

Flujo de fluidos compresibles

La variación de la densidad debe ser considerada en las ecuaciones que representan los sistemas en los que se transportan fluidos compresibles.

En el área de la ingeniería química se presentan pocos casos de los muy variados que existen en el área de estudio de los fluidos compresibles.

Flujo de fluidos compresibles

Dos parámetros importantes son el número de Mach y el número de Reynolds.

A bajas densidades, cuando la trayectoria media libre de las moléculas es apreciable en comparación con las dimensiones de los sólidos o las partículas en contacto se deben involucrar otras ecuaciones que no se presentan en este contexto.

Flujo de fluidos compresibles / Definiciones y ecuaciones básicas

Consideraciones para analizar los sistemas correspondientes al curso:

1. Estado estacionario
2. Flujo en una dimensión
3. Gradientes de velocidad despreciables
4. Fricción únicamente en la pared
5. Sin trabajo de eje
6. Energía potencial despreciable
7. Gas ideal con C_p constante

Flujo de fluidos compresibles / Definiciones y ecuaciones básicas

Ecuaciones utilizadas:

1. Ecuación de continuidad
2. Balance total de energía
3. Balance de energía mecánica
4. Ecuación de velocidad del sonido
5. Ecuación de estado del gas ideal

Ecuación de continuidad

$$dm = \rho u dS$$

$$\ln r + \ln S + \ln u = \text{constante}$$

$$\frac{dr}{r} + \frac{dS}{S} + \frac{du}{u} = 0$$

Balance total de energía

$$\frac{Q}{m} = H_b - H_a + \frac{u_b^2}{2} - \frac{u_a^2}{2}$$

$$\frac{dQ}{m} = dH + d\left(\frac{u^2}{2}\right)$$



Análisis de unidades

Balance de energía mecánica

$$\frac{dp}{r} + d\left(\frac{\rho u^2}{2}\right) + dh_f = 0$$

$$dh_f = \frac{u^2}{2} \frac{f dL}{r_H}$$

$$D = 4r_H$$



Balance de energía mecánica



$$D = 4r_H$$

$$D = 4 \frac{\text{Area de Flujo}}{\text{Perímetro Mojado}}$$

Balance de energía mecánica

$$\frac{dp}{r} + d\left(\frac{u^2}{2}\right) + \frac{u^2}{2} \frac{f dL}{r_H} = 0$$

Velocidad del sonido

$$a = \sqrt{\frac{\partial p}{\partial \rho}}_{\text{is}} = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}}$$

Velocidad del sonido

Es la velocidad de una onda de compresión - rarefacción moviéndose adiabáticamente y sin fricción.

Termodinámicamente, el movimiento de una onda de sonido es un proceso isentrópico.

Ecuaciones del gas ideal

$$P = \frac{r}{M} RT$$

$$H = H_0 + C_p(T - T_0)$$

$$U = H + PV = U_0 + c_v(T - T_0)$$

$$P\rho^{-\gamma} = cte \qquad TP^{-(1-1/\gamma)} = cte$$

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{C_p}{C_p - R/M}$$

Ecuaciones del gas ideal

$$c_p = \frac{R\gamma}{\gamma - 1}$$

$$c_v = \frac{R}{\gamma - 1}$$

$$S = S_0 + c_v \ln \frac{T}{T_0} + R \ln \frac{\rho_0}{\rho}$$

$$S = S_0 + c_p \ln \frac{T}{T_0} - R \ln \frac{p}{p_0}$$

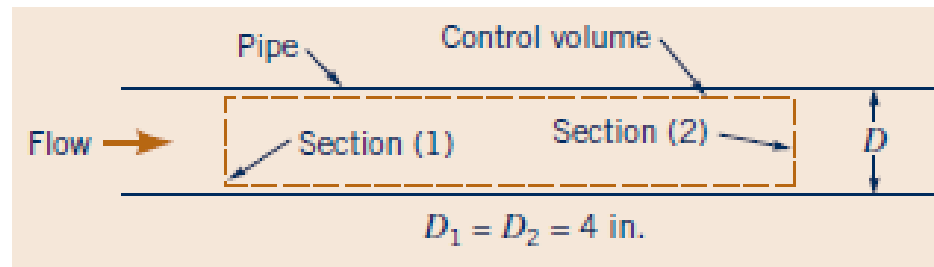
$$a = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} = \sqrt{RT\gamma}$$

Flujo de fluidos compresibles / Definiciones y ecuaciones básicas /

Ecuaciones del gas ideal

$$Ma^2 = \frac{ru^2}{gp} = \frac{u^2}{gTR/M}$$

Fluye aire en estado estable entre dos secciones de un tubo largo recto de 4 in de diámetro. Las temperaturas y presiones son $T_1=540^\circ\text{R}$, $p_1=100$ psia y $T_2=453^\circ\text{R}$, $p_2=18.4$ psia. Calcule (a) el cambio en energía interna entre la sección 1 y 2; (b) el cambio en entalpía entre las secciones y (c) el cambio en densidad entre las secciones.



Calcule ahora el cambio en entropía entre ambas secciones.

- Calcule la velocidad del sonido a 0°C, si $R=286.9 \text{ J/(kg K)}$.

Physical Properties of Air at Standard Atmospheric Pressure (SI Units)^a

Temperature (°C)	Density, ρ (kg/m ³)	Specific Weight ^b , γ (N/m ³)	Dynamic Viscosity, μ (N·s/m ²)	Kinematic Viscosity, ν (m ² /s)	Specific Heat Ratio, k (—)	Speed of Sound, c (m/s)
−40	1.514	14.85	1.57 E − 5	1.04 E − 5	1.401	306.2
−20	1.395	13.68	1.63 E − 5	1.17 E − 5	1.401	319.1
0	1.292	12.67	1.71 E − 5	1.32 E − 5	1.401	331.4
5	1.269	12.45	1.73 E − 5	1.36 E − 5	1.401	334.4
10	1.247	12.23	1.76 E − 5	1.41 E − 5	1.401	337.4
15	1.225	12.01	1.80 E − 5	1.47 E − 5	1.401	340.4
20	1.204	11.81	1.82 E − 5	1.51 E − 5	1.401	343.3
25	1.184	11.61	1.85 E − 5	1.56 E − 5	1.401	346.3
30	1.165	11.43	1.86 E − 5	1.60 E − 5	1.400	349.1
40	1.127	11.05	1.87 E − 5	1.66 E − 5	1.400	354.7
50	1.109	10.88	1.95 E − 5	1.76 E − 5	1.400	360.3
60	1.060	10.40	1.97 E − 5	1.86 E − 5	1.399	365.7
70	1.029	10.09	2.03 E − 5	1.97 E − 5	1.399	371.2
80	0.9996	9.803	2.07 E − 5	2.07 E − 5	1.399	376.6
90	0.9721	9.533	2.14 E − 5	2.20 E − 5	1.398	381.7
100	0.9461	9.278	2.17 E − 5	2.29 E − 5	1.397	386.9
200	0.7461	7.317	2.53 E − 5	3.39 E − 5	1.390	434.5
300	0.6159	6.040	2.98 E − 5	4.84 E − 5	1.379	476.3
400	0.5243	5.142	3.32 E − 5	6.34 E − 5	1.368	514.1
500	0.4565	4.477	3.64 E − 5	7.97 E − 5	1.357	548.8
1000	0.2772	2.719	5.04 E − 5	1.82 E − 4	1.321	694.8

Condición asterisco

La condición a la que $u = a$, $Ma = 1$, es conocida como la **condición asterisco**, la presión, la temperatura, la densidad y la entalpía se denotan como: p^* , T^* , ρ^* , H^* .

Temperatura de estancamiento

Se define para un fluido con alta velocidad, como la temperatura de reposo después de un proceso adiabático y sin trabajo de eje.

El estado de estancamiento se asocia con velocidad cero y un valor de entropía que corresponde a la del flujo de fluido. Se usa el subíndice 0.

Flujo de fluidos compresibles / Procesos de flujo compresible

Puede suceder:

1. Expansión isentrópica
2. Flujo adiabático
3. Flujo isotérmico

(Uno de los tres)

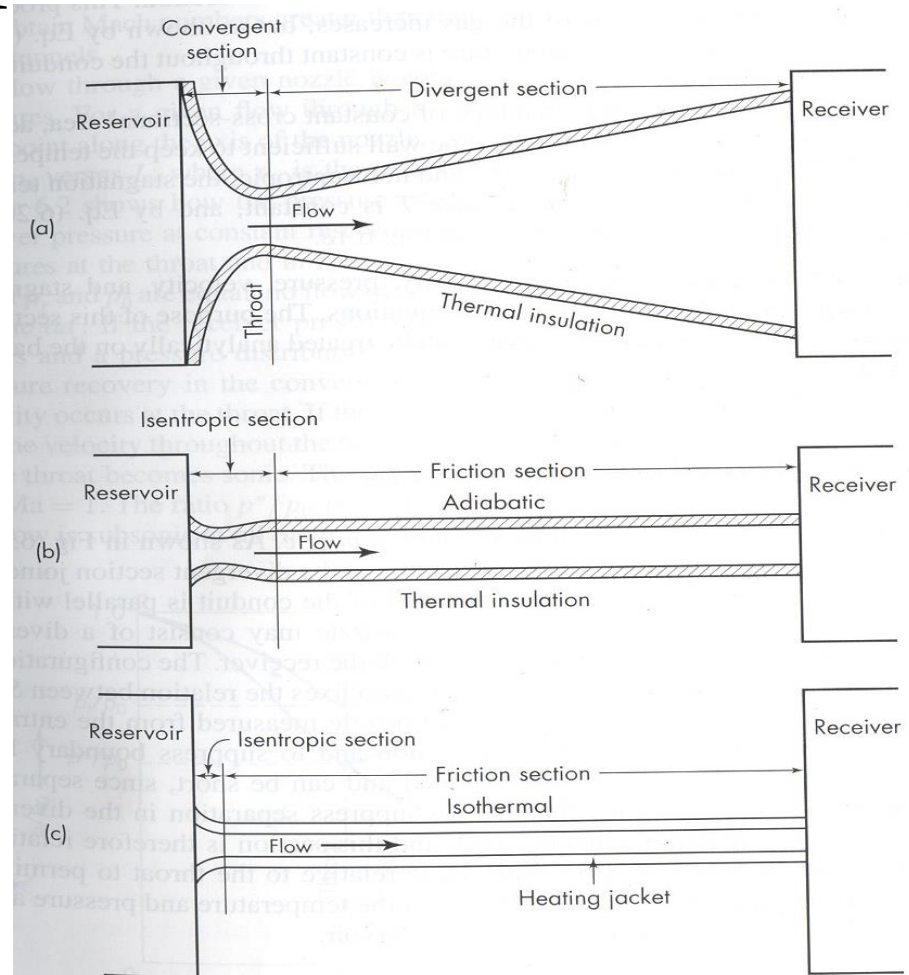


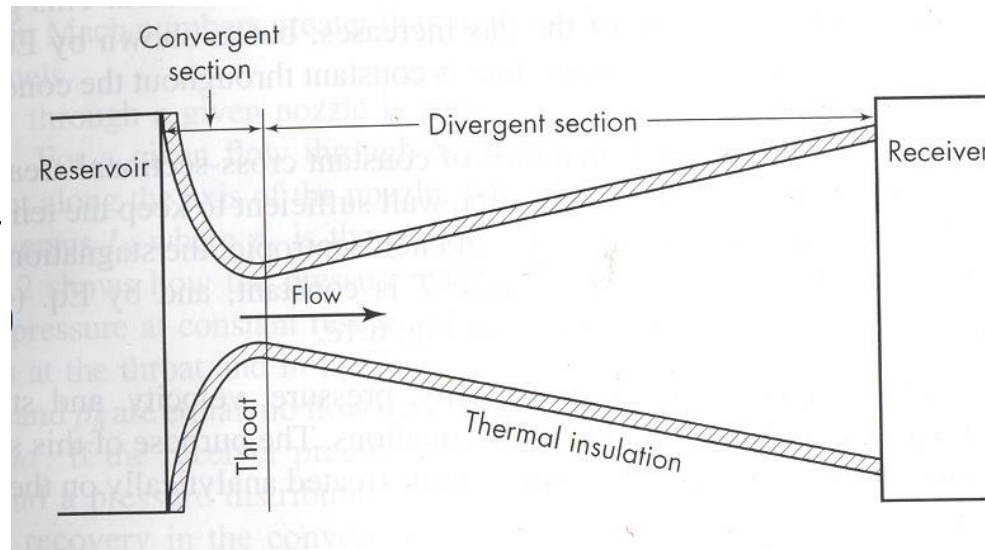
FIGURE 6.1

(a) Isentropic flow in a convergent-divergent nozzle. (b) Adiabatic friction flow. (c) Isothermal friction flow.

Flujo de fluidos compresibles / Procesos de flujo compresible / Flujo isentrópico en boquillas

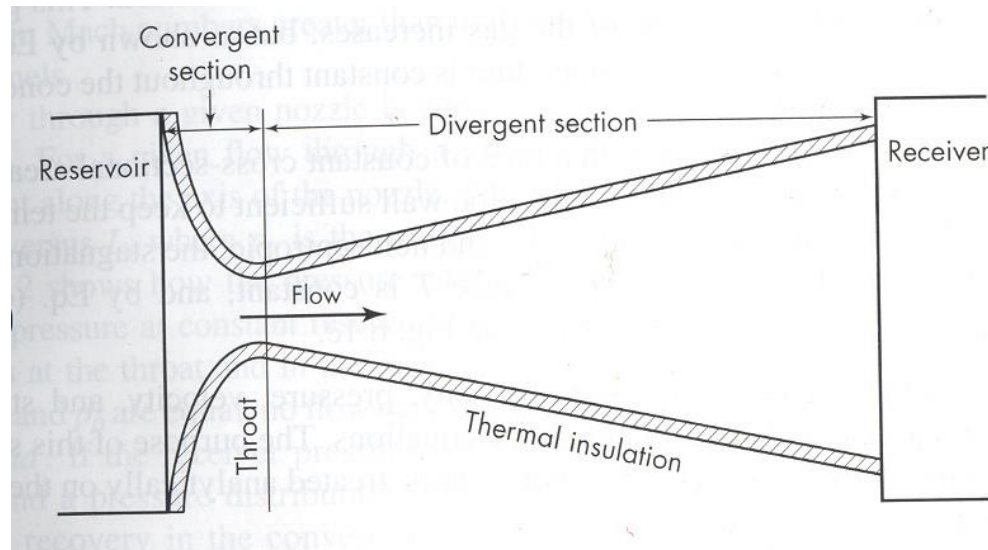
Una boquilla consiste de una sección convergente y una sección divergente unidas por una garganta. La garganta es de longitud corta y con paredes paralelas al eje de viaje del fluido.

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



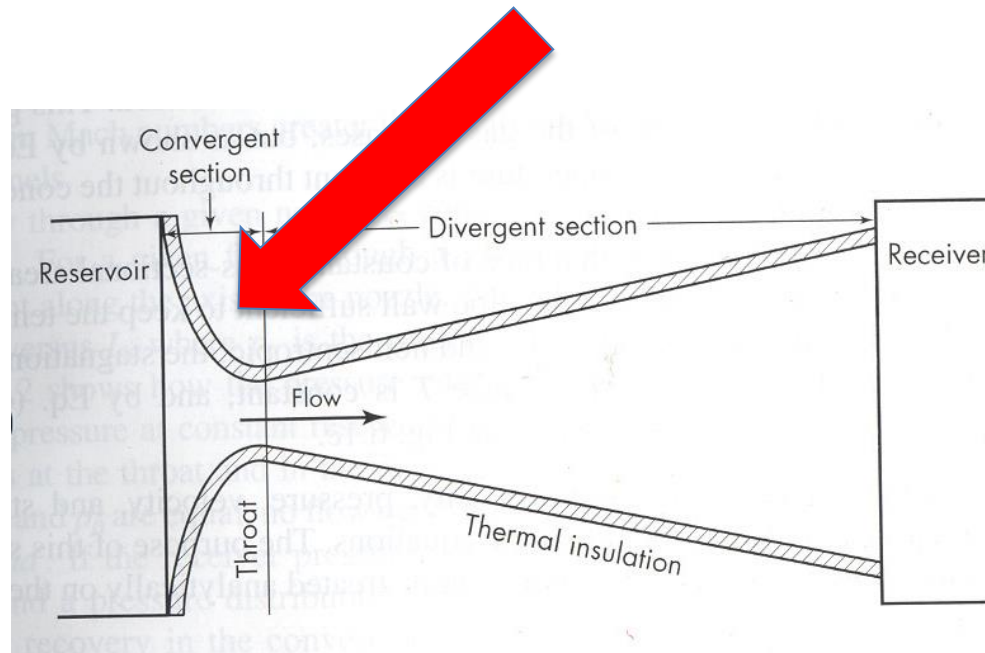
Flujo de fluidos compresibles / Procesos de flujo compresible / Flujo isentrópico en boquillas

La configuración de la boquilla es manipulada por el diseñador al fijar la relación entre el área de flujo y la longitud axial.



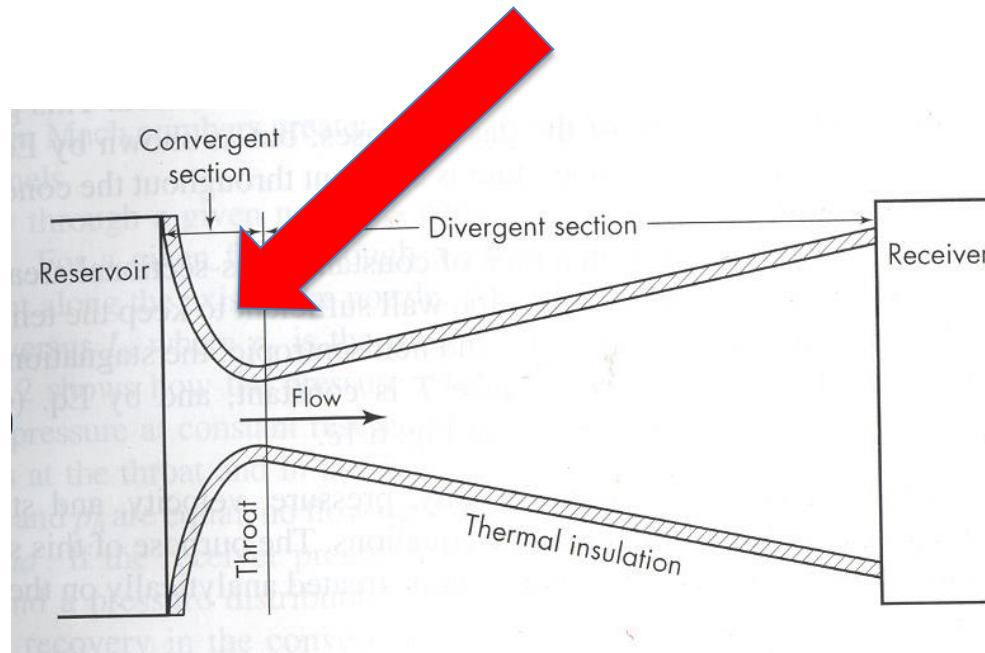
Flujo de fluidos compresibles / Procesos de flujo compresible / Flujo isentrópico en boquillas

El propósito de la **sección convergente** es **incrementar la velocidad y disminuir la presión** del gas.



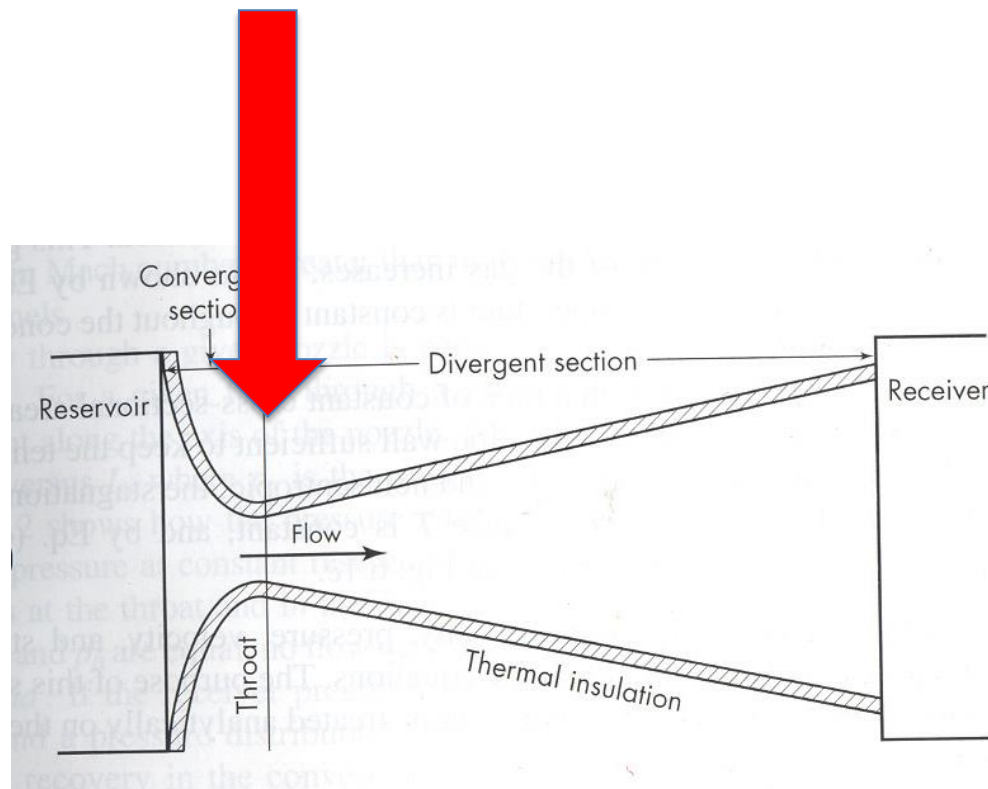
Flujo de fluidos compresibles / Procesos de flujo compresible / Flujo isentrópico en boquillas

En la **sección convergente siempre** existe **flujo subsónico**. **NO** es posible que se genere flujo supersónico en esa región.



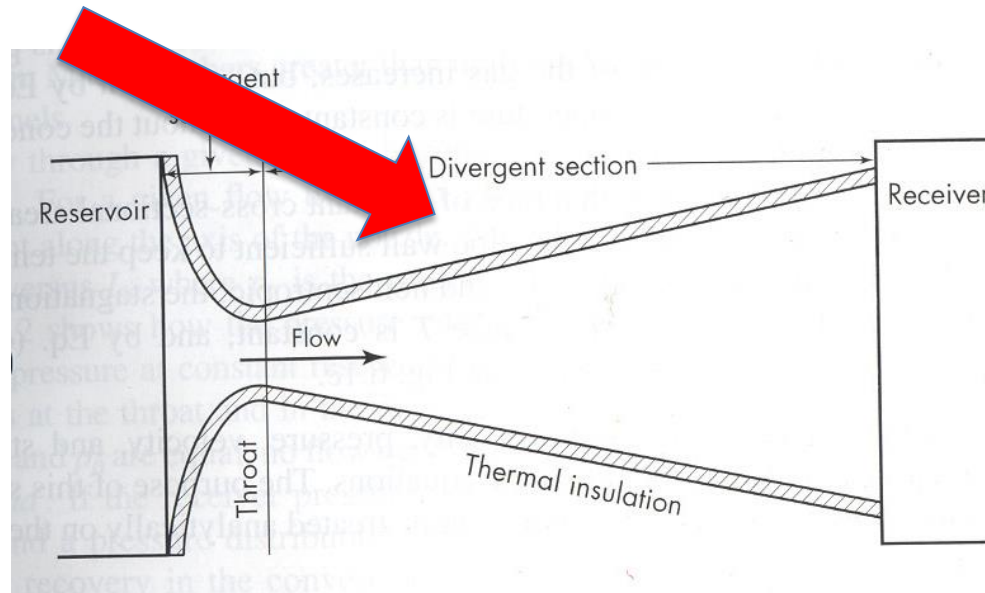
Flujo de fluidos compresibles / Procesos de flujo compresible / Flujo isentrópico en boquillas

En la **garganta** puede presentarse **flujo sónico**.



Flujo de fluidos compresibles / Procesos de flujo compresible / Flujo isentrópico en boquillas

En la **sección divergente** puede presentarse **flujo subsónico o supersónico**.



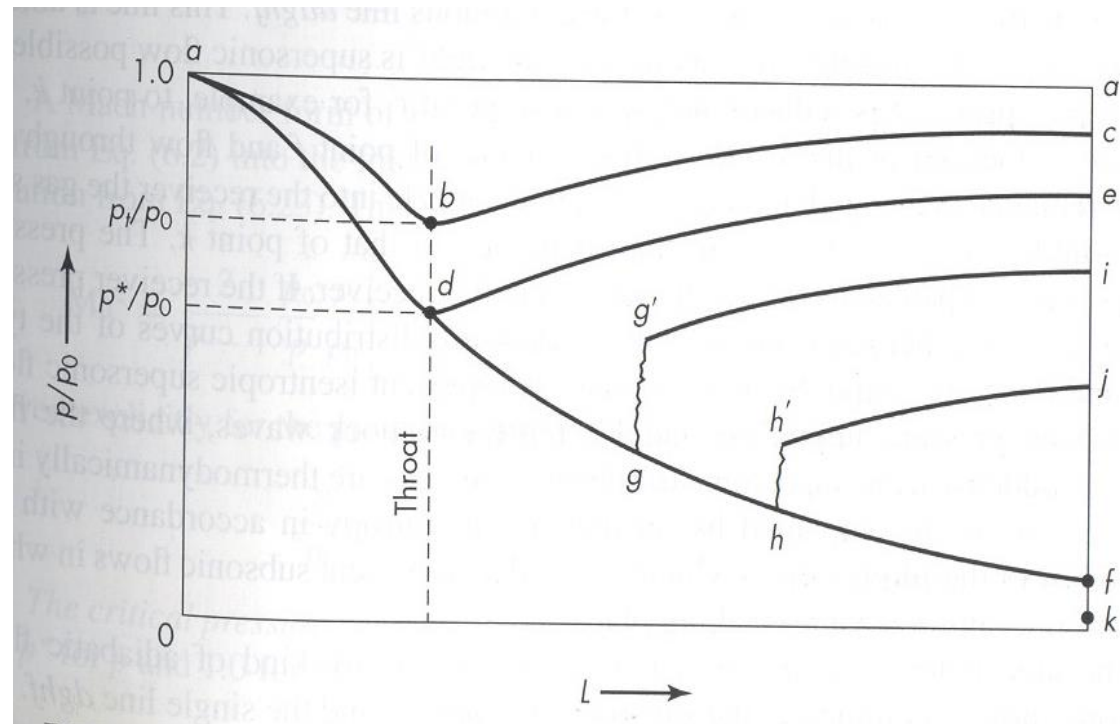
Flujo de fluidos compresibles / Procesos de flujo compresible / Flujo isentrópico en boquillas

En flujo **subsónico** se reduce la velocidad y se incrementa la presión. (Medición de flujo)

En el flujo **supersónico** se generan *jets*, *spray*, túneles, condensación

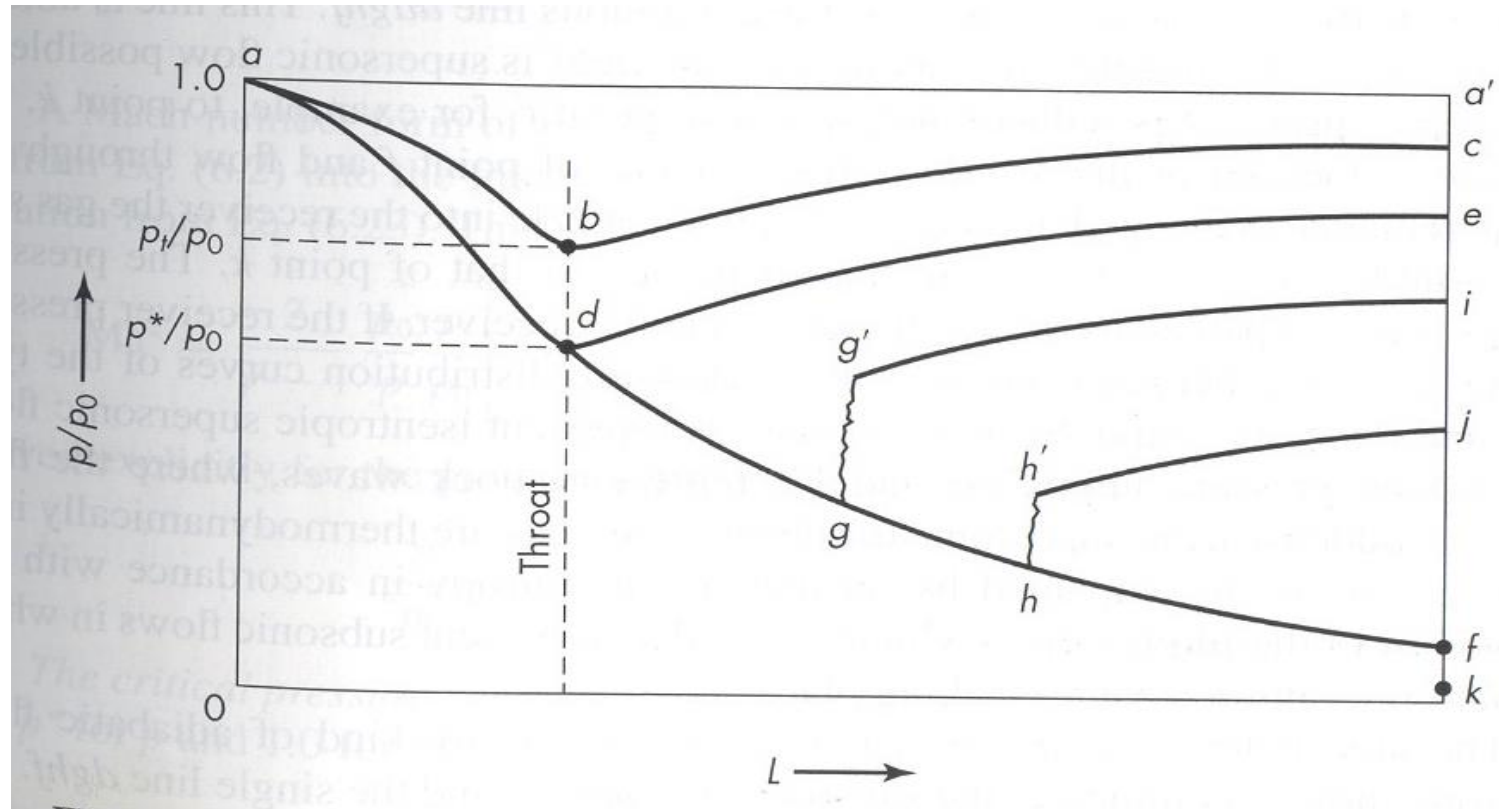
Flujo de fluidos compresibles / Procesos de flujo compresible / Flujo isentrópico en boquillas

El flujo a través de una boquilla está controlado por las presiones en el reservorio y en el destino del fluido.



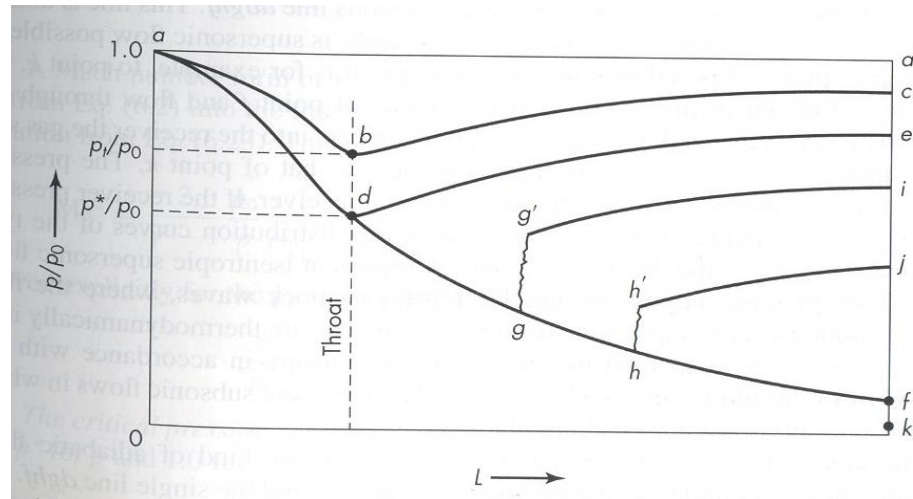
Flujo de fluidos compresibles / Procesos de flujo compresible / Flujo isentrópico en boquillas

Si $p_r = p_0$ no existe flujo: Línea aa'



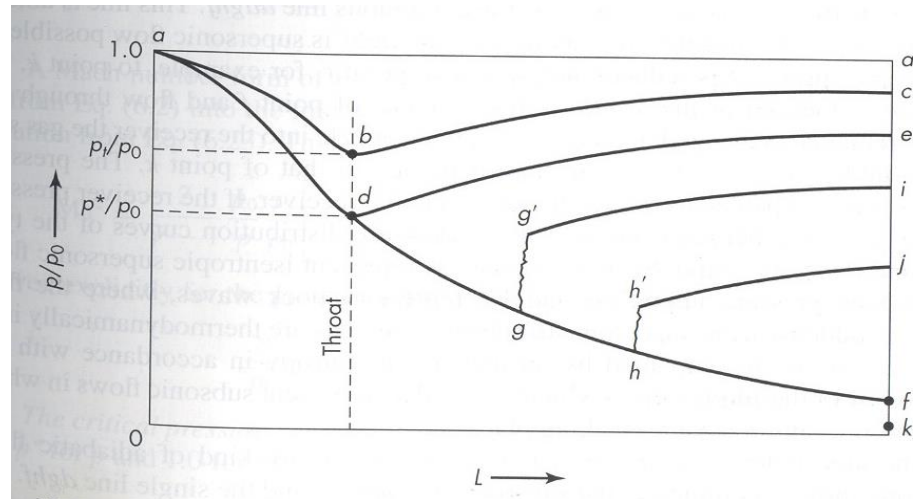
Flujo de fluidos compresibles / Flujo isentrópico en boquillas

Si la presión en el destino es menor que en el reservorio entonces se presenta flujo con un perfil como el descrito en la línea abc. Obsérvese que en la región de convergencia se recupera la presión.



Flujo de fluidos compresibles / Flujo isentrópico en boquillas

Si la presión en el destino disminuye puede presentarse flujo sónico en la garganta. Según línea *ade*. $Ma = 1$. p^*/p_0 se conoce como razón crítica de presión.



Relaciones de flujo isentrópico

Para cambio en las propiedades del gas durante el flujo.

$$\frac{P}{r^g} = \frac{P_0}{r_0^g}$$

$$\frac{T}{p^{1-1/g}} = \frac{T_0}{p_0^{1-1/g}}$$

Relaciones de flujo isentrópico

El balance de energía puede aplicarse, primero en forma diferencial:

$$\frac{dP}{r} = - \frac{a^2}{c} \frac{d\epsilon}{2} \div \frac{\epsilon}{\theta}$$

Puede integrarse desde el reservorio hasta cierto punto, antes utilizando la relación de estado mostrada.

$$\dot{Q}_0^u \frac{a^2}{c} \frac{d\epsilon}{2} \div \frac{\epsilon}{\theta} = - \frac{P_0^{1/g}}{r_0} \dot{Q}_{P_0}^P \frac{dP}{P^{1/g}}$$

Relaciones de flujo isentrópico

Integrando y despejando para la velocidad:

$$u^2 = \frac{2gP_0}{(g-1)r_0} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{1/g} - \frac{2gP_0}{(g-1)r_0} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{1/g} \left(\frac{u}{u_0} \right)^2$$

Relaciones de flujo isentrópico

La anterior expresión de velocidad puede insertarse en la expresión

$$Ma^2 = \frac{ru^2}{gp} = \frac{u^2}{gTR/M}$$

Resultando

$$Ma^2 = \frac{2gP_0 r}{(g-1)Pr_0} \frac{1 - \frac{P}{P_0}^{1-1/g}}{1 - \frac{P}{P_0}}$$

o

$$Ma^2 = \frac{2}{(g-1)} \frac{1 - \frac{P}{P_0}^{1-1/g}}{1 - \frac{P}{P_0}}$$

Relaciones de flujo isentrópico

Explícitamente para la presión:

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{\left\{1 + \frac{\gamma - 1}{2} Ma^2\right\}^{1/(1-1/\gamma)}}$$

Si se sustituye $Ma = 1$, se puede conocer la presión crítica para un fluido de interés:

$$r_c = \frac{P^*}{P_0} = \frac{1}{\left\{1 + \frac{\gamma - 1}{2}\right\}^{1/(1-1/\gamma)}}$$

Para aire, esta relación es 0.528

Relaciones de flujo isentrópico

Finalmente para el flujo másico:

$$G = \dot{m} = \sqrt{\frac{2g_0 p_0}{g-1}} \frac{a_p}{\sqrt{\rho_0}} \sqrt{1 - \frac{a_p}{\sqrt{\rho_0}}}$$

Flujo de fluidos compresibles / Procesos de flujo compresible / Flujo isotérmico

Se presenta si se transfiere calor por el conducto (paredes) por donde fluye el fluido y si no hay efectos de la fricción que causen un cambio en la temperatura.

Además si el conducto no está aislado y existe la misma temperatura dentro y fuera del mismo y el gas fluye a bajas velocidades.

Flujo de fluidos compresibles / Procesos de flujo compresible / Flujo isotérmico

Aun en grandes conductos pueden aplicarse estas deducciones y consideraciones.

Ecuación de Energía: $v dv + g dz + \frac{dp}{\rho} + dF = 0$

Si $dz = 0$, entonces: $v dv + V dp + \frac{2 f v^2 dL}{D} = 0$

El gasto másico: $G = v \rho = \frac{v}{V} = \frac{\dot{m}}{A}$

Flujo de fluidos compresibles / Procesos de flujo compresible / Flujo isotérmico

Sustituyendo v por GV : $G^2 \frac{dV}{V} + \frac{dp}{V} + \frac{2fG^2}{D} dL = 0$

Usando la ecuación de estado: $pV = \frac{1}{M} RT$

Sustituyendo por la presión e integrando:

$$G^2 \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} + \frac{M}{2RT} \int_{P_1}^{P_2} p dp + 2f \frac{G^2}{D} \int_{L_1}^{L_2} dL = 0$$

Flujo de fluidos compresibles / Procesos de flujo compresible / Flujo isotérmico

Integrando y reacomodando:

$$G^2 \ln \frac{V_2}{V_1} + \frac{M}{2RT} (p_2^2 - p_1^2) + 2f \frac{G^2}{D} \Delta L = 0$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1} \quad p_1^2 - p_2^2 = \frac{4f\Delta LG^2RT}{DM} + \frac{2G^2RT}{M} \ln \frac{p_1}{p_2}$$

Flujo de fluidos compresibles / Procesos de flujo compresible / Flujo isotérmico

El Balance de Energía queda como:

$$p_1^2 - p_2^2 = \frac{2G^2 RT}{M} \left[2f \frac{L}{D} + \ln \frac{p_1}{p_2} \right]$$



Análisis de unidades

Ecuación 3.21. Levenspiel O., Engineering Flow and Heat Exchange. Plenum Press. New York (**Fanning**)

Ecuación 6.49. McCabe, W. L., Unit Operations of Chemical Engineering 7th Ed. McGraw-Hill's. New York 2005 (**Fanning**)

Ecuación 20-30 d. Foust, A. S., Principles of Unit Operations 2nd Ed., JWS, 1987, New York, (**Darcy**)

Flujo de fluidos compresibles / Procesos de flujo compresible / Flujo isotérmico

Sistema 1 - Ejemplo. Se transporta aire a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ en una tubería de acero comercial de diámetro interno 0.1524 m , la presión de entrada es 500 kPa y de salida es 300 kPa . La longitud de la tubería es 168 m . Calcular el gasto másico.

Flujo de fluidos compresibles / Procesos de flujo compresible / Flujo adiabático

El proceso de flujo es adiabático y sin fricción. Es un fenómeno que ocurre si el flujo es “muy rápido”, de tal forma que no tiene oportunidad para la transferencia de calor con los alrededores. El análisis isentrópico puede aplicarse a flujos de alta velocidad sobre cortas distancias en las que la transferencia de calor y la fricción pueden despreciarse.

Flujo de fluidos compresibles / Procesos de flujo compresible / Flujo adiabático

Aplicando relaciones termodinámicas para procesos adiabáticos en gases ideales a la ecuación del balance de energía:

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} = \frac{P_1}{\rho_1} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \quad \text{ó} \quad \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho_2} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$$

Flujo de fluidos compresibles / Procesos de flujo compresible / Flujo adiabático

v = velocidad

g = gravedad

p = presión

$\gamma = C_p/C_v$

ρ = densidad

Flujo de fluidos compresibles / Procesos de flujo compresible / Flujo adiabático

Considere que se transporta aire adiabáticamente, con velocidades respectivas en los puntos de entrada y salida: $V_1 = 30.5 \text{ m s}^{-1}$, $V_2 = 150 \text{ m s}^{-1}$, la presión en la entrada del sistema: $P_1 = 350 \times 10^3 \text{ Pa}$, con peso específico $= 0.028 \times 10^3 \text{ N m}^{-3}$

Calcular P_2

Flujo de fluidos compresibles / Procesos de flujo compresible / Flujo adiabático

Resolución:

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} = \frac{P_1}{\rho_1} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right]$$
$$1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} = \left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \right) \frac{\rho_1}{P_1} \frac{\gamma - 1}{\gamma}$$

Flujo de fluidos compresibles / Procesos de flujo compresible / Flujo adiabático

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 1 - \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} * \frac{\rho_1}{P_1} \frac{\gamma-1}{\gamma} \quad P_2 = P_1 \left[1 - \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \frac{\rho_1}{P_1} \frac{\gamma-1}{\gamma} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

$$P_2 = 350 \times 10^3 \left[1 - \left(\frac{150^2 - 30.5^2}{2} \right) \left(\frac{0.028 \times 10^3}{9.8 * 350 \times 10^3} \right) \left(\frac{1.4-1}{1.4} \right) \right]^{\frac{1.4}{1.4-1}}$$

$$P_2 = 320 \times 10^3 \text{ Pa}$$

Ventiladores y Compresores

Los equipos para mover gases y vapores a través de otros equipos y ductos reciben el nombre de compresores, ventiladores o sopladores, dependiendo de la caída de presión o presión de trabajo.

Los ventiladores tienen presiones de descarga de 0.01 a 0.15 atm. (centrífugos o axiales)

Ventiladores y Compresores

Los sopladores (son de 1 etapa) con presiones de descarga de 0.15 atm a 1 atm. Las relaciones de compresión son de 4.

Los compresores manejan presiones de salida hasta de 55 atm.

Ventiladores y Compresores

Ventiladores

Un ventilador es esencialmente una bomba para gas; la diferencia es el grado de compresibilidad respecto a los líquidos. Su aplicación es en secadores, hornos, quemadores, acondicionamiento de aire, eliminación de humo.

Ventiladores y Compresores

Cálculo de trabajo y potencia

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho} + W = \frac{v_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho}$$

El comportamiento de un ventilador centrífugo varía con la temperatura, el número de revoluciones por minuto y la densidad del gas. Es necesario tener esto en consideración, ya que los catálogos de los fabricantes toman como base 20 °C y 1 atm de presión.

Ventiladores y Compresores

Un compresor es una bomba para un gas, con $P_{salida}/P_{entrada}$ significativamente mayor a 1.0. Si la presión cambia en menor proporción la bomba es llamada soplador o ventilador. Los ventiladores y sopladores trabajan como las bombas centrífugas y su comportamiento se predice como el de esas bombas.

Ventiladores y Compresores

El trabajo de un pistón simple es

$$W = \int F dx = \int P A dx = \int P dV = \int \frac{dP}{r}$$

En términos de la Primera Ley de la Termodinámica (ecuación del Balance de Energía):

$$W = \int_{P_a}^{P_b} \frac{dp}{r}$$

Ventiladores y Compresores

Si la compresión es adiabática, se utilizan las relaciones de procesos adiabáticos, resultando:

$$W = \frac{P_a g}{(g-1) r_a} \left(\frac{P_b}{P_a} \right)^{1-1/g} - 1 \dot{U}_a$$

Ventiladores y Compresores

Si la compresión es isotérmica:

$$W = \dot{Q}_{P_a}^{P_b} V dP$$

Usando las relaciones de estado del gas ideal

$$W = \dot{Q}_{P_a}^{P_b} \frac{dP}{r} = \frac{RT}{M} \dot{Q}_{P_a}^{P_b} \frac{dP}{P} = \frac{RT}{M} \ln \frac{P_b}{P_a}$$

Ventiladores y Compresores

EJEMPLO:

Un compresor con 100% de eficiencia se requiere para comprimir aire de 1 a 3 atm. La temperatura de entrada 68° F. Calcular el trabajo por libra mol para un compresor isotérmico y para un compresor adiabático.

Ventiladores y Compresores

Compresor Isotérmico:

$$W = RT \ln \frac{P_2}{P_1} = 1.987 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmol}^\circ \text{R}} \times 528^\circ \text{R} \ln 3$$

$$W = 1,153 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmol}} = 2.68 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} = 92.36 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Ventiladores y Compresores

Compresor adiabático:

$$W = 1.987 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmol}^\circ \text{R}} \times 528^\circ \text{R} \frac{1.4}{0.4} \left(3^{1.4} - 1 \right)$$

$$W = 1,354 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmol}} = 3.146 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} = 108.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Ventiladores y Compresores

La diferencia entre las dos respuestas es debida al incremento en la temperatura del gas en el compresor adiabático. De

$$T_1^g P_1^{1-g} = T_2^g P_2^{1-g}$$

Se obtiene que $T_2 = 722.7 \text{ }^\circ\text{R}$

Ventiladores y Compresores

Para el caso de la compresión isotérmica se incrementó la densidad 3 veces, y en el caso de la compresión adiabática se incrementó 2.192 veces. En el segundo caso no se requiere servicio de enfriamiento.

Ventiladores y Compresores

Otro ejemplo.

Se comprime aire de 1 a 10 atm. La temperatura de entrada es 68°F

¿Cuánto es el trabajo por mol para:

- a) Un compresor isotérmico
- b) Un compresor adiabático
- c) Un compresor adiabático de dos etapas en el cual el gas se comprime adiabáticamente a 3 atm y luego es enfriado a 68°F y posteriormente se comprime de 3 a 10 atm.

Ventiladores y Compresores

a) Compresor Isotérmico

$$W = 1.987 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmol } ^\circ R} \times 528^\circ R \ln 10 = 2,416 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmol}}$$

$$W = 5.614 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

Ventiladores y Compresores

b) Compresor Adiabático

$$W = 1.987 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmol}^\circ \text{R}} \times 528^\circ \text{R} \left[\frac{1.4}{0.4} \left(10^{1.4} - 1 \right) \right]$$

$$W = 3,418 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmol}} = 7.96 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

Ventiladores y Compresores

c) Compresión por etapas:

$$W = 1.987 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmol}^\circ R} \times 528^\circ R \left[\frac{1.4}{0.4} \left(\frac{3}{2} \right)^{\frac{0.4}{1.4}} - 1 \right] + \frac{10}{3} \left[\frac{1.4}{0.4} \left(\frac{3}{2} \right)^{\frac{0.4}{1.4}} - 1 \right]$$

$$W = 2,862 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmol}} = 6.6 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

Ventiladores y Compresores

Ejemplo

Se debe comprimir aire a 70 °F y presión atmosférica a 4000 psig, el flujo es de 125 ft³ min⁻¹ (STD), ¿Cuál es la potencia del compresor o de los compresores con etapas de enfriamiento?

$$W = \frac{\dot{n}RT_1\gamma}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right]$$

Ventiladores y Compresores

$$\dot{n} = \frac{PV}{RT} = \frac{(1\text{atm})(0.05899\text{m}^3 / \text{s})}{(8.314)(273.15\text{K})} = 2.6319\text{mol} / \text{s}$$

$$W = \frac{(2.6319\text{mol} / \text{s})(8.314)(294.2611\text{K})(1.40)}{1.40 - 1} \left[\left(\frac{2.768035 \times 10^7 \text{Pa}}{101325 \text{Pa}} \right)^{(1.4-1)/1.4} - 1 \right]$$

$$W = 89\,410.27 \text{ Watts} = 119.9011 \text{ hp}$$

Flujo de fluidos compresibles / Procesos de flujo compresible /

Ventiladores y Compresores

$$\frac{T}{P^{1-1/\gamma}} = \frac{T_0}{P_0^{1-1/\gamma}}$$

$$T = \frac{294.2611K}{101325^{1-1/1.4} Pa} \left(2.7680 \times 10^7 Pa \right)^{1-1/1.4} = 1461.715K$$

$$N = 1$$

Ventiladores y Compresores

$$r_c = \frac{P_2}{P_1} = 273.1839 \quad (\text{Relación de compresión})$$

$$N = 2$$

$$P_1 = 14.61 \text{ psia}$$

$$P_2 =$$

$$P_3 = 4014.69 \text{ psia}$$

Flujo de fluidos compresibles / Procesos de flujo compresible /

Ventiladores y Compresores

$$r = \left(\frac{P_{n+1}}{P_1} \right)^{1/n}$$

$$r = \left(\frac{4014.69}{14.69} \right)^{1/2} = 16.53$$

$$P_2 = 242.825 \text{ psia.}$$