



Motores Térmicos. Turboalimentación

Capítulo 7: Proceso de expansión. Turbinas de escape. (1/2 hora).

Autor: Antonio Lecuona Neumann

Contenido

- 7.1.- Proceso de expansión en la turbina. Rendimiento.
- 7.2.- Curvas características de turbinas.
- 7.3.- Análisis del funcionamiento.
- 7.4.- Morfología funcional de las turbinas centrípetas.
- 7.5.- Resumen y preguntas de autoevaluación.
- 7.6.- Actividades propuestas.
- 7.7.- Temas adicionales.

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 comuniquemos e intentaremos corregirlo. Puede contener material con copyright © por lo que su reproducción puede no estar permitida.



Este obra está bajo una [licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 3.0 España](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/es/).

7.1.- Proceso de expansión en la turbina. Rendimiento.

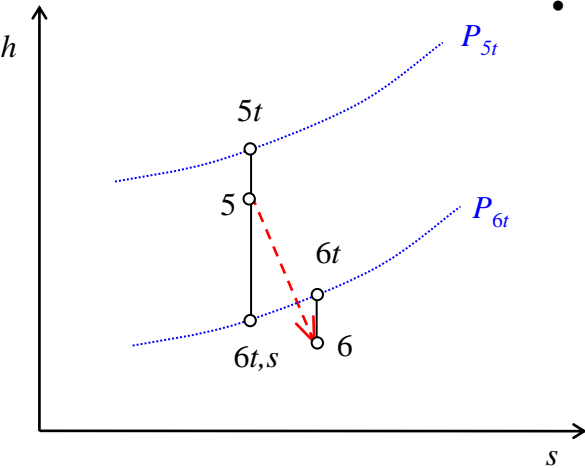
• Hipótesis:

- Flujo irreversible por efecto de la viscosidad y adiabático por la escasa superficie de contacto y el corto tiempo de residencia, entre P_5 y P_6 .
- Flujo estacionario a la entrada y a la salida. No hay fugas de masa.

Entalpía
de
remanso
o total

$$\left. \begin{array}{l} \text{Hipótesis} \\ \text{de flujo} \\ \text{irreversible} \end{array} \right\} \tau_{fl} = h_{5t} - h_{6t} > 0$$

- Para evaluar las irreversibilidades se emplea un rendimiento total a total (dado que el trabajo necesita la entalpía total) $\eta_{tt,e}$ en comparación con la evolución isentrópica ($_s$) entre las mismas presiones totales (para alcanzar las temperaturas totales, que son las determinantes para el trabajo). $\eta_{tt,e}$ ha de ser obtenido de ensayos experimentales.



$$\left. \begin{array}{l} \eta_{tt,e} = W_{fl,e} / W_{fl,e,s} \\ W_{fl,e,s} = \dot{m} \tau_{fl,s} = \dot{m} (h_{5t} - h_{6t,s}) \\ W_{fl,e} = \dot{m} \tau_{fl} = \dot{m} (h_{5t} - h_{6t}) \end{array} \right\} \rightarrow \eta_{tt,e} = \frac{h_{5t} - h_{6t}}{h_{5t} - h_{6t,s}} \quad (7.2)$$

- Añadiendo la hipótesis de gas ideal caloríficamente perfecto (gicp):

$$W_{fl,e} = \dot{m} \underbrace{\eta_{tt,e}}_{\Delta h_{5t}} \underbrace{(h_{5t} - h_{6t,s})}_{\Delta h_{5t,s}} = \dot{m} \eta_{tt,e} \bar{c}_{p,e} T_{5t} (1 - T_{6t,s} / T_{5t}) = \dot{m} \bar{c}_{p,e,s} T_{5t} \eta_{tt,e} \left[1 - \pi_{tt,e}^{-(\gamma_e - 1) / \gamma_e} \right] \quad (7.3)$$

$$\frac{P_{5t}}{P_{6t}} > 1$$

7.2.- Curvas características de turbinas.

- No suelen usarse parámetros adimensionales, sino pseudo-parámetros dimensionales de caudal y de régimen. Véase la Fig. 3.5.
- No aparecen zonas prohibidas, aunque aparece el bloqueo sónico a cada régimen y un régimen máximo.
- Se comportan casi como un orificio.
- Las turbinas centrípetas muestran la particularidad de que al aumentar su régimen de giro aumenta la relación de expansión para un mismo caudal. Está causada por el campo centrípeto en el que la presión sube del centro a la periferia y el gas fluye hacia radios menores, por lo tanto en contra del campo. Ello implica permeabilidad menor a mayor régimen.
- Se obtienen los mayores rendimientos cuando se combina caudal con régimen de giro (para hacer la incidencia al rotor pequeña). Son posibles π de 3 y de 4 con alta eficiencia.
- Si la turbina es mayor, el pseudo-parámetro de caudal es mayor, más permeabilidad.

$$\pi_{tt,e} = \frac{P_{5t}}{P_{6t}}$$

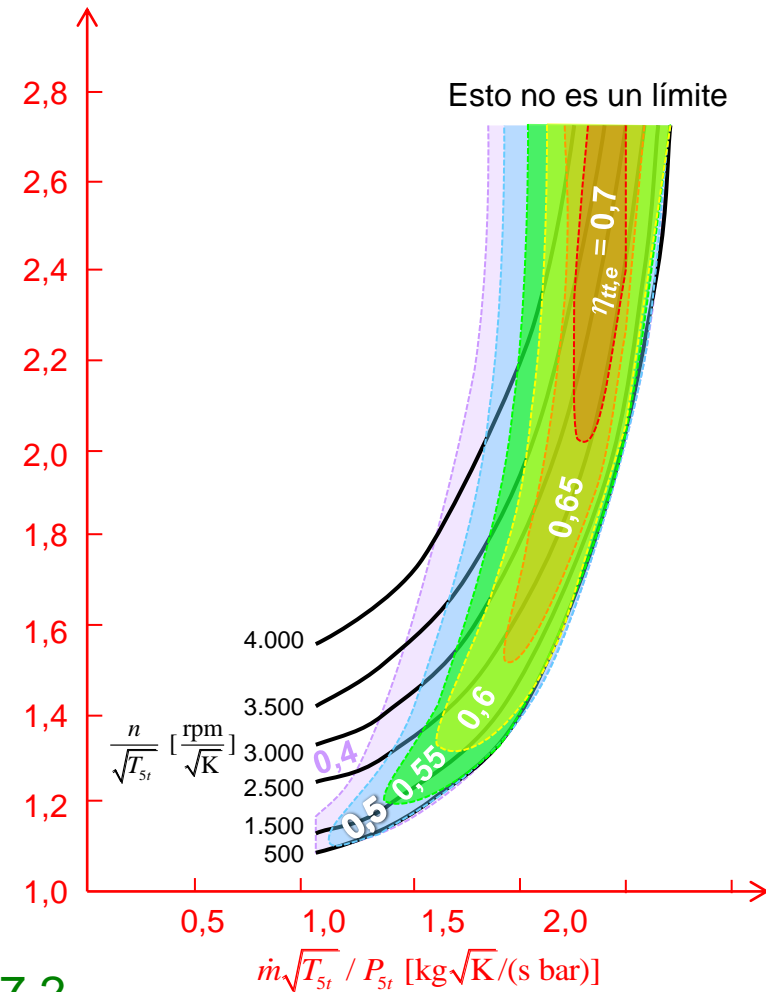


Figura 7.2

7.3.- Análisis del funcionamiento.

- Una vez instaladas en el escape de un motor, salvo que se interponga un depósito de volumen mucho mayor que la cilindrada, la turbina estará sometida a pulsos en el suministro de gas. Se ha podido comprobar que ante un flujo pulsante, la eficiencia media de la turbina tiende a ser mayor que la que le corresponde en el mapa con los valores “medios”, por lo que a menudo se les aplica un rendimiento aparente mayor que el de flujo estacionario. Este efecto es mayor cuando se opera con relaciones de expansión inferiores a las del rendimiento óptimo.
- Las turbinas de geometría variable usan dispositivos que las hacen tener una permeabilidad variable bajo demanda, véase el [Cap. 10](#).
- Las turbinas centrípetas se pueden modificar para obtener relaciones de expansión mayores, aumentando el radio exterior (de entrada) con respecto al radio interior medio (de salida).
- El mapa puede sintetizarse en las dos ecuaciones siguientes:

$$\pi_{tt,e} = \chi_e \left\langle \underbrace{\frac{\dot{m}_e \sqrt{T_{5t}}}{P_{5t}}}_{\text{Pseudo-parámetro de caudal}}, \underbrace{\frac{n_e}{\sqrt{T_{5t}}}}_{\text{Pseudo-parámetro de régimen}} \right\rangle; \quad \eta_{tt,e} = \zeta_e \left\langle \frac{\dot{m}_e \sqrt{T_{5t}}}{P_{5t}}, \frac{n_e}{\sqrt{T_{5t}}} \right\rangle; \text{ Ecs. de límites.} \quad (7.4)$$

7.4.- Morfología funcional de turbinas centrípetas.

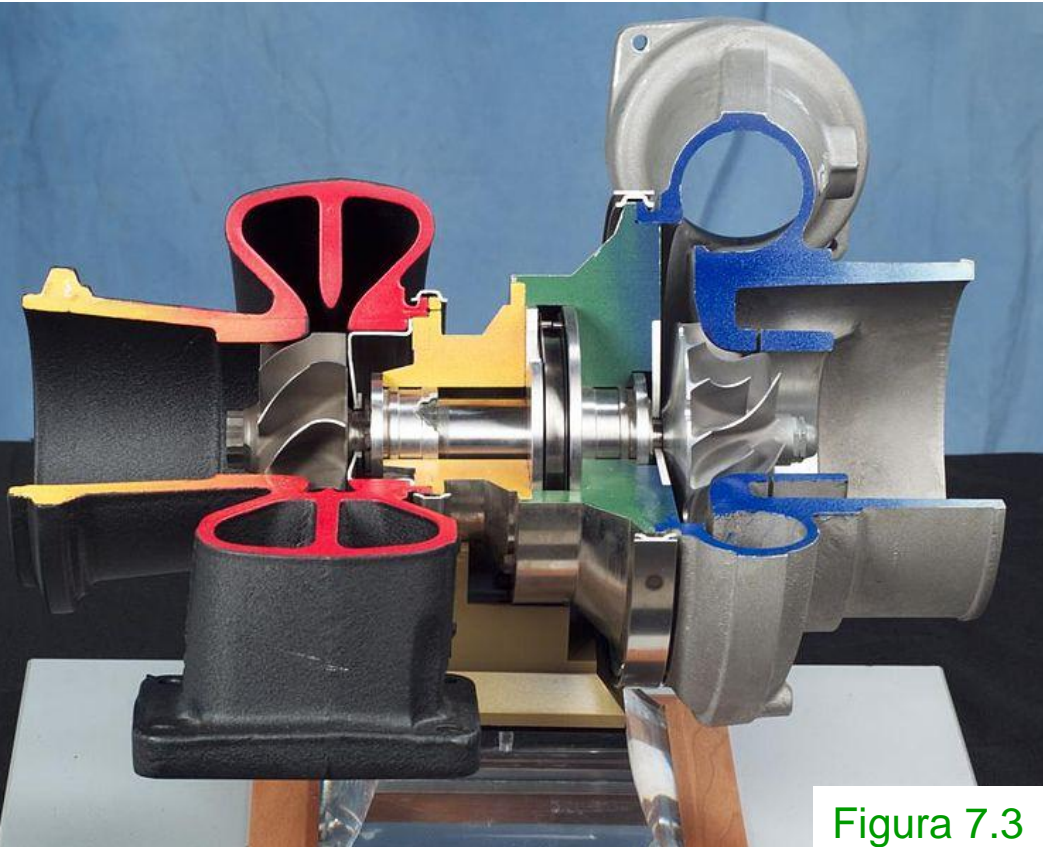


Figura 7.3

- Permiten una adecuada entrada y salida de gases con tubos de diámetro razonable, zona roja y amarilla.
- El caudal se reparte periféricamente a la entrada del rotor con una voluta que puede ser siamesa “twin” para separar los pulsos de unos cilindros sobre otros, como en la figura.
- El rotor tiene álabes radiales a la entrada y curvados hacia atrás a su salida para lograr que la corriente absoluta salga lo más axial posible.
- [Turbinas axiales.](#)

Fuente: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/76/Turbocharger.jpg> accedido el 13 de mayo de 2013.

7.5.- Resumen y preguntas de autoevaluación

- Las turbinas usan la entalpía de los gases que se les suministra para decrecerla (salto entálpico) y con ello extraen potencia en un eje (disminuyendo simultáneamente la presión y la temperatura. Si bien en la entalpía de un gas solo interviene la temperatura, es necesario un π_e para que puedan extraer potencia), [Ec. 7.3](#). La caída de entalpía viene dada por la relación de expansión posible.
- Las turbinas térmicas muestran rendimientos elevados en un rango amplio de relaciones de expansión, pero el caudal correspondiente viene determinado en un intervalo exiguo entre bloqueo y régimen máximo. Una primera aproximación a su curva característica es asumir que se trata de un estrechamiento en la corriente. Ello se corresponde al estator de la turbina, que es un estrechamiento en la corriente para acelerar el flujo y conducirlo al rotor.

7.1	Por las temperaturas típicas de los gases de escape de MACIs, entre 400 °C y 1.000 °C, ¿cree que un buen material para construirlas es la fundición de aceros inoxidables?. Más información .	SI
7.2	Si se trata de un motor $T = 4$ y N cilindros con encendidos equidistantes y colector de escape N en 1, determine el mínimo valor de N que ocasiona apertura de escapes que ocupen todo el intervalo de repetición sin solapamiento entre aperturas.	3
7.3	Como consecuencia de lo anterior, determine para qué números de cilindros N resulta indicada la turbina con estator siamés de la Fig. 7.3 .	4, 5 y 6

7.6.- Actividades propuestas

Actividad 7.1.- Obtenga una expresión que permita calcular la temperatura de salida de la turbina.

Solución: Partiendo de la Ec. (7.2) y asumiendo calor específico igual para la expansión isentrópica y la real, y además constante, resulta:

$$\left. \begin{aligned} \eta_{tt,e} &= \frac{T_{5t} - T_{6t}}{T_{5t} - T_{6t,s}} = \frac{1 - T_{6t} / T_{5t}}{1 - \pi_{tt,e}^{\frac{\gamma_e - 1}{\gamma_e}}} \\ \gamma_e &= \gamma_r \\ \text{Energía cinética despreciable} \\ \text{frente a la térmica} \end{aligned} \right\} \Rightarrow T_6 = T_{es} \left[1 - \eta_e \left(1 - \pi_e^{\frac{\gamma_e - 1}{\gamma_e}} \right) \right]$$

Actividad 7.1.- Si se considera inútil la energía cinética de la corriente a la salida de la turbina (6), obtenga la expresión del rendimiento total a estático, que permita tener en cuenta esa pérdida:

$$\text{Ec. (7.3): } \eta_{t,e} = \frac{h_{5t} - h_6}{h_{5t} - h_{6,s}} = \frac{1 - \frac{T_6}{T_{5t}}}{1 - \left(\frac{P_6}{P_{5t}} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}}$$



7.7.- Temas adicionales

- Las turbinas, al igual que los turbocompresores muestran eficiencias crecientes con el tamaño, al resultar menor el efecto de fugas en el intersticio entre rotor y carcasa, por aumentar el [número de Reynolds](#) del flujo, por resultar mejor el acabado superficial y menores los espesores relativos de los álabes.
- En grandes motores se emplean [turbinas axiales](#), generalmente de un único escalón de expansión. Los tubos de grupos de pocos cilindros (máximo 3 por grupo) atacan periféricamente la turbina, por lo que solo son adecuadas para motores de muchos cilindros $N = \dot{3}$. Alternativamente, la unión de los grupos de cilindros se hace corriente arriba de la turbina, por lo que ésta ha de incorporar un repartidor de caudal periférico para los grupos. Un caso típico son motores de tracción ferroviaria y de generación eléctrica, los cuales pueden llegar a tener hasta 24 cilindros. Otro caso particular es el motor de aviación en estrella que suele tener de 7 hasta 21 cilindros.
- Las prestaciones de las turbinas axiales son similares a las de las centrípetas salvo que desaparece el efecto del régimen en la permeabilidad.
- Actualmente existe una tendencia hacia turbinas de flujo mixto, de configuración intermedia entre turbina centrípeta y turbina axial.
- Las turbinas en grandes motores de gas o Diésel suelen ser del sistema de “presión constante”, véase [Cap. 4](#), por lo que su duración es aumentada al no estar sometidas a pulsos de calor.
- Las turbinas para operar con pulsos no son distintas de las que operan a presión constante.
- Es común el empleo de rendimiento total a estático, en lugar del total a total, pues la energía cinética de la corriente a la salida de la turbina es inútil.