

PROPULSIÓN DE AERONAVES

Profesores

Juan Manuel Tizón Pulido (ATA)

jm.tizon@upm.es

José Javier Álvarez García (NSA)

josejavier.alvarez@upm.es

Departamento de Motopropulsión y Termofluidodinámica

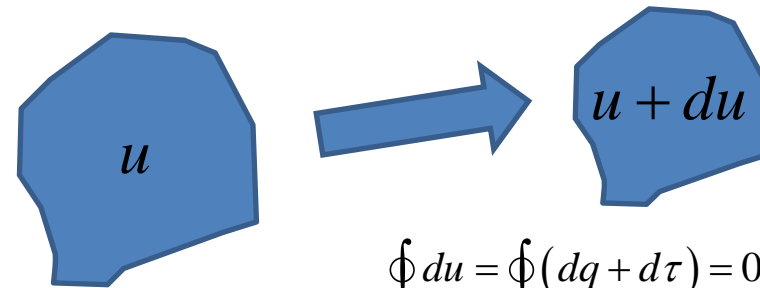
Tema 6a: Ciclo termodinámico del turborreactor

- Introducción y nomenclatura
- Modelo del ciclo termodinámico
- Tecnología de componentes
 - Toma dinámica y tobera
 - Compresor y turbina
 - Cámara de combustión
- Metodología de cálculo y ejemplos
- Bancos de ensayo

Repaso de TERMODINÁMICA

Primer Principio

$$du = dq + d\tau$$



Segundo Principio

Enunciado de Kelvin-Planck

No es posible construir un dispositivo que, funcionando cíclicamente, ceda una cantidad neta de trabajo a su entorno intercambiando calor con una única fuente térmica.

Enunciado de Clausius

No es posible construir un dispositivo que, funcionando cíclicamente, tenga como único efecto el paso de calor de un cuerpo frío a otro más caliente.

En la observación de la Naturaleza observamos la no-existencia de procesos reversibles. Siempre (?) se constata que la fricción, la transmisión de calor, ciertos procesos de difusión, etc. están presentes y esto hace imposible revertir a los sistemas a su estado original (procesos irreversibles).

$$dS \equiv \left(\frac{dQ}{T} \right)_{\text{reversible}}$$

$$dS \geq \left(\frac{dQ}{T} \right)_{\text{real}}$$

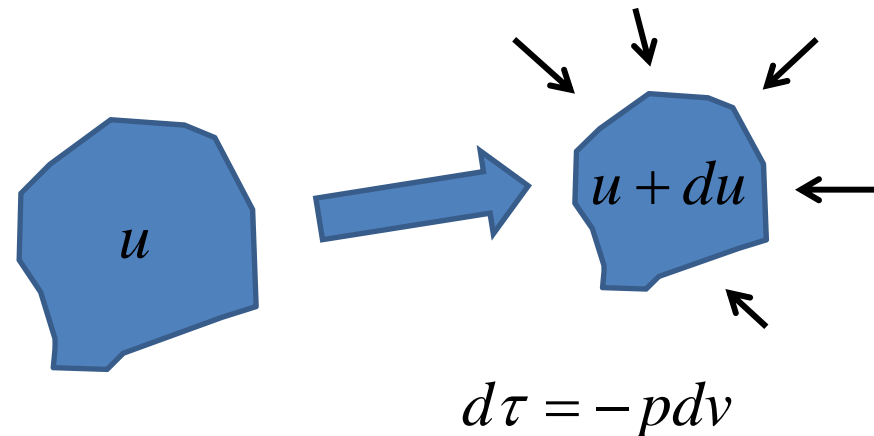
Repaso de TERMODINÁMICA

Segundo Principio

$$du = dq + d\tau$$

$$dq = du - d\tau = du + pdv$$

$$(dq)_{rev} = Tds = du + pdv$$



Sistema determinado por dos variables de estado

Como para una sustancia pura la descripción de su estado se realiza con dos variables de estado el cambio de entropía depende exclusivamente del cambio en du y dv y por lo tanto es función exclusivamente de los estados inicial y final del sistema

$$Tds = du + pdv$$

Repaso de TERMODINÁMICA

Gases perfectos

Ecuación de estado $pv = p/\rho = RT$

$$p/\rho = \frac{R_u}{M} T$$

Peso molecular: M (para el aire $M \approx 29$ g/mol)
Constante universal de los gases $R_u = 8.3143$ kJ/mol K

$$u = u(T)$$

$$h = u + pv = u + RT = h(T)$$

$$c_v = \frac{du}{dT}, \quad c_p = \frac{dh}{dT}$$

$$c_p = c_v + R$$

$$\gamma = c_p / c_v$$

$$c_p = R\gamma / (\gamma - 1)$$

$$R_u = 8.314 \text{ J / mol K}$$

Temperatura ambiente

$$T = 288,15 \text{ K}$$

$$M_{\text{aire}} = 29 \text{ g / mol}$$

$$R(\text{aire}) = 286,8 \text{ J / kg K}$$

$$c_p(\text{aire}) = 1004,5 \text{ J / Kg K}$$

Repaso de TERMODINÁMICA

Diagrama T-S

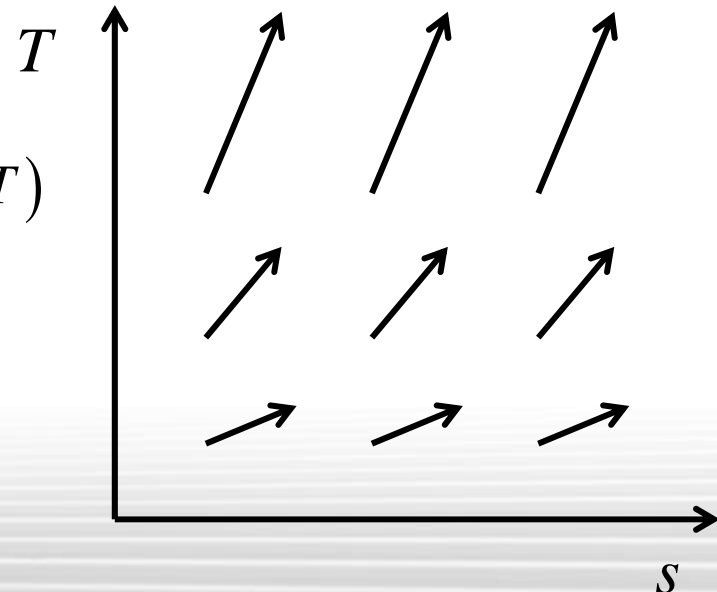
$$Tds = du + pdv = dh - vdp = c_p dT - vdp = c_p dT - \frac{RT}{p} dp$$

$$h = u + pv \quad dh = c_p dT \quad p/\rho = pv = RT$$

$$ds = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p}$$

$$\left(ds = c_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v} \right)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\partial T}{\partial s} \right)_{p=cte} = \frac{T}{c_p} = f(T) \\ \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_{s=cte} = \frac{c_p}{R} \frac{p}{T} > 0 \end{array} \right.$$



Repaso de TERMODINÁMICA

Diagrama T-S

$$ds = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p} \quad \frac{T_2}{T_1} = e^{\Delta s/c_p} \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

Proceso isentrópico

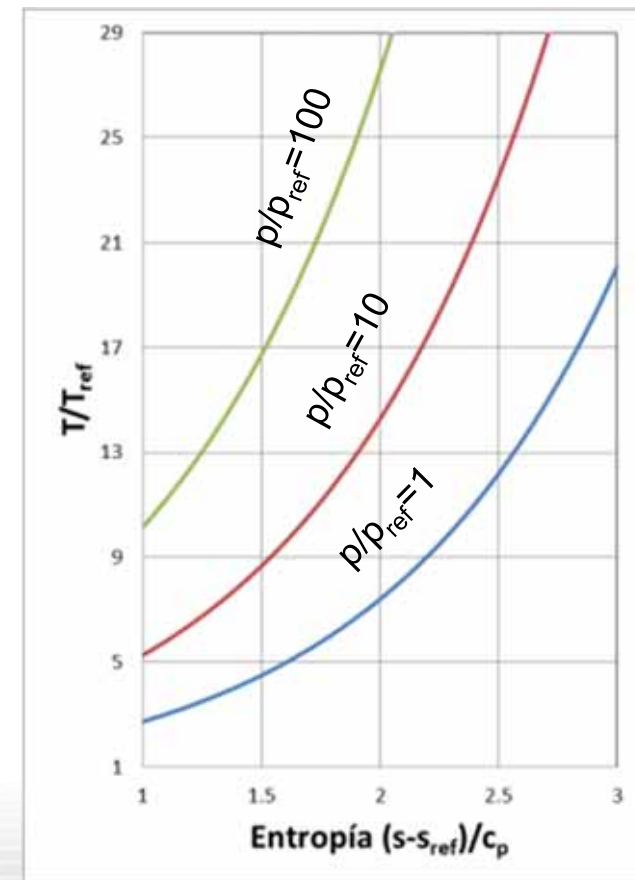
Cuando la evolución es isentrópica el estado de partida y el de llegada de la sustancia se encuentran en la misma vertical del diagrama T-S y se cumple

$$T_2/T_1 = \left(P_2/P_1 \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\rho_2/\rho_1 \right)^{\gamma-1}$$

Calores específicos variables

En el caso más general en el que los calores específicos son función de la temperatura tradicionalmente se empleaban tablas (por ejemplo, JANAF) de valores que habían sido obtenidos con un factor de integración adecuado y sobre el que pivotan el resto de las cantidades

$$d\phi = c_p(T) \frac{dT}{T}$$



Repaso de TERMODINÁMICA

Mezcla de gases

Ley de Gibbs-Dalton

- La presión de la mezcla es la suma de las presiones parciales (calculadas como si cada constituyente ocupara todo el volumen)
- La energía interna y la entropía de la mezcla se calculan sumando la de los componentes como si estos ocuparan todo el volumen disponible de forma individual a la temperatura de la mezcla.

En estas condiciones

$$X_j = n_j / \sum_i n_i, n_i = m_i / M_i$$

$$M_m = \sum_j X_j M_j$$

$$\frac{1}{M_m} = \sum_j \frac{Y_j}{M_j}$$

$$p = \sum_j p_j, T = T_{j, \forall j}, \rho_j = \rho Y_j$$

$$u = \sum_j u_j Y_j, h = \sum_j h_j Y_j, c_v = \sum_j c_{vj} Y_j, c_p = \sum_j c_{pj} Y_j$$

$$p = \rho \frac{R_u}{M_m} T = \rho R T$$

Repaso de Termodinámica

Estado de remanso (variables de remanso)

El sistema (definido por T, P que presenta una velocidad V) sufre una evolución adiabática sin realizar ni recibir trabajo hasta velocidad nula ($V=0$) con lo que su presión y temperatura aumentan:

Conservación de la energía del sistema $dh + VdV = 0$

$$c_p T + \frac{1}{2} V^2 = c_p T_t \Rightarrow \frac{T_t}{T} = 1 + \frac{V^2}{2c_p}$$

Evolución isentrópica

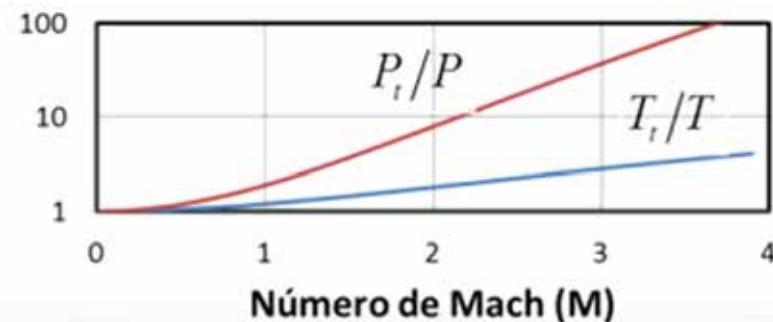
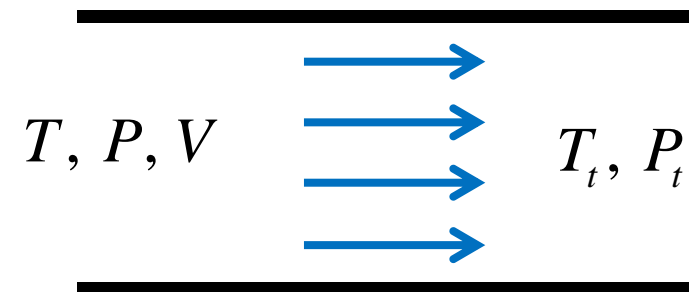
Número de Mach

$$\frac{T_t}{T} = \left(\frac{P_t}{P}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad M = V/a = V/\sqrt{\gamma RT}$$

$$\frac{T_t}{T} = \left(\frac{P_t}{P}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{\rho_t}{\rho}\right)^{\gamma-1} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2$$

Variables críticas ($M^*=1$)

$$\frac{T_t}{T^*} = \left(\frac{P_t}{P^*}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} = \left(\frac{\rho_t}{\rho^*}\right)^{\gamma-1} = (\gamma+1)/2 \quad (T^* \sim T_t/1.2, \quad P^* \sim P_t/1.89)$$



Repaso de Fluidos Ideales

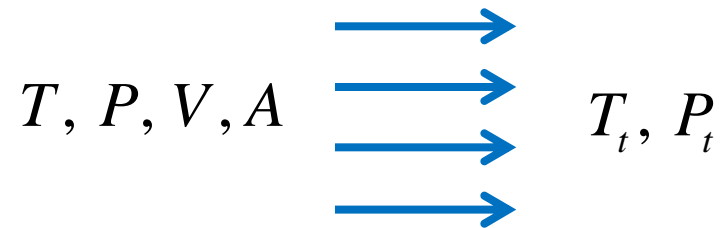
Parámetro de gasto

El gasto que atraviesa una sección A es $G = \rho VA$

$$G = \frac{P}{RT} VA = \frac{P}{RT} M \sqrt{\gamma RT} A = \frac{PA}{\sqrt{RT}} \sqrt{\gamma} M$$

$$G = \frac{AP_t}{\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}} \frac{\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{RT_t}} \sqrt{\gamma} M$$

$$G = \frac{AP_t}{\sqrt{RT_t}} \sqrt{\gamma} M \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{1}{2} - \frac{\gamma}{\gamma-1}}$$



$$\frac{T_t}{T} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2$$

$$\frac{P_t}{P} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

$$\frac{G \sqrt{RT_t}}{AP_t} = \sqrt{\gamma} M \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{-\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}$$

Repaso de Fluidos Ideales

Parámetro de gasto

$$\frac{G\sqrt{RT_t}}{AP_t} = F(M, \gamma) = \sqrt{\gamma}M \left(1 + \frac{\gamma-1}{2}M^2\right)^{-\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}$$

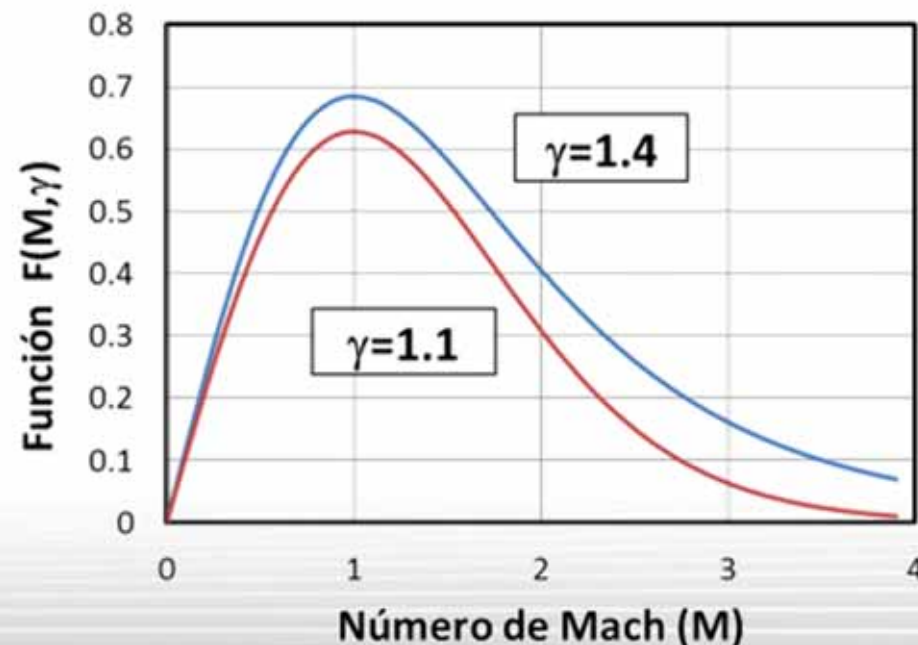
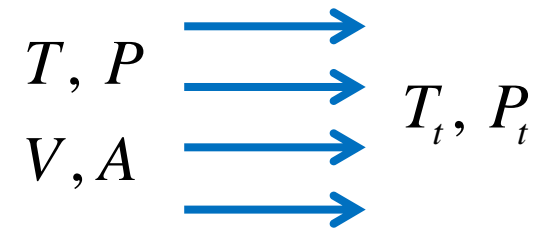
$$\left. \frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)} \right|_{\gamma=1.4} \sim 3,5$$

$$F(0, \gamma) = 0$$

$$F(\infty, \gamma) = 0$$

$$\frac{\partial F}{\partial M} = 0 \Rightarrow M = 1$$

$$F(M, \gamma) \xrightarrow{M \sim 0} \sqrt{\gamma}M$$



Repaso de Fluidos Ideales

Parámetro de gasto

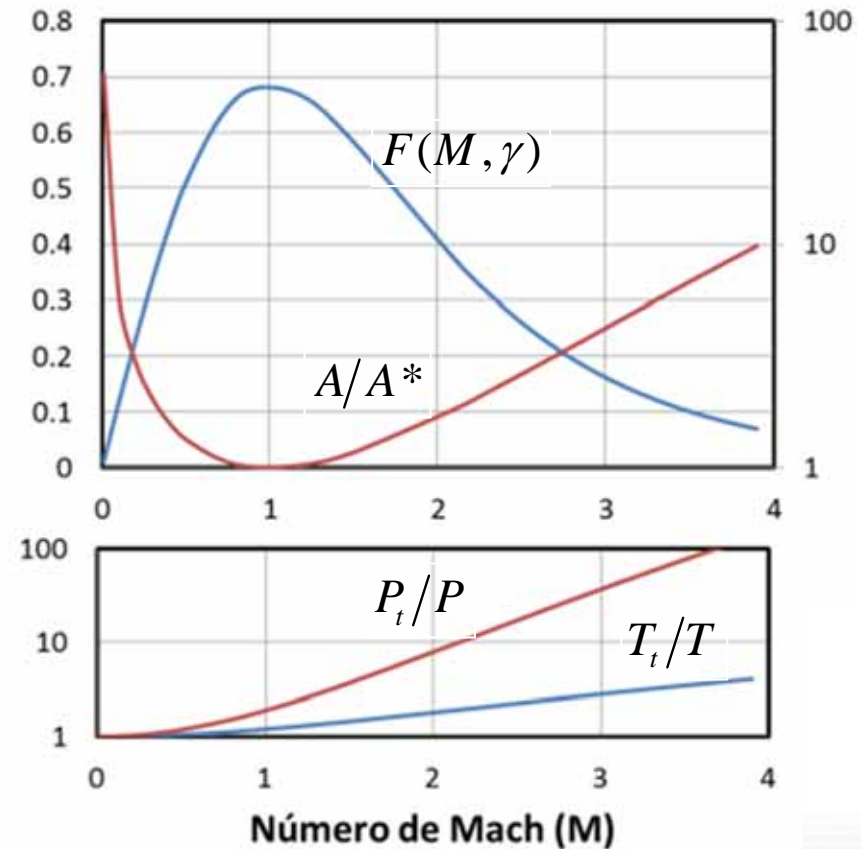
$$\frac{G\sqrt{RT_t}}{AP_t} = F(M, \gamma) = \sqrt{\gamma} M \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{-\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}$$

Área crítica ($G = \rho^* V^* A^*$)

$$\frac{G\sqrt{RT_t}}{A^* P_t} = F(1, \gamma) = \sqrt{\gamma} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \sim 0.68$$

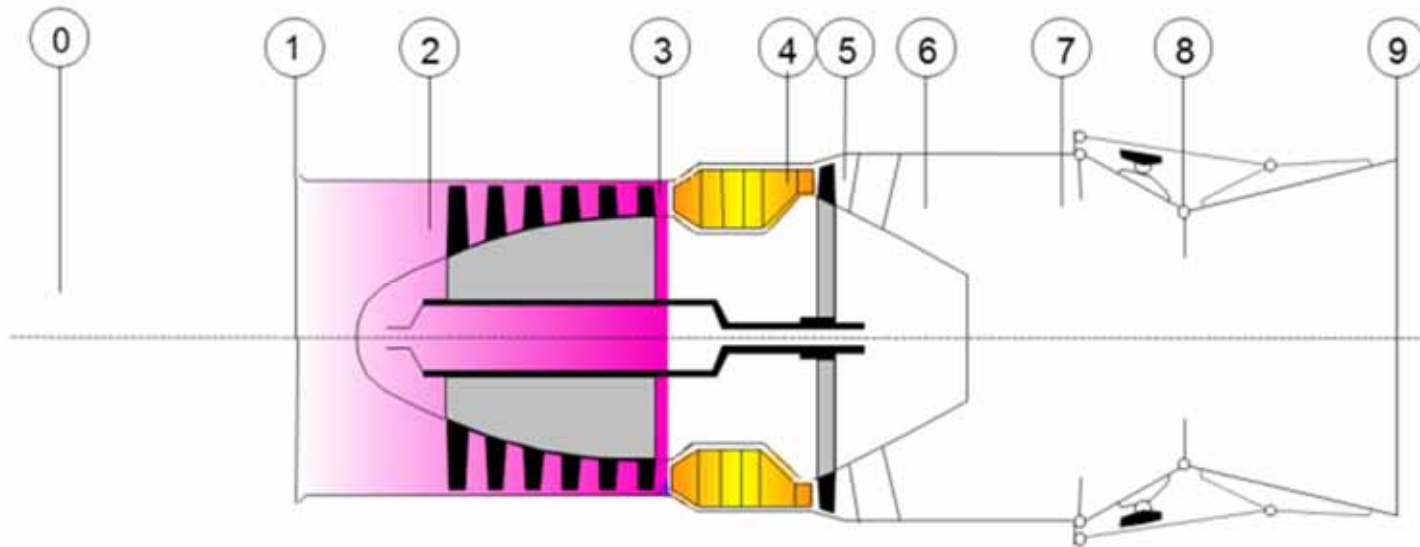
El área crítica (A^*/G) es función exclusivamente de las variables de remanso y de la relación de calores específicos. Por lo tanto

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{M} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}$$

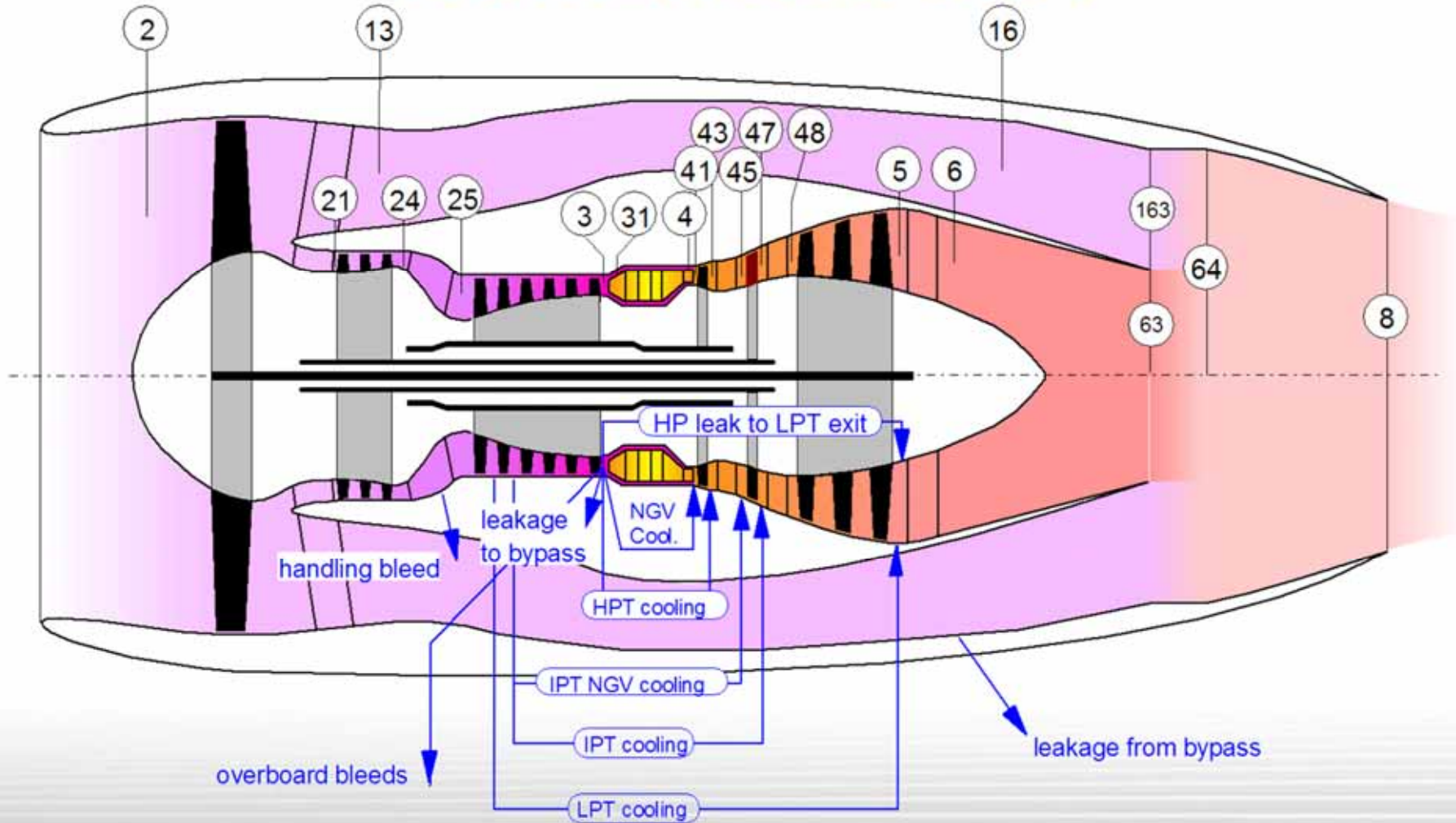


NOMENCLATURA

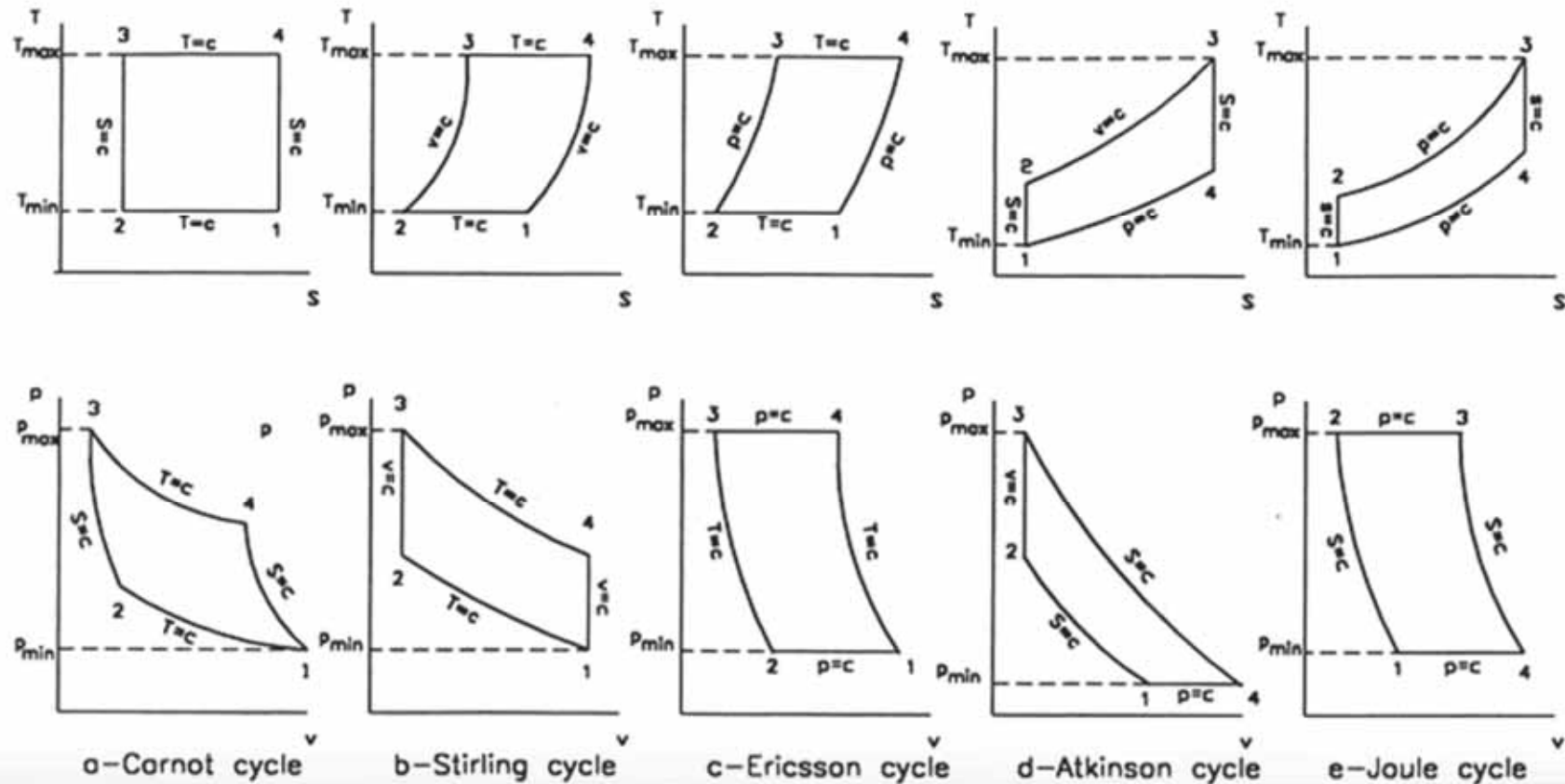
*Gas Turbine Engine Performance Station and Nomenclature, Aerospace Recommended Practice, **ARP 755A**, Society of Automotive Engineers, Inc. 1974*



NOMENCLATURA



DIFERENTES TIPOS DE CICLOS



Tipos de ciclo

Ciclo	Proceso 1-2 Compresión	Proceso 2-3 Calentamiento	Proceso 3-4 Expansión	Proceso 4-1 Enfriamiento	Comentarios
Ciclos en los que el proceso de combustión tiene lugar en el exterior					
Bell Coleman	adiabático	isobárico	adiabático	isobárico	Ciclo Brayton inverso
Carnot	isentrópico	isotérmico	isentrópico	isotérmico	
Ericsson	isotérmico	isobárico	isotérmico	isobárico	2º ciclo Ericsson (1853)
Rankine	adiabático	isobárico	adiabático	isobárico	Maquina de vapor
Scuderi	adiabático	variable	adiabático	isocórico	
Stirling	isotérmico	isocórico	isotérmico	isocórico	
Stoddart	adiabático	isobárico	adiabático	isobárico	
Ciclos con combustión interna					
Brayton	adiabático	isobárico	adiabático	isobárico	1º ciclo Ericsson (1833)
Diesel	adiabático	isobárico	adiabático	isocórico	
Lenoir	isobárico	isocórico	adiabático		Pulse jets
Otto	adiabático	isocórico	adiabático	isocórico	MCI

CICLO TERMODINAMICO

VARIABLES DE REMANSO

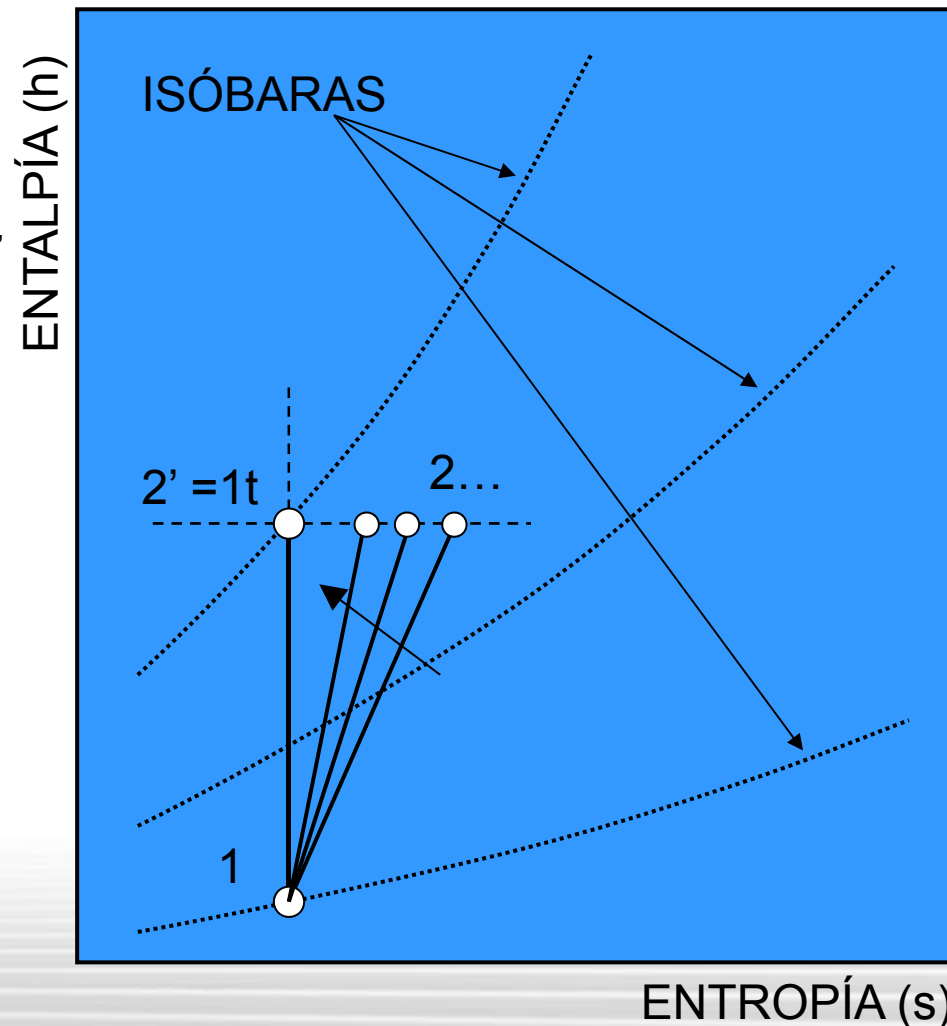
- El estado de un fluido queda determinado por su estado termodinámico (P,T) y su velocidad (V).
- Si realizamos un proceso de deceleración de la corriente, hasta velocidad nula, sin interacción energética con el exterior, el estado energético queda caracterizado por la nueva temperatura (temperatura de remanso).
- Dependiendo de cómo haya sido el proceso de deceleración, se alcanzará una presión u otra. Si el proceso es reversible la presión alcanzada es máxima.

$$h_1 + \frac{1}{2}V_1^2 = h_2 = C_p T_{2'} = C_p T_{1t}$$

$$P_{1t}/P_1 = P_{2'}/P_1 = (T_{2'}/T_1)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

$$(P_{1t}/P_1)^{(\gamma-1)/\gamma} = T_{1t}/T_1 = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2$$

$$\gamma = C_p/C_v, \quad R = C_p - C_v, \quad p/\rho = RT, \quad R = \mathbb{R}/M$$



CICLO TERMODINAMICO

PRIMER PRINCIPIO

$$h_{t2} - h_{t1} = \tau_{12} + q_{12}$$

Proceso adiabático:

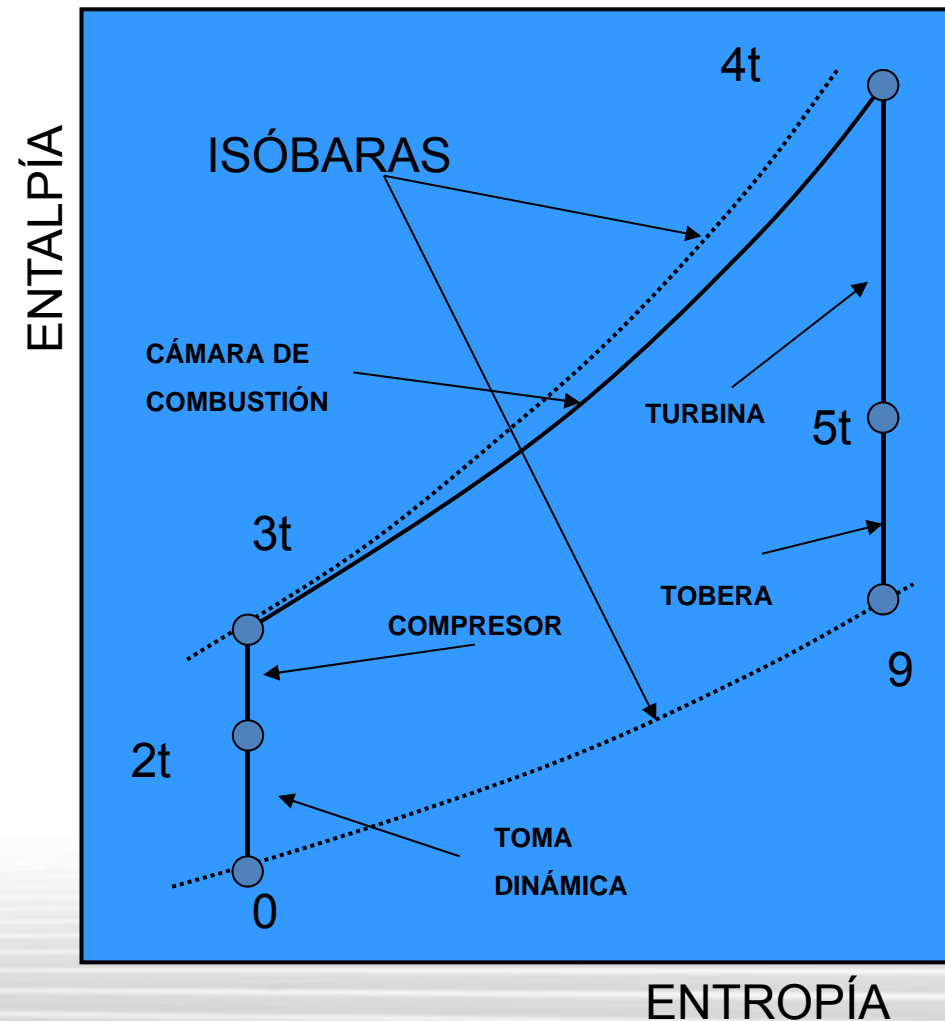
$$q_{12} = 0 \Rightarrow \tau_{12} = h_{t2} - h_{t1}$$

Proceso isoentálpico:

$$\tau_{12} = q_{12} = 0 \Rightarrow h_{t2} = h_{t1}$$

Proceso diabático:

$$\tau_{12} = 0 \Rightarrow q_{12} = h_{t2} - h_{t1}$$



CICLO TERMODINAMICO

SEGUNDO PRINCIPIO

$$TdS = dq + d\varepsilon$$

Proceso adiabático:

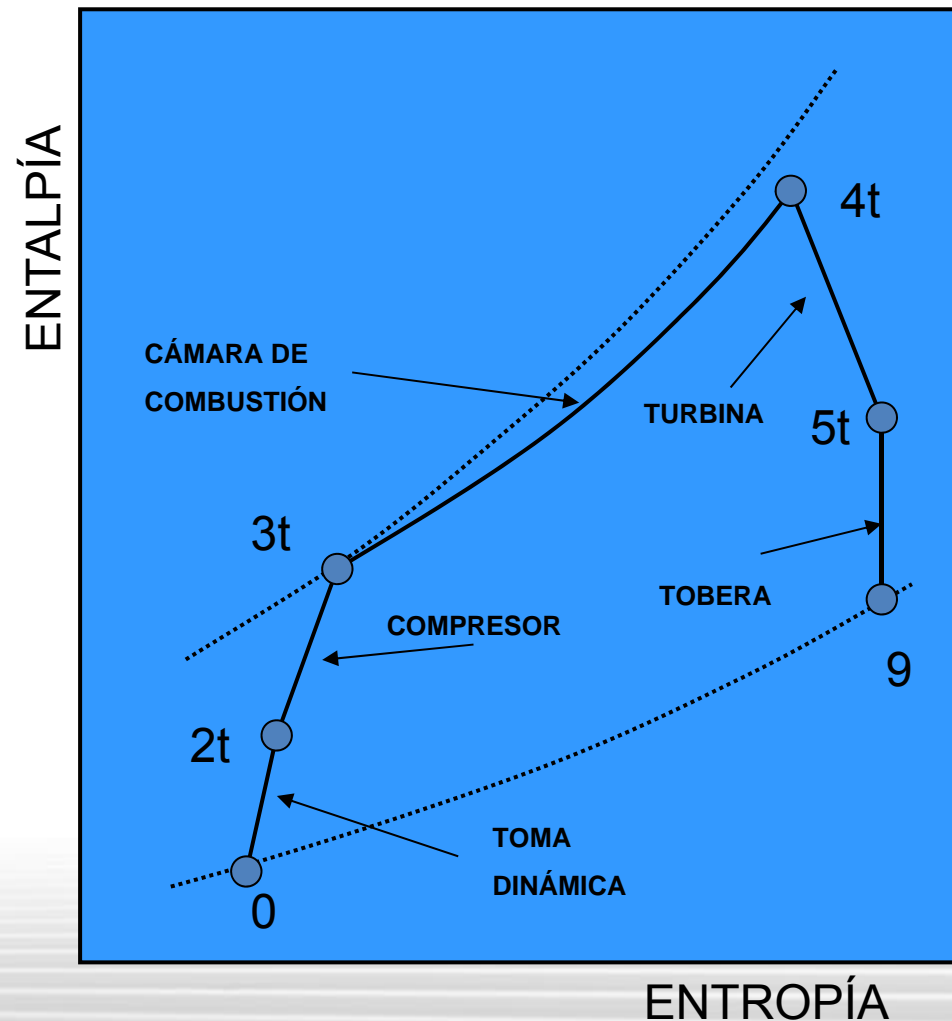
$$q_{12} = 0 \Rightarrow dS = d\varepsilon/T$$

Proceso isoentálpico:

$$\tau_{12} = q_{12} = 0 \Rightarrow dS = d\varepsilon/T$$

Proceso diabático:

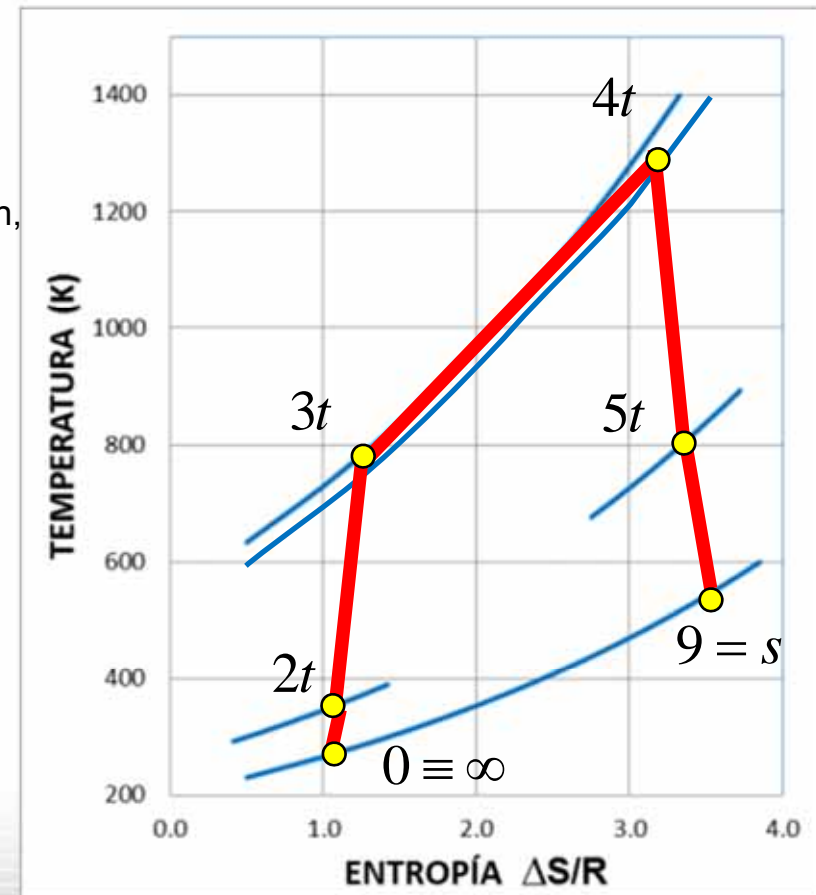
$$\tau_{12} = 0 \Rightarrow dS \approx dq_{12}/T$$



Ciclo termodinámico

MODELO BÁSICO

- Los resultados obtenidos se corresponden con el motor funcionando en régimen permanente. Flujo estacionario.
- Un fluido ideal que evoluciona intercambiando calor y trabajo con el exterior a lo largo de 6 estaciones. Se emplea un análisis cero-dimensional ($\Delta h_t = q + \tau$). Todos los procesos son, no obstante, adiabáticos.
- Configuraciones de motores más complejas (turbofan, turbohélice, etc..) se describen con las herramientas presentada, combinándolas y repitiéndolas adecuadamente.
- Parte de los efectos reales se tienen en cuenta definiendo rendimientos y coeficientes (valores *a priori*) que caracterizan cada evolución ($Tds = dq + d\varepsilon$).
- Se omiten detalles que contabilizan con exactitud, gastos sangrados, potencias auxiliares, composición química o dependencia con la temperatura de los coeficientes termodinámicos.
- El grado de precisión, pese a lo grosero del modelo, es razonable (5-10%), alcanzándose precisión ingenieril recuperando, básicamente, los aspectos del punto anterior.
- Los modelos precisos (oficina de ingeniería) tienen como esqueleto el modelo presentado aquí y se emplean con pequeñas capacidades de cálculo (PC's de sobremesa).



TOMA DINÁMICA

PROCESO 0-2

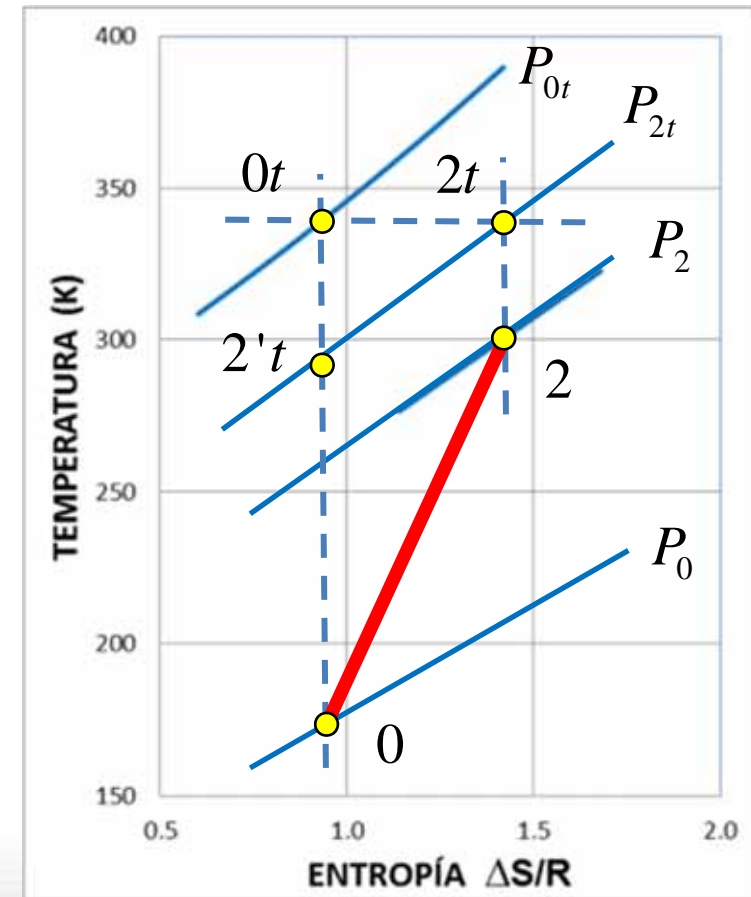
Proceso adiabático y sin trabajo

PRIMER PRINCIPIO

$$\Delta h_t = q + \tau = 0 \quad h_{t2} = h_{t0} \Rightarrow T_{2t} = T_{0t}$$

$$\left. \begin{array}{l} c_p T_{0t} = c_p T_0 + \frac{1}{2} V_0^2 \\ M_0 = V_0 / \sqrt{\gamma R T_0} \end{array} \right\} \frac{T_{0t}}{T_0} = \frac{T_{2t}}{T_0} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_0^2$$

$$\frac{P_{0t}}{P_0} = \left(\frac{T_{0t}}{T_0} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \approx \frac{P_{1t}}{P_0} \geq \frac{P_{2t}}{P_0}$$



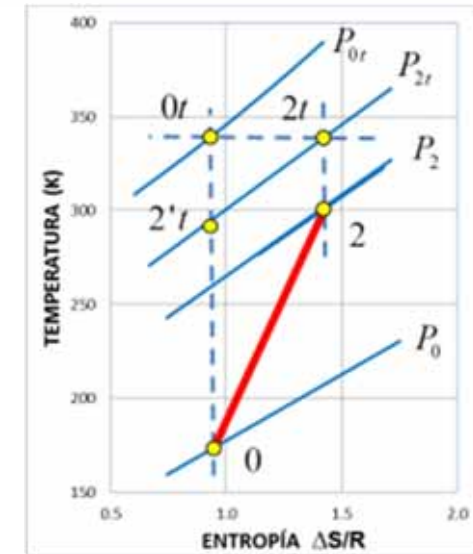
TOMA DINÁMICA

DESCRIPCIÓN DE LAS PERDIDAS

Rendimiento adiabático:

$$\eta_{02} = \frac{h_{2't} - h_0}{h_{2t} - h_0} = \frac{T_{2't} - T_0}{T_{2t} - T_0} = \frac{\left(\frac{P_{2t}}{P_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\frac{P_{2t}}{P_0} - 1}$$

$$\eta_{02} = \frac{\frac{1}{2}V_{0-2't}^2}{\frac{1}{2}V_0^2}$$



Coeficiente de pérdida de presión de remanso: $\pi_{02} = \pi_d = \frac{P_{2t}}{P_{0t}}$

ESTIMACIÓN DE DISEÑO
(Estándar MIL-E-5008B)

$$\eta_{MIL} = \begin{cases} 1 & , M_0 \leq 1 \\ 1 - 0.076(M_0 - 1)^{1.35} & , 1 < M_0 < 5 \\ 800 / (M_0^4 + 935) & , 5 < M_0 \end{cases}$$

COMPRESOR

PROCESO 2-3

Proceso adiabático:

PRIMER PRINCIPIO

$$\tau_{23} = \tau_c = h_{3t} - h_{2t} = c_p (T_{3t} - T_{2t})$$

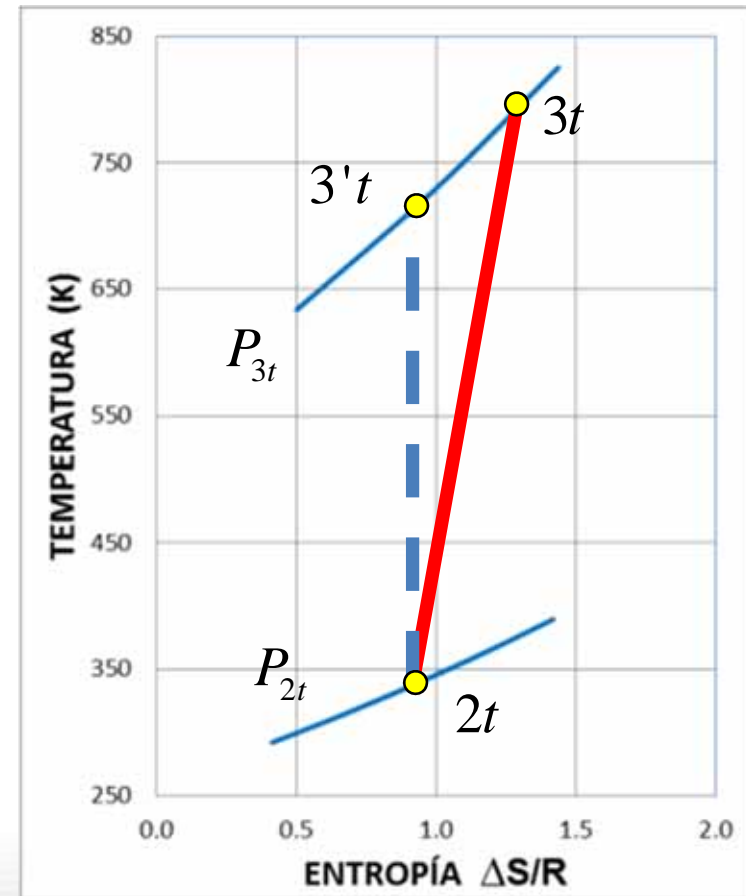
$$W_c = G\tau_{23} \quad \frac{\tau_{23}}{c_p T_{2t}} = \frac{T_{3t}}{T_{2t}} - 1$$

DESCRIPCIÓN DE LAS PERDIDAS

Rendimiento adiabático:

$$\eta_{23} = \eta_c = \frac{h_{3't} - h_{2t}}{h_{3t} - h_{2t}} = \frac{T_{3't} - T_{2t}}{T_{3t} - T_{2t}}$$

$$\eta_{23} = \frac{T_{3't}/T_{2t} - 1}{T_{3t}/T_{2t} - 1} = \frac{(P_{3t}/P_{2t})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{T_{3t}/T_{2t} - 1}$$

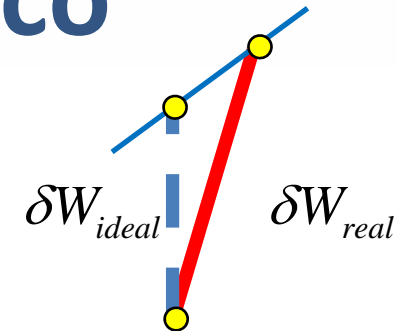


Rendimiento politrópico

Rendimiento politrópico

$$e_c = \frac{\delta W_{ideal}}{\delta W_{real}} = \frac{dh_{ideal}}{dh_{real}} = \frac{dP_t / \rho_t}{c_p dT_t} = \frac{R T_t}{c_p P_t} \frac{dP}{dT_t} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{T_t}{P_t} \frac{dP}{dT_t}$$

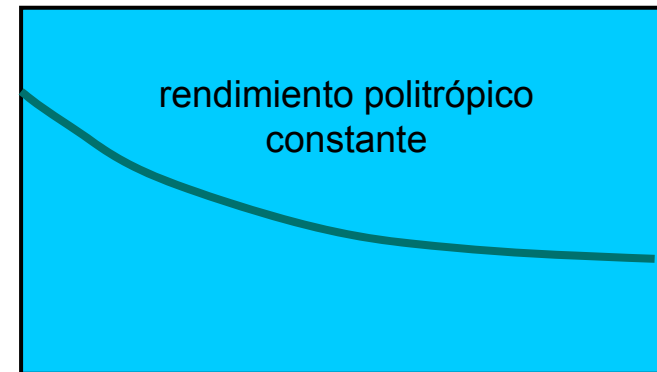
$dq + d\varepsilon = dh - dp/\rho$ $p/\rho = RT$ $c_p = \gamma R / (\gamma - 1)$



$$\frac{dT_t}{T_t} = \frac{\gamma - 1}{\gamma e_c} \frac{dP}{P_t} \quad \frac{T_{3t}}{T_{2t}} = \left(\frac{P_{3t}}{P_{2t}} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma e_c}} = \pi_c^{\frac{\gamma - 1}{\gamma e_c}}$$

$$\eta_{02} = \frac{\pi_c^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1}{\frac{T_{3t}}{T_{2t}} - 1} = \frac{\pi_c^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1}{\pi_c^{\frac{\gamma - 1}{\gamma e_c}} - 1}$$

Rendimiento adiabático



Relación de compresión P_{3t}/P_{2t}

$$\eta_c|_{e_c \approx 1} \approx 1 - (1 - e_c) \frac{x \ln x}{x - 1}; \quad x = \left(\frac{P_{3t}}{P_{2t}} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma e_c}}$$

COMPRESORES MULTIETAPA

$$\pi_c = \frac{P_{3t}}{P_{2t}} = \prod_{j=1}^N \pi_{cj}; \quad \frac{T_{3t}}{T_{2t}} = \prod_{j=1}^N \theta_{cj}; \quad \eta_{cj} = \frac{\pi_{cj}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\theta_{cj} - 1}$$

$$\eta_{23} = \frac{\pi_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\prod_{j=1}^N \left\{ 1 + \frac{1}{\eta_{cj}} \left(\pi_{cj}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \right\} - 1}$$

$$\left. \begin{array}{l} \pi_{cj} = \sqrt[N]{\pi_c} \\ \eta_{cj} = \bar{\eta}_{cj} \end{array} \right\} \forall j \Rightarrow \eta_{23} = \frac{\pi_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\left\{ 1 + \frac{1}{\bar{\eta}_{cj}} \left(\pi_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma N}} - 1 \right) \right\}^N - 1}$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \eta_{23} = \frac{\pi_{23}^{\frac{\gamma_c-1}{\gamma_c}} - 1}{\pi_c^{\frac{\gamma_c-1}{\gamma_c \bar{\eta}_{cj}}} - 1} \Rightarrow \eta_{cj} \Big|_{N \rightarrow \infty} \equiv e_c$$

CAMARA DE COMBUSTIÓN

PROCESO 3-4

Proceso adiabático (?)

PRIMER PRINCIPIO

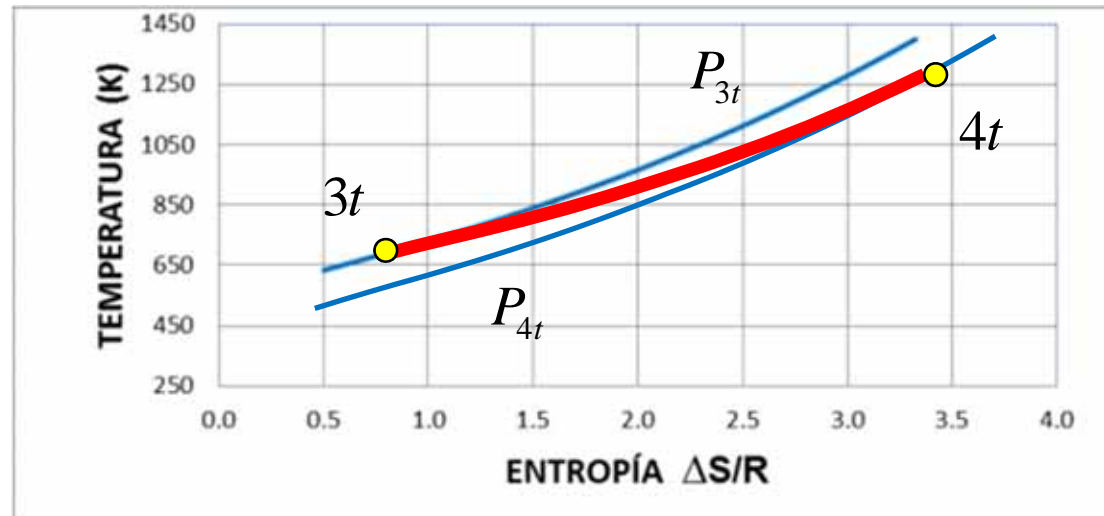
$$c\eta_q L = (G + c)h_{4t} - Gh_{3t}$$

$$f\eta_q L = (1 + f)c_{pc}T_{4t} - c_{pe}T_{3t}$$

$$f = \frac{c_{pc}T_{4t} - c_{pe}T_{3t}}{\eta_q L - c_{pc}T_{4t}} \approx \frac{c_p T_{3t}}{\eta_q L} \left(\frac{T_{4t}}{T_{3t}} - 1 \right)$$

DESCRIPCIÓN DE LAS PERDIDAS

$$\pi_{cc} = \pi_{34} = \frac{P_{4t}}{P_{3t}} = 1 - \left\{ K_1 + K_2 \left(\frac{T_{4t}}{T_{3t}} - 1 \right) \right\} \left(\frac{G\sqrt{RT_{3t}}}{A_{3ref} P_{3t}} \right)^2$$



TURBINA

PROCESO 4-5

Proceso adiabático:

PRIMER PRINCIPIO

$$\tau_{45} = -\tau_t = h_{5t} - h_{4t} = C_p (T_{5t} - T_{4t})$$

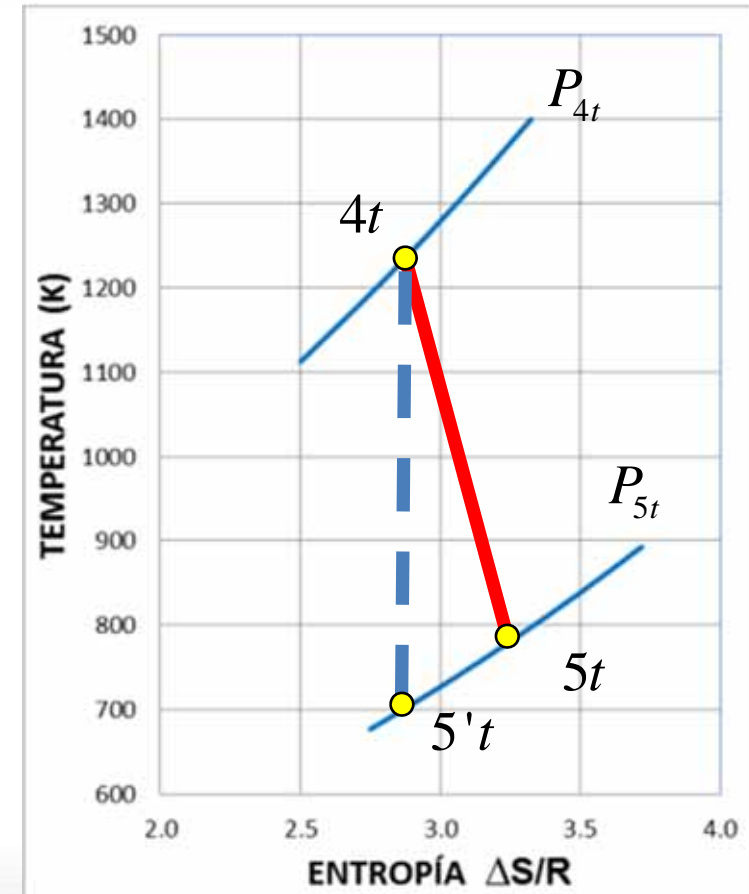
$$W_t = G_4 \tau_t = (G + c - g) \tau_t$$

DESCRIPCIÓN DE LAS PERDIDAS

Rendimiento adiabático:

$$\eta_{45} = \frac{h_{4t} - h_{5t}}{h_{4t} - h_{5't}} = \frac{T_{4t} - T_{5t}}{T_{4t} - T_{5't}} = \frac{1 - T_{5t}/T_{4t}}{1 - T_{5't}/T_{4t}}$$

$$\eta_{45} = \eta_t = \frac{1 - T_{5t}/T_{4t}}{1 - (P_{5t}/P_{4t})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$$

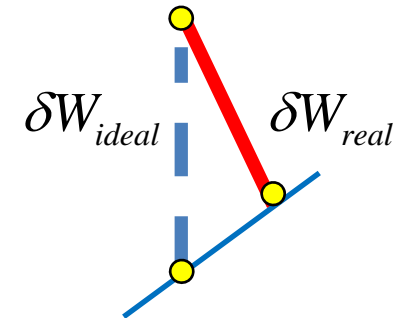


Rendimiento politrópico

Rendimiento politrópico

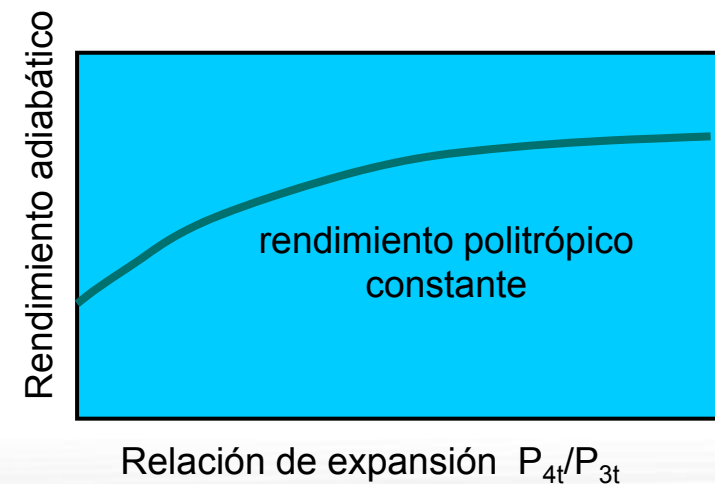
$$e_t = \frac{\delta W_{real}}{\delta W_{ideal}} = \frac{dh_{real}}{dh_{ideal}} = \frac{c_p dT_t}{dh_{ideal}} = \frac{c_p P_t dT_t}{R T_t dP} = \frac{\gamma P_t dT_t}{(\gamma - 1) T_t dP}$$

$$dq + d\varepsilon = dh - dp/\rho \quad p/\rho = RT \quad c_p = \gamma R / (\gamma - 1)$$



$$\frac{dT_t}{T_t} = e_t \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{dP}{P_t} \quad \frac{T_{5t}}{T_{4t}} = \left(\frac{P_{5t}}{P_{4t}} \right)^{e_t \frac{\gamma - 1}{\gamma}}$$

$$\eta_{45} = \frac{1 - T_{5t}/T_{4t}}{1 - \left(P_{5t}/P_{4t} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}} = \frac{1 - \left(P_{5t}/P_{4t} \right)^{e_t \frac{\gamma - 1}{\gamma}}}{1 - \left(P_{5t}/P_{4t} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}}$$



EXPANSIÓN: TOBERA

PROCESO 5-9

Proceso adiabático y sin trabajo

PRIMER PRINCIPIO

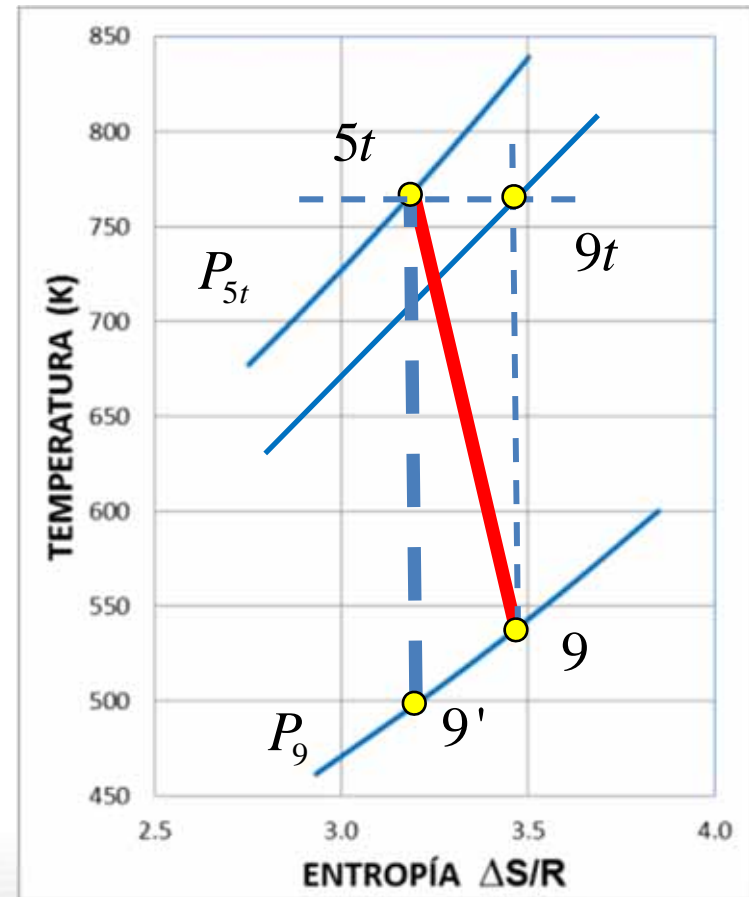
$$\Delta h_t = q + \tau = 0 \quad h_{t5} = h_{t9} \Rightarrow T_{5t} = T_{9t}$$

$$\left. \begin{aligned} c_p T_{9t} &= c_p T_9 + \frac{1}{2} V_9^2 \\ M_9 &= V_9 / \sqrt{\gamma R T_9} \end{aligned} \right\} \frac{T_{5t}}{T_9} = \frac{T_{9t}}{T_9} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_9^2$$

DESCRIPCIÓN DE LAS PERDIDAS

$$\eta_{59} = \frac{h_{5t} - h_9}{h_{5t} - h_{9'}} = \frac{T_{5t} - T_9}{T_{5t} - T_{9'}} = \frac{1 - T_9/T_{5t}}{1 - (P_9/P_{5t})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$$

$$\pi_{59} = \frac{P_{9t}}{P_{5t}}$$



EXPANSIÓN: TOBERA

CONDICIÓN DE SALIDA

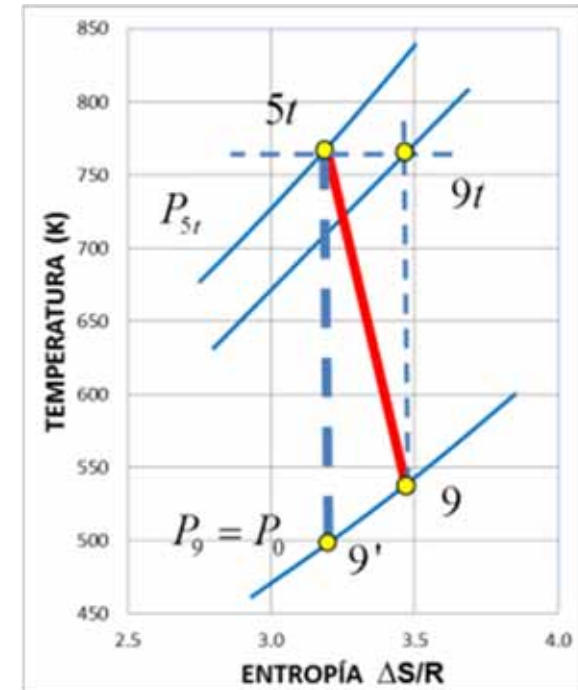
Tobera adaptada: $P_9 = P_0$

$$\frac{T_{5t}}{T_9} = \frac{T_{9t}}{T_9} = \left(\frac{P_{9t}}{P_9}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{P_{9t}}{P_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{\pi_{59} P_{5t}}{P_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\eta_{59} = \frac{1 - T_9/T_{5t}}{1 - (P_0/P_{5t})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$$

$$G_9 = G + c - G_{aux} = \rho_9 V_9 A_9$$

$$\frac{G_9 \sqrt{RT_{9t}}}{A_9 P_{9t}} = (1 + f - g) \frac{G \sqrt{RT_{5t}}}{A_9 \pi_{59} P_{5t}} = \sqrt{\gamma} M_9 \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_9^2\right)^{-\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}$$



ECUACIÓN DE ACOPLAMIENTO

- La turbina del motor tiene la principal misión de proporcionar toda la potencia necesaria para el funcionamiento del motor. La mayor parte de la potencia producida se invierte en el compresor pero también se encarga de todos los elementos auxiliares que permiten el funcionamiento autónomo del turborreactor (bombas de combustible o lubricantes, generadores eléctricos, sistemas neumáticos o hidráulicos, etc.)
- La transmisión de esta potencia se realiza por el eje del motor que se apoya en cojinetes (de bolas o rodamientos) con alto rendimiento mecánico.

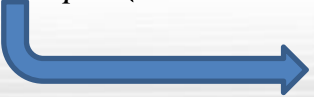
$$W_t = W_c + W_{aux} + W_{disip}$$

$$W_t = (W_c + W_{aux}) / \eta_m$$

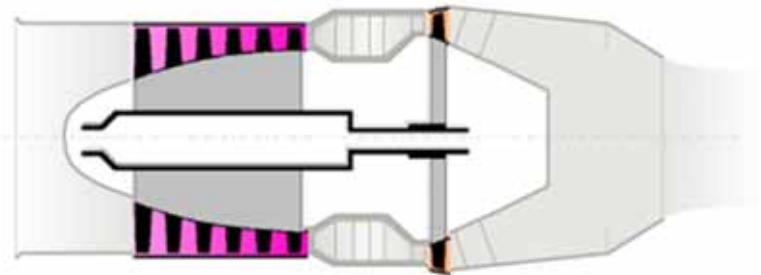
$$W_t = (G + c - G_{aux}) c_{pe} (T_{4t} - T_{5t})$$

$$W_c = G c_{pc} (T_{3t} - T_{2t})$$

$$\eta_m (1 + f - g) c_{pe} (T_{4t} - T_{5t}) = c_{pc} (T_{3t} - T_{2t}) + W_{aux} / G$$



$$(T_{4t} - T_{5t}) \sim (T_{3t} - T_{2t})$$

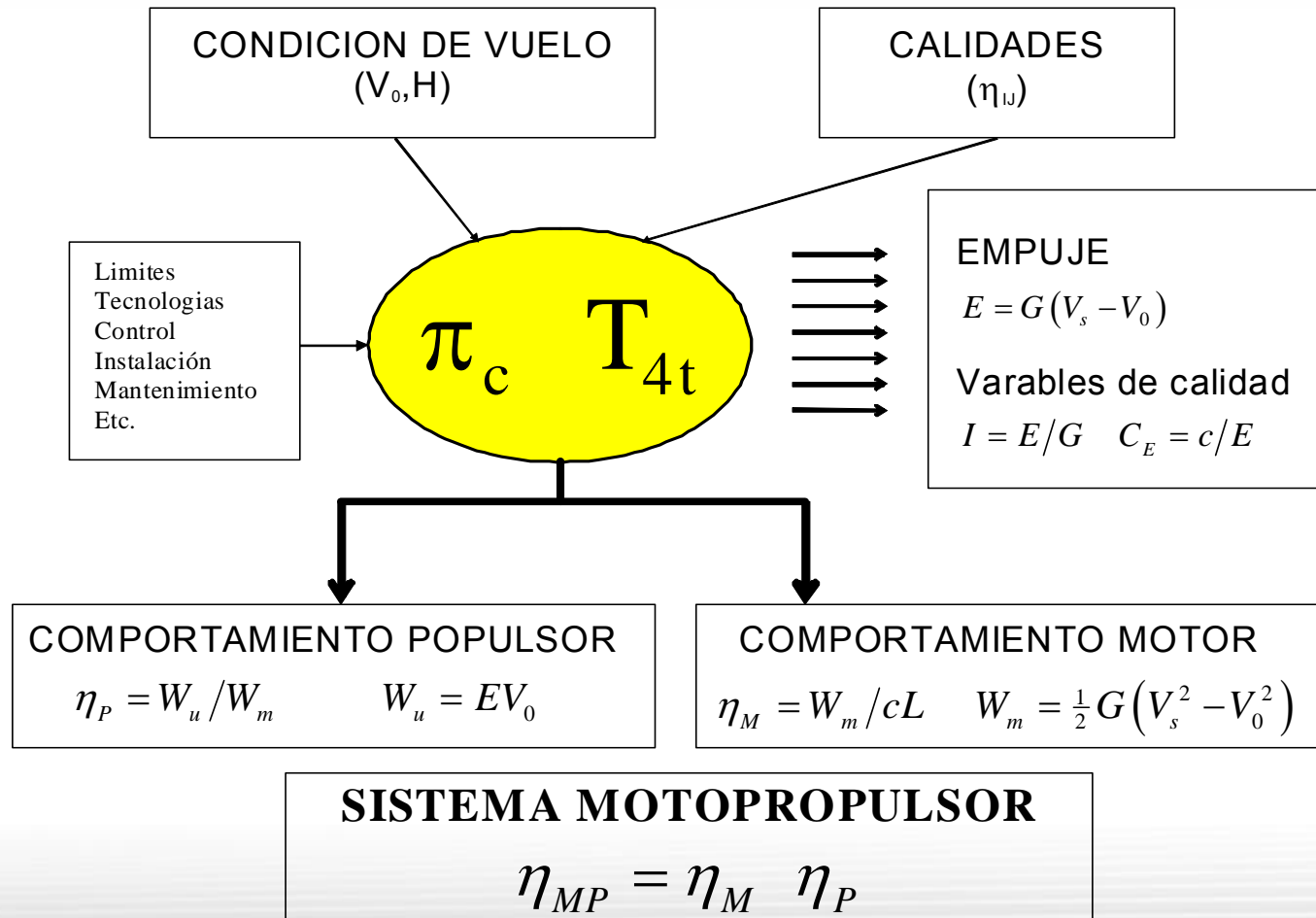


METODOLOGIA DE CALCULO

Evolución	ELEMENTO	Eq.	DATOS DE DISEÑO	DATO DE ENTRADA	CALIDADES	DATO CALCULADO
0-2	DIFUSOR	2	V_0, T_0, P_0		π_{02}	T_{2v}, P_{2t}
2-3	COMPRESOR	3	π_c	T_{2v}, P_{2t}	η_{23}	T_{3v}, P_{3t}, τ_c
3-4	CÁMARA DE COMBUSTIÓN	2	T_{4t}	T_{3v}, P_{3t}	η_q, π_{34}	f, P_{4t}
4-5	TURBINA	1		T_{4v}, P_{4t}	η_{45}	P_{5t}
ECUACIÓN DE ACOPLAMIENTO		1			η_m	T_{5t}
5-9	TOBERA	3		T_{5v}, P_{5t}	π_{59}	T_9, V_9, M_9

Conocimientos del gasto de aire, G , (o una sección de paso como A_9) permite obtener todas las demás cantidades que dependen del tamaño del motor, E, c, W .

RESUMEN DE CALCULO



Ejemplo: Rendimiento motor

(H=0 m, M0=0)

(H=10000 m, M0=0.85)

