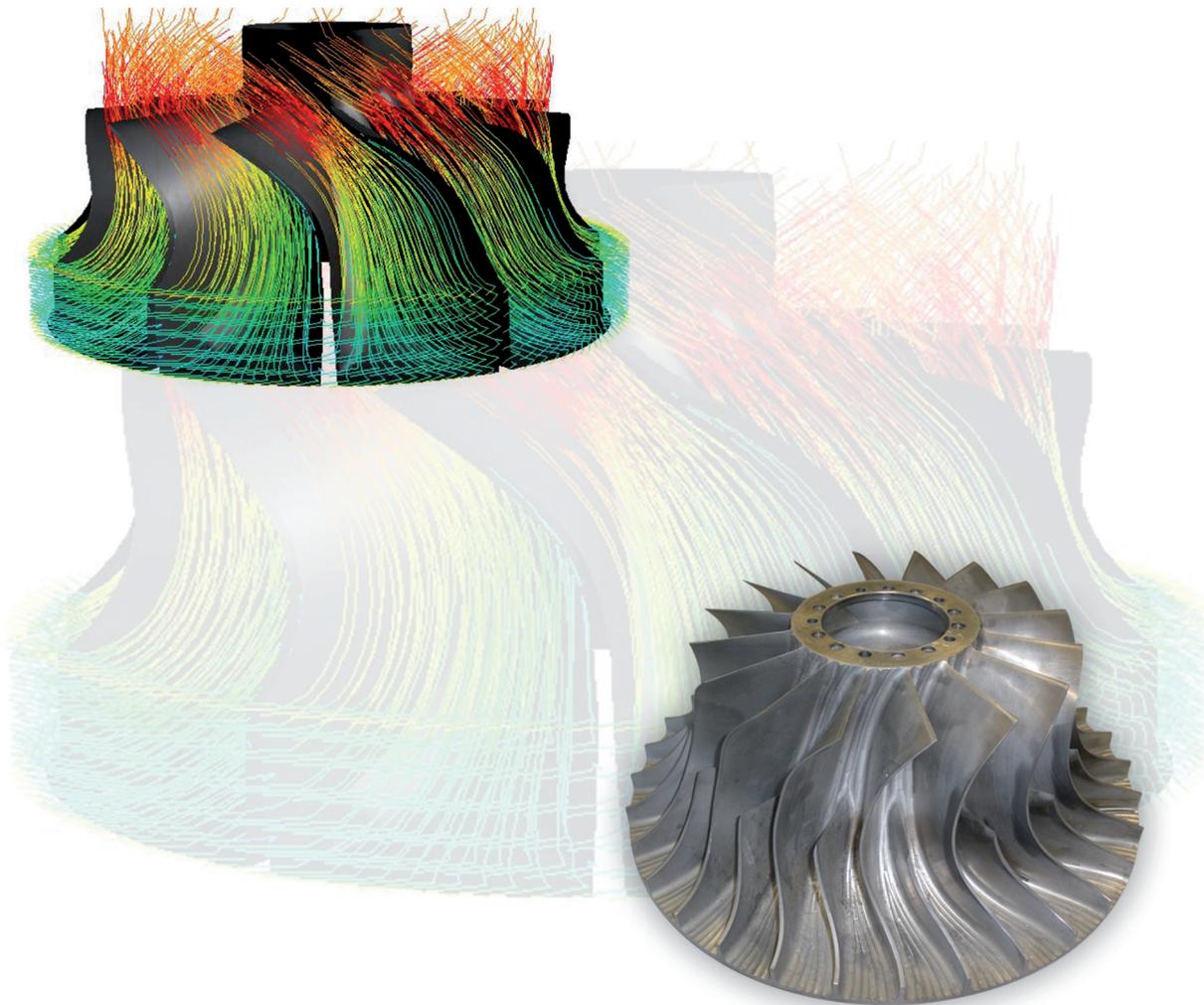


Problemas Resueltos de Flujo Compresible y Turbomáquinas Térmicas

Santiago Ruiz
Pedro Piqueras
José M. García-Oliver
Benjamín Plá



EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Santiago Ruiz (coord.)
Pedro Piqueras
José M. García-Oliver
Benjamín Plá

Problemas resueltos de flujo compresible y turbomáquinas térmicas

**EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**



Esta editorial es miembro de la UNE, lo que garantiza la difusión y comercialización de sus publicaciones a nivel nacional e internacional.

Primera edición, 2008
Segunda edición, 2012

© de la presente edición:
Editorial Universitat Politècnica de València
www.editorial.upv.es

Distribución: pedidos@editorial.upv.es
Tel. 96 387 70 12

© Santiago Ruiz (coord.)
Pedro Piqueras
José M. García-Oliver
Benjamín Pla

Imprime: By print percom sl.

ISBN: 978-84-8363-794-4
Impresión bajo demanda.
Ref. editorial: 196

Queda prohibida la reproducción, distribución, comercialización, transformación, y en general, cualquier otra forma de explotación, por cualquier procedimiento, de todo o parte de los contenidos de esta obra sin autorización expresa y por escrito de sus autores.

Impreso en España

ÍNDICE

P 1. Diseño y funcionamiento de un carburador	3
P 2. Flujo compresible en un conducto de sección constante con aporte de calor.....	7
P 3. Flujo supersónico en un conducto adiabático	11
P 4. Flujo compresible en un conducto aislado.....	19
P 5. Descarga de depósito a alta presión (I).....	23
P 6. Descarga de depósito a alta presión (II).....	35
P 7. Condiciones críticas en una tobera	45
P 8. Flujo en un sistema de EGR.....	55
P 9. Análisis de un escalonamiento de turbina axial de reacción.....	59
P 10. Comparación entre escalonamientos de turbina de acción y de reacción.....	63
P 11. Turbina axial de reacción con varios escalonamientos.....	67
P 12. Escalonamiento de turbina de acción (I).....	73
P 13. Escalonamiento de turbina de acción (II)	83
P 14. Escalonamiento de turbina de acción (III)	95
P 15. Escalonamiento de turbina de acción (IV).....	99
P 16. Escalonamiento de turbina de acción (V).....	109
P 17. Escalonamientos de turbina axial de reacción de alta presión.....	117
P 18. Escalonamiento de turbina axial de reacción de baja presión.....	125
P 19. Escalonamiento de turbina axial de reacción conocido M_{1s}	135
P 20. Escalonamientos de turbina axial contrarrotativa	141
P 21. Escalonamiento de compresor axial (I).....	147
P 22. Escalonamiento de compresor axial (II)	155

P 23. Escalonamiento de turbina centrípeta	163
P 24. Escalonamiento de compresor centrífugo	171
P 25. Equilibrio radial en turbinas (I)	175
P 26. Equilibrio radial en turbinas (II)	181
P 27. Equilibrio radial en compresores	187
P 28. Acoplamiento entre turbina y compresor en una turbina de gas de eje único con carga	197
TABLA DE SÍMBOLOS	205
TABLA DE SUBÍNDICES Y ACRÓNIMOS	207

P 1. Diseño y funcionamiento de un carburador

Se quiere diseñar un carburador sencillo para realizar la mezcla aire–gasolina en un motor estacionario que funciona a un régimen de giro fijo. En la Figura 1 se presenta un esquema de cómo es este sistema.

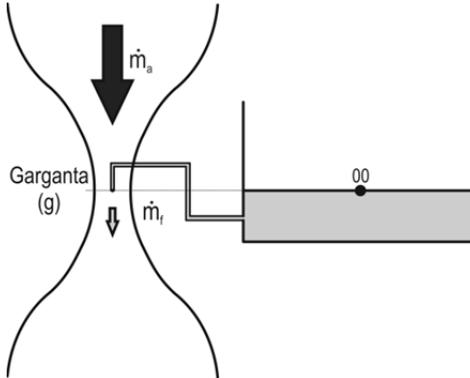


Figura 1: Esquema de funcionamiento de un carburador.

El gasto másico de aire que entra al motor y que pasa previamente por el carburador es de $0.12 \frac{kg}{s}$. Las condiciones atmosféricas son $p_{00} = 1 \text{ bar}$ y $T_{00} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$. Se pide:

- 1) Sabiendo que la mezcla tiene que ser estequiométrica (15 kg de aire por cada kg de gasolina), calcular el gasto másico de gasolina (\dot{m}_f) que debe introducir el carburador.
- 2) Sabiendo que la sección del conducto de gasolina es constante y de valor 2 mm^2 , y que la densidad de la gasolina es de $700 \frac{kg}{m^3}$, calcular la velocidad a la que debe salir la gasolina del conducto.
- 3) Buscar cuál es la presión que debe existir en la garganta del carburador para que se induzca la velocidad que se necesita en la gasolina. Recuerda que para flujos incompresibles se puede aplicar la ecuación de Bernoulli: $p + \rho \frac{c^2}{2} = cte.$
- 4) Hallar las condiciones del fluido en la garganta: ρ_g (o v_g), T_g y c_g .
- 5) Hallar el área en la sección de la garganta.

Nota: El fluido se asume gas perfecto con las propiedades $R = 287 \frac{J}{kgK}$ y $\gamma = 1.4$.

SOLUCIÓN

- 1) Sabiendo que la mezcla tiene que ser estequiométrica (15 kg de aire por cada kg de gasolina), calcular el gasto másico de gasolina (\dot{m}_f) que debe introducir el carburador.

Para estimar el valor del consumo horario de gasolina se recurrirá a la relación estequiométrica aire-gasolina de la mezcla, es decir:

$$F_e = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} \Rightarrow \frac{1}{15} = \frac{\dot{m}_f}{0.12} \Rightarrow \dot{m}_f = \frac{0.12}{15} = 0.008 \frac{kg}{s}$$

- 2) Sabiendo que la sección del conducto de gasolina es constante y de valor 2 mm^2 , y que la densidad de la gasolina es de $700 \frac{kg}{m^3}$, calcular la velocidad a la que debe salir la gasolina del conducto.

Aplicando la ecuación de continuidad al flujo de gasolina se debe cumplir que:

$$\dot{m}_f = (\rho c A)_f \Rightarrow c_f = \frac{\dot{m}_f}{(\rho A)_f}$$

de donde se obtiene que:

$$c_f = \frac{0.008}{700 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 5.714 \frac{kg}{s}$$

- 3) Buscar cuál es la presión que debe existir en la garganta del carburador para que se induzca la velocidad que se necesita en la gasolina. Recuerda que para flujos incompresibles se puede aplicar la ecuación de Bernoulli: $p + \rho \frac{c^2}{2} = cte$.

La gasolina se considera como un fluido incompresible. Aplicando la conservación de la energía entre los puntos inicial y el final del conducto, y si se asume que no existen pérdidas en toda la trayectoria recorrida por la gasolina, se puede escribir que:

$$Be_{00} = Be_g \Rightarrow \left(p + \rho \frac{c^2}{2} \right)_{00} = \left(p + \rho \frac{c^2}{2} \right)_g$$

Donde el subíndice g representa la garganta. Como en el depósito de la gasolina la velocidad es nula entonces:

$$p_g = p_{00} - \left(\rho \frac{c^2}{2} \right)_g$$

Por lo tanto:

$$p_g = 1 \cdot 10^5 - \left(700 \cdot \frac{5.714^2}{2} \right) = 88572.6 \text{ Pa} \equiv 0.886 \text{ bar}$$

4) Hallar las condiciones del fluido en la garganta: ρ_g (o v_g), T_g y c_g .

Asumiendo que el proceso es ideal, entonces se tiene un derrame adiabático en el carburador (venturi). Por lo tanto, se cumplen las relaciones de los procesos adiabáticos para gases ideales, es decir:

$$\frac{T_g}{T_{00}} = \left(\frac{p_g}{p_{00}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \Rightarrow T_g = T_{00} \left(\frac{p_g}{p_{00}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

Sustituyendo valores se obtiene que:

$$T_g = 293 \cdot \left(\frac{0.886}{1} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 283 \text{ K}$$

Para obtener la densidad en la garganta, a partir de la expresión de los gases ideales se obtiene el volumen específico del gas

$$pv = RT \Rightarrow v_g = \frac{RT_g}{p_g} = \frac{287 \cdot 283}{88572.6} = 0.917 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

y como $\rho = \frac{1}{v}$ entonces:

$$\rho_g = \frac{1}{0.917} = 1.09 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Finalmente, la variación de entalpía de la mezcla desde el punto de partida hasta la garganta del carburador se calculará como:

$$dh = c_p dT \Rightarrow \Delta h = c_p \Delta T \Rightarrow h_{00} - h_g = c_p (T_{00} - T_g)$$

Asumiendo que el fluido se comporta como un gas perfecto entonces $h = c_p T$, el calor específico a presión constante se obtiene como:

$$\left. \begin{array}{l} c_p - c_v = R \\ \frac{c_p}{c_v} = \gamma \end{array} \right\} \rightarrow c_v = \frac{R}{\gamma - 1} = \frac{287}{1.4 - 1} = 717.5 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$$

$$c_p = R + c_v = 287 + 717.5 = 1004.5 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$$

Sustituyendo los valores correspondientes se obtiene:

$$h_{00} - h_g = 1004.5 \cdot (293 - 283) = 10.045 \frac{kJ}{kg}$$

De esta forma, la velocidad del flujo en la garganta resulta:

$$h_{00} - h_g = \frac{c_g^2}{2} \Rightarrow c_g = \sqrt{2(h_{00} - h_g)} = \sqrt{2 \cdot 10045} = 141.74 \frac{m}{s}$$

5) Hallar el área en la sección de la garganta.

A partir de la ecuación de continuidad aplicada al carburador se tiene que:

$$\dot{m} = (\rho c A)_g \Rightarrow A_g = \frac{\dot{m}}{(\rho c)_g} = \left(\frac{v}{c}\right)_g \dot{m}$$

y sustituyendo los valores numéricos correspondientes:

$$A_g = \frac{0.917 \cdot 0.12}{141.626} = 7.769 \cdot 10^{-4} m^2 \equiv 776.9 mm^2$$

P 2. Flujo compresible en un conducto de sección constante con aporte de calor

Por un conducto de sección constante circula aire. Las condiciones del fluido en la estación de entrada 1 son:

- $M_1 = 0.2$
- $p_1 = 1 \text{ bar}$
- $T_1 = 273 \text{ K}$

Determinar las condiciones en una estación 2 si se aporta al aire una cantidad total de calor por unidad de masa q de $10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$.

Nota: El fluido se asume gas perfecto con las propiedades $R = 287 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$, $\gamma = 1.4$ y $c_p = 1004.5 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$.

SOLUCIÓN

Para la resolución del problema se comenzará calculando las condiciones de parada a la entrada del conducto a partir de los valores indicados en el enunciado:

$$T_{01} = T_1 \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_1^2 \right) = 275.2 \text{ K}$$

$$p_{01} = p_1 \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_1^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} = 1.028 \text{ bar}$$

Por su parte, la velocidad del fluido a la entrada del conducto puede calcularse a partir del número de Mach y la temperatura de entrada como:

$$c_1 = M_1 a_1 = M_1 \sqrt{\gamma R T_1} = 66.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Finalmente, la densidad del fluido a la entrada de la conducción será:

$$\rho_1 = \frac{p_1}{R T_1} = 1.276 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Una vez conocidas las condiciones de parada a la entrada del conducto, el balance energético puede emplearse para calcular la temperatura de parada a la salida de acuerdo con la siguiente expresión:

$$q = h_{02} - h_{01} = c_p (T_{02} - T_{01})$$

Luego:

$$T_{02} = \frac{q}{c_p} + T_{01} = 1271 \text{ K}$$

A continuación se debe calcular el valor del número de Mach en la estación 2 (M_2). Para ello se utiliza la curva de Rayleigh. Combinando las ecuaciones de conservación del momento y de la masa, se llega a la siguiente expresión:

$$\frac{T_{02}}{T_{01}} = \left(\frac{1 + \gamma M_1^2}{1 + \gamma M_2^2} \right)^2 \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^2 \frac{1 + \left(\frac{\gamma - 1}{2} \right) M_2^2}{1 + \left(\frac{\gamma - 1}{2} \right) M_1^2}$$

La única incógnita en la ecuación anterior es M_2 . Desafortunadamente, a partir de la expresión anterior no es posible obtener M_2 de forma explícita, por lo que es necesario emplear algún método iterativo, por ejemplo el método del intervalo mitad:

$$\left. \begin{aligned} \Delta - \frac{T_{01}}{T_{02}} &= \varepsilon \quad \Delta = \Delta(M_1, M_2) \\ M_2 &\rightarrow \text{acotado entre 0.2 y 1} \\ (M_2)_1 &\text{ si } \varepsilon > 0 \quad (M_2)_2 < (M_2)_1 \\ (M_2)_1 &\text{ si } \varepsilon < 0 \quad (M_2)_2 > (M_2)_1 \end{aligned} \right\} \rightarrow M_2 \approx 0.585$$

Una vez determinado M_2 se obtienen el resto de variables en la estación 2:

$$\left\{ \begin{aligned} T_2 &= \frac{T_{02}}{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_2^2} = 1190 \text{ K} \\ p_2 &= p_1 \frac{1 + \gamma M_1^2}{1 + \gamma M_2^2} = 0.714 \text{ bar} \\ p_{02} &= p_2 \left(\frac{T_2}{T_{02}} \right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = 0.9 \text{ bar} \\ c_2 &= M_2 \sqrt{\gamma R T_2} = 404.5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ \rho_2 &= \frac{p_2}{R T_2} = 0.21 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \end{aligned} \right.$$

y finalmente se determina que la variación de entropía es:

$$\Delta s = c_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) = 1.57 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

P 3. Flujo supersónico en un conducto adiabático

Una tubería de sección constante tiene un diámetro de 28.6 mm y un coeficiente de fricción $f = 0.0025$. Suponiendo que un flujo adiabático no isentrópico de aire discurre por el interior de la tubería y suponiendo que el número de Mach en la sección de entrada es de $M_1 = 2.39$, determinar:

- 1) La longitud máxima posible de la tubería para obtener condiciones críticas en la sección de salida, manteniendo flujo supersónico en toda la tubería. Determinar la relación de presiones de parada entre las secciones de entrada y de salida.
- 2) La longitud de la tubería necesaria para frenar el fluido hasta $M_2 = 1.3$. Determinar la relación de presiones de parada entre las secciones de entrada y de salida.
- 3) Si la tubería tiene una longitud $L = 300 \text{ mm}$ y se establece una onda de choque 200 mm aguas abajo de la entrada, determinar el número de Mach en la salida de la tubería, la relación de presiones y la relación de presiones de parada entre las secciones de salida y de entrada.
- 4) Con las condiciones del apartado anterior, determinar la longitud del tubo necesaria a partir de la onda de choque para alcanzar condiciones sónicas en la sección de salida y la relación de presiones de parada entre las secciones de salida y de entrada.

Nota: El fluido se asume gas perfecto con las propiedades $R = 287 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$ y $\gamma = 1.4$.

SOLUCIÓN

- 1) **La longitud máxima posible de la tubería para obtener condiciones críticas en la sección de salida, manteniendo flujo supersónico en toda la tubería. Determinar la relación de presiones de parada entre las secciones de entrada y de salida.**

Los esquemas de la tubería junto con el correspondiente diagrama h - s se han representado en la Figura 2:

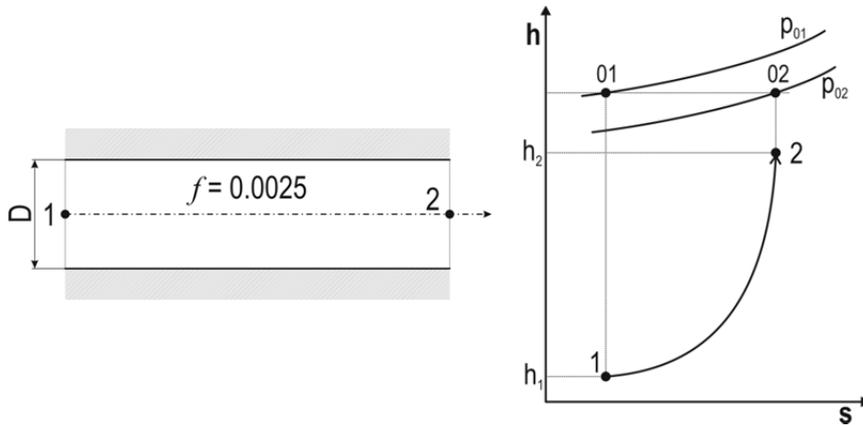


Figura 2: Esquema del conducto (izquierda) y diagrama h - s de evolución del fluido (derecha).

Se trata de un problema de flujo con fricción por una tubería de sección constante. Para su resolución se utilizarán las curvas de Fanno.

La longitud máxima manteniendo flujo supersónico en toda la tubería y condiciones críticas en la sección salida se da para $M_2 = 1$.

Si se conoce el coeficiente de fricción, el diámetro y el M_2 la longitud máxima puede obtenerse de la expresión

$$\frac{4f}{D} L_{max} = \frac{1}{\gamma} \left[\frac{1 - M_1^2}{M_1^2} + \frac{\gamma + 1}{2} \ln \left(\frac{\frac{\gamma + 1}{2} M_1^2}{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_1^2} \right) \right] \rightarrow L_{max} = 1.166 \text{ m}$$

Para el cálculo de la relación de presiones de parada entre la entrada y la salida se aplica la siguiente expresión:

$$\frac{p_{01}}{p_{02}} = \frac{1}{M_1} \left(\frac{2 + (\gamma - 1)M_1^2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} = 2.38$$

En procesos con fricción la presión de parada disminuye. Una forma de acelerar o frenar un fluido es a través de la fricción en flujo subsónico o supersónico pero considerando que la relación de presiones de parada es desfavorable, es decir, el proceso no es eficiente.

2) La longitud de la tubería necesaria para frenar el fluido hasta $M_2 = 1.3$. Determinar la relación de presiones de parada entre las secciones de entrada y de salida.

El esquema de la tubería junto con el diagrama $h-s$ serían los mismos del caso anterior con la salvedad de que la longitud de la tubería en este apartado será menor que la máxima calculada en el apartado anterior ya que M_2 en este caso es 1.3. Hay dos caminos para resolver este apartado:

a) Usar la siguiente expresión:

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{4f}{D} dx = \left[-\frac{1}{\gamma M^2} - \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \ln \left(\frac{M^2}{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2} \right) \right]_{M_1}^{M_2}$$

Integrando el primer miembro se obtiene $\frac{4f}{D} L_{12}$, y como se conocen $M_1 = 2.39$ y $M_2 = 1.3$ el problema está determinado.

b) Se emplea la siguiente expresión, que proporciona la longitud a la que se alcanzarían las condiciones críticas:

$$\frac{4f}{D} L_{max} = \frac{1}{\gamma} \left[\frac{1 - M^2}{M^2} + \frac{\gamma + 1}{2} \ln \left(\frac{\frac{\gamma + 1}{2} M^2}{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2} \right) \right]$$

particularizándola para $M_1 = 2.39$ y $M_2 = 1.3$. A continuación se realiza la diferencia entre ambos resultados:

$$\frac{4f}{D} L_{12} = \frac{4f}{D} L_{max} \Big|_{M_1=2.39} - \frac{4f}{D} L_{max} \Big|_{M_2=1.3} = 0.343$$

Conocidos el diámetro y el coeficiente de fricción, se obtiene la longitud L_{12} :

$$L_{12} = 0.98 \text{ m}$$

El cálculo de la relación de presiones de parada entre las secciones de entrada y de salida se realiza mediante la siguiente expresión:

$$\frac{p_{01}}{p_{02}} = \frac{M_2}{M_1} \left(\frac{2 + (\gamma - 1)M_1^2}{2 + (\gamma - 1)M_2^2} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} = 2.23$$

Los resultados son razonables puesto que $L_{12} < L_{max}$ y p_{02} del apartado 2) es mayor al valor de p_{02} obtenido en el apartado 1).

El esquema de la longitud de la tubería sería el mostrado en la Figura 3:

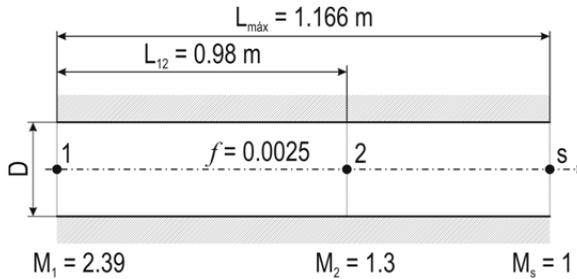


Figura 3: Esquema de la tubería con las longitudes características analizadas.

- 3) Si la tubería tiene una longitud $L = 300 \text{ mm}$ y se establece una onda de choque 200 mm aguas abajo de la entrada, determinar el número de Mach en la salida de la tubería, la relación de presiones y la relación de presiones de parada entre las secciones de salida y de entrada.

El esquema de la tubería junto con su diagrama $h-s$ sería el representado en la Figura 4:

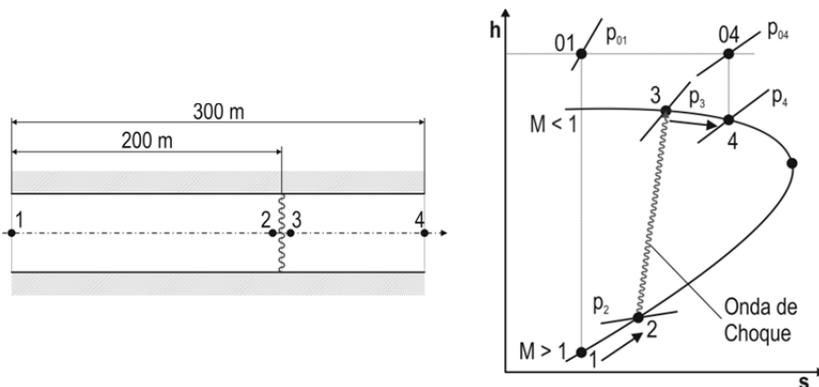


Figura 4: Esquema con la situación de la onda de choque en la tubería (izquierda) y diagrama $h-s$ de evolución del fluido (derecha).

Para resolver el problema se debe calcular el número de Mach en cada una de las estaciones indicadas.

Se conoce el valor de la condición $L_{max,M_1} = 1.166 \text{ m}$ y la distancia a la que se produce la onda de choque, que es de 0.2 m , así que se calcula el valor de L_{max,M_2} como:

$$\frac{4f}{D} L_{max} \Big|_{M_1=2.39} = \frac{4f}{D} \cdot 0.2 + \frac{4f}{D} L_{max} \Big|_{M_2=?}$$

$$L_{max,M_2} = L_{max,M_1} - 0.2 = 1.166 - 0.2 = 0.966 \text{ m}$$

Por otra parte, se tiene que:

$$\frac{4f}{D} L_{max} \Big|_{M_2} = \frac{1}{\gamma} \left[\frac{1 - M_2^2}{M_2^2} + \frac{\gamma + 1}{2} \ln \left(\frac{\frac{\gamma + 1}{2} M_2^2}{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_2^2} \right) \right]$$

Resolviendo en la expresión anterior se obtiene el valor final:

$$M_2 = 2.114$$

Para el cálculo del número de Mach tras la onda de choque M_3 se emplea la siguiente expresión:

$$M_3^2 = \frac{1 + \frac{\gamma + 1}{2} M_2^2}{\gamma M_2^2 - \frac{\gamma + 1}{2}} \rightarrow M_3 = 0.559$$

Para el cálculo de M_4 en primer lugar se obtiene:

$$\frac{4f}{D} L_{max} \Big|_{M_3=0.559} = 0.677$$

Se conoce la longitud total de la tubería y la distancia desde el inicio de la tubería hasta la onda de choque, con lo que se tiene la distancia entre las estaciones 3 y 4, que es de 0.1 m .

Se realiza la diferencia entre las estaciones 3 y 4:

$$\frac{4f}{D} L_{max} \Big|_{M_3} = \frac{4f}{D} \cdot 0.1 + \frac{4f}{D} L_{max} \Big|_{M_4=?} \Rightarrow \frac{4f}{D} L_{max} \Big|_{M_4=?} = 0.6427$$

Finalmente se obtiene:

$$\frac{4f}{D} L_{max} \Big|_{M_4} = \frac{1}{\gamma} \left[\frac{1 - M_4^2}{M_4^2} + \frac{\gamma + 1}{2} \ln \left(\frac{\frac{\gamma + 1}{2} M_4^2}{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_4^2} \right) \right] \rightarrow M_4 = 0.566$$

Una vez calculados los números de Mach en cada estación, cualquier parámetro termodinámico y cinético es calculable. Así la relación de presiones resulta:

$$\frac{p_4}{p_3} = \frac{M_3}{M_4} \left(\frac{2 + (\gamma - 1)M_3^2}{2 + (\gamma - 1)M_4^2} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.987 \rightarrow \text{Régimen subsónico}$$

$$\frac{p_3}{p_2} = 1 + \left(\frac{2\gamma}{\gamma + 1} \right) (M_2^2 - 1) = 5.047 \rightarrow \text{Onda de choque}$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{M_1}{M_2} \left(\frac{2 + (\gamma - 1)M_1^2}{2 + (\gamma - 1)M_2^2} \right)^{\frac{1}{2}} = 1.203 \rightarrow \text{Régimen supersónico}$$

y como se cumple que:

$$\frac{p_4}{p_1} = \frac{p_4}{p_3} \frac{p_3}{p_2} \frac{p_2}{p_1} = 5.99$$

La relación de presiones de parada entre las secciones de entrada y salida posee el siguiente valor:

$$\frac{p_{04}}{p_{01}} = \frac{p_4}{p_1} \left(\frac{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_4^2}{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_1^2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} = 5.99 \cdot 0.086 \Rightarrow \frac{p_{04}}{p_{01}} = 0.51$$

Aunque $p_4 > p_1$ y el fluido se ha comprimido fuertemente, $p_{04} < p_{01}$ como consecuencia de las irreversibilidades del proceso.

- 4) Con las condiciones del apartado anterior, determinar la longitud del tubo necesaria a partir de la onda de choque para alcanzar condiciones sónicas en la sección de salida y la relación de presiones de parada entre las secciones de salida y de entrada.**

Se calcula la longitud L_{max} en la estación 4 con las condiciones del apartado anterior:

$$\left. \frac{4f}{D} L_{max} \right|_{M_4=0.566} = 0.6427 \rightarrow L_{max} = 1.838 \text{ m}$$

Así que la longitud total es:

$$L_{Total} = 1.838 + 0.3 = 2.138 \text{ m}$$

Para el cálculo de las relaciones de presiones se denomina estación 5 a la nueva sección de salida:

$$\frac{p_5}{p_3} = M_3 \left(\frac{2 + (\gamma - 1)M_3^2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.526$$

$$\frac{p_5}{p_1} = 0.526 \cdot 5.047 \cdot 1.203 = 3.19$$

La relación de presiones es menor que en el apartado anterior como consecuencia de la expansión que tiene lugar en la rama subsónica.

Por último se calcula la relación de presiones de parada:

$$\frac{p_{05}}{p_{01}} = \frac{p_5}{p_1} \left(\frac{\frac{\gamma - 1}{2}}{1 + \frac{\gamma + 1}{2} M_1^2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} = 0.42 \Rightarrow \frac{p_{01}}{p_{05}} = 2.38$$

La relación de presiones de parada es mayor que el apartado anterior como consecuencia del incremento en las pérdidas al aumentar la longitud del conducto.

Para seguir leyendo haga click aquí