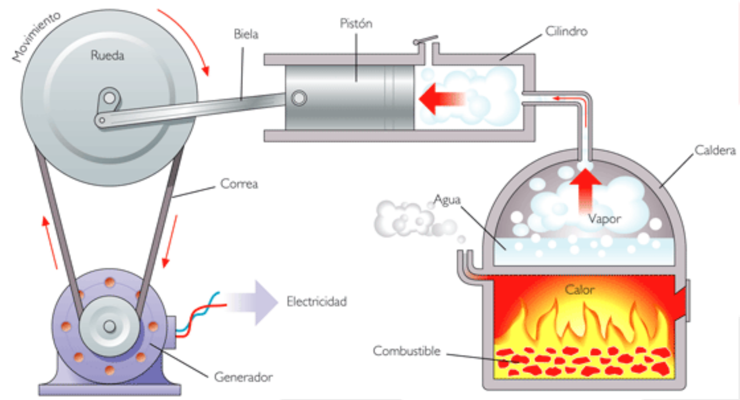
Tema 6. Flujo Compresible



1. Introducción
2. Modelos básicos de flujo compresible
   2.1. Flujo estacionario adiabático
   2.2. Flujo estacionario isentrópico
   2.3. Flujo isotermo
3. Cálculo de la potencia necesaria para el flujo compresible isotermo

Alicia García Sánchez

Universidad Rey Juan Carlos

1. Introducción

Estudio del flujo de gases por el interior de conducciones

DIFERENCIA FUNDAMENTAL CON FLUJO DE LÍQUIDOS: Densidad variable con la *presión*, y cambios sensibles con la *temperatura*.

PROBLEMAS: Cálculo de la potencia necesaria para la impulsión de gases por la conducción y condiciones de velocidad, presión y temperatura a lo largo de la tubería.

EJEMPLOS DE APLICACIONES:

- Impulsión de gas natural por gaseoductos.
- Potencia para la distribución de gas en ciudades.
- Potencia para impulsar gases a través de lechos filtrantes o adsorbentes.
- Cálculo del tamaño de tuberías.

1. Introducción

Flujo Compresible

Variaciones de densidad apreciables con la presión y la temperatura → **Ecuación de estado**

$$m = \rho V A = \rho Q = cte$$

Ecuaciones: **Continuidad + cantidad de movimiento + energía + estado**

Incógnitas: ***P, ρ, T, V***

Modelos de flujo: **Adiabático, isentrópico, isotermo**.

NÚMERO DE MACH (*Ma*) $$Ma = \frac{V}{c}$$ Número adimensional (Velocidad del fluido/velocidad del sonido en ese fluido)

CLASIFICACIÓN DEL FLUJO

Ma < 0,3 → Flujo incompresible

0,3 < ***Ma*** < 0,8 → Flujo subsónico

0,8 < ***Ma*** < 1,2 → Flujo transónico

1,2 < ***Ma*** < 3,0 → Flujo supersónico

3,0 < ***Ma*** → Flujo hipersónico

CLASIFICACIÓN PARA FLUJO INTERNO

Ma < 1 → Flujo subsónico

Ma = 1 → Flujo sónico

Ma > 1 → Flujo supersónico

1. Introducción

Ecuación de Estado: Gas ideal o perfecto

$$\boldsymbol{P \cdot V = n \cdot R \cdot T \;\rightarrow P = \frac{\rho \cdot R \cdot T}{M} = \rho \cdot R_g T}$$

$$R = 8314 \frac{J}{kmol \cdot K}$$

Calores específicos ~ ctes con T

Razón de calores específicos (o factor de expansión isentrópica o coeficiente de dilatación adiabática) constante:

$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

$$R_g = c_p - c_v$$

$$u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1)$$

$$h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1)$$

Ej. aire

k = 1,4

M = 28 → R_g = 287 m²/(s²K)

c_p = 1005 m²/(s²K)

c_v = 718 m²/(s²K))

Proceso isentrópico (S = cte)

$$\boxed{Tds = dh - \frac{dP}{\rho}}$$

Variaciones de entropía: Primer y segundo principio de la termodinámica

$$\int_1^2 dx$$

Reordenando T,

Gas ideal: $\begin{cases} dh = c_p dT \\ \rho = \dfrac{PM}{RT} \rightarrow \rho T = \dfrac{PM}{R} = \dfrac{P}{R_g} \end{cases}$

$$\int_1^2 ds = \int_1^2 c_p \frac{dT}{T} - R_g \int_1^2 \frac{dP}{P}$$

Gas ideal:

$c_p \sim cte$

Variación de entropía entre dos estados 1 y 2, en función de *T* y/o *P, ρ*

$$s_2 - s_1 = c_p ln \frac{T_2}{T_1} - R_g ln \frac{P_2}{P_1}$$

$$\boxed{R_g = c_p - c_v}$$

$$s_2 - s_1 = c_v ln \frac{T_2}{T_1} - R_g ln \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

1. Introducción

Proceso isentrópico (S = cte)

$$s_2 - s_1 = c_p ln\frac{T_2}{T_1} - R_g ln\frac{P_2}{P_1}$$

$$s_2 - s_1 = c_v ln\frac{T_2}{T_1} - R_g ln\frac{\rho_2}{\rho_1}$$

($s_1 = s_2$)

$$c_p ln\frac{T_2}{T_1} = R_g ln\frac{P_2}{P_1}$$

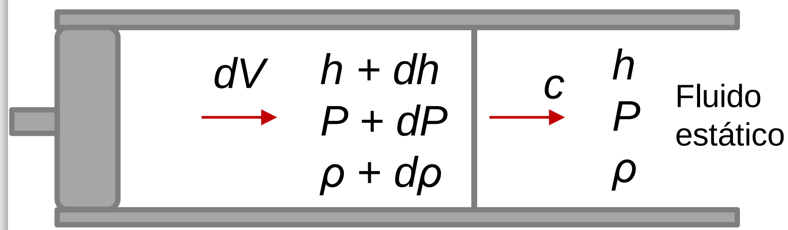
$$c_v ln\frac{T_2}{T_1} = R_g ln\frac{\rho_2}{\rho_1}$$

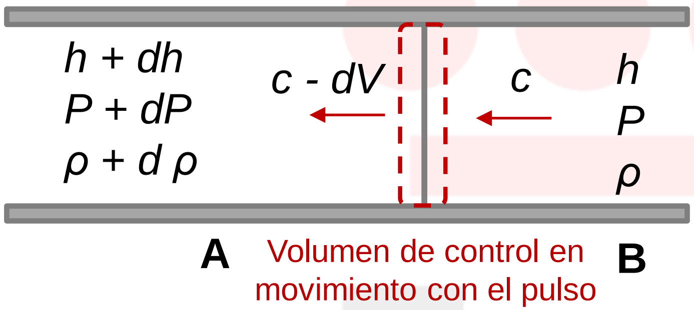
$$\boxed{k = \frac{c_p}{c_v}}$$

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

Velocidad del sonido (velocidad sónica)

Velocidad de propagación de un pulso infinitesimal de presión a través de un fluido estático.





Balance de masa en flujo estacionario

$$m_B = m_A \;\rightarrow\; \rho c A_B = (\rho + d\rho)(c - dV)A_A$$

Balance de energía (adiabático, *q = 0*)

$$e_B = e_A \;\rightarrow\; h + \frac{c^2}{2} = (h + dh) + \frac{(c - dV)^2}{2}$$

$$e = u + \frac{P}{\rho} + z + \frac{V^2}{2}$$

$$h = u + \frac{P}{\rho}$$

Velocidad del sonido (velocidad sónica)

Balance de masa en flujo estacionario

$$m_B = m_A \rightarrow \rho c A_A = (\rho + d\rho)(c - dV)A_B \xrightarrow[d\rho dV \rightarrow 0]{A_B = A_A} c\,d\rho - \rho\,dV = 0 \qquad \textbf{(1)}$$

Balance de energía

$$e_B = e_A \rightarrow h + \frac{c^2}{2} = (h + dh) + \frac{(c - dV)^2}{2} \xrightarrow{dV^2 \rightarrow 0} dh - c\,dV = 0 \qquad \textbf{(2)}$$

Flujo isentrópico

$$T\cancel{ds} = dh - \frac{dP}{\rho} \quad \rightarrow \quad dh = \frac{dP}{\rho} \qquad \textbf{(3)}$$

$$\boxed{c^2 = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_s}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^k \rightarrow P\rho^{-k} = cte$$

Derivando a ambos lados y reordenando términos

$$\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_s = k\frac{P}{\rho}$$

Gas ideal

$$\rho T = \frac{P}{R_g}$$

$$\boxed{c = \sqrt{kR_gT}}$$

2. Modelos básicos de flujo compresible

Ecuación de estado: GAS IDEAL

Conducción: Sin sistema de impulsión (queda antes o después del tramo estudiado).

Diferencia de energía potencial despreciable, comparada con los términos cinéticos.

MODELOS DE FLUJO:

a) **Adiabático:** No existe intercambio de calor con el exterior (***ej:*** conducción perfectamente aislada)

b) **Isentrópico:** Adiabático y los cambios son reversibles (no hay pérdidas de energía por rozamiento) (***ej:*** conducción corta y con flujo rápido, en una tobera o un difusor)

BLOQUEO (CHOKING): La velocidad de flujo en una conducción está muy limitada por las condiciones de flujo sónico, definiendo un caudal máximo admisible por la misma.

ONDAS DE CHOQUE: cambios casi discontinuos en diferentes propiedades del flujo supersónico (presión y velocidad).

c) **Isotermo/isotérmico:** Sin cambios apreciables de temperatura en la conducción (***ej:*** conducciones con buena disipación de calor al exterior → $\Delta T < 10\%$)

2.1. Flujo estacionario adiabático

Propiedades de estancamiento o remanso

Adiabático: $q = 0$
Sistema con cambios de energía potencial despreciable y ausencia de maquinas que aporten/extraigan trabajo

Ecuación de conservación de energía:

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2} = h_2 + \frac{V_2^2}{2} = cte \rightarrow h_0$$

Entalpía de remanso o de estancamiento

$$\boxed{h + \frac{V^2}{2} = h_0 \rightarrow h_{0,1} = h_{0,2}}$$

Entalpía de un fluido cuando se lleva a reposo adiabáticamente

Gas ideal
$h = c_p T$

$$c_p T + \frac{V^2}{2} = c_p T_0 \Rightarrow \boxed{T_0 = T + \frac{V^2}{2c_p}}$$

Temperatura de remanso o estancamiento

h* → *0
o
T* → *0

$$\boxed{V_{max} = (2h_0)^{\frac{1}{2}} = \left(2c_p T_0\right)^{\frac{1}{2}}}$$

Máxima velocidad que puede alcanzar un fluido sin aporte extra de energía (***trabajo o calor***)

Alicia García Sánchez
Universidad Rey Juan Carlos

2.1. Flujo estacionario adiabático

Relación entre propiedades estáticas y de remanso

$$T_0 = T + \frac{V^2}{2c_p} \quad \Rightarrow \quad \frac{T_0}{T} = 1 + \frac{V^2}{2c_pT}$$

$$\frac{V^2}{2c_pT} = \cdots$$

$$\left.\begin{array}{l} k = \dfrac{c_p}{c_v} \\ R_g = c_p - c_v \end{array}\right\} \; c_p = \frac{kR_g}{k-1}$$

$$\cdots = \frac{V^2(k-1)}{2kR_gT} = \cdots$$

$$c^2 = kR_gT$$

$$\cdots = \frac{(k-1)V^2}{2c^2} = \cdots$$

$$Ma = \frac{V}{c}$$

$$\frac{V^2}{2c_pT} = \frac{k-1}{2}Ma^2 \quad \Rightarrow \quad \boxed{\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{k-1}{2}Ma^2}$$

$$c^2 = kR_gT$$

$$\boxed{\frac{c_0}{c} = \left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{1}{2}} = \left[1 + \frac{k-1}{2}Ma^2\right]^{\frac{1}{2}}}$$

2.2. Flujo estacionario isentrópico

Relaciones entre propiedades

Isentrópico:

- adiabático *q=0*
- Reversible (*s=cte*)
  Sin fricción

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{k-1}{2} Ma^2$$

$$\frac{c_0}{c} = \left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{1}{2}} = \left[1 + \frac{k-1}{2} Ma^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

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

$$\frac{P_0}{P} = \left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{k}{k-1}} = \left[1 + \frac{k-1}{2} Ma^2\right]^{\frac{k}{k-1}}$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{1}{k-1}} = \left[1 + \frac{k-1}{2} Ma^2\right]^{\frac{1}{k-1}}$$

$$Ma^2 = \frac{2}{k-1}\left(\frac{T_0}{T} - 1\right)$$

$$Ma^2 = \frac{2}{k-1}\left[\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{k-1} - 1\right]$$

$$Ma^2 = \frac{2}{k-1}\left[\left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]$$

Relacionan velocidad-propiedades físicas del gas ideal

Ecuaciones de cantidad de movimiento y energía (para condiciones adiabáticas y sin fricción)

2.2. Flujo estacionario isentrópico

Condiciones sónicas

Ma = 1 → RAZONES SÓNICAS (o CRÍTICAS)

$$\frac{T^*}{T_0} = \frac{2}{k+1} \qquad \frac{P^*}{P_0} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \qquad \frac{\rho^*}{\rho_0} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}$$

$$V^* = c^* = \sqrt{\frac{2k}{k+1} R_g T_0}$$

En flujo isentrópico, todas las condiciones sónicas son constantes.

En flujo adiabático no isentrópico P* y ρ* son variables

Para AIRE (k = 1,4)

$$\frac{T_0}{T} = 1 + 0{,}2Ma^2 \qquad Ma^2 = 5\left(\frac{T_0}{T} - 1\right) \qquad \frac{T^*}{T_0} = 0{,}8333$$

$$\frac{P_0}{P} = [1 + 0{,}2Ma^2]^{3{,}5} \qquad Ma^2 = 5\left[\left(\frac{P_0}{P}\right)^{2/7} - 1\right] \qquad \frac{P^*}{P_0} = 0{,}5283$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left[1 + \frac{k-1}{2} Ma^2\right]^{2{,}5} \qquad Ma^2 = 5\left[\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{2/5} - 1\right] \qquad \frac{\rho^*}{\rho_0} = 0{,}6340$$

Gases calientes combustión (k=1,33)

$$\frac{T^*}{T_0} = 0{,}8584$$

$$\frac{P^*}{P_0} = 0{,}5404$$

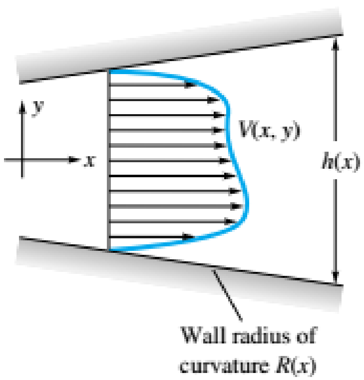
$$\frac{\rho^*}{\rho_0} = 0{,}6295$$

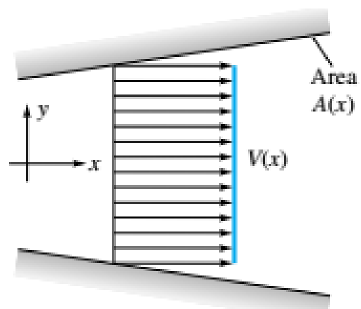
2.2. Flujo estacionario isentrópico

Efecto del cambio de área en el conducto

Combinar ecuación de energía, cantidad de movimiento **Y CONTINUIDAD** → Análisis completo del flujo

Simplificación: **Flujo UNIDIMENSIONAL**





White F., Fluid Mechanics (5ª edición) Ed. McGrawHill

Balance de masa $m = \rho A V = constante$

Balance de energía $e = h + \dfrac{V^2}{2} = constante$

Flujo isentrópico $dh = \dfrac{dP}{\rho}$

Balance de masa $\dfrac{dm}{m}$

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dA}{A} + \frac{dV}{V} = 0 \qquad \textbf{(1)}$$

Balance de energía

$$dh + V dV = 0$$

Flujo isentrópico

$$\frac{dP}{\rho} + V dV = 0 \qquad \textbf{(2)}$$

Combinando 1 y 2

$$c^2 = \left(\frac{dP}{d\rho}\right)_s$$

$$Ma = \frac{V}{c}$$

$$\frac{dV}{V} = \frac{dA}{A}\frac{1}{Ma^2 - 1}$$

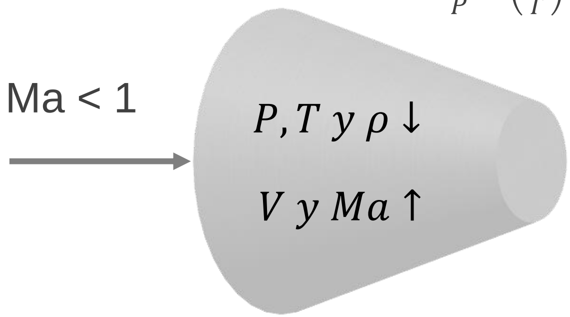
La relación entre V y A es opuesta para flujo sub- y supersónico

2.2. Flujo estacionario isentrópico

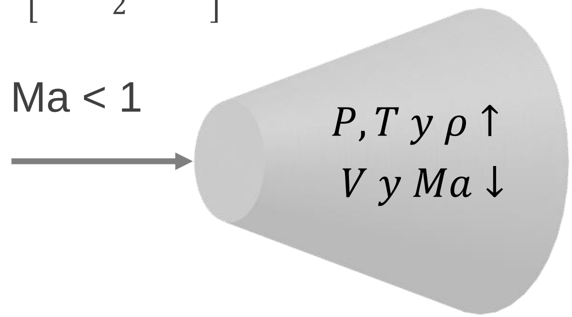
Efecto del cambio de área en el conducto

Flujo SUBSÓNICO

$$\frac{P_0}{P} = \left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{k}{k-1}} = \left[1 + \frac{k-1}{2} Ma^2\right]^{\frac{k}{k-1}}$$

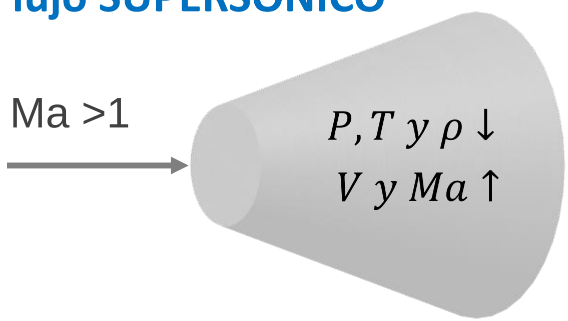


Tobera subsónica

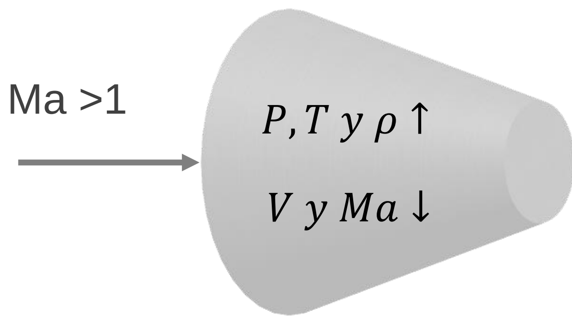


Difusor subsónico

Flujo SUPERSÓNICO



Tobera supersónica

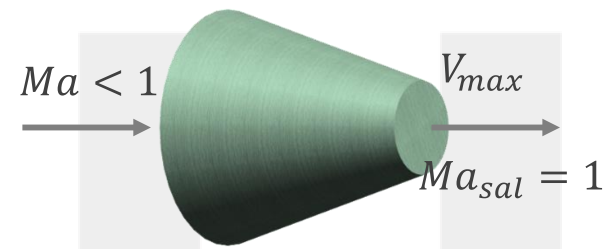


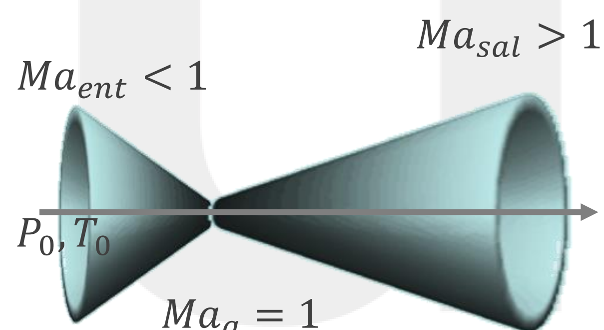
Difusor supersónico

Ma = 1 → dA = 0

¿Ensanchamiento sónico?

Garganta sónica

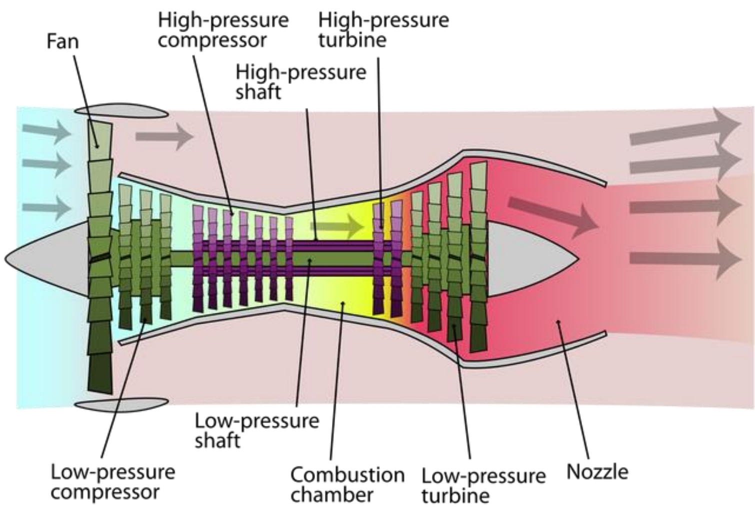




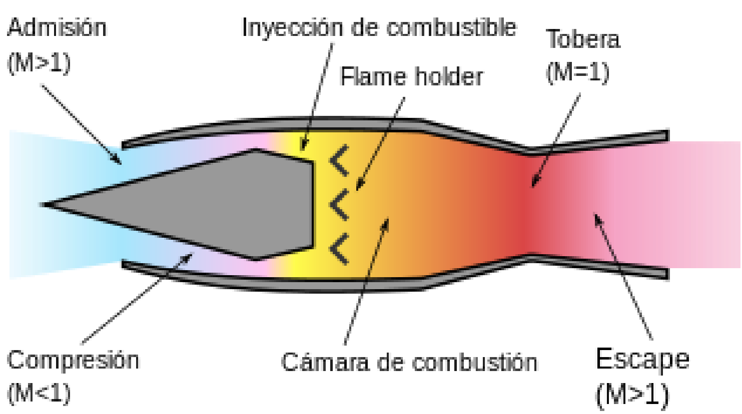
2.2. Flujo estacionario isentrópico

Efecto del cambio de área en el conducto

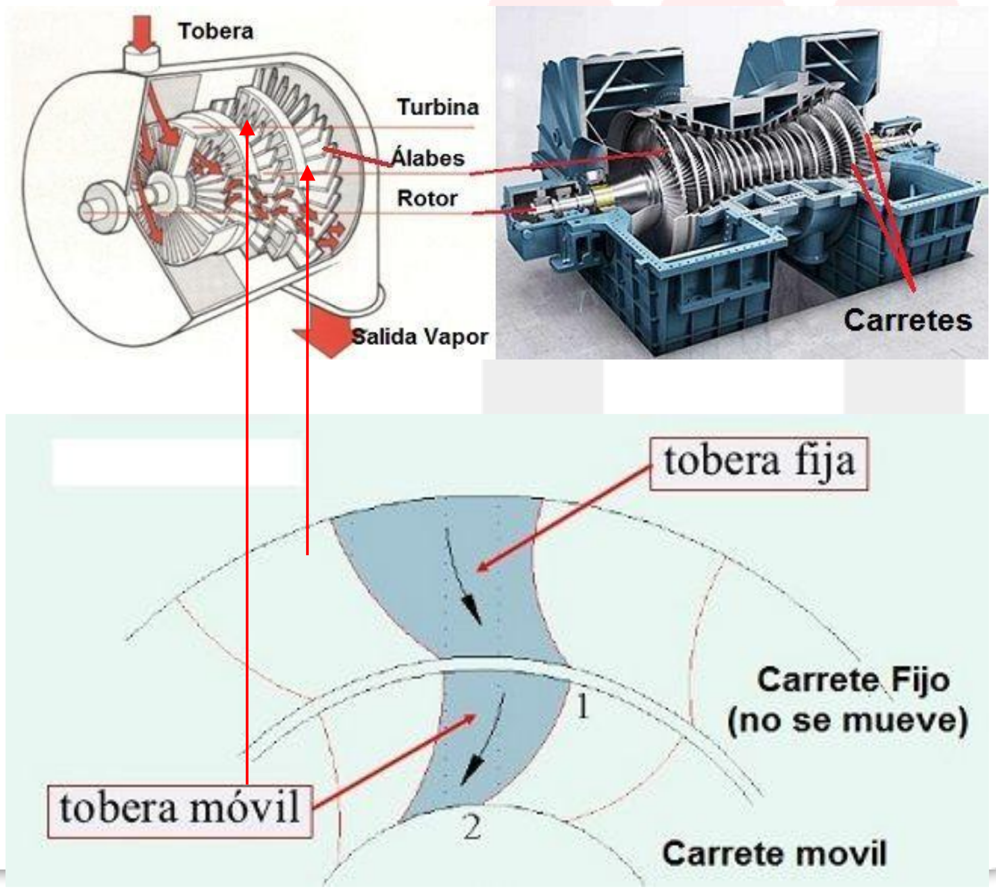
Motor turbofan de un avión comercial para Ma <0,8



Estatorreactor supersónico



Tobera de una turbina de vapor de acción-reacción



Alicia García Sánchez

Universidad Rey Juan Carlos

2.2. Flujo estacionario isentrópico

Área sónica

En el área sónica (si existe), tendremos condiciones sónicas (***T*, P*, ρ*, Ma = 1, V* = c****)

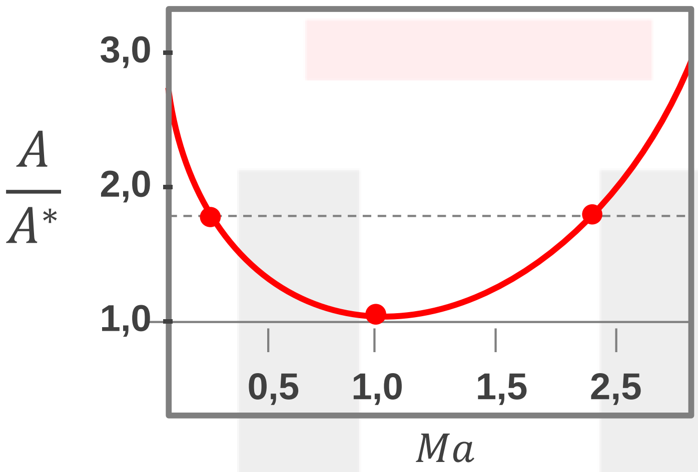
¿Existe una relación entre A*, A y Ma? → puede usarse la ec. de continuidad para A = f(Ma)

$$m = \rho A V = \rho^* A^* V^* = constante$$

$$\frac{A}{A^*} = \frac{\rho^*}{\rho}\frac{V^*}{V}$$

$$\boxed{\frac{\rho^*}{\rho}} = \frac{\rho^*}{\rho_0}\frac{\rho_0}{\rho} = f(Ma)$$

$$\boxed{\frac{V^*}{V}} = \frac{\sqrt{kR_gT^*}}{V} = \frac{\sqrt{kR_gT}}{V}\left(\frac{T_0}{T}\right)^{1/2}\left(\frac{T^*}{T_0}\right)^{1/2} = f(Ma)$$



$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{Ma}\left[\frac{1 + 1/2(k-1)Ma^2}{1/2(k+1)}\right]^{\frac{1/2(k+1)}{k-1}}$$

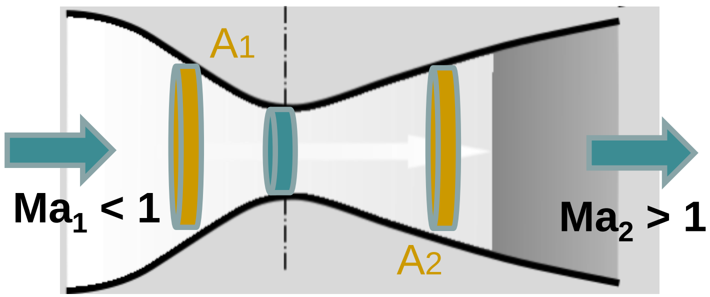
Aire (k=1,4)

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{Ma}\frac{(1 + 0{,}2Ma^2)^3}{1{,}728}$$

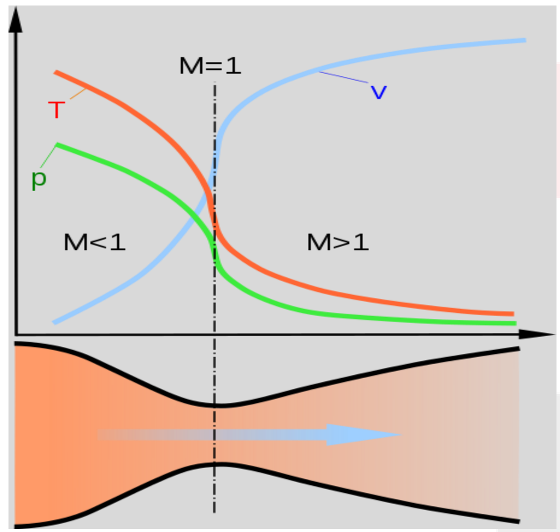
2.2. Flujo estacionario isentrópico

Área sónica y caudal másico en una tobera

$A_g = A^*$ $\quad A_1 = A_2$



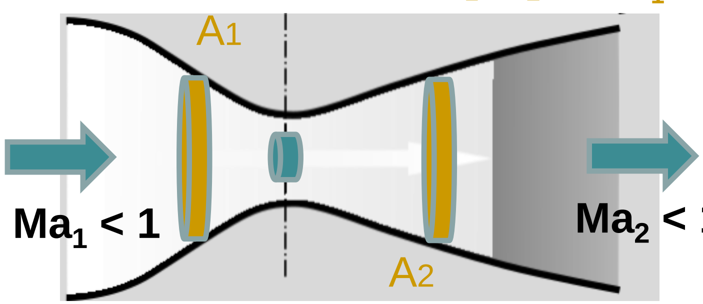
$Ma_g = 1$



$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{Ma}\frac{\left(1 + 0,2Ma^2\right)^3}{1,728}$$

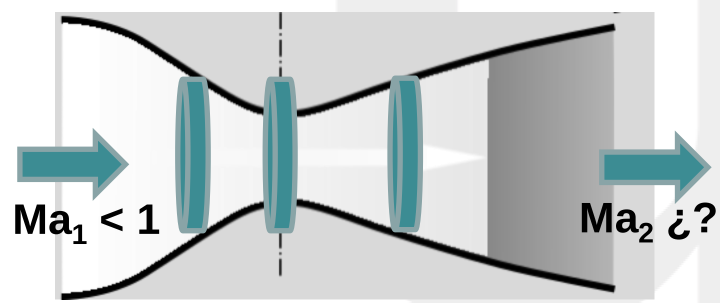
A^*

$A_g > A^*$ $\quad A_1 = A_2$ $\quad Ma_1 = Ma_2$



$Ma_g < 1$

$A_g < A^*$



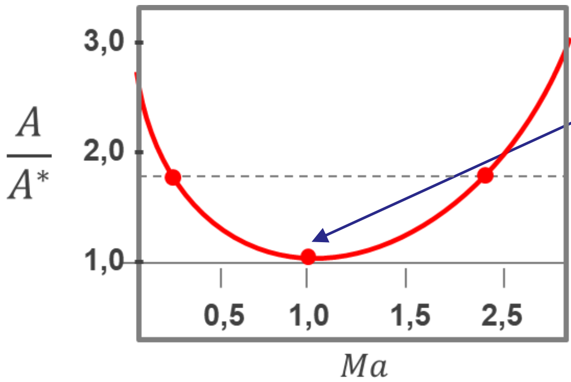
Ma_g ¿?

2.2. Flujo estacionario isentrópico

Área sónica y caudal másico en una tobera

CAUDAL MÁSICO MÁXIMO

$$m = \rho A V = \rho^* A^* V^* \qquad \frac{A^*}{A} = \frac{\rho V}{\rho^* V^*} = \frac{m\ por\ unidad\ de\ area}{m\ por\ unidad\ de\ area\ (sónica)}$$



Máximo en Ma = 1 (condiciones sónicas)
Para condiciones de remanso dadas, *m* es máximo cuando en la garganta hay condiciones sónicas ($A_{garganta} = A^*$)

BLOQUEO: No puede haber un caudal mayor a menos que se ensanche el conducto (o se cambien las condiciones de estancamiento).

$$m_{max} = \rho^* A^* V^* = \rho_0 \left(\frac{2}{k+1}\right)^{1/(k-1)} A^* \left(\frac{2k}{k+1} R_g T_0\right)^{1/2}$$

Aire (k=1,4)

$$\boxed{m_{max} = 0{,}6847 A^* \rho_0 (R_g T_0)^{1/2} = \frac{0{,}6847 A^* P_0}{(R_g T_0)^{1/2}}}$$

Área sónica y caudal másico en una tobera

CAUDAL MÁSICO MÁXIMO

Si la tobera no está bloqueada, el caudal másico puede calcularse en cualquier sección con área y *Ma* conocidos

Para cualquier area, en flujo estacionario:

$$m = cte = \rho AV = \left(\frac{P}{R_g T}\right) A \left(Ma\sqrt{kR_g T}\right) = PA\,Ma\sqrt{\frac{k}{R_g T}}$$

$$T = f(T_0, k, Ma) \quad y \quad P = f(P_0, k, Ma)$$

$$\boxed{m = \frac{A\,Ma\,P_0\sqrt{k/(R_g T_0)}}{\left[1+(k-1)Ma^2/2\right]^{\frac{k+1}{2(k-1)}}}}$$

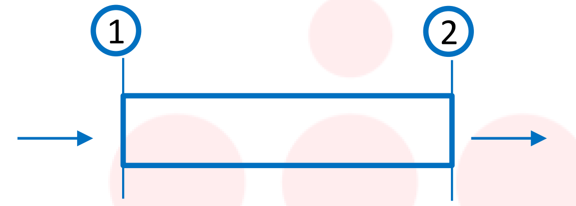
Cálculo del caudal másico en función del área y *Ma* locales

2.2. Flujo isotermo

Ecuaciones de conservación

Temperatura constante en toda la conducción

No adiabático ni isentrópico: intercambio de calor y pérdida de energía por rozamiento



Tramo recto horizontal sin cambio de sección ni máquina
Gas ideal
Re ↑↑ por lo que α=1

1) Ecuación de continuidad:

$$m_1 = m_2 \rightarrow \rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 \rightarrow G_1 A_1 = G_2 A_2$$

***G*: Velocidad másica (kg/m²s)→** Conducciones sin cambios de sección: $\boldsymbol{G_1 = G_2}$

2) Ecuación de conservación de energía:

$$(h_2 - h_1) + \left(\frac{V_2^2}{2} - \frac{V_1^2}{2}\right) = q \quad \xrightarrow{\text{Gas ideal}} \quad c_p(T_2 - T_1) + \left(\frac{V_2^2}{2} - \frac{V_1^2}{2}\right) = q$$

$$\boxed{\left(\frac{V_2^2}{2} - \frac{V_1^2}{2}\right) = q}$$

Al haber pérdida de presión debida al rozamiento, la densidad del fluido baja, y por lo tanto **la velocidad aumenta a lo largo de la tubería.**

En un tramo recto de conducción en el que no varía la sección de paso, **al variar la presión varía la densidad del fluido, y varía la velocidad.**

$P_2 < P_1 \rightarrow \rho = P/R_g T \rightarrow \rho_2 < \rho_1$

2.2. Flujo isotermo

3) Ecuación de conservación de Bernouilli:

$$VdV + \frac{dP}{\rho} + \frac{fV^2dL}{2D} = 0$$

$V = \frac{G}{\rho} \rightarrow dV = \frac{-Gd\rho}{\rho^2}$

$$\frac{-G^2d\rho}{\rho^3} + \frac{dP}{\rho} + \frac{fG^2dL}{2D\rho^2} = 0$$

Tramo recto horizontal sin cambio de sección ni máquina
Gas ideal
Re ↑↑ por lo que α=1

Reordenando
$multiplicando\ por\ \rho^2$

$$-\rho dP = \frac{-G^2d\rho}{\rho} + \frac{fG^2dL}{2D}$$

$$-\int_1^2 \rho dP = -G^2\int_1^2 \frac{d\rho}{\rho} + \frac{fG^2}{2D}\int_1^2 dL$$

$$\int_1^2 dL = L$$

$\rho = \frac{P}{R_gT}$

T=cte

$$-G^2\int_1^2 \frac{d\rho}{\rho} = -G^2 ln(\rho)]_1^2 = -G^2 ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)$$

$\rho = \frac{P}{R_gT}$

T=cte

$$-G^2\int_1^2 \frac{d\rho}{\rho} = -G^2 ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = G^2 ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$$

$$-\int_1^2 \rho dP = -\frac{1}{R_gT}\int_1^2 PdP = -\frac{1}{R_gT}\left(\frac{P^2}{2}\right)_1^2 = -\frac{1}{R_gT}\left(\frac{P_2^2 - P_1^2}{2}\right) = \left(\frac{P_1^2 - P_2^2}{2R_gT}\right)$$

2.2. Flujo isotermo

Ecuaciones de conservación

$$\left(\frac{P_1^2 - P_2^2}{2R_gT}\right) = G^2 ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) + \frac{fG^2}{2D}\mathrm{L} \quad \Rightarrow \quad \left(\frac{M}{2R\quad T}\right)(P_1^2 - P_2^2) = G^2 ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) + \frac{fG^2}{2D}\mathrm{L}$$

Simplificación de Weymouth: Cuando ***EN TODA LA TUBERÍA*** la velocidad es inferior a 35 m/s, experimentalmente se ha comprobado que $P_1 \approx P_2 \rightarrow ln(P_1/P_2) \approx 0$

Casos: Sistemas a muy alta presión, diámetros grandes

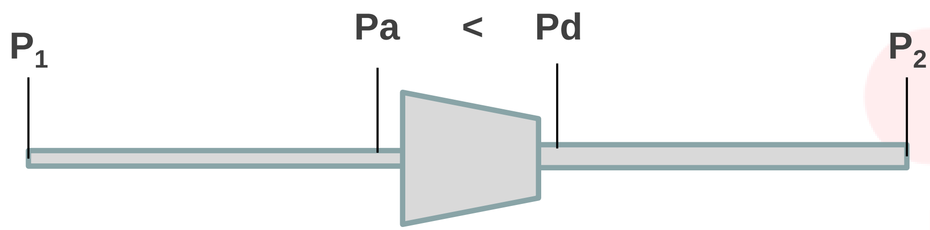
$$(P_1^2 - P_2^2) = \frac{RT}{M}\frac{fG^2}{D}\mathrm{L} \qquad\qquad (P_1^2 - P_2^2) = R_gT\frac{fG^2}{D}\mathrm{L}$$

V_{max} … $\rightarrow V_2 \rightarrow V_2 < 35$ m/s

Tramo recto horizontal sin cambio de sección ni máquina
Gas ideal
Re ↑↑ por lo que α=1

3. Cálculo de la Potencia para el Flujo

Cálculo de la potencia de compresión



La potencia que deben suministrar las máquinas se calcularán a partir de las presiones de admisión y descarga de las mismas

Las ecuaciones vistas en el apartado anterior se utilizarán para poder evaluar estas presiones

Cálculo de la energía: ecuaciones de compresión para gases.

Compresión adiabática: se produce con una considerable elevación de temperatura.

Compresión isoterma: debe eliminarse todo el calor producido durante la compresión. Se necesita un trabajo mínimo para comprimir el gas

Compresión politrópica: intermedio entre el adiabático y el isotermo. El trabajo que hay que realizar en este tipo de compresión viene expresado por las siguientes expresiones:

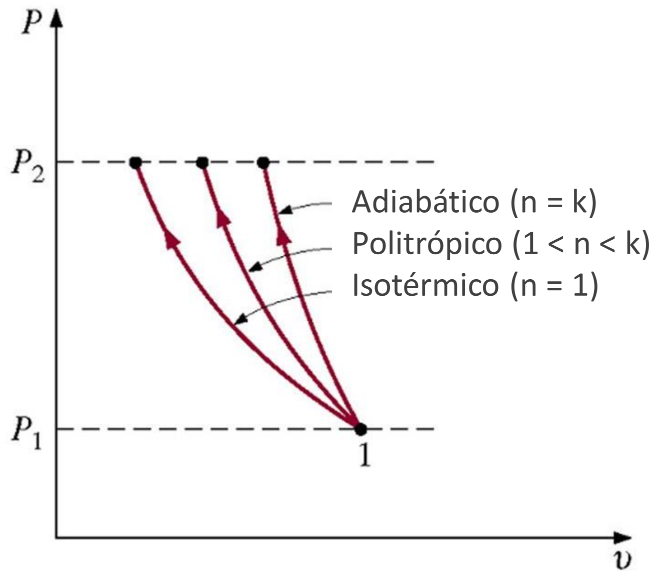
3. Cálculo de la Potencia para el Flujo

Cálculo de la potencia de compresión

$$N = mW\left(\frac{J}{s}\right) \qquad m = \rho V A = GA$$

Isoterma: $W = -\int_1^2 P dv$ Gas ideal $W = -R_g T \int_1^2 \frac{dv}{v} = -R_g T ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = R_g T ln\left(\frac{v_1}{v_2}\right)$

$$\boxed{W = R_g T ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = \frac{RT}{M} ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)}$$



Adiabático:

$$\boxed{W = \frac{k}{k-1} R_g T \left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right] = \frac{k}{k-1}\frac{RT}{M}\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]}$$

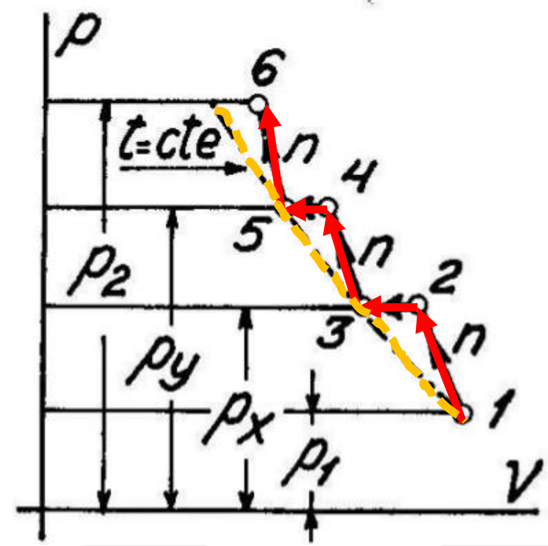
Politrópico:

$$\boxed{W = \frac{n}{n-1} R_g T \left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right] = \frac{n}{n-1}\frac{RT}{M}\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right]}$$

Compresión politrópica en s etapas

Necesaria cuando la relación de compresión r, (P_D/P_A), es $P_D/P_A > 3$

$$\boxed{W = s\frac{n}{n-1}R_gT\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{ns}} - 1\right] = \frac{n}{n-1}\frac{RT}{M}\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right]}$$



Cálculo de s:

$$r_{lim} = 3 = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{s}} \to\to \boxed{s = \frac{log\left(\frac{P_2}{P_1}\right)}{log(3)} = 2{,}09\ log\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = 2{,}09\log(r)}$$