Flujo de gases

Si el cambio en la presión es menor a aproximadamente el 10% de la presión de entrada, las variaciones en peso específico tendrán un efecto insignificante. Cuando la caída de presión se ubica entre 10 y 40% de la presión de entrada, se puede usar el promedio del peso específico registrado para las condiciones de entrada y salida, con resultados razonables. Cuando el cambio de presión es mayor al 40%, es necesario rediseñar el sistema.

$$\gamma = \frac{P}{RT}$$

R para el aire es 53.3 lb-ft/lb °R en el sistema inglés, o 29.2 N m/N K.

Calcule el peso específico del aire a 100 psig y 80°F.

Rapidez de flujo para líneas de aire comprimido

$$Q_r = Q_s \frac{p_{atmstd}}{p_{atm} + p_{man}} \frac{T_r}{T_s}$$

Q_s flujo en condiciones normales.
P_{atmst} presión atmosférica estándar.
P_{atm} presión atmosférica real.
T_s temperatura absoluta estándar.
P_{man} presión manométrica real.
T_r temperatura absoluta real

Un compresor de aire tiene una clasificación de aire libre de 500 cfm. Calcule la rapidez de flujo en una tubería en la que la presión es de 100 psig y la temperatura de 80°F.

Factores para especificar tamaños de tubería con aire comprimido

- Caída de presión. Es deseable usar una temperatura tan grande como sea posible.
- Requerimiento de potencia del compresor. Es deseable usar tuberías grandes para minimizar la caída de presión.
- Costo de la tubería. Las tuberías grandes cuestan más que las pequeñas.
- Costo del compresor. Un compresor grande cuesta más que uno pequeño.
- Costo de instalación. Aunque las tuberías pequeñas son más fáciles de manejar, no es un factor tan importante.
- Espacio. Las tuberías pequeñas provocan menor interferencia con otros equipos.
- Expansión futura. Las tuberías grandes permiten la adición futura de otros equipos.
- Ruido. Los tubos grandes provocan menor ruido por las velocidades más bajas.

TABLA 18.1 Tamaños de tubería sugeridos para sistemas de aire comprimido

Rapidez de flujo máxima (cfm)		Tamaño de tubería (cédula 40)	
Aire libre	Aire comprimido (100 psig, 60 °F)	Tamaño en pulgadas	Tamaño métrico DN (mm)
4	0.513	$1/8$	6
8	1.025	$1/4$	8
20	2.563	$3/8$	10
35	4.486	$1/2$	15
80	10.25	$3/4$	20
150	19.22	1	25
300	38.45	$1\,1/4$	32
450	57.67	$1\,1/2$	40
900	115.3	2	50
1400	179.4	$2\,1/2$	65
2500	320.4	3	80
3500	448.6	$3\,1/2$	90
5000	640.8	4	100

Nota: Los tamaños indicados corresponden a las tuberías de acero estándar cédula 40 más pequeñas que conducirán la rapidez de flujo dada a una presión de 100 psig (690 kPa) con no más de 5.0 psi (34.5 kPa) de caída de presión en 100 pies (30.5 m) de tubería. Vea el apéndice F "Dimensiones de la tubería de acero".

Especifique un tamaño de tubería adecuado para el suministro de 500 cfm (aire libre) a 100 psig y 80°F para el sistema neumático de una maquinaria. La longitud total de tubería recta requerida entre el compresor y la máquina es de 140 ft. La línea también contiene 2 válvulas de compuerta completamente abiertas, seis codos estándar y dos tes estándar, donde el flujo tiene lugar a través de una línea principal de la te. Después, analice la presión requerida en el compresor para asegurar que en la máquina la presión no sea menor de 100 psig.

$$\frac{p_1}{\gamma_1} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma_2} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_L$$

$$p_1 = p_2 + \gamma h_L$$

Evaluar las pérdidas de energía con la ecuación de Darcy, incluyendo pérdidas menores.

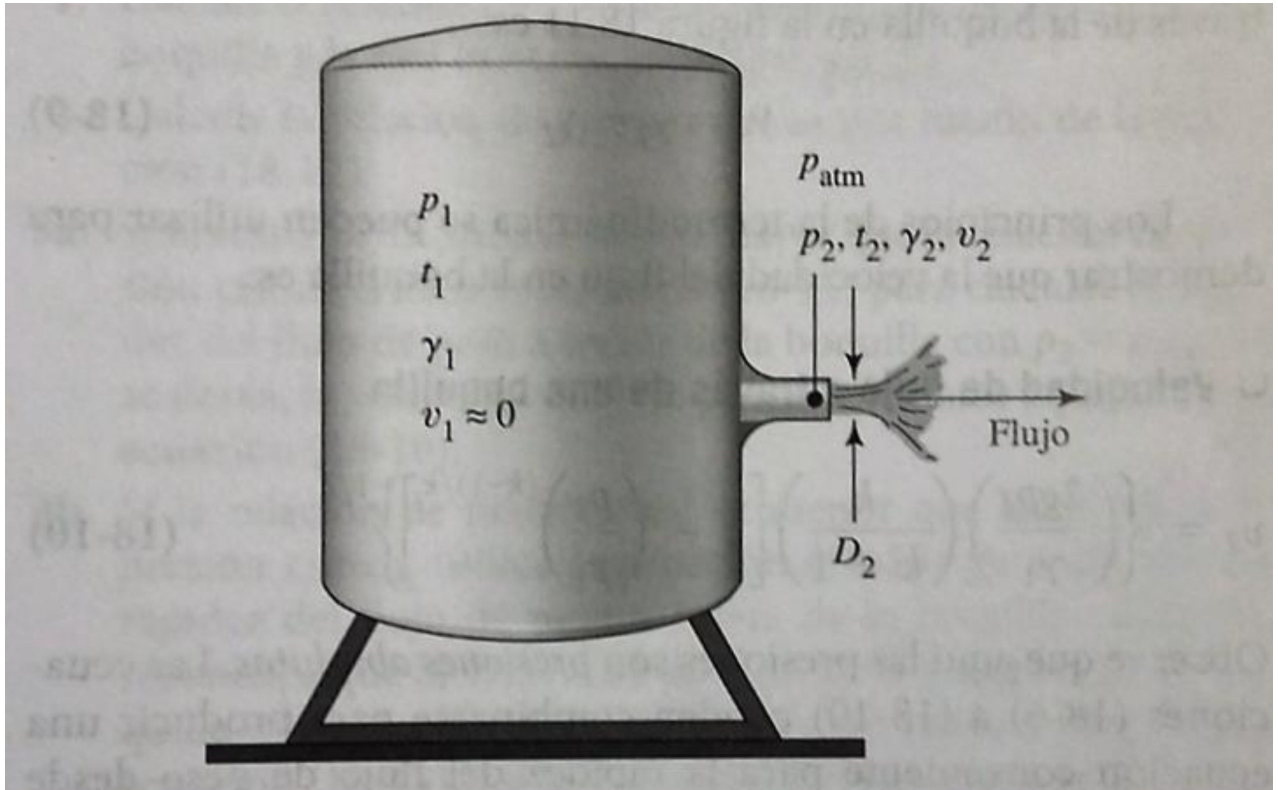


FIGURA 18.11 Descarga de un gas desde un tanque a través de una boquilla convergente lisa.

Cuando el flujo de un gas se da lentamente, es posible que se transfiera calor de los alrededores hacia o desde el gas para mantener la temperatura constante, conocido como flujo isotérmico.

Cuando el flujo se da muy rápidamente o cuando el sistema está muy bien aislado, se transfiere muy poco calor hacia o desde el gas; este flujo se llama adiabático.
Los sistemas reales se comportan de una manera intermedia.
Para el flujo rápido en una boquilla, se supone flujo adiabático.

Flujo en boquilla para procesos adiabáticos

$$\frac{p}{\gamma^k} = cte = \frac{p_1}{\gamma_1^k} = \frac{p_2}{\gamma_2^k}$$

$$\frac{\gamma_2}{\gamma_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{k}}$$

P_2 está en la boquilla y p_1 en el tanque. La presión fuera de la boquilla es p_{atm}.

La ecuación de continuidad debe considerar a la densidad.

$$w = \gamma_2 v_2 A_2$$

Y la velocidad de flujo en la boquilla es

$$v_2 = \left\{\left(\frac{2gp_1}{\gamma_1}\right)\left(\frac{k}{k-1}\right)\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]\right\}^{0.5}$$

Se usan presiones absolutas.

Rapidez de flujo de peso cuando p2/p1 > relación crítica

$$W = A_2\sqrt{\frac{2gk}{k-1}(p_1\gamma_1)\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{2/k} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(k+1)/k}\right]}$$

La rapidez de flujo alcanza un máximo en una relación de presión crítica.

$$\left(\frac{p'_2}{p_1}\right)_c = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

En este punto, la velocidad de flujo en la garganta es igual a la velocidad del sonido en el gas a esas condiciones. Entonces esta velocidad de flujo permanece constante independientemente de cuanto se reduzca la presión aguas abajo.

$$c = \sqrt{\frac{kgp'_2}{\gamma_2}}$$

Esta es la velocidad máxima de flujo de un gas a través de una boquilla convergente.

Se debe usar la ecuación de flujo anterior para valores de Mach<1.0 (p_{atm}/p_1 mayor que la relación crítica).

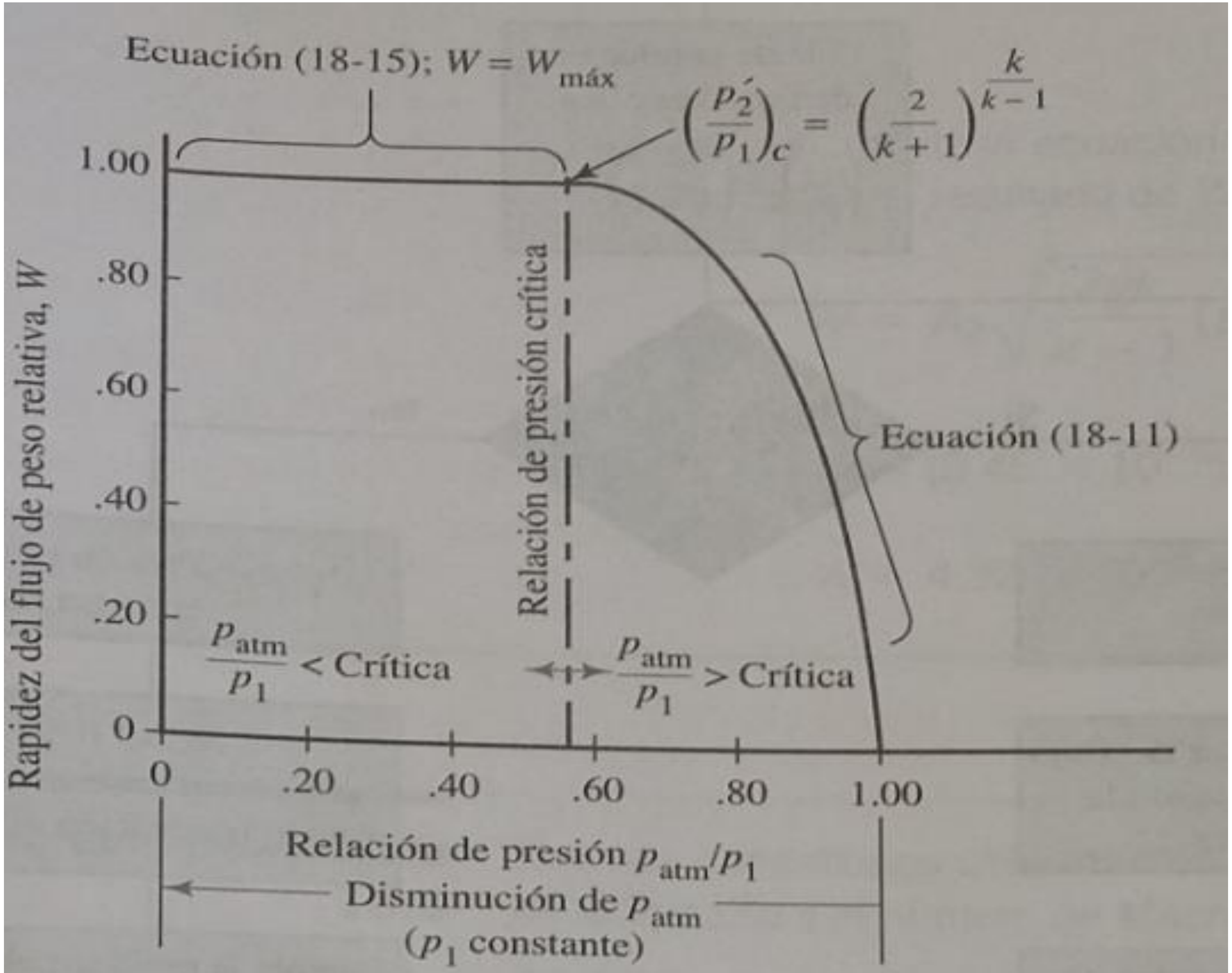
$$M = v/c$$

Cuando M= 1, se tiene:

Rapidez del flujo de peso máxima cuando p_2/p_1 = crítica

$$W_{max} = A_2 \sqrt{\frac{2gk}{k+1}(p_1\gamma_1)\left[\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}}\right]}$$

Se debe usar esta ecuación cuando p_{atm}/p_1 es menor que la relación crítica.


Ecuación (18-15); $W = W_{máx}$
$\left(\frac{p_2'}{p_1}\right)_c = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$
1.00
.80
.60
.40
.20
0
Rapidez del flujo de peso relativa, W
Relación de presión crítica
Ecuación (18-11)
$\frac{p_{atm}}{p_1}$ < Crítica
$\frac{p_{atm}}{p_1}$ > Crítica
0
.20
.40
.60
.80
1.00
Relación de presión p_{atm}/p_1
Disminución de p_{atm}
(p_1 constante)
(a)

Procedimiento para calcular la rapidez de flujo de peso a través de una boquilla adiabática:

1. Calcule la relación de presión real entre la presión fuera de la boquilla y la del tanque, p_{atm}/p_1.
2. Calcule la relación de presión crítica.
3. Si la relación de presión real es mayor que la relación de presión crítica, calcule el flujo con la ecuación $W = A_2\sqrt{\frac{2gk}{k-1}(p_1\gamma_1)\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{2/k} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(k+1)/k}\right]}$ con p_2=p_{atm}.
4. Si la relación de presión real es menor que la relación de presión crítica, use la ecuación $W_{max} = A_2\sqrt{\frac{2gk}{k+1}(p_1\gamma_1)\left[\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}}\right]}$ para calcular la rapidez de flujo de peso. La velocidad en la boquilla es la del sonido $c = \sqrt{\frac{kgp_2'}{\gamma_2}}$ y la presión en la garganta es la crítica, $\left(\frac{p'_2}{p_1}\right)_c = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$. El gas se expande a la presión atmosférica a medida que sale de la boquilla.

FLUJO ADIABÁTICO SIN FRICCIÓN (ISENTRÓPICO)

Para el tanque de la figura presentada, calcule la rapidez de flujo de peso de aire que sale del tanque bajo las siguientes condiciones: p_1=10 psig, p_{atm}=14.2 psia, t_1=80°F, D_2=0.1 in.

Calcule la velocidad de flujo en la garganta y el número de Mach.

Calcule la rapidez de flujo de peso del aire que sale de un tanque por una boquilla si la presión en el tanque se eleva hasta 20 psig. Todas las demás condiciones son iguales que en el problema anterior.

Relaciones adicionales del flujo isentrópico

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

$$\frac{p}{p_0} = \left\{\frac{1}{1 + \left[\frac{k-1}{2}\right] Ma^2}\right\}^{\frac{k}{k-1}}$$

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

Flujo adiabático con fricción (área constante)

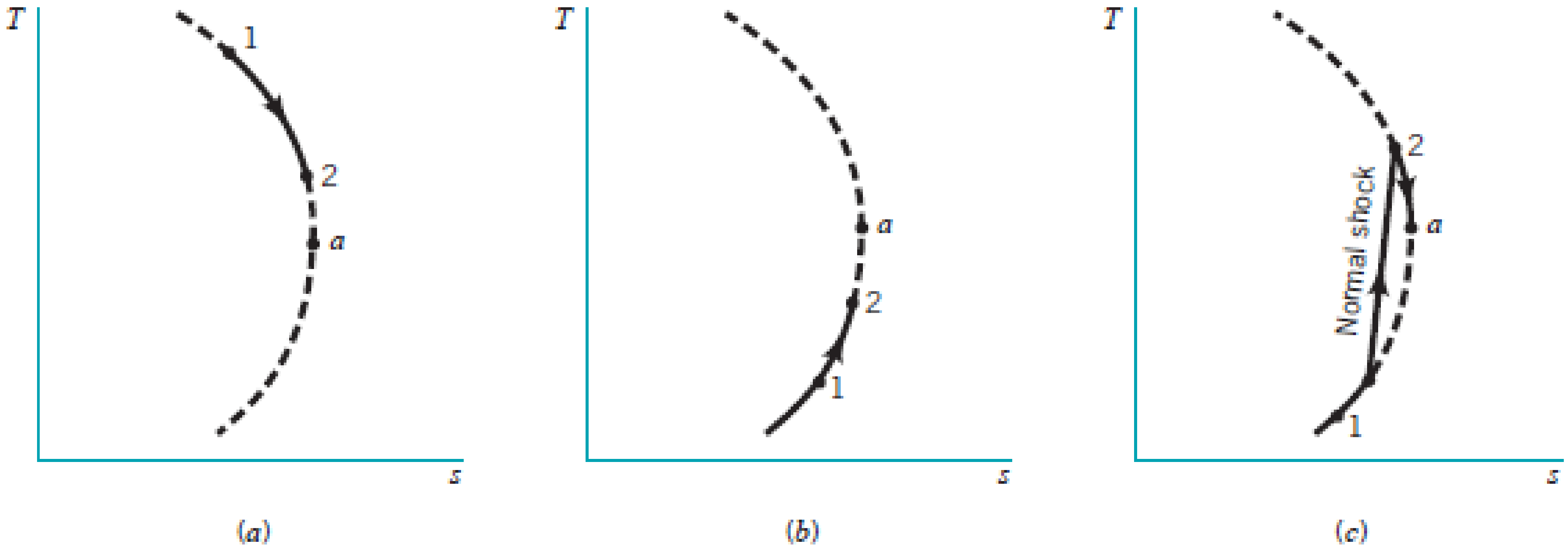


FIGURE 11.17 *(a)* **Subsonic Fanno flow.** *(b)* **Supersonic Fanno flow.** *(c)* **Normal shock occurrence in Fanno flow.**

Summary of Fanno Flow Behavior

	Flow	
Parameter	**Subsonic Flow**	**Supersonic Flow**
Stagnation temperature	Constant	Constant
Ma	Increases (maximum is 1)	Decreases (minimum is 1)
Friction	Accelerates flow	Decelerates flow
Pressure	Decreases	Increases
Temperature	Decreases	Increases

El análisis sobre un volumen de control, incorporando las relaciones del gas ideal y número de Mach, arroja:

$$\boxed{\frac{1}{k}\frac{(1-Ma^2)}{Ma^2}+\frac{k+1}{2k}ln\left\{\frac{\left[\frac{k+1}{2}\right]Ma^2}{1+\left[\frac{k-1}{2}\right]Ma^2}\right\}=\frac{f(l^*-l)}{D}}$$

f cte., k cte.

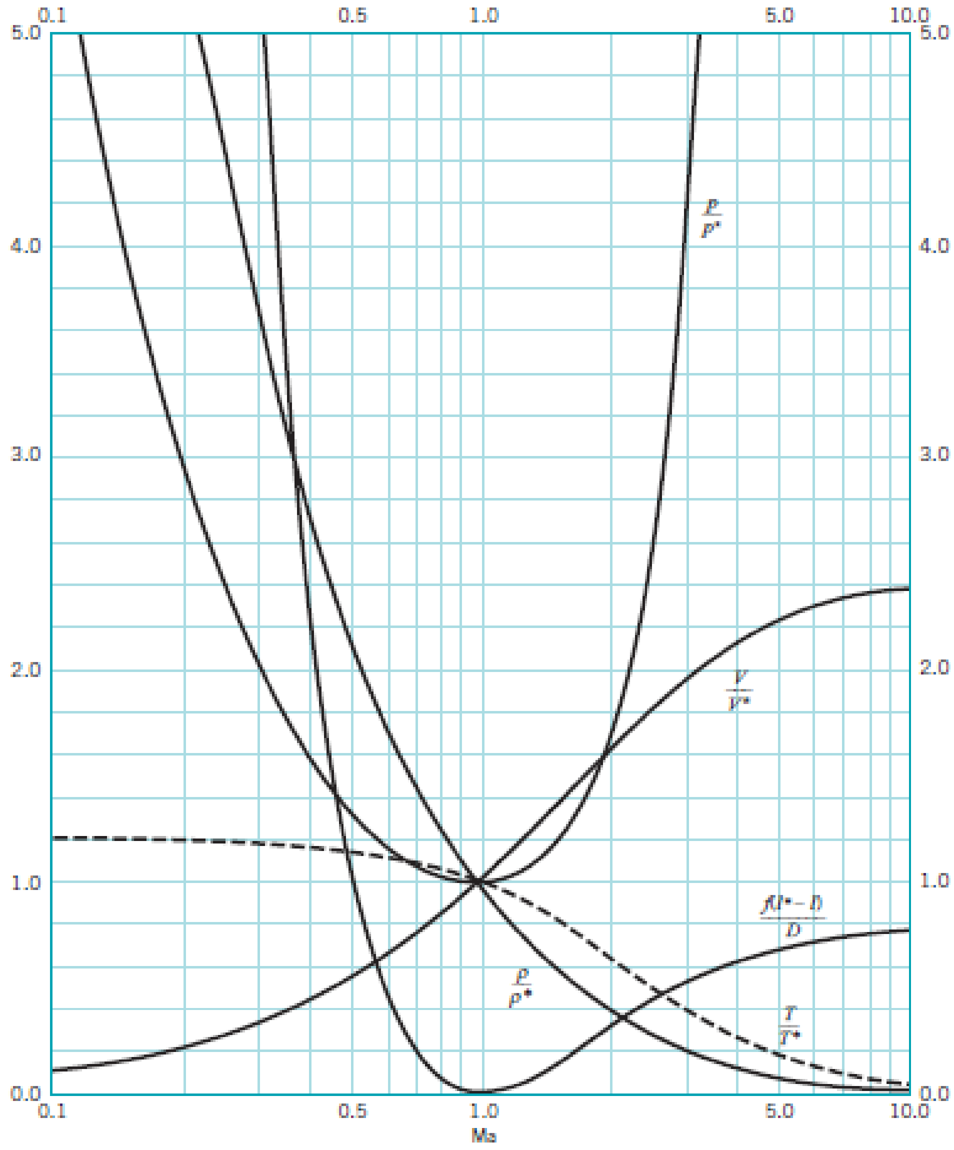


FIGURE D.2 Fanno flow of an ideal gas with $k = 1.4$. (Graph provided by Dr. Bruce A. Reichert.)

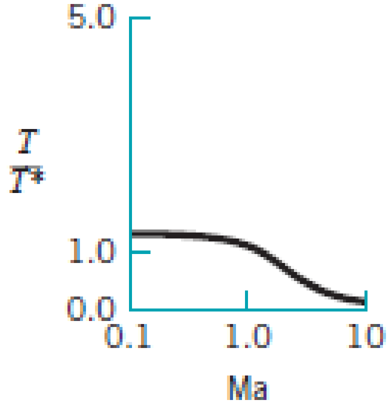
No es necesario que se dé la condición crítica:

$$\boxed{\frac{f(l^*-l_2)}{D}-\frac{f(l^*-l_1)}{D}=\frac{f}{D}(l_1-l_2)}$$

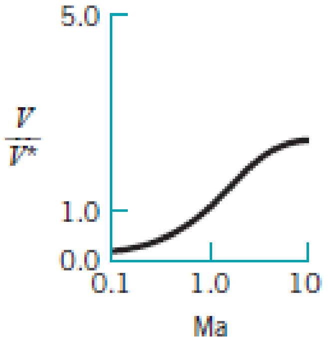
Con estas ecuaciones se puede calcular la longitud de tubo

Necesaria para cambiar el Ma_1 a Ma_2

Ecuaciones complementarias:



$$\frac{T}{T^*} = \frac{(k+1)/2}{1 + \frac{k-1}{2} Ma^2}$$



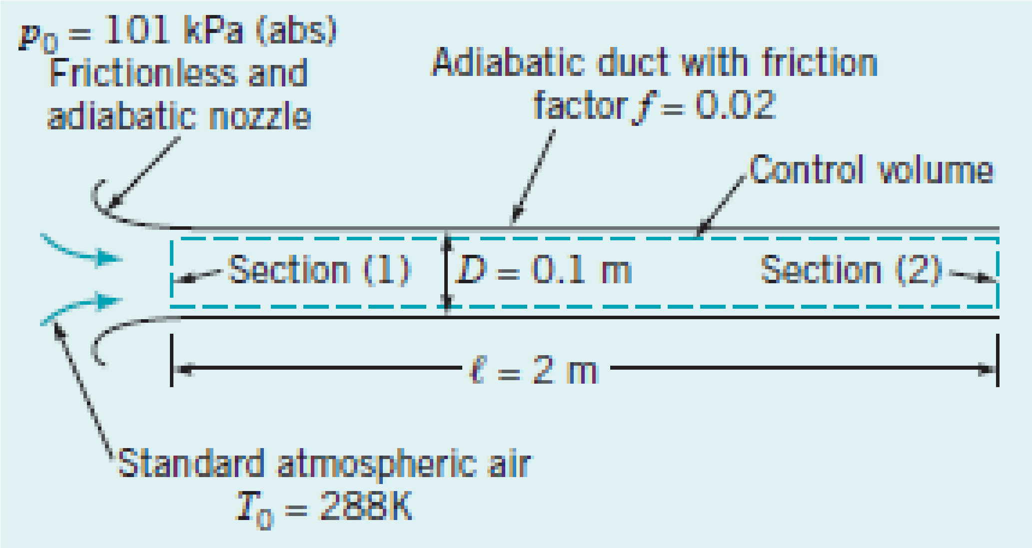
$$\frac{V}{V^*} = \left\{\frac{Ma^2 (k+1)/2}{1 + \frac{k-1}{2} Ma^2}\right\}^{\frac{1}{2}}$$

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

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

$$\frac{p_0}{p_0^*} = \frac{1}{Ma}\left[\left(\frac{2}{k+1}\right)\left(1 + \frac{k-1}{2} Ma^2\right)\right]^{\frac{k+1}{2(k-1)}}$$

Fluye aire atmosférico (T_0=288 K, p_0=101 kPa_{abs}) en estado estable a través de una garganta adiabática convergente sin fricción hacia un ducto adiabático de área constante. El ducto es de 2 m de longitud y 0.1 m de diámetro interior. El factor de fricción promedio se estima como 0.02. ¿Cuál es el flujo másico máximo a través del ducto? Estime también los valores de temperatura estática, presión estática, temperatura y presión de estancamiento y velocidad a la entrada y salida del ducto de área constante.



Observaciones:

- El flujo en la garganta-boquilla es isentrópico
- El flujo en el tubo es adiabático con fricción (flujo Fanno)
- La disminución de la presión a la salida del tubo ocasiona un aumento del flujo másico
- El flujo es subsónico
- El flujo máximo se dará cuando se disminuya la presión en la salida (punto de ahogamiento) y se alcance un Ma=1

Procedimiento de solución:

- Calcular $f(l^*-l_1)/D = f(l_2-l_1)/D$.
- Con este valor, calcular Ma en la sección de entrada.

$$\frac{1}{k}\frac{(1-Ma^2)}{Ma^2} + \frac{k+1}{2k}\, ln\left\{\frac{\left[\frac{k+1}{2}\right]Ma^2}{1+\left[\frac{k-1}{2}\right]Ma^2}\right\} = \frac{f(l^*-l)}{D}$$

- Con este valor de Ma conocido, se pueden calcular las propiedades del fluido en este punto

$$\frac{p}{p^*} = \frac{1}{Ma}\left\{\frac{(k+1)/2}{1+\frac{k-1}{2}Ma^2}\right\}^{\frac{1}{2}} \qquad \frac{T}{T^*} = \frac{(k+1)/2}{1+\frac{k-1}{2}Ma^2} \qquad \frac{V}{V^*} = \left\{\frac{Ma^2(k+1)/2}{1+\frac{k-1}{2}Ma^2}\right\}^{\frac{1}{2}} \qquad \frac{\rho}{\rho^*} = \left\{\frac{1+Ma^2(k-1)/2}{\frac{k+1}{2}Ma^2}\right\}^{\frac{1}{2}} \qquad \frac{p_0}{p_0^*} = \frac{1}{Ma}\left[\left(\frac{2}{k+1}\right)\left(1+\frac{k-1}{2}Ma^2\right)\right]^{\frac{k+1}{2(k-1)}}$$

- Para conocer el flujo másico, se usa la ecuación para flujo isentrópico, ya que este Ma es el que corresponde a la salida de la boquilla (considerando las condiciones de entrada y salida de la boquilla, por supuesto).

$$W = A_2\sqrt{\frac{2gk}{k-1}(p_1\gamma_1)\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{2/k} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(k+1)/k}\right]}$$

- Para conocer las propiedades críticas necesarias, calcular primero T* a partir de

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

- La velocidad crítica puede obtenerse de la relación $V^* = \sqrt{RT^* k}$
- Conocida la velocidad en un punto dado, con la ecuación de continuidad puede calcularse el flujo másico.

Calcular las relaciones Ma_1, T_1/T^*, V_1/V^*, p_1/p^*, $p_{0,1}/p_0^*$

Obtener también T_1/T_0, $p_1/p_{0,1}$, $\rho_1/\rho_{0,1}$

Para hacer los cálculos, OBSERVAR que:

La temperatura, presión y densidad ***de estancamiento*** son constantes a través de la boquilla, por ser flujo ISENTRÓPICO.

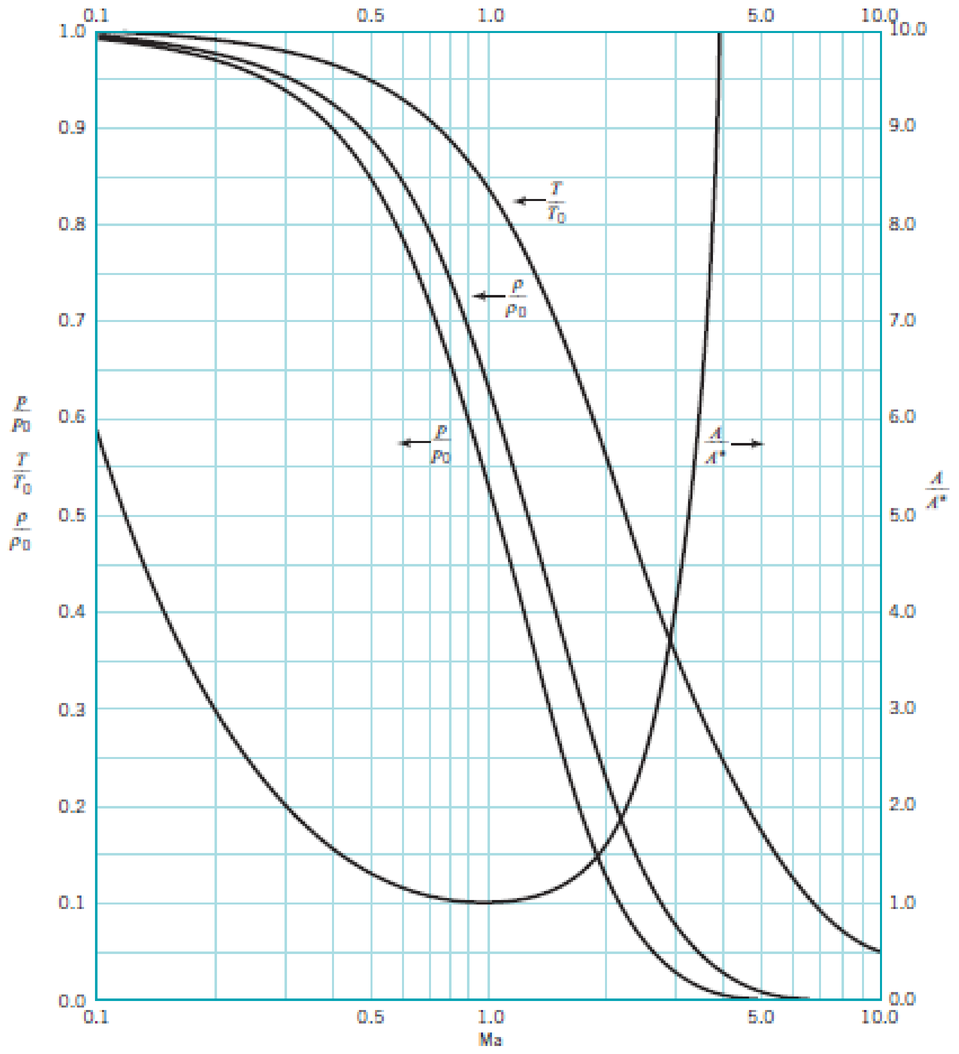
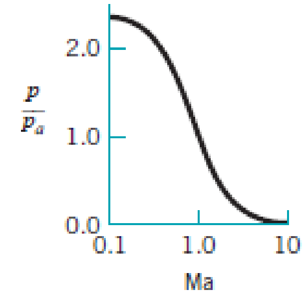


FIGURE D.1 Isentropic flow of an ideal gas with $k = 1.4$. (Graph provided by Dr. Bruce A. Reichert.)

El mismo ducto se recorta en un 50%, pero se mantiene la presión del problema anterior en la descarga. ¿El flujo másico aumentará o disminuirá por esta disminución? El factor de fricción se mantiene.

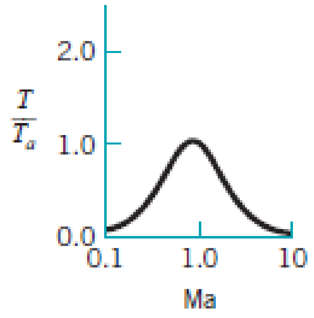
Se debe suponer que el flujo se agota o estrangula, por lo que se debe analizar la presión a la salida con la presión crítica ($p_d<p^*$). Si la nueva presión es menor a la crítica, la suposición se cumple y se pueden usar las mismas ecuaciones.

Flujo isotérmico

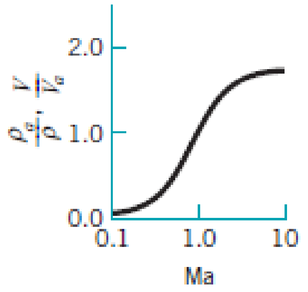


Las relaciones de las propiedades para este tipo de flujo son

$$\frac{p}{p^*} = \frac{1+k}{1+kMa^2}$$



$$\frac{T}{T^*} = \left[\frac{(1+k)Ma}{1+kMa^2}\right]^2$$



$$\frac{\rho^*}{\rho} = \frac{V}{V^*} = Ma\left[\frac{(1+k)Ma}{1+kMa^2}\right]$$

Además de las relaciones de las propiedades de estancamiento.

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

$$\frac{p_0}{p_0^*} = \frac{1+k}{(1+kMa^2)}\left[\left(\frac{2}{k+1}\right)\left(1+\frac{k-1}{2}Ma^2\right)\right]^{\frac{k}{k-1}}$$

Se encuentran fácilmente gráficas de estas funciones para aire frecuentemente en los apéndices de libros.

Con el balance de energía se obtiene

$$p_a^2 - p_b^2 = \frac{G^2RT}{M}\left[2ln\frac{\rho_a}{\rho_b} + \frac{f(L_b - L_a)}{r_H}\right]$$

G es el flux másico. Se puede usar esta ecuación incluso cuando el cambio de temperatura es pequeño, por lo que T es el promedio aritmético.

Aire a una presión manométrica de 1.7 atm y 15°C entra a una tubería horizontal de acero de 75 mm de diámetro y 70 m de longitud. La velocidad de flujo a la entrada de la tubería es de 0.265 m3/s. Suponiendo que el flujo es isotérmico, ¿cuál será la presión al extremo de la descarga?