



Motores Térmicos. Turboalimentación

Capítulo 9: Hermanamiento turbocompresor-motor. Ecuaciones. (1,5 horas).

Autor: Antonio Lecuona Neumann.

Contenido

- 9.1.- Ecuaciones de hermanamiento.
- 9.2.- Análisis del funcionamiento.
- 9.3.- Resumen y preguntas de autoevaluación.
- 9.4.- Temas adicionales.
- 9.5.- Bibliografía.

La información contenida en este documento sirve de propósito exclusivo como apuntes para alumnos en la enseñanza de la asignatura indicada y ha sido obtenida de las mejores fuentes que se han podido encontrar, generalmente de reconocido prestigio. No obstante el/los autor/es no garantizan la exactitud, exhaustividad, actualización o perfección de su contenido. Por ello no será/n responsable/s de cualquier error, omisión o daño causado por el uso de la información contenida, no tratando con este documento prestar ninguna clase de servicio profesional o técnico; antes bien, se ofrece como simple guía general de apoyo a la docencia. En caso de detectar algún error, rogamos nos lo comunique e intentaremos corregirlo. Puede contener material con copyright © por lo que su reproducción puede no estar permitida.





9.1.- Ecuaciones de hermanamiento.

- En este capítulo se plantean las ecuaciones que permiten hermanar el grupo turbo con el motor al efecto de lograr una turboalimentación convencional que cumpla con parámetros de diseño en operación estacionaria.
- El modelo que se construye a partir de ello se basa en el sistema de presión constante. En el **Cap. 4** se ha demostrado que:
 - Es el sistema de transferencia de energía a la(s) turbina(s) menos eficiente.
 - Es mejorable aprovechando en la medida que se pueda la energía de los pulsos que el motor engendra en la fase de escape espontáneo de cada cilindro. Para tener esto en cuenta se recurrirá a un rendimiento aparente de la turbina, generalmente superior al consignado en las características de catálogo de la turbina. Éste solo se puede estimar por experiencias previas y/o por simulación numérica con acción de ondas en el sistema de escape. En la literatura especializada se dispone de información al efecto, p. e. [1].
 - Se aproxima en eficiencia al sistema ideal cuando el grado de sobrealimentación es alto, **Fig. 4.6**.
 - Es sencillo de calcular y de diseñar.
 - Resulta ineludible para un elevado número de cilindros.





9.1.- Ecuaciones de hermanamiento.

- Balance de masa. A la entrada y salida del motor ha de coincidir el caudal másico con el del turbo:
 - A través del compresor: \dot{m}_a solamente aire ($_a$). Salvo que el EGR sea en baja presión, [Fig. 3.3](#).
 - A través de la turbina: $\dot{m} = \dot{m}_a(1 + F)$, con la composición de gases residuales ($_r$).
 - La turbina puede incorporar cortocircuito, pasando por ella una fracción másica $\Phi \leq 1$.
 - ✓ Solo intervendrían los caudales en las curvas características de compresor y turbina, como se verá.
- El régimen de giro de compresor ha de ser el de turbina. $n_c = n_e$
 - ✓ Solo intervendría en las curvas características, como se verá.
- La presión de admisión ha de coincidir con la que origine el compresor tras la disminución ejercida por la mariposa ($\phi = P_{ad}/P_{4t} \leq 1$, [Fig. 3.3](#)), si existe y otras disminuciones viscosas.
- La presión media de escape del motor P_{es} coincide con la de entrada a la turbina P_5 , [Figs. 3.2 y 3.3](#). Esta suposición no es buena para sistema de pulsos y pocos cilindros.
- Los rendimientos supuestos han de coincidir con los de las curvas características (necesaria una iteración que no vamos a hacer), [Fig. 5.3 o Ec. \(5.8\)](#) para compresor y [Fig. 7.2 o Ec. 7.4](#) para turbina.
- Balance de potencia. La potencia de la turbina menos las pérdidas es la potencia del compresor (balance de energía) en condiciones estacionarias. Se considera una eficiencia mecánica del grupo turbo. Es la ecuación básica.



9.1.- Ecuaciones de hermanamiento (cont.).

- Balance integral basado en balance de potencia:

$$W_c = \eta_{mTC} W_e \Rightarrow \underbrace{\frac{\dot{m}_a \bar{c}_{p,a} T_{2t} \left(\pi_{tt,c}^{(\gamma_c-1)/\gamma_c} - 1 \right)}{\eta_{tt,c}}}_{\text{Ec. (5.3)} \rightarrow W_c} = \eta_{mTC} \underbrace{\eta_{tt,e} \Big|_{ap} \dot{m}_a \Phi (1+F) \bar{c}_{p,es} T_{es} \left(1 - \pi_{tt,e}^{-(\gamma_e-1)/\gamma_e} \right)}_{\text{Ec. (7.3)} \rightarrow W_e}$$

Fracción del caudal a través de la turbina

Rend. mec. eje del turbo

- De donde se obtiene:

$$\underbrace{\Phi \eta_{mTC} \eta_{tt,e} \eta_{tt,c} (1+F) \frac{\bar{c}_{p,es} T_{es}}{\bar{c}_{p,a} T_{2t}}}_{\substack{\doteq \eta_{TC} \\ \text{Eficiencia global} \\ \text{del turbo}}} = \underbrace{\left[\frac{\pi_{tt,c}^{(\gamma_a-1)/\gamma_a} - 1}{1 - \pi_{tt,e}^{-(\gamma_r-1)/\gamma_r}} \right]}_{\substack{\doteq \Gamma \langle \pi_{tt,c}, \pi_{tt,e} \rangle \\ \text{"Lo necesario"}}} \quad (9.2)$$

$\doteq \theta$ "Lo que da el sistema"

9.1.- Ecuaciones de hermanamiento (cont.).

- Expresando la relación de presiones del compresor como función de la de la turbina y pérdidas en el tracto de admisión y de escape, de acuerdo a la Fig. 3.3:

$$\pi_{tt,c} = \frac{P_{3t}}{P_{2t}} \frac{P_{4t}}{P_{4t}} \frac{P_{ad}}{P_{ad}} \frac{P_{es}}{P_{es}} \frac{P_{5t}}{P_{5t}} \frac{P_{6t}}{P_{6t}} \frac{P_{atm}}{P_{atm}} \geq 1; \quad P_{1t} = P_{atm}$$

Admisión :

$P_{ad} / P_{4t} = \phi$; $\phi \leq 1$; grado de admisión.

Filtro de aire y silenciador de ad.: $P_{1t} / P_{2t} \doteq \pi_f \geq 1$

Posenfriador: $P_{3t} / P_{4t} \doteq \pi_{in} \geq 1$

Motor: Ec.(4.11): $\frac{P_{ad}}{P_{es}} \doteq r_a = \frac{P_{ad}}{P'_{ad}} \frac{P'_{ad}}{P'_{es}} \frac{P'_{es}}{P_{es}}$

Escape :

Purificador en alta presión: $P_{es} / P_{5t} \doteq \pi_{pu} \geq 1$

Turbina: $P_{5t} / P_{6t} \doteq \pi_{tt,e} \geq 1$

Silenciador de escape y purific.: $P_{6t} / P_{atm} \doteq \pi_{se} \geq 1$

Coef. de pérdidas
externas al turbo.

$\doteq \pi_{pe} \geq 1$

$$\frac{\pi_{tt,c}}{\pi_{tt,e}} = \frac{r_a \pi_f \pi_{in} \pi_{pu} \pi_{se}}{\phi} = \frac{r_a \pi_{pe}}{\phi} \quad (9.3)$$

9.1.- Ecuaciones de hermanamiento (cont.).

- Para resolver la **Ec. (9.2)** se necesita el incremento de temperatura a través del conjunto del motor ($T_{2t} \cong T_{atm}$ a T_{es}), que depende de varios factores. Ejemplo, a potencia nominal, motores turboalimentados, un valor estimativo:

Tipo de motor	Temperatura de entrada a turbina T_{es} (°C)
Estacionarios a gas natural	530
Diesel industriales de funcionamiento continuo y marinos	650
Diesel industriales de altas prestaciones y de emergencia	650 a 710
Diesel automoción de gran potencia (camiones ...)	< 720
Diesel automoción de pequeña potencia (automóviles ...)	730 a 800
Gasolina de primera generación en la turboalimentación	800 a 1.000
Gasolina de segunda generación (actuales)	900 a 1.100

- Un balance energético experimental del motor en su conjunto puede permitir realizar una mejor predicción de la temperatura de escape, si se dispone de información suficiente.
- El ciclo de dos composiciones permite una aproximación, **Ecs. (4.7)** y siguientes.
- Los valores de γ_a y γ_r para γ_e los proporcionan la **Ec. (4.12)**.



9.1.- Ecuaciones de hermanamiento (cont.).

- La **Ec. (9.2)** implícita permite compatibilizar los tres parámetros, en color distinto:

$$\theta\Phi = \frac{\pi_{tt,c}^{(\gamma_c-1)/\gamma_c} - 1}{1 - \left(\pi_{tt,c} \frac{\phi}{r_a \pi_{pe}} \right)^{-(\gamma_e-1)/\gamma_e}}$$

- Una representación gráfica con valores habituales permite obtener una solución aproximada y estudiar el comportamiento del sistema.



9.1.- Ecuaciones de hermanamiento (cont.).

$$r_a \pi_{pe}/\phi = \pi_{tt,c} / \pi_{tt,e}$$

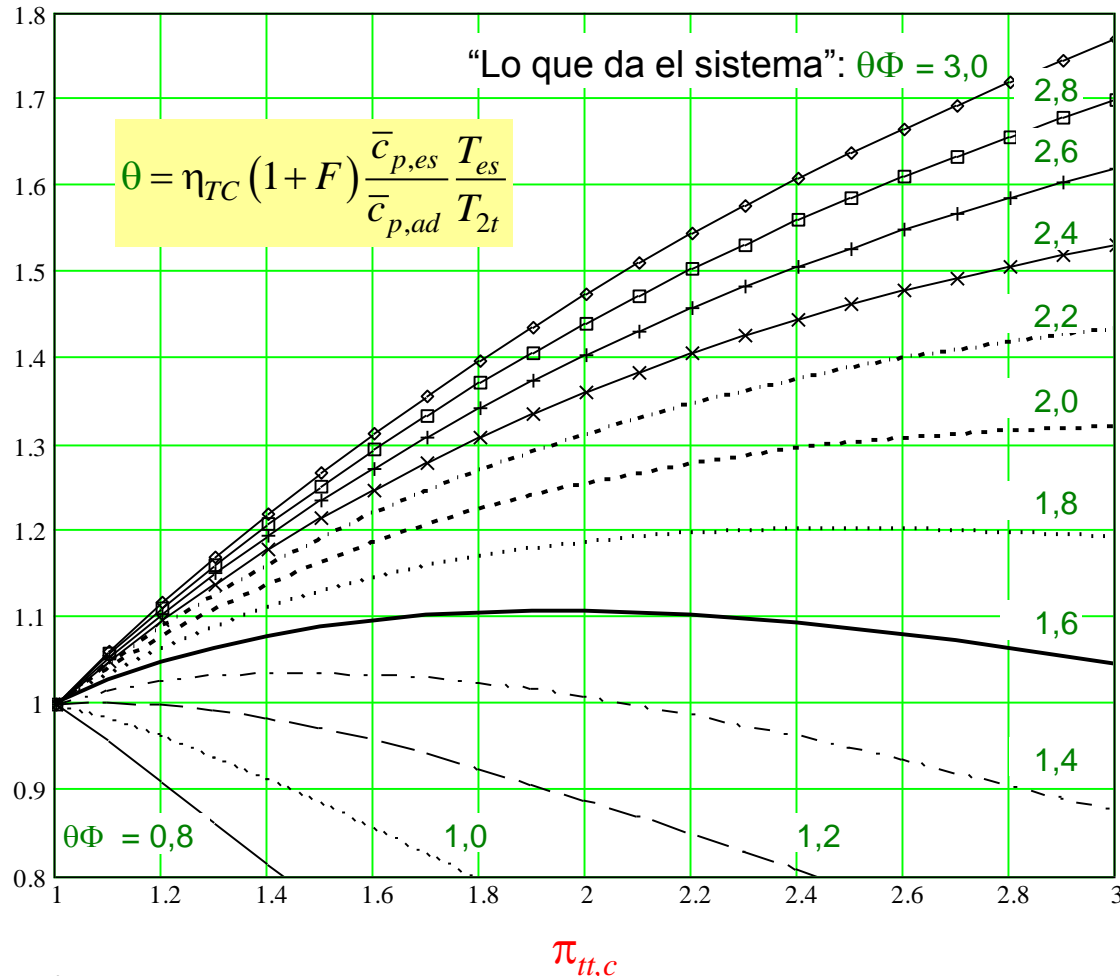


Figura 9.1



9.2.- Análisis del funcionamiento.

- **Ejercicio:** Determinar Φ para: $r_a = 1,06$; $\phi = 1$; $\theta = 1,6$; $\pi_{tt,c} = 2,0$ y $\pi_{pe} = 1,0 \Rightarrow r_a \pi_{pe}/\phi = 1,06$ con $\phi = 1$

No coinciden en un mismo punto con $\Phi = 1$. Hay exceso de potencia.

Soluciones:

I. Con $\Phi = 1$ (cortocircuito cerrado):

1. Con $\pi_{tt,c} = 1,33$ (inestable) y 2,7 (estable), puntos \bullet y \circ .

2. Se puede cerrar la mariposa hasta (punto \times) $\phi = 1,06/1,1 = 0,96$.

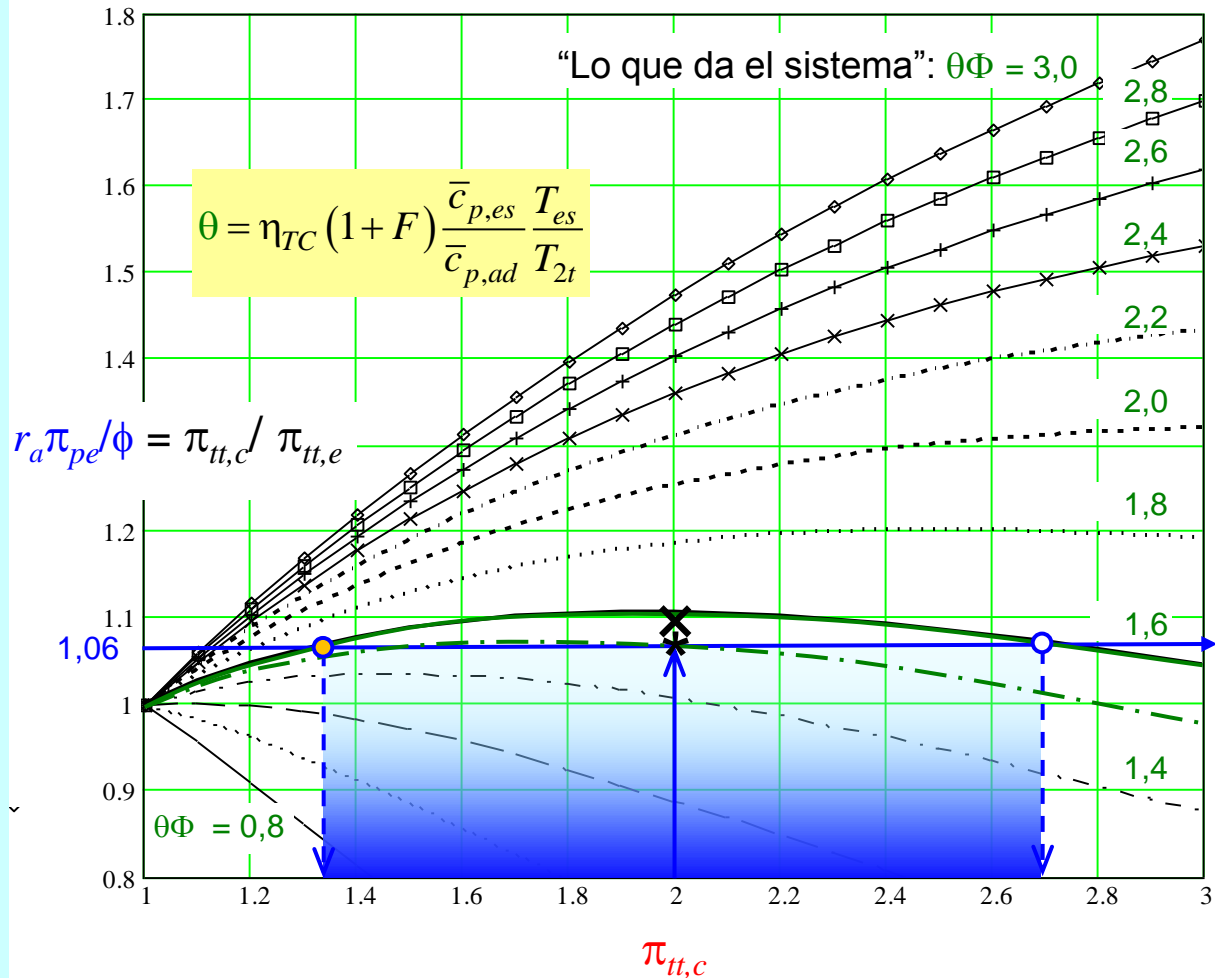
3. Se llega a $r_a = 1,1$ a mariposa abierta (punto \times).

II. Con $\Phi < 1$ (cortocircuito abierto, entremedias, zona azul,). Para

$\pi_{tt,c} = 2$, la curva que pasa por el punto es la de $\theta\Phi = 1,53 < 1,6$

que es el dato, (punto $*$) luego:

$\Phi = (\theta\Phi)_{\text{grafica}}/\theta_{\text{dato}} = 1,53/1,6 = 0,96$.





9.2.- Análisis de funcionamiento (cont.).

- Se observa que valores de $\theta\Phi > 1,2$ originan pendiente positiva en la Fig. 9.1 para $r_a\pi_{pe}/\phi > 1$.
- Ello significa que una perturbación hacia la derecha (aumento de $\pi_{tt,c}$) ocasiona que con $\theta\Phi = \text{cte}$. el turbo da más potencia que lo especificado por $r_a\pi_{pe}/\phi$, con lo que se sigue desplazando hacia la derecha, aumentando ambas π hasta la solución estable en el tramo de curva de pendiente negativa. Lo inverso ocurre con una perturbación hacia la izquierda. El equilibrio indiferente se alcanza con la solución $\theta\Phi$ tal que la pendiente sea horizontal.
- Este fenómeno es el causante de que al aumentar el régimen ligeramente, cuando el motor está a bajo régimen, se produzca un aumento considerable de ambas π , lo cual es apreciable en la Fig. 5.4.
- El punto ● es pues inestable y el punto ○ estable.
- El punto x es indiferente y el punto * es marginalmente estable.





9.2.- Análisis de funcionamiento (cont.).

- El ejercicio anterior muestra que el motor turboalimentado posee más grados de libertad que el motor de aspiración normal.
- La(s) solucio(nes) encontrada(s) han de compatibilizarse con un compresor y una turbina, de catálogo o adaptadas con un “[trimming](#)”, tal que girando a igual régimen y recibiendo el caudal correspondiente, a las presiones y temperaturas correspondientes a la solución, proporcionen en ambas, [Ecs. \(5.8\) y \(7.4\)](#) las mismas π y η supuestas, con n_c como parte de la solución. Alternativamente usando ambos diagramas gráficos de curvas características, [Figs. 5.3 y 7.2](#). En todo caso el punto operativo ha de caer en zona aceptable.
- Caso de no ser así, es necesario iterar e incluso cambiar de turbomáquina. En su caso se añadirá la ecuación adicional del control del turbo y del motor que se haya elegido, pues como se ha visto en el ejercicio, hay varias posibilidades.
- El $\eta_{v,e}$, necesario para calcular \dot{m}_a , [Ec. \(1.5\)](#), depende de T_{ad} y de r_a , [Ec. \(1.5\)](#), por lo que ha de ajustarse durante las iteraciones. Además ρ_{ad} cambiará.





9.3.- Resumen y preguntas de autoevaluación

- Las ecuaciones de hermanamiento permiten obtener la solución al punto de funcionamiento del sistema motor-turbo en régimen estacionario. Una extensión permitiría incluir transitorios.
- La ecuación básica, **Ec. (9.2)**, consiste en la igualdad de la potencia rendida por la turbina a la necesaria por el compresor, tras detraer la disipación mecánica.
 - El exceso de potencia de la turbina con un turbo determinado puede mitigarse fácilmente: a) baipaseando caudal por la turbina, b) cerrando mariposa, c) actuando sobre la geometría variable de la turbina d) extrayendo la potencia.
 - El exceso de potencia puede mitigarse optando por un turbo menos eficiente o mayores pérdidas.
 - La falta de potencia conduce a aceptar una menor r_a .

9.1	El punto de funcionamiento común de motor y turbo es necesario determinarlo por medio de ecuaciones de hermanamiento, al ser máquinas acopladas y distintas	SI
9.2	La solución encontrada puede ser con $r_a > 1$ o < 1 .	SI
9.3	Valores de θ elevados permiten que $r_a > 1$	SI
9.4	El cortocircuito de la turbina ($\Phi < 1$) ocasiona un valor de θ efectivo ($\theta\Phi$) reducido.	SI
9.5	Los MEP, por su menor eficiencia y mayor F que los MEC originan un mayor valor de θ .	SI



9.4.- Temas adicionales

- El retraso en la respuesta del turbo es un fenómeno que pertenece a las actuaciones transitorias, especialmente relevantes en motores de automóvil y de generación eléctrica. En este último caso por la estabilidad de la red eléctrica alimentada.
- Para mitigar el retraso se disponen artilugios que provocan una temperatura y/o presión transitoriamente elevados durante la aceleración, p. e. provocando un F más elevado hasta que el par del motor se estabiliza. Lamentablemente ello ocasiona una subida transitoria de los contaminantes en gases de escape. Alternativamente, se puede cerrar temporalmente la válvula de cortocircuito. Un apoyo eléctrico e hidráulico (con turbina Pelton) se han estudiado, sin que hasta la fecha se hayan comercializado.
- El EGR en alta, Fig. 3.3, reduce el caudal trasegado por el turbo en comparación con el que trasiega el motor, lo que implica usar una turbina más pequeña. La eliminación del EGR a plena carga supone un caudal por el turbo mayor, planteando problemas de hermanamiento.
- En automóviles, la inercia del turbo compromete el freno-motor. Para lograr un freno motor inmediato se puede conectar la salida del turbocompresor con su entrada, con lo que no comprime, pero sigue girando, manteniendo su energía cinética, que queda disponible cuando unos segundos después se desea acelerar.
- Cuando la presión de admisión es exagerada, p. e. en una retención con un automóvil, se alivia ésta con una válvula de alivio “bow-off valve”.





9.5.- Bibliografía

- [1] Watson N. Turbocharging the Internal Combustion Engine. Ed. John Wiley & Sons Inc. 1982, ISBN-10: 0471870722, ISBN-13: 978-0471870722.
- [2] Benson R. S. The thermodynamics and Gas Dynamics of Internal- Combustion Engines, Vols. I y II. Clarendon Press, 1982.
- [3] Baines N. C. Fundamentals of Turbocharging. Ed. John Wiley & Sons Inc. 1982, ISBN-10: 0471870722, ISBN-13: 978-0471870722.

