q_H = c_p(T_3 - T_x) = c_p(T_3 - T_4) \qquad q_L = c_p(T_y - T_1) = c_p(T_2 - T_1)$$

la eficiencia del ciclo es

$$\eta_r = 1 - \frac{q_L}{q_H} = 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4} = 1 - \frac{T_1}{T_3}\left(\frac{T_2/T_1 - 1}{1 - T_4/T_3}\right)$$

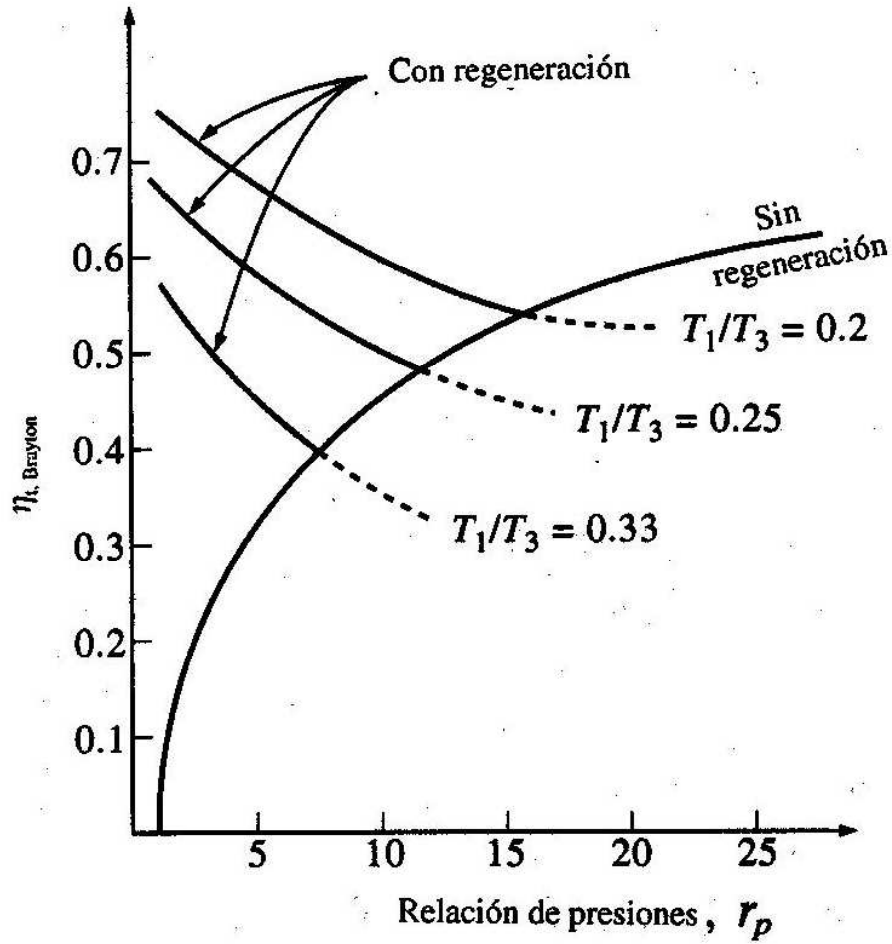
pero

$$\frac{T_2/T_1 - 1}{1 - T_4/T_3} = \frac{r_p^{\alpha_k} - 1}{1 - 1/r_p^{\alpha_k}} = r_p^{\alpha_k}$$

eficiencia con regeneración ideal disminuye con $r_p \nearrow$

$$\eta_r = 1 - \frac{T_1}{T_3} r_p^{\alpha_k}$$

eficiencia del ciclo regenerativo



a partir de cierta relación r_p (que depende de T_1/T_3) la regeneración empeora la eficiencia...

ejemplo

en el ciclo Brayton ideal anterior (A),
se incorpora un regenerador ideal.
¿Cuanto vale la nueva eficiencia del ciclo?

con $r_p = 10$ y $T_1/T_3 = 0,2098\ldots$

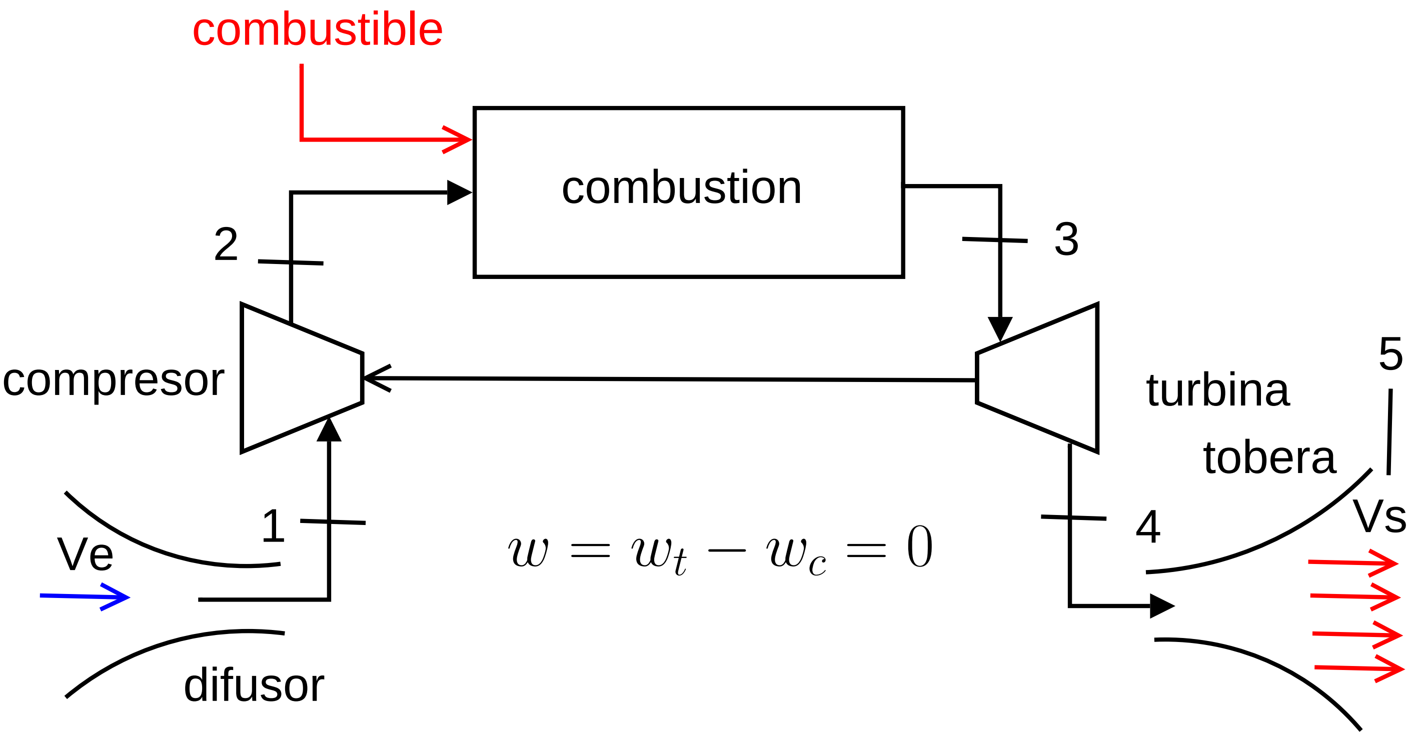
$$\eta_r = 1 - \frac{T_1}{T_3} r_p^{\alpha_k} = 0,60$$

pasó de $0,48 \longrightarrow 0,60$

un aumento de 25%

aplicación: propulsión a chorro

una turbina a gas que usa todo el trabajo generado para mover su compresor... se ajusta la presión de salida P_5



$$w = w_t - w_c = 0$$

difusor: frena el aire incidente y eleva su presión
tobera: acelera el aire que sale y baja su presión

empuje

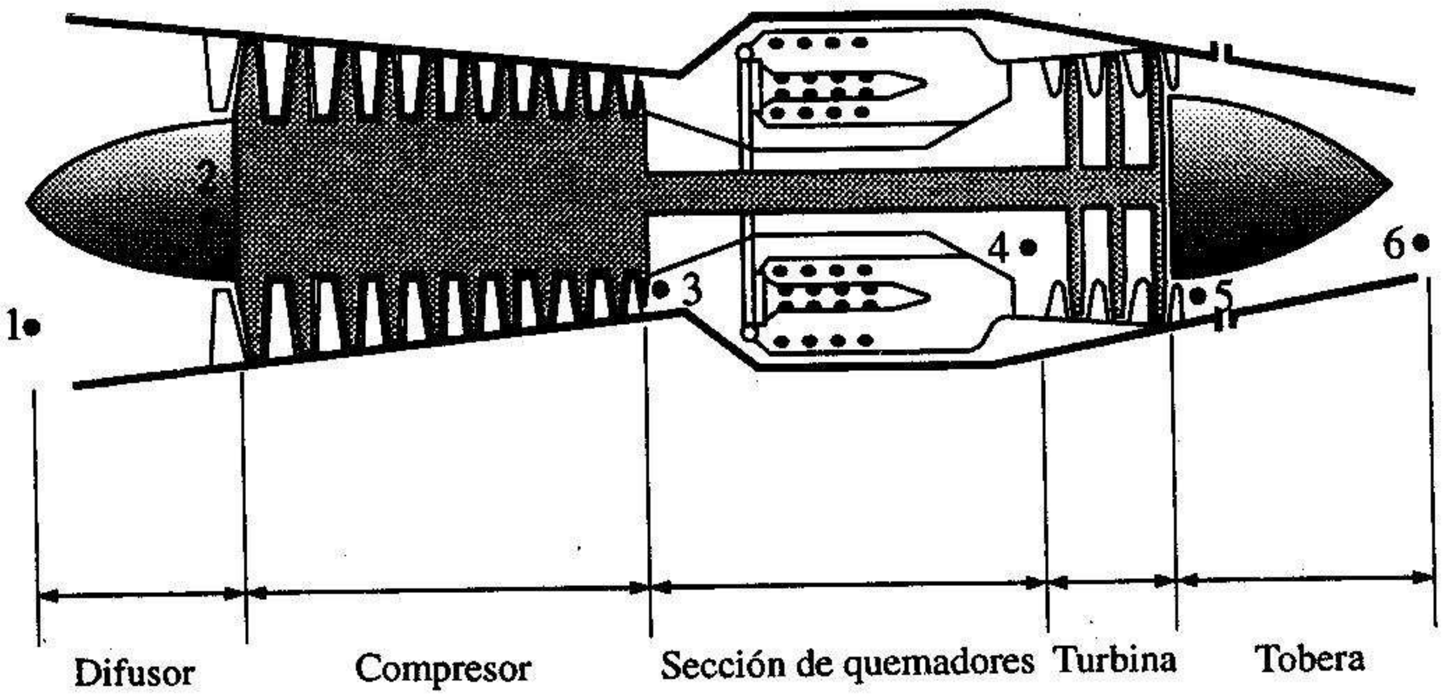
el empuje se debe al impulso de los gases emitidos

$$F = \dot{m}(V_s - V_e)$$

(velocidades relativas al avión). En régimen, esta fuerza se usa sólo para vencer la fricción del aire.

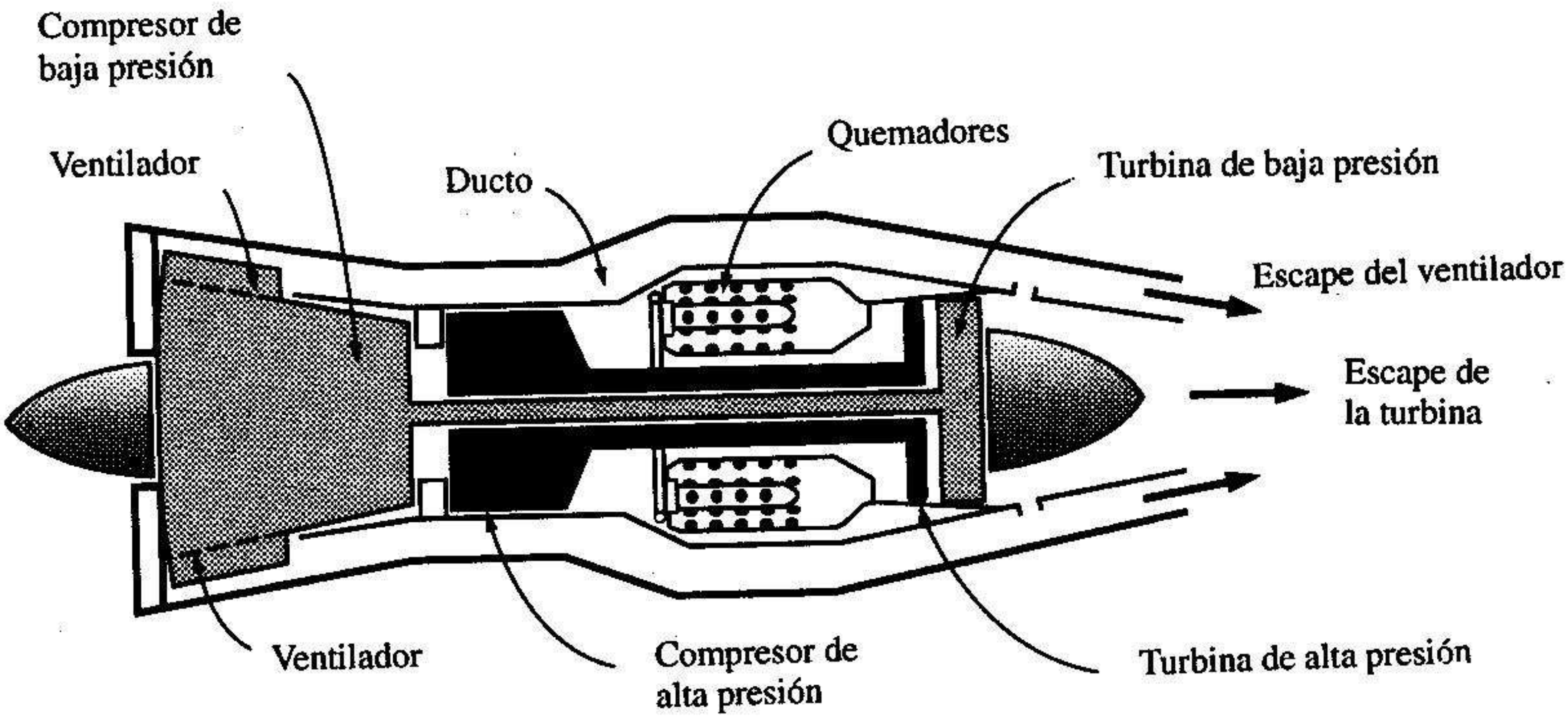
Dos formas de aumentar F:
a) gran flujo másico $\dot{m}$, velocidades bajas (turbohélice)
b) poco flujo másico, alta velocidad (propulsión a chorro o turbochorro)
c) el más usado (aviones comerciales) combina ambos sistemas... (turboventilador)

turbinas de gas para aviación



turborreactor o propulsión a chorro

turbinas de gas para aviación



turboventilador