

Termodinámica
FIS1523-4

Tema #5
Primera Ley
(Sistemas Abiertos)

Nuevo tema:

Primera Ley para Sistemas Abiertos

CAPÍTULO

5

ANÁLISIS DE MASA Y ENERGÍA DE VOLÚMENES DE CONTROL

En el capítulo 4 se aplicó a sistemas cerrados la relación de balance de energía expresada como $E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} = \Delta E_{\text{sistema}}$. En este capítulo se amplía el análisis de energía a sistemas en los que hay flujo másico a través de sus fronteras, es decir, volúmenes de control, con énfasis particular en sistemas de flujo estacionario.

En este capítulo se inicia con el desarrollo de la relación general de *conservación de la masa* para volúmenes de control y se continúa con una explicación del trabajo de flujo y la energía de flujos de fluido. Luego, se aplica el balance de energía a sistemas que involucran *procesos de flujo estacionario* y se analizan dispositivos comunes con este tipo de flujo como toberas, difusores, compresores, turbinas, válvulas de estrangulamiento, cámaras de mezclado e intercambiadores de calor. Por último, se aplica el balance de energía a *procesos de flujo no-variable,* como la carga y descarga de recipientes.

OBJETIVOS

En el capítulo 5, los objetivos son:

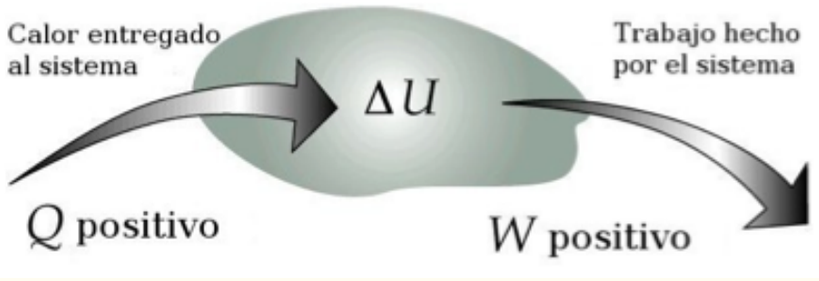
- Desarrollar el principio de conservación de la masa.
- Aplicar el principio de conservación de la masa a varios sistemas que incluyen volúmenes de control de flujo estacionario y no estacionario.
- Aplicar la primera ley de la termodinámica como enunciado del principio de conservación de la energía para volúmenes de control.

(Capítulo 5 del C&B)

Primera Ley

Para un **<u>sistema cerrado y estacionario</u>** nos quedó que:

$$\Delta U = Q - W \qquad dU = \delta Q - \delta W$$



ya que Q y W son las únicas dos formas de energía que pueden atravesar la frontera de un sistema cerrado

Ahora extenderemos el análisis de energía a sistemas en donde, aparte de calor y trabajo, hay flujo de masa a través de sus fronteras

Sistemas Abiertos

Los sistemas termodinámicos abiertos juegan un rol sumamente importante en nuestra sociedad. Algunos ejemplos:

Bombas →



Turbinas →



Compresores →



Toberas (boquillas) →



Masa de Control vs. Volumen de Control

¿Por qué el término “volumen de control”?

Al considerar sistemas cerrados, en donde la masa no cambia, por lo general tenía más sentido tomar esa masa fija como el sistema (masa de control)

Sin embargo, al considerar sistemas abiertos, por lo general es más práctico considerar un volumen fijo como el sistema.

Por eso el título “Volumen de Control” (abreviado VC)

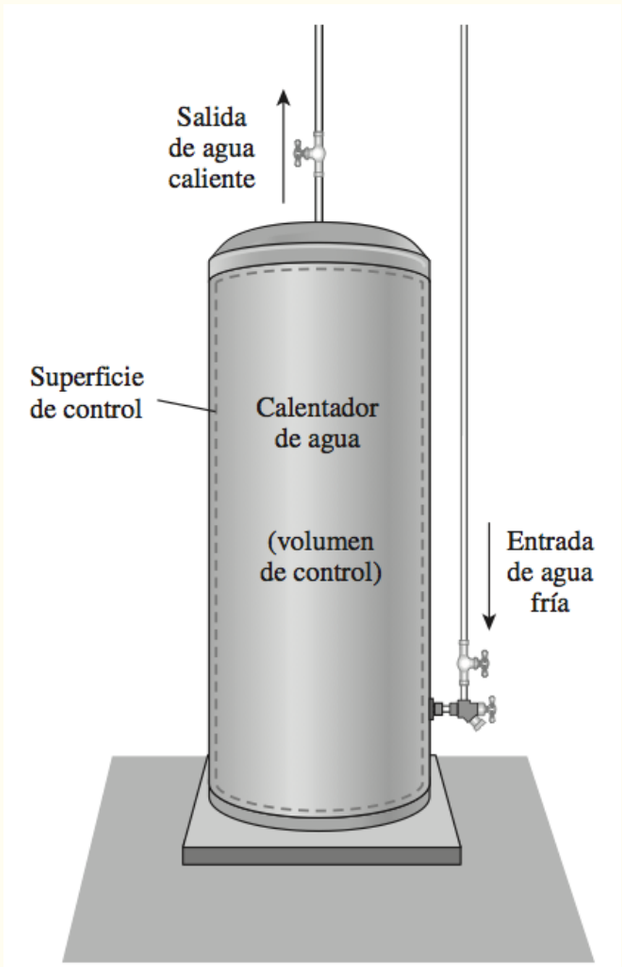


FIGURA 1-23
Un sistema abierto (o volumen de control) con una entrada y una salida.

Primera Ley

¿El flujo de masa tiene que tomarse en cuenta en la ecuación de la primera ley?

¡Sí!



Por ejemplo, si yo meto una papa caliente en un una olla con agua (mi volumen de control), la temperatura del agua se va a elevar

La primera ley nos va a quedar algo como lo siguiente:

$$\Delta E_{sistema} = \underbrace{(Q_{entra} - Q_{sale})}_{Q} + \underbrace{(W_{entra} - W_{sale})}_{-W} + (E_{masa,entra} - E_{masa,sale})$$

ya que seguimos la convención en donde el trabajo que hace el sistema (i.e. W_{sale}) es positivo.

Pero antes de hacer el balance de energía, necesitamos estudiar algunas cosas relacionadas al flujo másico

Conservación de Masa

5-1 ▪ CONSERVACIÓN DE LA MASA

La conservación de la masa es uno de los principios fundamentales de la naturaleza. Todos estamos familiarizados con este principio y no es difícil de entender. Una persona no tiene que ser un científico para saber cuánto aderezo de vinagre y aceite se obtiene al mezclar 100 gramos de aceite con 25 gramos de vinagre. Incluso el balanceo de ecuaciones químicas se hace con base en el principio de conservación de la masa. Cuando 16 kg de oxígeno reaccionan con 2 kg de hidrógeno, se forman 18 kg de agua (Fig. 5-1). En un proceso de electrólisis, el agua se separa en 2 kg de hidrógeno y 16 kg de oxígeno.

(Sección 5.1 del C&B)

Balance de Masa

La conservación de la masa es uno de esos principios fundamentales de la ciencia para el cual no se ha encontrado ninguna excepción

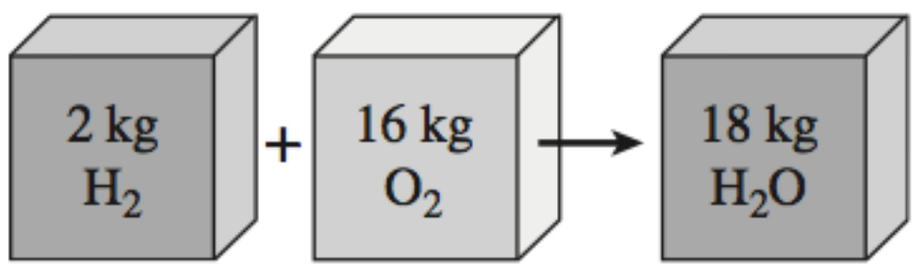
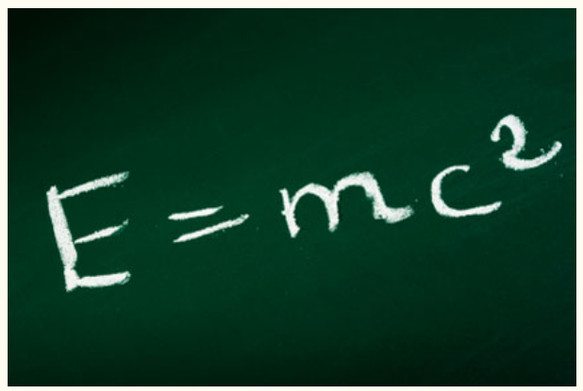
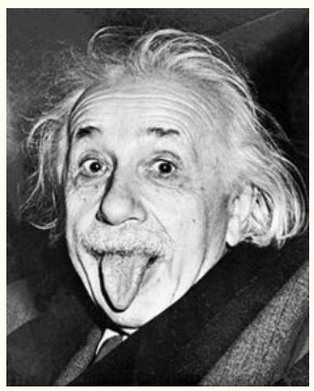


FIGURA 5-1

La masa se conserva incluso durante las reacciones químicas.

Nótese que sí se puede convertir la energía en masa y viceversa, pero no veremos ese tipo de reacciones en este curso:





Balance de masa

En palabras, escribimos la conservación de masa así:

$$\begin{pmatrix}\text{Masa total que entra}\\ \text{al VC durante } \Delta t\end{pmatrix} - \begin{pmatrix}\text{Masa total que sale}\\ \text{del VC durante } \Delta t\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\text{Cambio neto de masa}\\ \text{dentro del VC durante } \Delta t\end{pmatrix}$$

En ecuaciones:

$$m_{\text{entrada}} - m_{\text{salida}} = \Delta m_{\text{VC}} \qquad (\text{kg})$$

o

$$\dot{m}_{\text{entrada}} - \dot{m}_{\text{salida}} = dm_{\text{VC}}/dt \qquad (\text{kg/s})$$

Recordatorio: el punto sobre un símbolo se usa para denotar la derivada respecto al tiempo.

$$\frac{dm_{\text{VC}}}{dt} = \sum_{\text{entrada}} \dot{m} - \sum_{\text{salida}} \dot{m}$$

típicamente las ecuaciones se escriben con sumatorias para denotar el hecho de que puede haber múltiples entradas y/o salidas

Balance de masa

En general, tenemos que:

$$m_{VC} = \int_{VC} \rho \, dV$$

Por lo que:

$$\frac{dm_{VC}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{VC} \rho \, dV$$

Si la densidad es constante, entonces:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = \frac{\dot{V}}{v} = \frac{vA}{v} = \rho v A$$

volumen específico

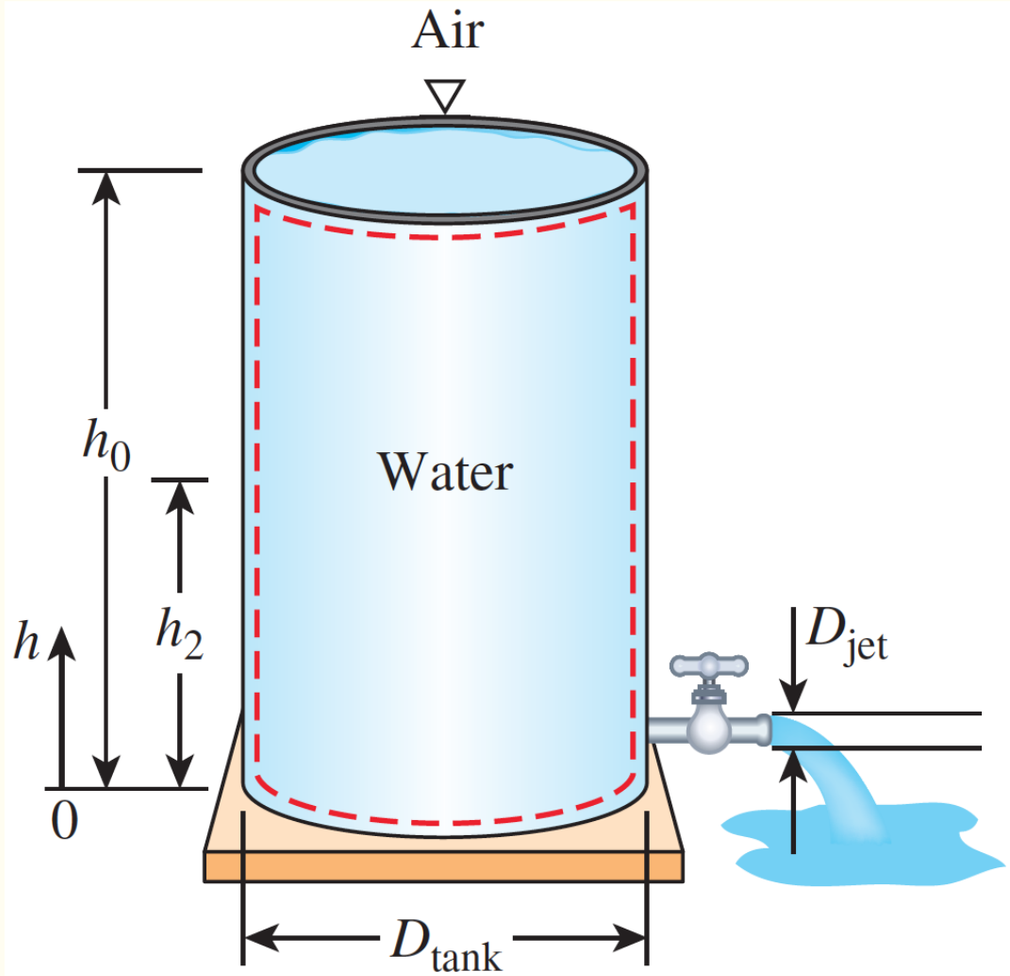
velocidad del flujo

área transversal

Ejercicio

(5-2 resuelto en C&B)

Un tanque cilíndrico de 91.4cm de diámetro y 122cm de altura sin tapa está inicialmente lleno con agua. Se abre la llave de descarga ubicada cerca del fondo y se genera un chorro de agua de 13mm de diámetro. La velocidad promedio del chorro está dada por $\sqrt{2gh}$, donde h es la altura del agua medida desde el centro del orificio (es variable) y g es la aceleración de la gravedad. Determine cuánto tiempo pasa hasta que el nivel de agua en el tanque es 61cm desde el fondo.



(resolver en pizarra)

Respuesta: 12.0 minutos

Experimento



¡El principio de elevación de vacío!

¡Si el vacío es lo suficientemente bueno, se puede hasta sostener una persona!



https://www.youtube.com/watch?v=QeAp3CuGjk8

Trabajo de Flujo

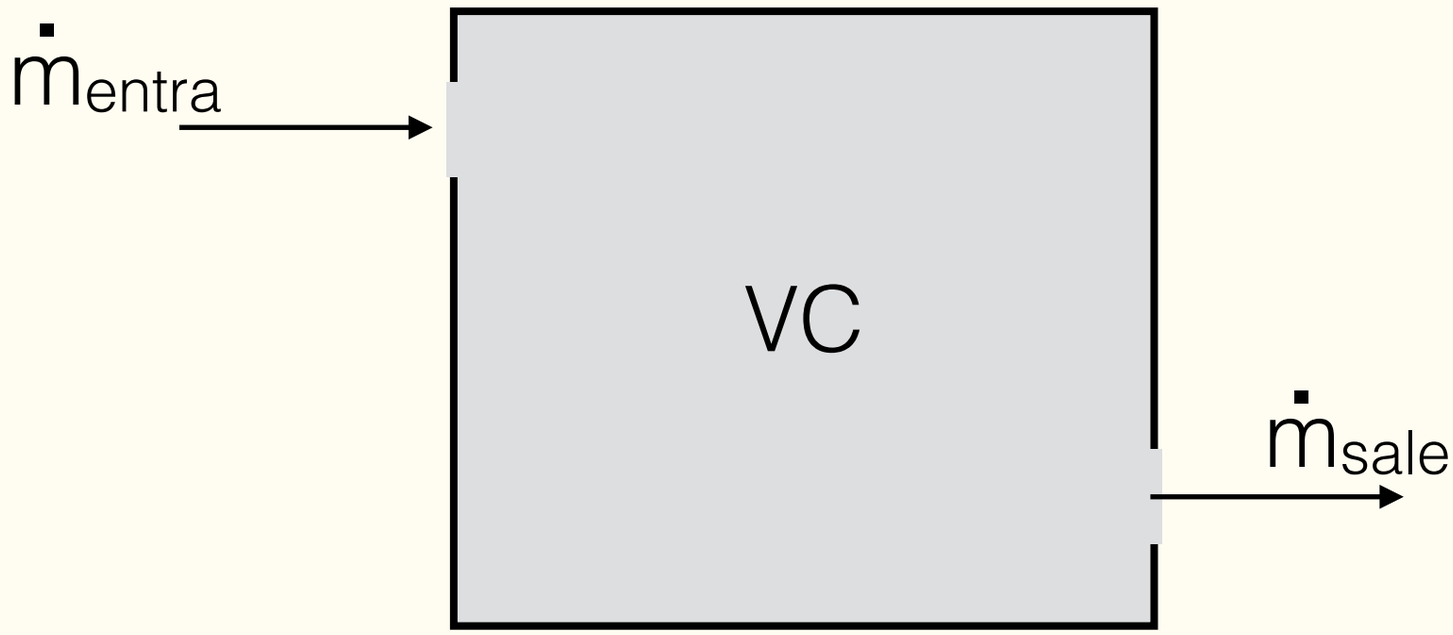
5-2 ▪ TRABAJO DE FLUJO Y ENERGÍA DE UN FLUIDO EN MOVIMIENTO

A diferencia de los sistemas cerrados, en los volúmenes de control hay flujo de masa a través de sus fronteras, y se requiere trabajo para introducirla o sacarla del volumen de control. Este trabajo se conoce como **trabajo de flujo** o **energía de flujo**, y se requiere para mantener un flujo continuo a través de un volumen de control.

(Sección 5.2 del C&B)

Trabajo de Flujo

Consideremos un volumen de control (VC) que tiene un flujo de masa a través de su frontera



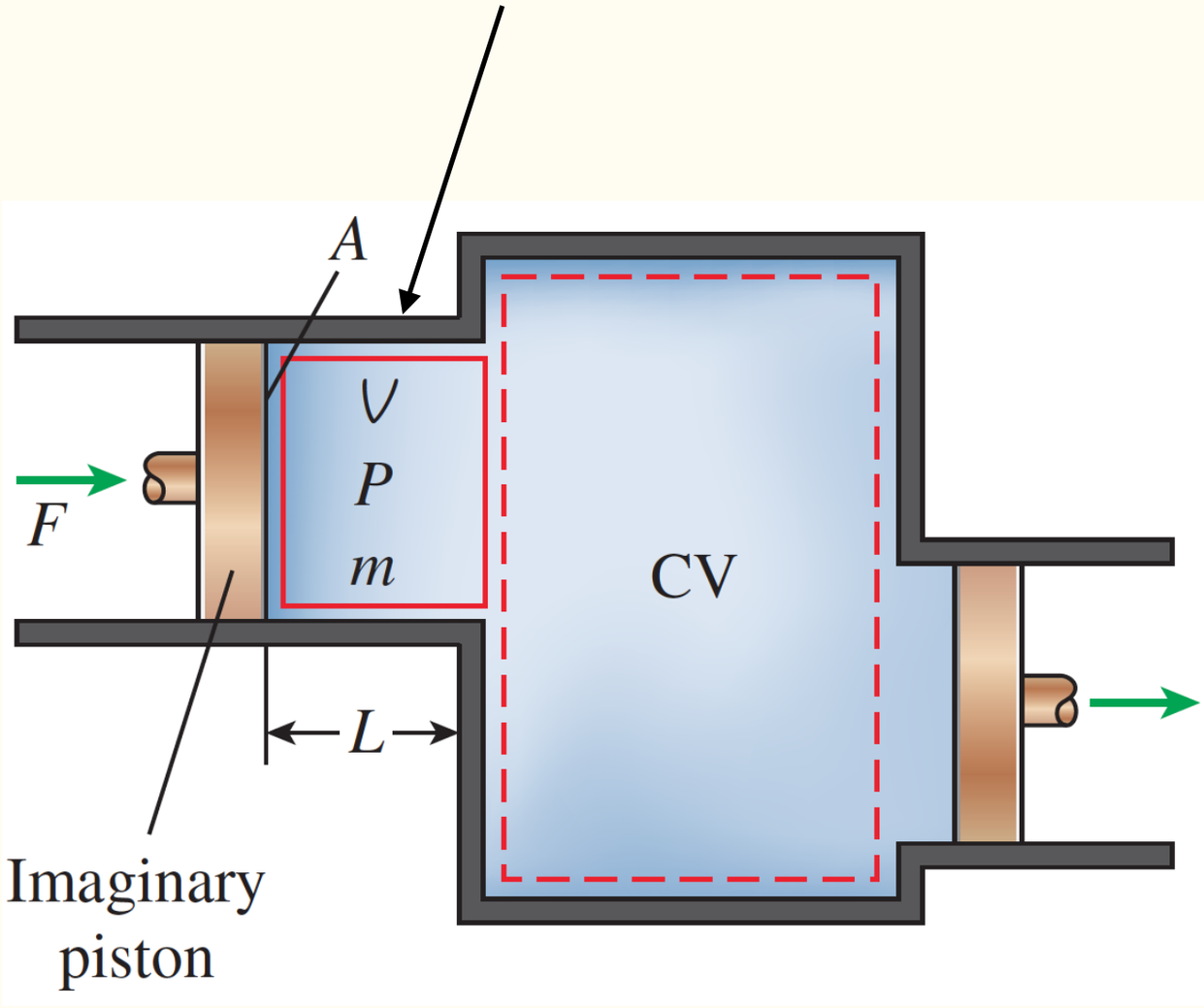
Pregunta: ¿se requiere hacer trabajo para introducir y/o extraer masa de un VC?

¡sí!

¿Por qué? Calculémoslo y entendamos por qué…

Trabajo de Flujo

Consideremos un elemento de fluido con volumen V y presión P



Nota: la P del elemento que entra al CV no necesariamente es igual a la P del CV

y recordemos que:

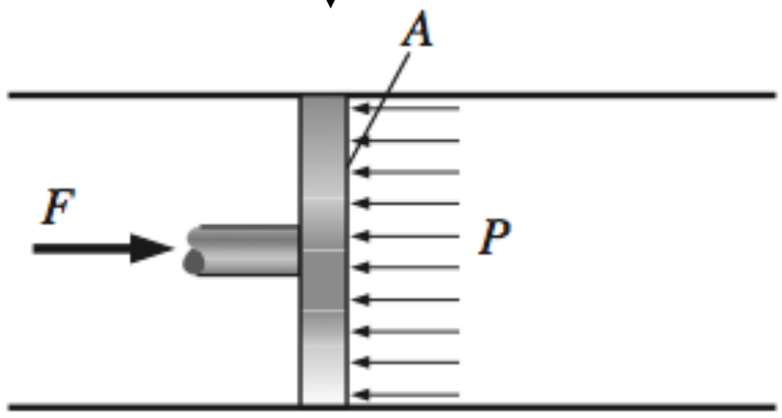
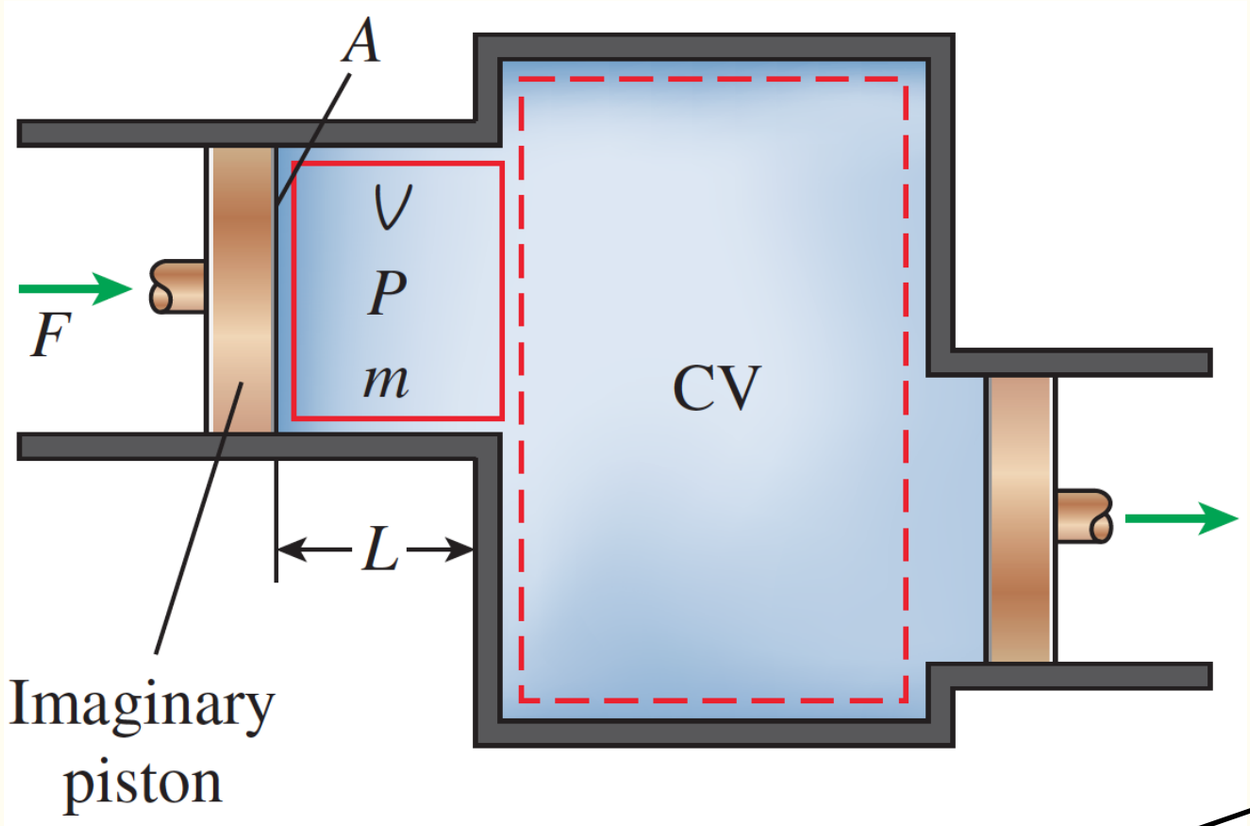


FIGURA 5-12

En ausencia de aceleración, la fuerza que se aplica a un fluido mediante un émbolo es igual a la fuerza que el fluido aplica al émbolo.

Trabajo de Flujo



La fuerza que aplica el émbolo imaginario es

F=PA

Para empujarlo por completo debe actuar una distancia L, por lo que:

$$W_{flujo} = F\,L = P\,A\,L = P\,V$$

¡cuidado! Esta W es mayúscula

$$w_{flujo} = P\,\nu$$

¡cuidado! Esta w es minúscula
(o sea es trabajo específico)

Al trabajo necesario para extraer o introducir masa de un VC se le llama **trabajo de flujo**.

¿Trabajo o Energía?

El trabajo de flujo se calcula igual ya sea que el fluído entre o salga

pero…

para introducir el elemento de masa al VC, el entorno tuvo que hacer trabajo para empujarlo (es trabajo que entra al VC). Por otro lado, un elemento de masa que sale tiene que ser empujado por el sistema mismo (es trabajo que sale del VC)

Aparte, $w_{flujo} = P\nu$ es una función de dos propiedades (presión y volumen específico)

Por estas razones, esta cantidad se puede ver como una **propiedad llamada "energía de flujo" asociada al fluído**, es decir que entra o sale con el fluido



Existe un debate un tanto "filosófico" sobre si es correcto o no llamarle "energía", ya que es algo que sólo aplica para fluídos en movimiento. Al final de cuentas no importa (siguiente diapositiva)

Energía de fluído en movimiento

Se le llame trabajo o se le llame energía, lo importante es que se tiene que tomar en cuenta en la energía de un fluído en movimiento

La energía de un sistema compresible simple tiene tres partes: interna, cinética, y potencial:

$$e = u + e.c. + e.p.g. = u + \frac{v^2}{2} + g\,z$$

Para un fluido en movimiento hay que agregar el trabajo (energía) de flujo:

energía cinética específica

energía potencial específica

$$\theta = e + P\,\nu = u + \frac{v^2}{2} + g\,z + P\,\nu$$

energía específica total de un fluído en movimiento

$$= h + v^2/2 + g\,z$$

entalpía específica, definida como h= u+Pv (siguiente diapositiva)

Definición: Entalpía

La entalpía se define como:

$$h \equiv u + P\nu \quad \text{ó} \quad H \equiv U + PV$$

entalpía específica

entalpía total

donde u y *v* son la energía interna y el volumen específicos

¿Qué es la entalpía?

No es fácil definirla con palabras. Tal vez lo mejor es decir simplemente que es **“una cantidad que surge mucho en Termodinámica”**

Nota importante: puesto que u, P y v son propiedades de estado, h lo es también



Otro uso de entalpía: calor latente (P const.)

Aparte de ser sumamente útil en sistemas abiertos, la entalpía también surge en otras situaciones.

Por ejemplo, es fácil demostrar que la cantidad de calor que se requiere para pasar de un líquido saturado a un vapor saturado a presión constante (es decir el calor latente de vaporización) **es igual a la diferencia de entalpías**

La primera ley nos dice: $\Delta U = Q - W$

¿Cúanto es W?

$$\mathbf{W = P\,(V_2 - V_1)}$$

Entonces nos queda:

$$\mathbf{U_2 - U_1 = Q - PV_2 + PV_1}$$

$$\mathbf{Q = U_2 + PV_2 - U_1 - PV_1 = H_2 - H_1}$$

Cálculo de Δu y Δh para gases ideales

Como seguramente se han percatado ya, para sustancias como el agua y el R134a la entalpía **se obtiene de las tablas**.

Sin embargo, para **gases ideales**, las variaciones en entalpía y en energía interna se pueden calcular de forma muy sencilla:

cambio en energía interna específica → $\Delta u = c_v \Delta T$

cambio en entalpía específica → $\Delta h = c_p \Delta T$

¡fórmulas válidas para cualquier proceso (con un gas ideal)!

¡Cuidado! Las expresiones arriba son válidas para cualquier proceso, pero:



$Q = mc_v \Delta T$ ← sólo para proceso a v constante

$Q = mc_p \Delta T$ ← sólo para proceso a p constante

(ver demostración en siguiente diapositiva)

Demostración

Esto se debe a lo siguiente:

En general para cualquier sustancia podemos suponer que la energía interna es función de T y v (se necesitan dos propiedades de estado independientes). Entonces:

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v dT + \cancelto{0}{\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T} dv$$

Esto es la derivada de la energía respecto a la temperatura si se mantiene el volumen constante

ya que u sólo depende de la temperatura para gases ideales

Pero para un proceso a volumen constante tenemos que: $du = \delta q - \cancelto{0}{\delta w} = c_v dT$

Por lo que: $c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v$ y concluimos que $du = c_v dT$ para <u>cualquier</u> proceso

Integrando ambos lados: $\int_{u_1}^{u_2} du = \int_{T_1}^{T_2} c_v \, dT$ $\xrightarrow[\text{constante}]{\text{si } c_v \text{ se asume}}$ $\boxed{\Delta u = c_v \Delta T}$

Nota: se puede hacer la demostración similar para la entalpía con c_p y asumiendo que h=h(T,P). Ver sección 4.3-4.4 del Cengel & Boles.

Resumiendo

Regresando a sistemas abiertos, concluimos que la energía específica de un fluido en movimiento está dada por:

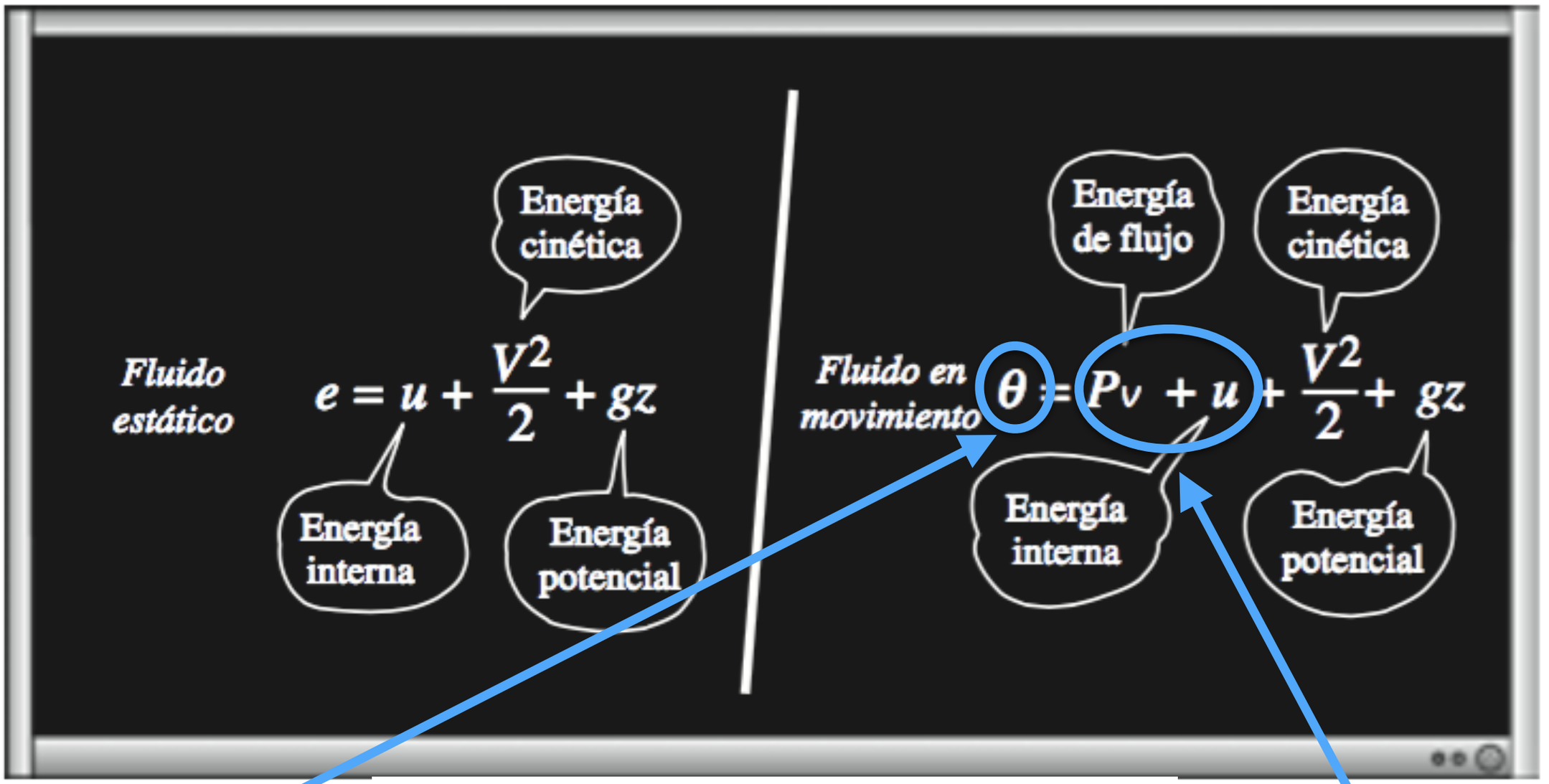


FIGURA 5-14

La energía total está formada por tres partes para un fluido estático y por cuatro partes para un fluido en movimiento.

energía total específica de un fluido en movimiento (θ)

entalpía (h)

Resumiendo: Energía Transportada

La cantidad de energía transportada por un fluído en movimiento es entonces:

$$E_{\text{masa}} = m\theta = m\left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \qquad \text{(kJ)}$$

Por lo que la tasa de energía transportada es:

$$\dot{E}_{\text{masa}} = \dot{m}\theta = \dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \qquad \text{(kW)}$$

Extendiendo la Primera Ley para un volumen de control en forma de tasa de variación, nos queda:

$$\dot{E}_{vc} = \frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_{\text{entradas}} \dot{m}\theta - \sum_{\text{salidas}} \dot{m}\theta$$

Resumiendo: las dos ecuaciones más importantes de este capítulo



$$\frac{dm_{VC}}{dt} = \sum_{\text{entrada}} \dot{m} - \sum_{\text{salida}} \dot{m}$$

← balance de masa

$$\dot{E}_{vc} = \frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_{entradas} \dot{m}\theta - \sum_{salidas} \dot{m}\theta$$

← balance de energía

Experimento

Un buen ejemplo de un sistema abierto: un extinguidor



Experimento

Antes, un poco de información:



¿Qué sustancia contiene este extinguidor?

CO_2

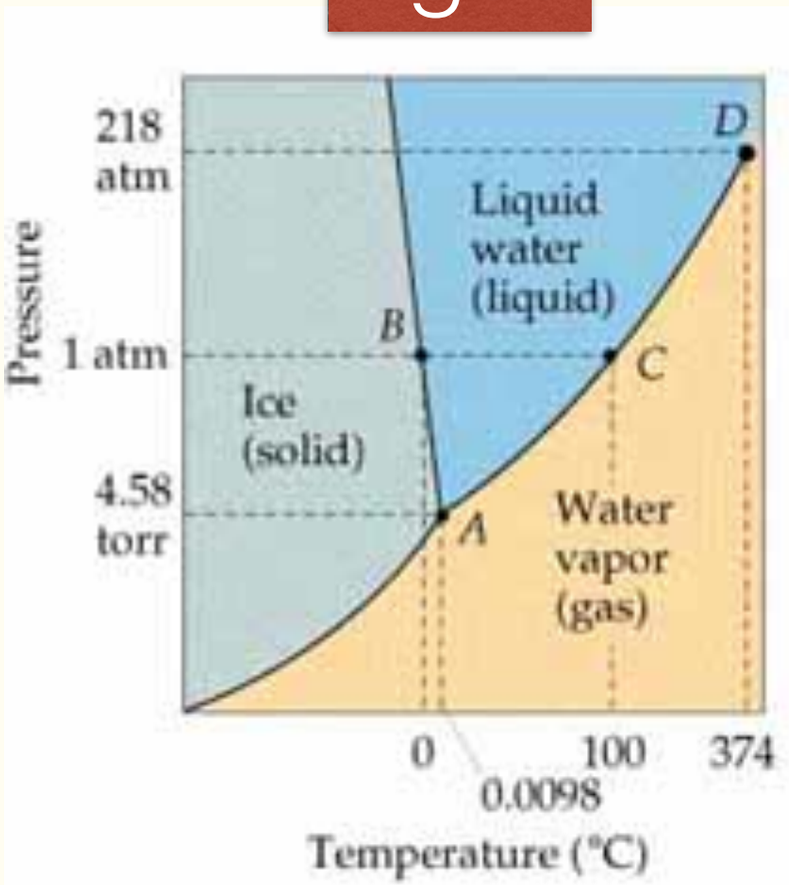
¿En qué estado está almacenado?

Líquido

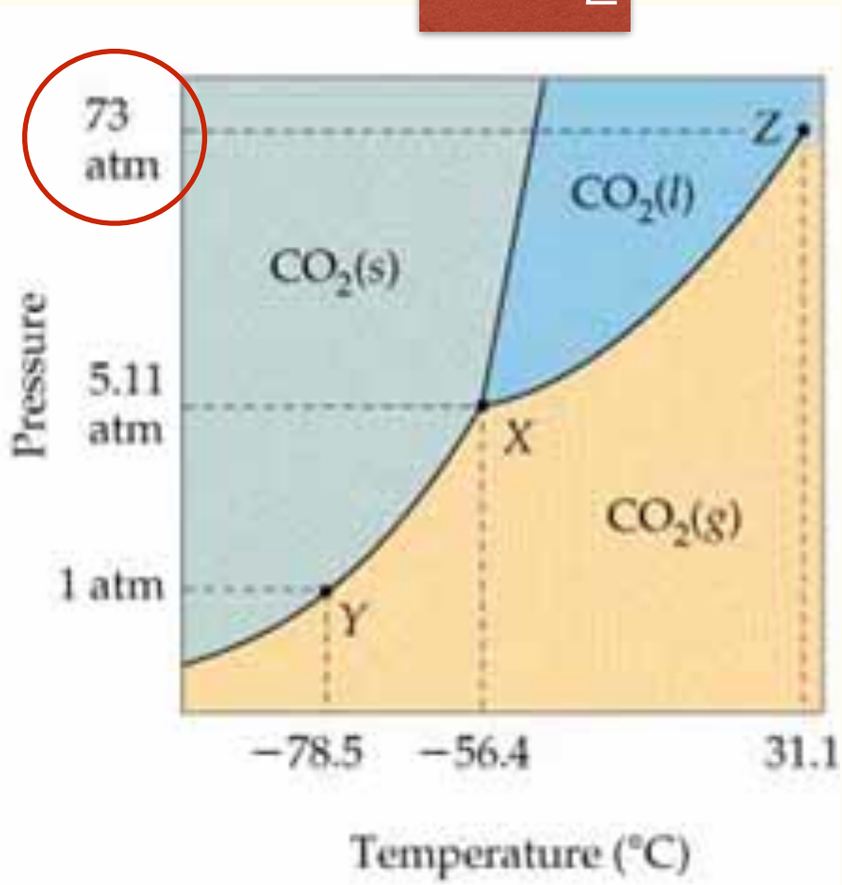
(aunque de hecho está en una mezcla saturada, ya que hay vapor saturado de CO2 sobre el líquido)

¿Cúal es la presión mínima a la que puede estar?

Agua



CO_2



En general los extinguidores están a > 50 atm

¿Por qué usar CO_2?

No es corrosivo

No es tóxico

No es conductor

¿Por qué es efectivo en apagar un incendio?

Razón #1: Desplaza el oxígeno



Razón #2 (menos importante): sale a temperatura muy fría

¿Por qué sale tan frío, si el CO_2 líquido está a temperatura ambiente?

Primero hay que responder, ¿Qué tipo de proceso es el que ocurre al operar un extinguidor?

¡Adiabático!

(ocurre tan rápido que no hay tiempo para intercambiar calor)

¿Si no hay intercambio de calor, porqué se enfría?

Si consideramos la masa entera original de CO_2 como el sistema, lo podemos ver como una masa de control que hace mucho trabajo (positivo) durante la expansión, por lo que pierde energía interna

$$\Delta U = -W$$

Si consideramos el volumen del extintor como el sistema (volumen de control), tenemos una salida de masa a alta velocidad y ninguna entrada. Eso hace que baje la energía interna del VC.

$$\theta = u + Pv + \frac{v^2}{2} + gz$$

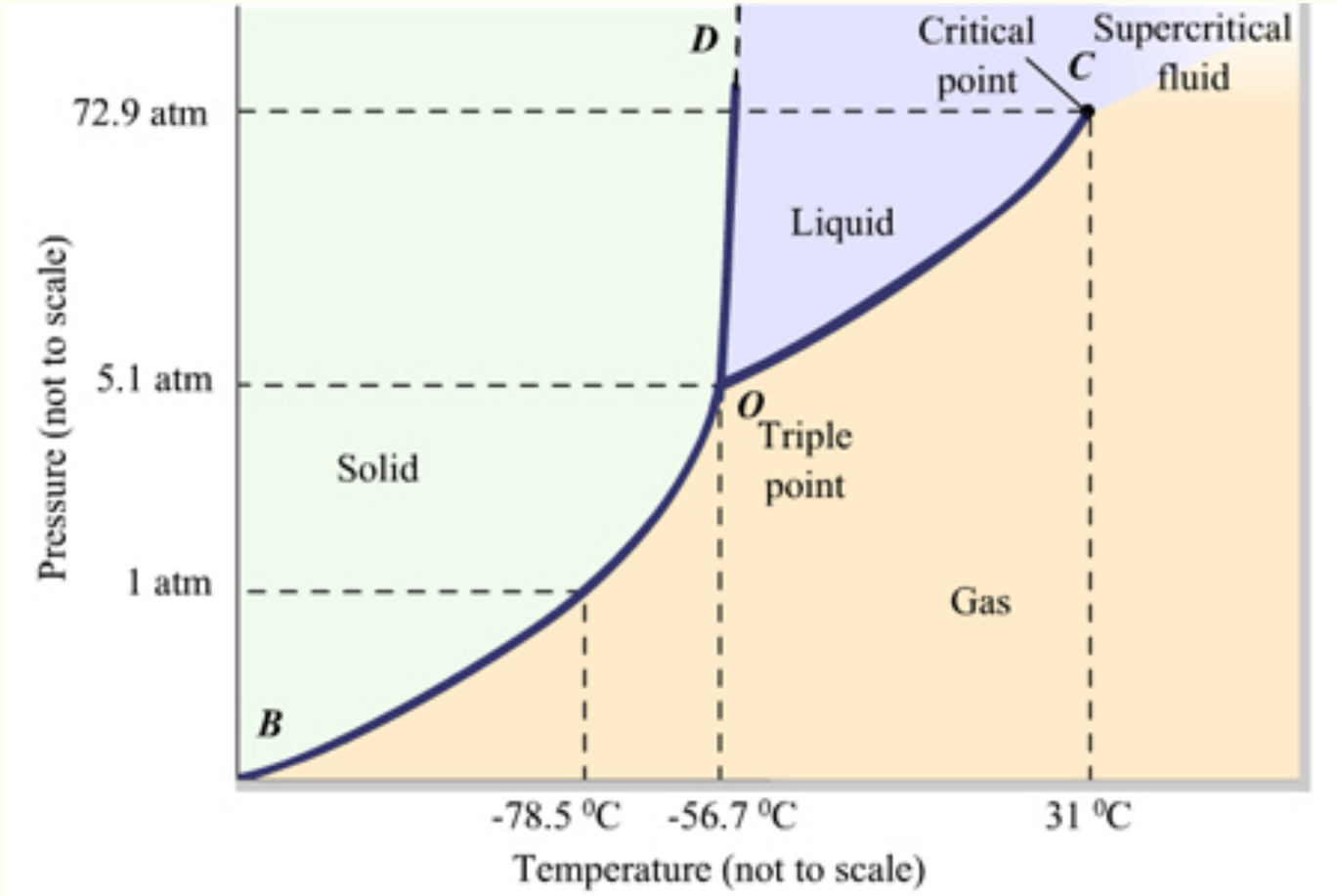
El extintor es una excelente forma de ilustrar el concepto de “trabajo de flujo”: **al empujar masa hacia afuera, el sistema hace trabajo y pierde energía.** Aparte, pierde la energía interna de la masa expulsada

¿Qué pasa si volvemos a comprimir el CO2 frío que sale (aunque no a tanta presión como antes)?

(demostrarlo)

¡CO2 sólido!
(-78.5 grados Celsius)

¿Cómo se ve esto en el diagrama? (discutir en clase)



Hielo Seco (CO_2 sólido)

¿Qué pasa si mezclamos agua y hielo seco?

¡Sublimación Rápida!



Nota: sublimación se le llama al proceso por medio del cual un sólido pasa directamente a gas

¿Por qué? (discutir en clase)

Sistemas de Flujo Estacionario

5-3 ▪ ANÁLISIS DE ENERGÍA DE SISTEMAS DE FLUJO ESTACIONARIO

Un gran número de dispositivos de ingeniería como turbinas, compresores y toberas funcionan durante largos periodos bajo las mismas condiciones una vez completado el periodo de inicio transitorio y establecida la operación estacionaria; y se clasifican como *dispositivos de flujo estacionario* (Fig. 5-17). Los procesos en los que se utilizan estos dispositivos se pueden representar razonablemente bien a través de un proceso un tanto idealizado, llamado **proceso de flujo estacionario**, definido en el capítulo 1 como *un proceso durante el cual un fluido fluye de manera estacionaria por un volumen de control*. Es decir, las propiedades del fluido pueden cambiar de un punto a otro dentro del volumen de control, pero en cualquier punto permanecen constantes durante todo el proceso. (Recuerde, *estacionario* significa *ningún cambio con el tiempo*.)



FIGURA 5-17

Muchos sistemas de energía como las centrales eléctricas operan en condiciones estacionarias.

© Vol. 57/PhotoDisc/Getty RF.

Durante un proceso de flujo estacionario, ninguna propiedad intensiva o extensiva *dentro del volumen de control* cambia con el tiempo. Por lo tanto, el volumen V, la masa m y el contenido de energía total E del volumen de control permanecen constantes (Fig. 5-18). Como resultado, el trabajo de frontera es cero para sistemas de flujo estacionario (puesto que V_{VC} = constante), y la masa total o energía que entra al volumen de control debe ser igual a la masa total o energía que sale de él (puesto que m_{VC} = constante y E_{VC} = constante). Estas observaciones simplifican en gran medida el análisis.

Las propiedades del fluido en una entrada o salida permanecen constantes

(Secciones 5.3-5.4 del C&B)

Resumiendo hasta ahora

Balance de masa:

$$\dot{m}_{vc} = \sum_{entradas} \dot{m} - \sum_{salidas} \dot{m}$$

¿Y si la densidad es constante?

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = \frac{\dot{V}}{\nu} = \frac{v A}{\nu} = \rho v A$$

Trabajo (o energía) de flujo:

$$w_{flujo} = P \nu \longleftarrow \text{por unidad de masa}$$

Balance de energía:

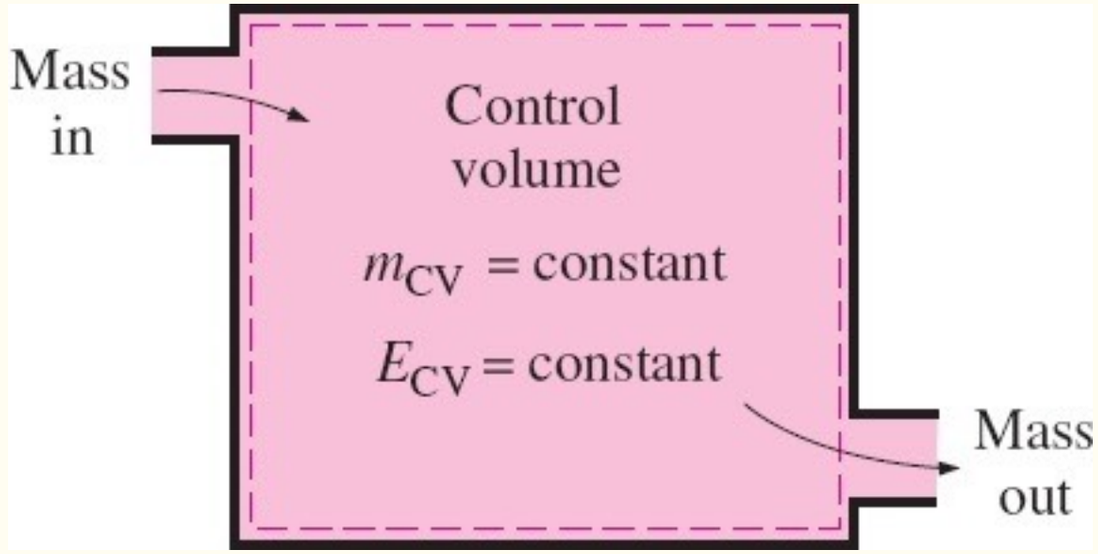
$$\dot{E}_{vc} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_{entradas} \dot{m}\theta - \sum_{salidas} \dot{m}\theta$$

donde: $\theta = e + P\nu = u + \frac{v^2}{2} + g z + P\nu = h + v^2/2 + g z$

Sistemas con Flujo Estacionario

Muchos sistemas de la vida diaria funcionan en condiciones estables una vez completado el periodo de inicio transitorio.

Un proceso de flujo estacionario es un proceso durante el cual un fluído fluye de manera estacionaria (estable) por un VC



Nota: “estacionario” significa que no cambia con el tiempo, no que no haya fluido en movimiento. El opuesto a “estacionario” es “transiente”.

Sistema con flujo estacionario

En un sistema con flujo estacionario, **ninguna propiedad (intensiva o extensiva) del VC cambia con el tiempo**

(en otras palabras, E_{VC}, m_{VC} y V_{VC} son constantes, y por ende no puede haber trabajo de frontera)

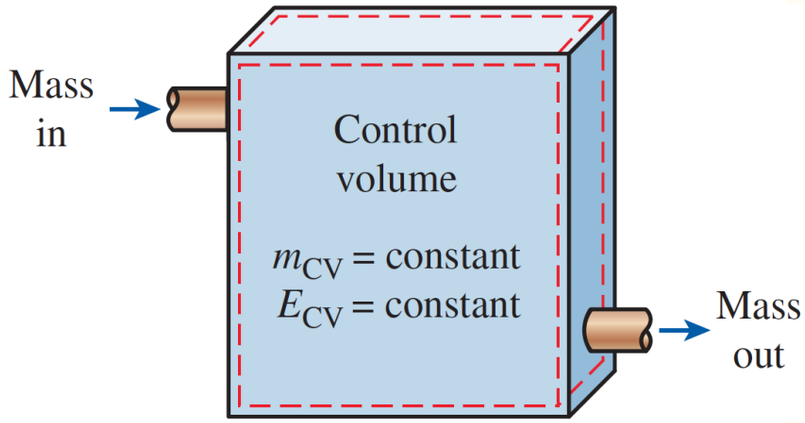


FIGURA 5-18

En condiciones de flujo estacionario, el contenido de masa y energía de un volumen de control permanecen constantes.

También, tanto en las entradas como en las salidas, las propiedades del flujo **permanecen constantes con el tiempo**, así como los intercambios de calor y de trabajo entre el sistema y su entorno

¡Cuidado! No significa que $h_1=h_2=h_3$, sino más bien que h_1, h_2 y h_3 … etc. no cambian con el tiempo.

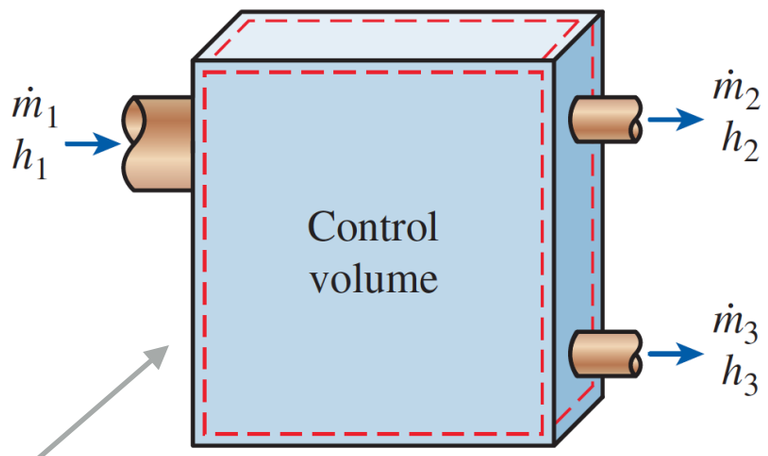


FIGURA 5-19

En condiciones de flujo estacionario, las propiedades del fluido en una entrada o salida permanecen constantes (no cambian con el tiempo).

Sistemas con Flujo Estacionario

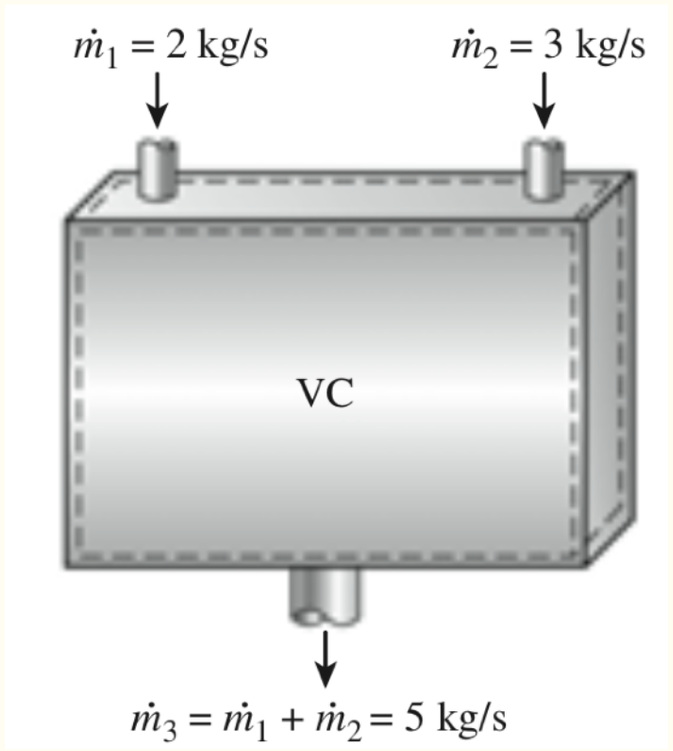
¿Cómo se simplifican las ecuaciones? Tenemos que:

$\dot{m}_{VC} = 0$ $\quad$ $\dot{E}_{VC} = 0$ $\quad$ (y también $\dot{V}_{VC} = 0$)

Por ende, la ecuación de conservación de masa se simplifica así:

$$\frac{dm_{VC}}{dt} = \sum_{\text{entrada}} \dot{m} - \sum_{\text{salida}} \dot{m} \xrightarrow{\text{flujo estacionario}} \boxed{\sum_{\text{entrada}} \dot{m} = \sum_{\text{salida}} \dot{m}}$$

Ejemplo →



Sistemas con Flujo Estacionario

¿Y cómo queda la ecuación de conservación de energía?

$$\dot{E}_{vc} = \frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_{entradas} \dot{m}\theta - \sum_{salidas} \dot{m}\theta$$

(0 sobre $\dot{E}_{vc}$ y 0 sobre dE_{vc})

Lo cual también se puede escribir como:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{\text{salida}} \underbrace{\dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right)}_{\text{por cada salida}} - \sum_{\text{entrada}} \underbrace{\dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right)}_{\text{por cada entrada}}$$

Ejemplos de Sistemas de Flujo Estacionario

Ahora veremos algunos ejemplos de sistemas que operan en condiciones estables durante largos periodos de tiempo

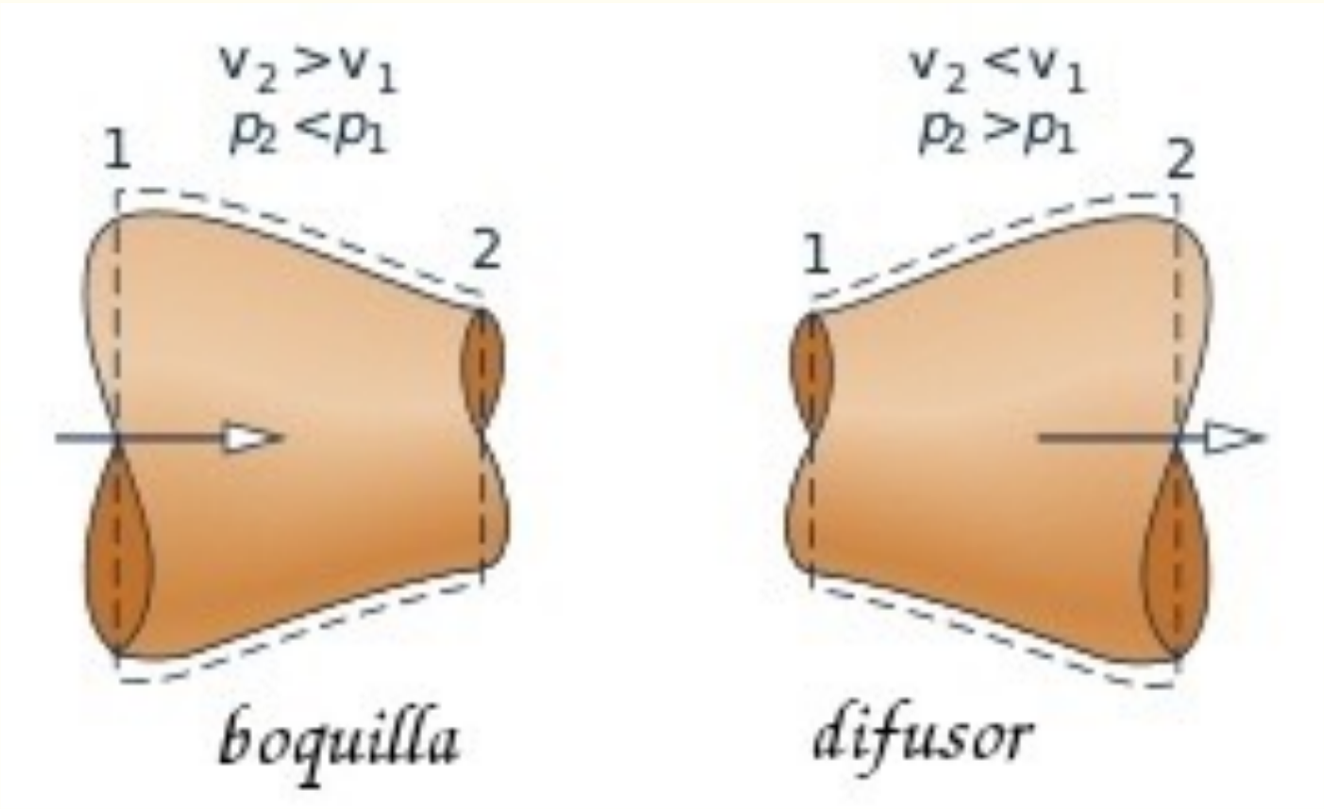
Nota: no veremos el funcionamiento interno de estos sistemas en detalle, sino sólo los estudiaremos desde el punto de vista de conservación de energía.



Esta es una de las **bellezas del principio de conservación de energía** (= la primera ley de termodinámica). **Sin saber los detalles** de cómo funcionan estos aparatos podremos obtener resultados válidos sobre su operación.

Ejemplos de Sistemas de Flujo Estacionario

Toberas (boquillas) y difusores

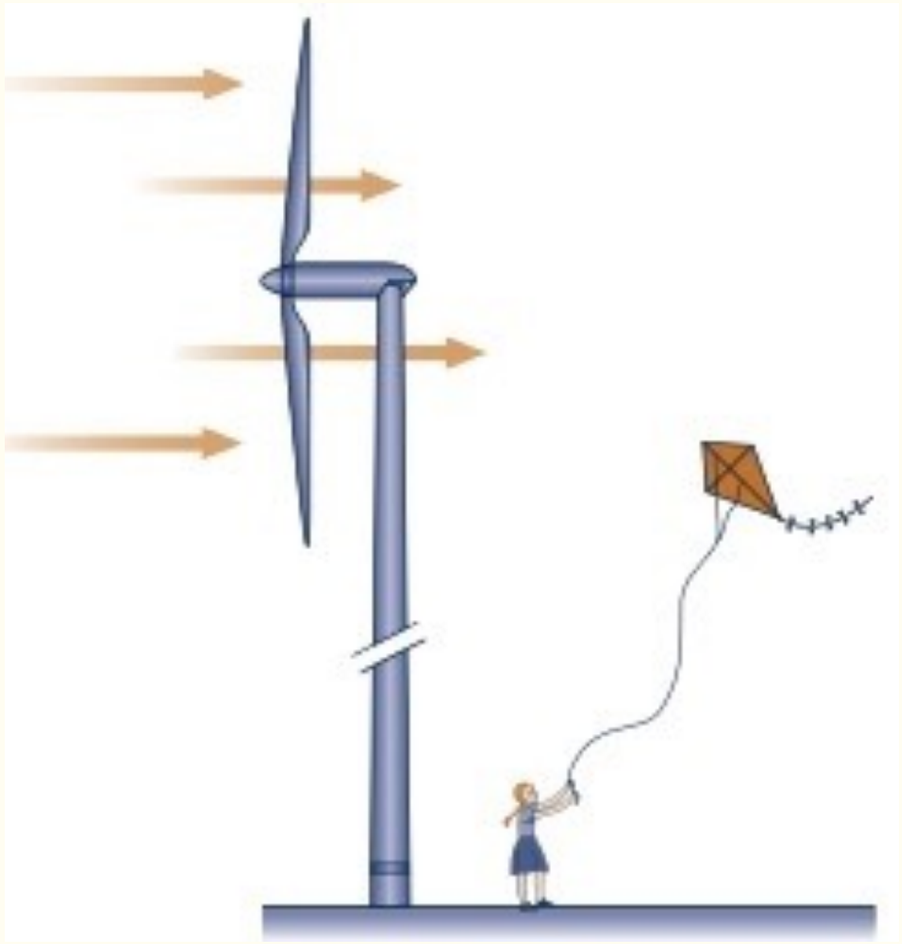


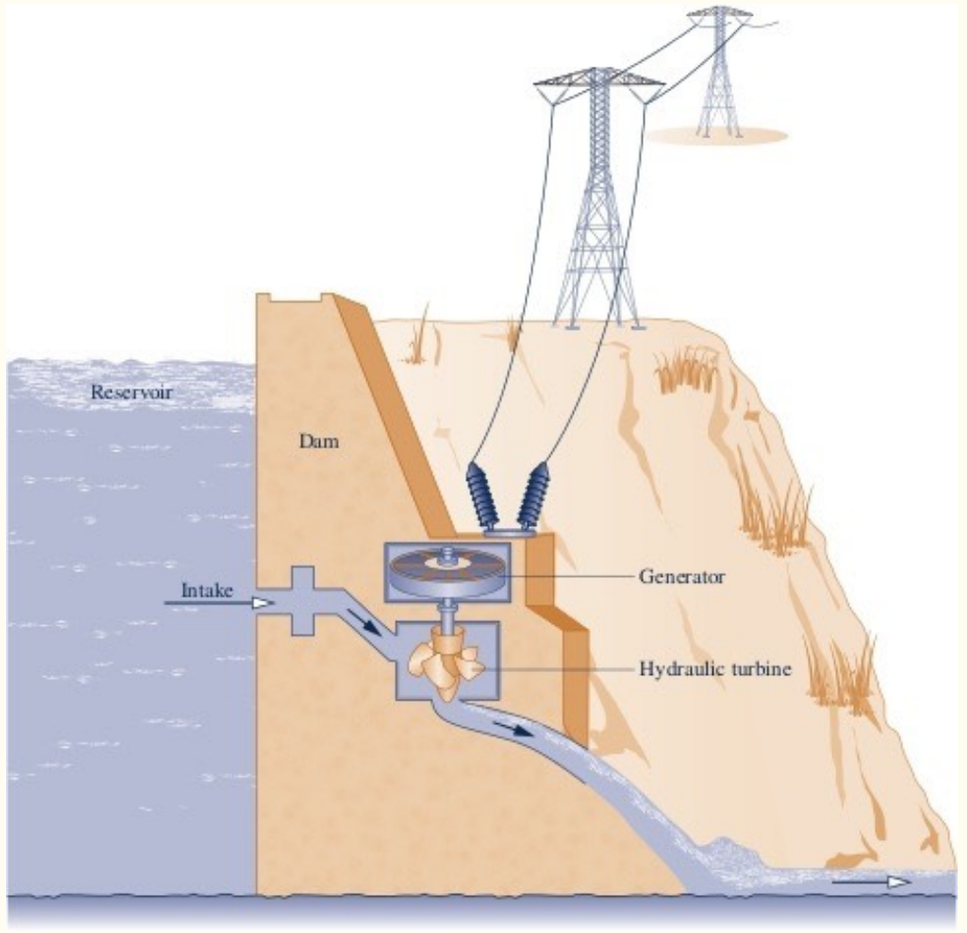
Su función es cambiar la velocidad del flujo, lo cual se hace a expensas de la presión

¿Aplicaciones? Cohetes, vehículos espaciales, mangueras de jardín … etc.

Ejemplos de Sistemas de Flujo Estacionario

Turbinas

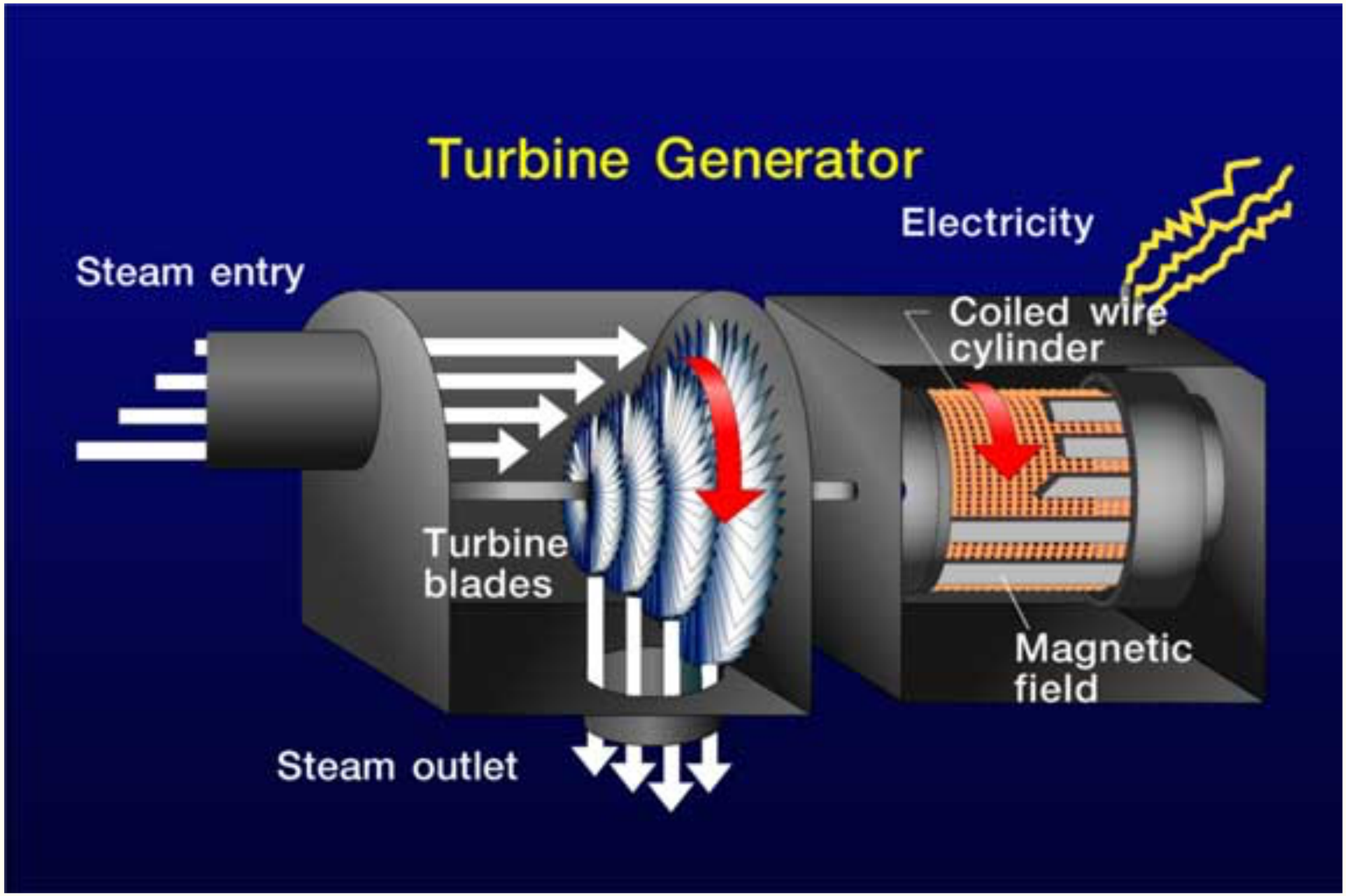




¿Su función? Producir trabajo a partir de un flujo (producen trabajo)

¿Aplicaciones? Plantas Eléctricas… etc.

Diagrama de una Turbina de Vapor

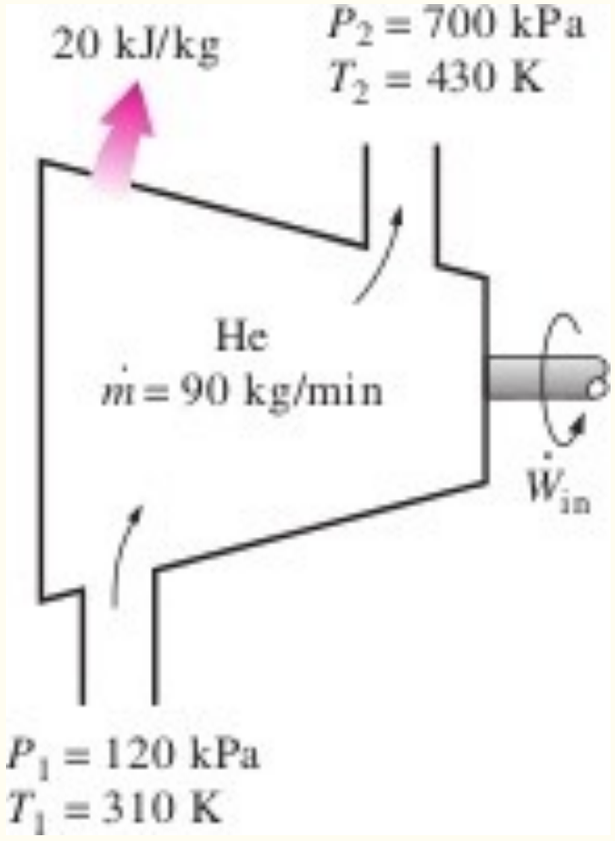


En algunas turbinas la energía cinética del flujo es la que más contribuye a la producción de trabajo. Sin embargo, en otras como esta (de vapor) es más bien la energía interna del vapor la que más contribuye (ver ejemplo más adelante)

Ejemplos de Sistemas de Flujo Estacionario

Compresores y Bombas

Nota: típicamente las bombas manejan líquidos, mientras que los compresores gases



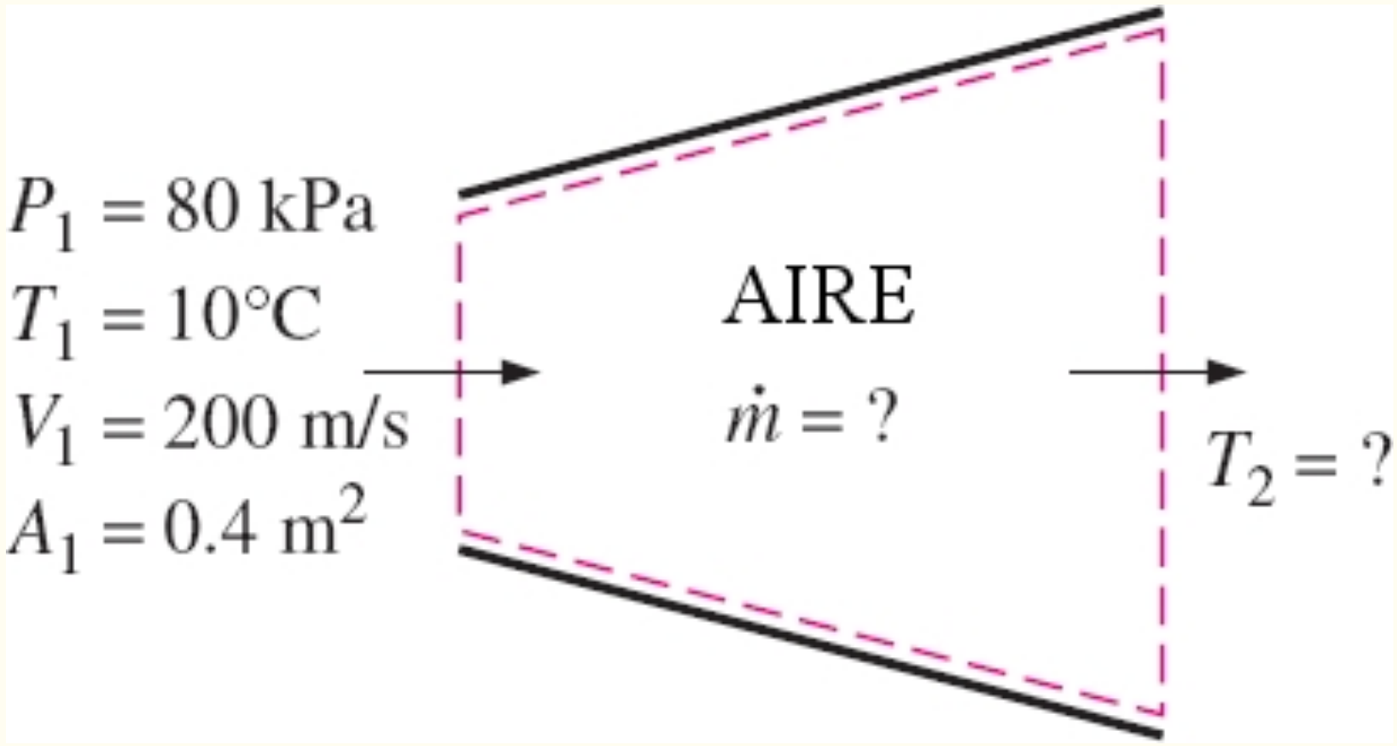
¿Su función? Incrementar la presión de un fluído (requieren trabajo)

¿Aplicaciones? Plantas Eléctricas, edificios, … etc.

Ejercicio #1

(Ejemplo resuelto 5.4 en C&B)

Aire a 10°C y 80 kPa entra al difusor de un motor de inyección estacionariamente con una velocidad de 200m/s. El área de la entrada es 0.4m^2. El aire deja el difusor con una velocidad que es muy pequeña comparada con la velocidad de entrada. Determine la tasa de entrada másica del aire y la temperatura con la que el aire deja el difusor.



<u>Para discusión antes de hacer el problema:</u>

¿Esperamos que la temperatura suba, baje, o permanezca igual?

(resolver en pizarra)

TABLA A-2

Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes

a) A 300 K

Gas	Fórmula	Constante de gas, R kJ/kg · K	c_p kJ/kg · K	c_v kJ/kg · K	k
Aire	—	0.2870	1.005	0.718	1.400
Argón	Ar	0.2081	0.5203	0.3122	1.667
Butano	C_4H_{10}	0.1433	1.7164	1.5734	1.091
Dióxido de carbono	CO_2	0.1889	0.846	0.657	1.289
Etano	C_2H_6	0.2765	1.7662	1.4897	1.186
Etileno	C_2H_4	0.2964	1.5482	1.2518	1.237
Helio	He	2.0769	5.1926	3.1156	1.667
Hidrógeno	H_2	4.1240	14.307	10.183	1.405
Metano	CH_4	0.5182	2.2537	1.7354	1.299
Monóxido de carbono	CO	0.2968	1.040	0.744	1.400
Neón	Ne	0.4119	1.0299	0.6179	1.667
Nitrógeno	N_2	0.2968	1.039	0.743	1.400
Octano	C_8H_{18}	0.0729	1.7113	1.6385	1.044
Oxígeno	O_2	0.2598	0.918	0.658	1.395
Propano	C_3H_8	0.1885	1.6794	1.4909	1.126
Vapor	H_2O	0.4615	1.8723	1.4108	1.327

Nota: La unidad kJ/kg · K es equivalente a kJ/kg · °C.

Fuente: Chemical and Process Thermodynamics 3a. ed., por Kyle, B.G., © 2000. Adaptado con permiso de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, Nueva Jersey.

TABLE A – 1

Molar mass, gas constant, and critical-point properties

Substance	Formula	Molar mass, M kg/kmol	Gas constant, R kJ/kg · K*	*Critical-point properties* Temperature, K	Pressure, MPa	Volume, m^3/kmol
Air	—	28.97	0.2870	132.5	3.77	0.0883
Ammonia	NH_3	17.03	0.4882	405.5	11.28	0.0724
Argon	Ar	39.948	0.2081	151	4.86	0.0749
Benzene	C_6H_6	78.115	0.1064	562	4.92	0.2603
Bromine	Br_2	159.808	0.0520	584	10.34	0.1355
n-Butane	C_4H_{10}	58.124	0.1430	425.2	3.80	0.2547
Carbon dioxide	CO_2	44.01	0.1889	304.2	7.39	0.0943
Carbon monoxide	CO	28.011	0.2968	133	3.50	0.0930
Carbon tetrachloride	CCl_4	153.82	0.05405	556.4	4.56	0.2759
Chlorine	Cl_2	70.906	0.1173	417	7.71	0.1242
Chloroform	$CHCl_3$	119.38	0.06964	536.6	5.47	0.2403

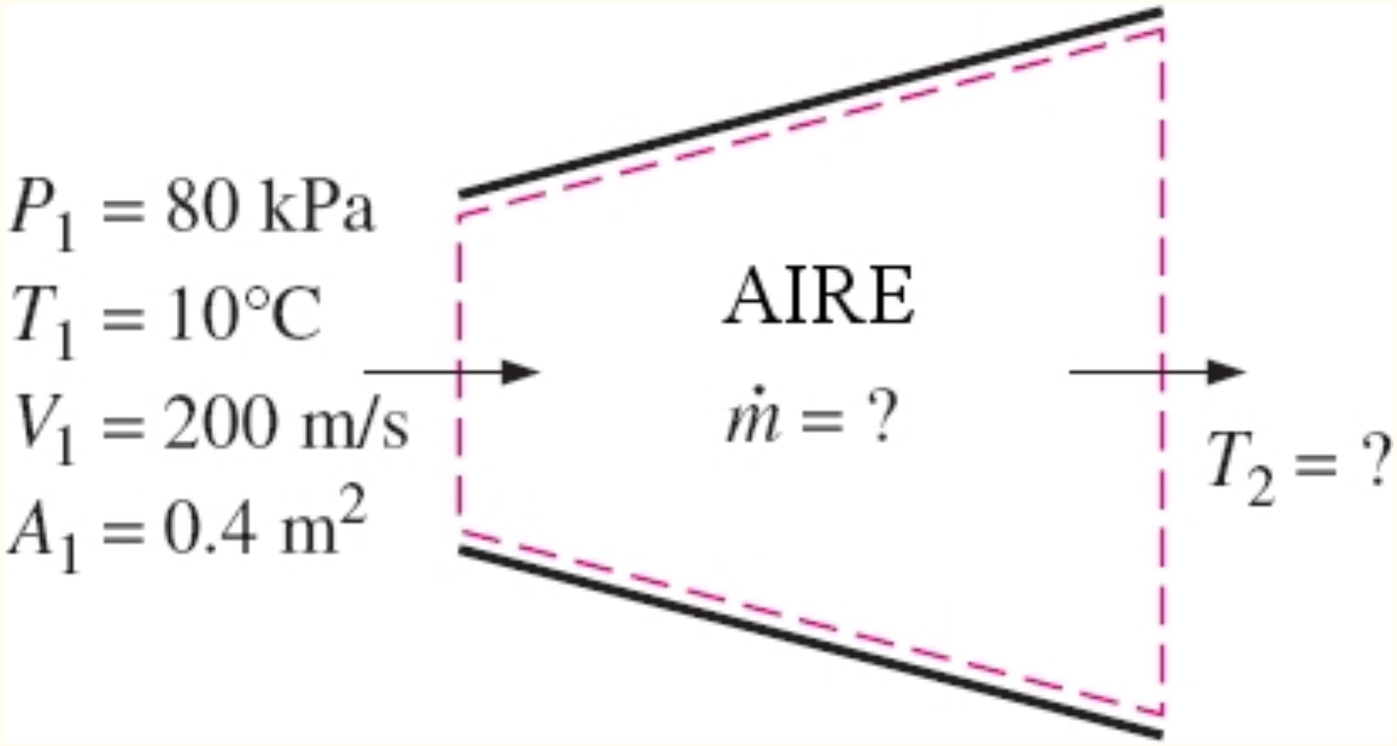
Nota: ¿se puede considerar el aire como gas ideal?

$T >> T_{cr}$ and $P << P_{cr}$ —> ¡SÍ!

Ejercicio #1

(Ejemplo resuelto 5.4 en C&B)

Aire a 10°C y 80 kPa entra al difusor de un motor de inyección estacionariamente con una velocidad de 200m/s. El área de la entrada es 0.4m^2. El aire deja el difusor con una velocidad que es muy pequeña comparada con la velocidad de entrada. Determine el flujo másico de entrada del aire y la temperatura con la que el aire deja el difusor.



Para discusión antes de hacer el problema:

¿Esperamos que la temperatura suba, baje, o permanezca igual?

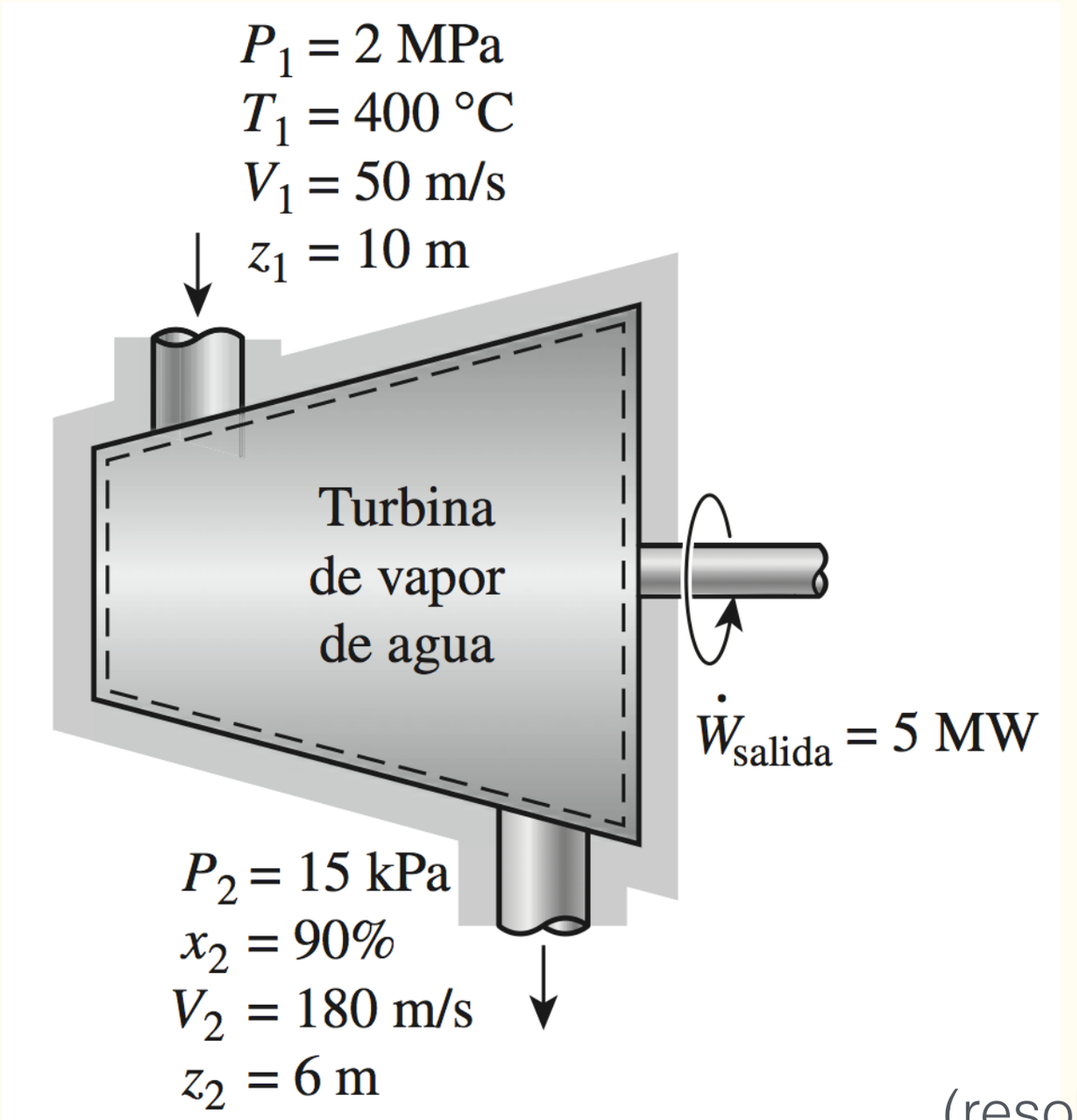
(resolver en pizarra)

Respuesta: $\dot{m} = 78.7$ kg/s, $T_2 = 29.9°C$

Ejercicio #2

(Ejemplo resuelto 5.7 en C&B)

La salida de potencia de una turbina a vapor adiabática es 5MW en las condiciones indicadas en la figura.



Compare las magnitudes de Δh, Δec (energía cinética) y Δep (energía potencial)

Determine el trabajo hecho por unidad de masa de vapor fluyendo a través de la turbina.

Calcule el flujo másico de vapor.

<u>Para discusión antes de hacer el problema:</u>

¿Cúal esperamos sea el signo de Δh, Δec, Δep, y w?

(resolver en pizarra)

TABLE A–5

Saturated water—Pressure table (*Continued*)

		Specific volume, m^3/kg		*Internal energy, kJ/kg*			*Enthalpy, kJ/kg*			*Entropy, kJ/kg · K*		
Press., P kPa	Sat. temp., T_{sat} °C	Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_{fg}	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_{fg}	Sat. vapor, s_g
800	170.41	0.001115	0.24035	719.97	1856.1	2576.0	720.87	2047.5	2768.3	2.0457	4.6160	6.6616
850	172.94	0.001118	0.22690	731.00	1846.9	2577.9	731.95	2038.8	2770.8	2.0705	4.5705	6.6409
900	175.35	0.001121	0.21489	741.55	1838.1	2579.6	742.56	2030.5	2773.0	2.0941	4.5273	6.6213
950	177.66	0.001124	0.20411	751.67	1829.6	2581.3	752.74	2022.4	2775.2	2.1166	4.4862	6.6027
1000	179.88	0.001127	0.19436	761.39	1821.4	2582.8	762.51	2014.6	2777.1	2.1381	4.4470	6.5850
1100	184.06	0.001133	0.17745	779.78	1805.7	2585.5	781.03	1999.6	2780.7	2.1785	4.3735	6.5520
1200	187.96	0.001138	0.16326	796.96	1790.9	2587.8	798.33	1985.4	2783.8	2.2159	4.3058	6.5217
1300	191.60	0.001144	0.15119	813.10	1776.8	2589.9	814.59	1971.9	2786.5	2.2508	4.2428	6.4936
1400	195.04	0.001149	0.14078	828.35	1763.4	2591.8	829.96	1958.9	2788.9	2.2835	4.1840	6.4675
1500	198.29	0.001154	0.13171	842.82	1750.6	2593.4	844.55	1946.4	2791.0	2.3143	4.1287	6.4430
1750	205.72	0.001166	0.11344	876.12	1720.6	2596.7	878.16	1917.1	2795.2	2.3844	4.0033	6.3877
2000	212.38	0.001177	0.099587	906.12	1693.0	2599.1	908.47	1889.8	2798.3	2.4467	3.8923	6.3390
2250	218.41	0.001187	0.088717	933.54	1667.3	2600.9	936.21	1864.3	2800.5	2.5029	3.7926	6.2954
2500	223.95	0.001197	0.079952	958.87	1643.2	2602.1	961.87	1840.1	2801.9	2.5542	3.7016	6.2558
3000	233.85	0.001217	0.066667	1004.6	1598.5	2603.2	1008.3	1794.9	2803.2	2.6454	3.5402	6.1856

TABLE A–6

Superheated water (*Continued*)

T °C	*v* m³/kg	*u* kJ/kg	*h* kJ/kg	*s* kJ/kg · K	*v* m³/kg	*u* kJ/kg	*h* kJ/kg	*s* kJ/kg · K	*v* m³/kg	*u* kJ/kg	*h* kJ/kg	*s* kJ/kg · K
	P = 1.00 MPa (179.88°C)				*P* = 1.20 MPa (187.96°C)				*P* = 1.40 MPa (195.04°C)			
Sat.	0.19437	2582.8	2777.1	6.5850	0.16326	2587.8	2783.8	6.5217	0.14078	2591.8	2788.9	6.4675
200	0.20602	2622.3	2828.3	6.6956	0.16934	2612.9	2816.1	6.5909	0.14303	2602.7	2803.0	6.4975
250	0.23275	2710.4	2943.1	6.9265	0.19241	2704.7	2935.6	6.8313	0.16356	2698.9	2927.9	6.7488
300	0.25799	2793.7	3051.6	7.1246	0.21386	2789.7	3046.3	7.0335	0.18233	2785.7	3040.9	6.9553
350	0.28250	2875.7	3158.2	7.3029	0.23455	2872.7	3154.2	7.2139	0.20029	2869.7	3150.1	7.1379
400	0.30661	2957.9	3264.5	7.4670	0.25482	2955.5	3261.3	7.3793	0.21782	2953.1	3258.1	7.3046
500	0.35411	3125.0	3479.1	7.7642	0.29464	3123.4	3477.0	7.6779	0.25216	3121.8	3474.8	7.6047
600	0.40111	3297.5	3698.6	8.0311	0.33395	3296.3	3697.0	7.9456	0.28597	3295.1	3695.5	7.8730
700	0.44783	3476.3	3924.1	8.2755	0.37297	3475.3	3922.9	8.1904	0.31951	3474.4	3921.7	8.1183
800	0.49438	3661.7	4156.1	8.5024	0.41184	3661.0	4155.2	8.4176	0.35288	3660.3	4154.3	8.3458
900	0.54083	3853.9	4394.8	8.7150	0.45059	3853.3	4394.0	8.6303	0.38614	3852.7	4393.3	8.5587
1000	0.58721	4052.7	4640.0	8.9155	0.48928	4052.2	4639.4	8.8310	0.41933	4051.7	4638.8	8.7595
1100	0.63354	4257.9	4891.4	9.1057	0.52792	4257.5	4891.0	9.0212	0.45247	4257.0	4890.5	8.9497
1200	0.67983	4469.0	5148.9	9.2866	0.56652	4468.7	5148.5	9.2022	0.48558	4468.3	5148.1	9.1308
1300	0.72610	4685.8	5411.9	9.4593	0.60509	4685.5	5411.6	9.3750	0.51866	4685.1	5411.3	9.3036
	P = 1.60 MPa (201.37°C)				*P* = 1.80 MPa (207.11°C)				*P* = 2.00 MPa (212.38°C)			
Sat.	0.12374	2594.8	2792.8	6.4200	0.11037	2597.3	2795.9	6.3775	0.09959	2599.1	2798.3	6.3390
225	0.13293	2645.1	2857.8	6.5537	0.11678	2637.0	2847.2	6.4825	0.10381	2628.5	2836.1	6.4160
250	0.14190	2692.9	2919.9	6.6753	0.12502	2686.7	2911.7	6.6088	0.11150	2680.3	2903.3	6.5475
300	0.15866	2781.6	3035.4	6.8864	0.14025	2777.4	3029.9	6.8246	0.12551	2773.2	3024.2	6.7684
350	0.17459	2866.6	3146.0	7.0713	0.15460	2863.6	3141.9	7.0120	0.13860	2860.5	3137.7	6.9583
400	0.19007	2950.8	3254.9	7.2394	0.16849	2948.3	3251.6	7.1814	0.15122	2945.9	3248.4	7.1292
500	0.22029	3120.1	3472.6	7.5410	0.19551	3118.5	3470.4	7.4845	0.17568	3116.9	3468.3	7.4337
600	0.24999	3293.9	3693.9	7.8101	0.22200	3292.7	3692.3	7.7543	0.19962	3291.5	3690.7	7.7043
700	0.27941	3473.5	3920.5	8.0558	0.24822	3472.6	3919.4	8.0005	0.22326	3471.7	3918.2	7.9509
800	0.30865	3659.5	4153.4	8.2834	0.27426	3658.8	4152.4	8.2284	0.24674	3658.0	4151.5	8.1791
900	0.33780	3852.1	4392.6	8.4965	0.30020	3851.5	4391.9	8.4417	0.27012	3850.9	4391.1	8.3925
1000	0.36687	4051.2	4638.2	8.6974	0.32606	4050.7	4637.6	8.6427	0.29342	4050.2	4637.1	8.5936
1100	0.39589	4256.6	4890.0	8.8878	0.35188	4256.2	4889.6	8.8331	0.31667	4255.7	4889.1	8.7842
1200	0.42488	4467.9	5147.7	9.0689	0.37766	4467.6	5147.3	9.0143	0.33989	4467.2	5147.0	8.9654
1300	0.45383	4684.8	5410.9	9.2418	0.40341	4684.5	5410.6	9.1872	0.36308	4684.2	5410.3	9.1384

TABLE A–5

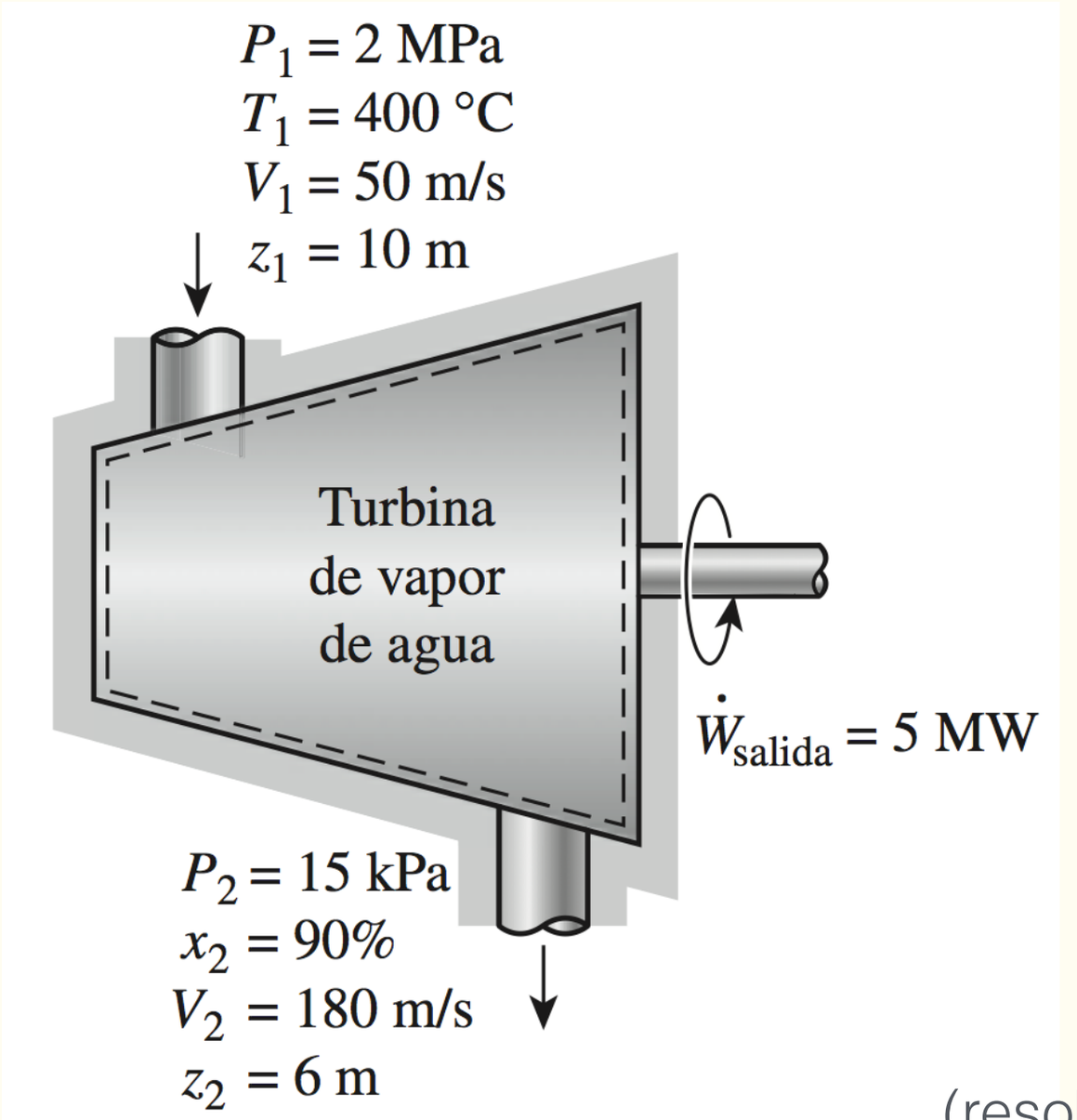
Saturated water—Pressure table

		Specific volume, m^3/kg		*Internal energy,* kJ/kg			*Enthalpy,* kJ/kg			*Entropy,* kJ/kg · K		
Press., P kPa	Sat. temp., T_{sat} °C	Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_{fg}	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_{fg}	Sat. vapor, s_g
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
20	60.06	0.001017	7.6481	251.40	2204.6	2456.0	251.42	2357.5	2608.9	0.8320	7.0752	7.9073
25	64.96	0.001020	6.2034	271.93	2190.4	2462.4	271.96	2345.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8302
30	69.09	0.001022	5.2287	289.24	2178.5	2467.7	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675
40	75.86	0.001026	3.9933	317.58	2158.8	2476.3	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6691
50	81.32	0.001030	3.2403	340.49	2142.7	2483.2	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931

Ejercicio #2

(Ejemplo resuelto 5.7 en C&B)

La salida de potencia de una turbina a vapor adiabática es 5MW en las condiciones indicadas en la figura.



Compare las magnitudes de Δh, Δec (energía cinética) y Δep (energía potencial)

Determine el trabajo hecho por unidad de masa de vapor fluyendo a través de la turbina.

Calcule el flujo másico de vapor.

Para discusión antes de hacer el problema:

¿Cúal esperamos sea el signo de Δh, Δec, Δep y w?

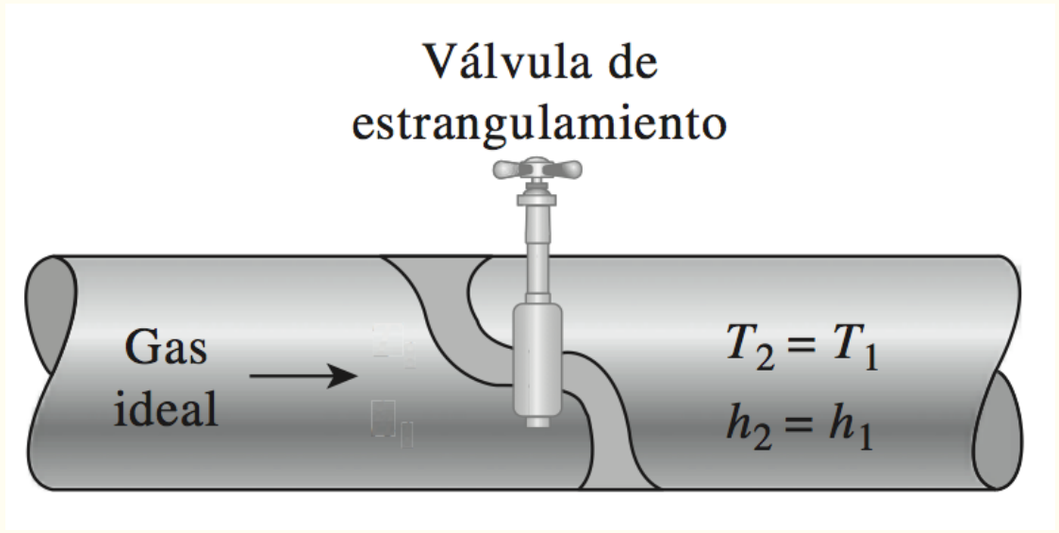
(resolver en pizarra)

Respuestas: $(a)\Delta h \gg \Delta ec \gg \Delta ep,\ (b)w = 872.5\text{kJ/kg},\ (c)\dot{m} = 5.73\text{kg/s}$

Más Ejemplos de Sistemas de Flujo Estacionario

Otro dispositivo extremadamente útil son las válvulas reguladoras:

Válvulas reguladoras
(o válvulas de estrangulamiento)




a) Válvula ajustable


b) Tapón poroso


c) Tubo capilar

Estos dispositivos restringen el flujo disminuyendo la sección del conducto por el que pasa. Debido a principios que se ven en mecánica de fluidos (Bernoulli + disipación), esto provoca **caídas de presión grandes** y en muchos casos también una caída de temperatura (pero sin producir trabajo)

¿Aplicaciones? Refrigeración, y acondicionamiento de aire

Experimento



¡Es el principio detrás de las válvulas reguladoras!

El hacer pasar el fluido abruptamente por un sección bastante menor hace que disminuya la presión. En este caso la diferencia de presión entre el aire de arriba de la pelota con el de abajo (presión atmosférica) es suficiente para hacer flotar la pelota

Nota: no se necesita la forma de embudo para que este principio funcione. Ver por ejemplo https://www.youtube.com/watch?v=Z_6ef3L0eE8

Sobre el Experimento

Este aparatito (válvula reguladora) cuesta unas cuantas “lucas” pero es absolutamente crucial para un aparato muy importante en la casa:

¡El refrigerador!



(típica válvula reguladora para refrigeración)



Más adelante estudiaremos cómo funciona un refrigerador. Para mayor información sobre válvulas en refrigeradores, ver por ejemplo http://www.brighthubengineering.com/hvac/58365-throttling-devices-or-expansion-valves-used-in-refrigeration-and-ac-systems/

Ejercicio #3

(Ejemplo resuelto 5.8 en C&B)

El fluido de trabajo utilizado en los refrigeradores es comúnmente denominado R134-a. Se tiene refrigerante que entra en un tubo capilar del refrigerador como líquido saturado a 0.8MPa. Su flujo es restringido hasta que alcanza una presión de 0.12 MPa. Determine la calidad del refrigerante en el estado final y la caída de temperatura durante el proceso, así como la caída de temperatura. Puede asumir que la válvula está muy bien aislada y puede despreciar cambios en energía cinética y potencial.

TABLA A-12

Refrigerante 134a saturado. Tabla de presión

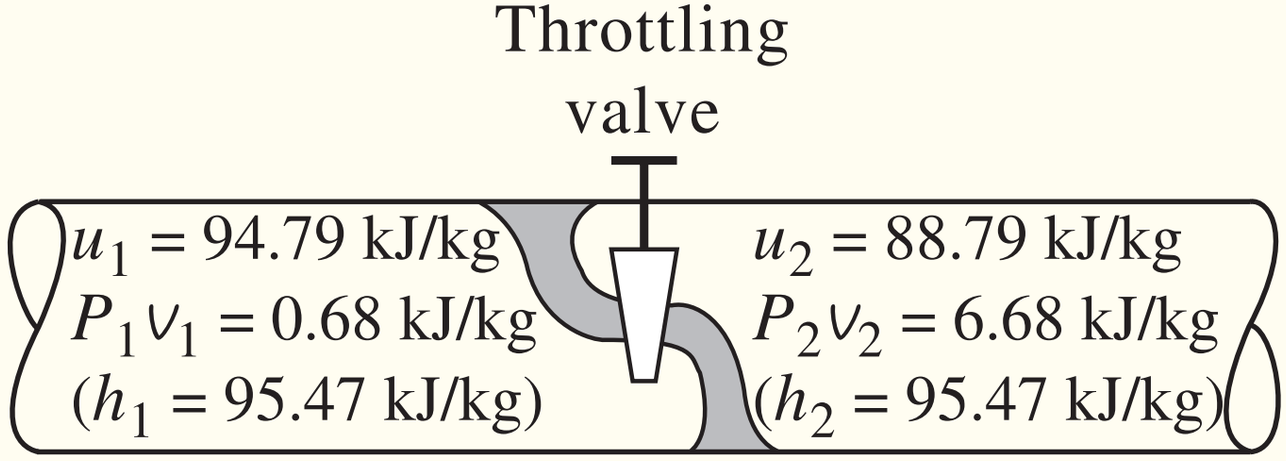
		Volumen específico, m^3/kg		*Energía interna, kJ/kg*			*Entalpía, kJ/kg*			*Entropía, kJ/kg · K*		
Pres., P kPa	Temp. sat., T_{sat} °C	Líq. sat., v_f	Vapor sat., v_g	Líq. sat., u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Líq. sat., h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Líq. sat., s_f	Evap., s_{fg}	Vapor sat., s_g
60	−36.95	0.0007098	0.31121	3.798	205.32	209.12	3.841	223.95	227.79	0.01634	0.94807	0.96441
70	−33.87	0.0007144	0.26929	7.680	203.20	210.88	7.730	222.00	229.73	0.03267	0.92775	0.96042
80	−31.13	0.0007185	0.23753	11.15	201.30	212.46	11.21	220.25	231.46	0.04711	0.90999	0.95710
90	−28.65	0.0007223	0.21263	14.31	199.57	213.88	14.37	218.65	233.02	0.06008	0.89419	0.95427
100	−26.37	0.0007259	0.19254	17.21	197.98	215.19	17.28	217.16	234.44	0.07188	0.87995	0.95183
120	−22.32	0.0007324	0.16212	22.40	195.11	217.51	22.49	214.48	236.97	0.09275	0.85503	0.94779
140	−18.77	0.0007383	0.14014	26.98	192.57	219.54	27.08	212.08	239.16	0.11087	0.83368	0.94456
160	−15.60	0.0007437	0.12348	31.09	190.27	221.35	31.21	209.90	241.11	0.12693	0.81496	0.94190
180	−12.73	0.0007487	0.11041	34.83	188.16	222.99	34.97	207.90	242.86	0.14139	0.79826	0.93965
200	−10.09	0.0007533	0.099867	38.28	186.21	224.48	38.43	206.03	244.46	0.15457	0.78316	0.93773
240	−5.38	0.0007620	0.083897	44.48	182.67	227.14	44.66	202.62	247.28	0.17794	0.75664	0.93458
280	−1.25	0.0007699	0.072352	49.97	179.50	229.46	50.18	199.54	249.72	0.19829	0.73381	0.93210
320	2.46	0.0007772	0.063604	54.92	176.61	231.52	55.16	196.71	251.88	0.21637	0.71369	0.93006
360	5.82	0.0007841	0.056738	59.44	173.94	233.38	59.72	194.08	253.81	0.23270	0.69566	0.92836
400	8.91	0.0007907	0.051201	63.62	171.45	235.07	63.94	191.62	255.55	0.24761	0.67929	0.92691
450	12.46	0.0007985	0.045619	68.45	168.54	237.00	68.81	188.71	257.53	0.26465	0.66069	0.92535
500	15.71	0.0008059	0.041118	72.93	165.82	238.75	73.33	185.98	259.30	0.28023	0.64377	0.92400
550	18.73	0.0008130	0.037408	77.10	163.25	240.35	77.54	183.38	260.92	0.29461	0.62821	0.92282
600	21.55	0.0008199	0.034295	81.02	160.81	241.83	81.51	180.90	262.40	0.30799	0.61378	0.92177
650	24.20	0.0008266	0.031646	84.72	158.48	243.20	85.26	178.51	263.77	0.32051	0.60030	0.92081
700	26.69	0.0008331	0.029361	88.24	156.24	244.48	88.82	176.21	265.03	0.33230	0.58763	0.91994
750	29.06	0.0008395	0.027371	91.59	154.08	245.67	92.22	173.98	266.20	0.34345	0.57567	0.91912
800	31.31	0.0008458	0.025621	94.79	152.00	246.79	95.47	171.82	267.29	0.35404	0.56431	0.91835
850	33.45	0.0008520	0.024069	97.87	149.98	247.85	98.60	169.71	268.31	0.36413	0.55349	0.91762

Ejercicio #3

(Ejemplo resuelto 5.8 en C&B)

El fluido de trabajo utilizado en los refrigeradores es comúnmente denominado R134-a. Se tiene refrigerante que entra en un tubo capilar del refrigerador como líquido saturado a 0.8MPa. Su flujo es restringido hasta que alcanza una presión de 0.12 MPa. Determine la calidad del refrigerante en el estado final y la caída de temperatura durante el proceso, así como la caída de temperatura. Puede asumir que la válvula está muy bien aislada y puede despreciar cambios en energía cinética y potencial.

Moraleja importante: si se desprecian cambios de ec y ep, así como intercambios de calor, las **válvulas reguladoras son isentálpicas** (es decir $h_1=h_2$)

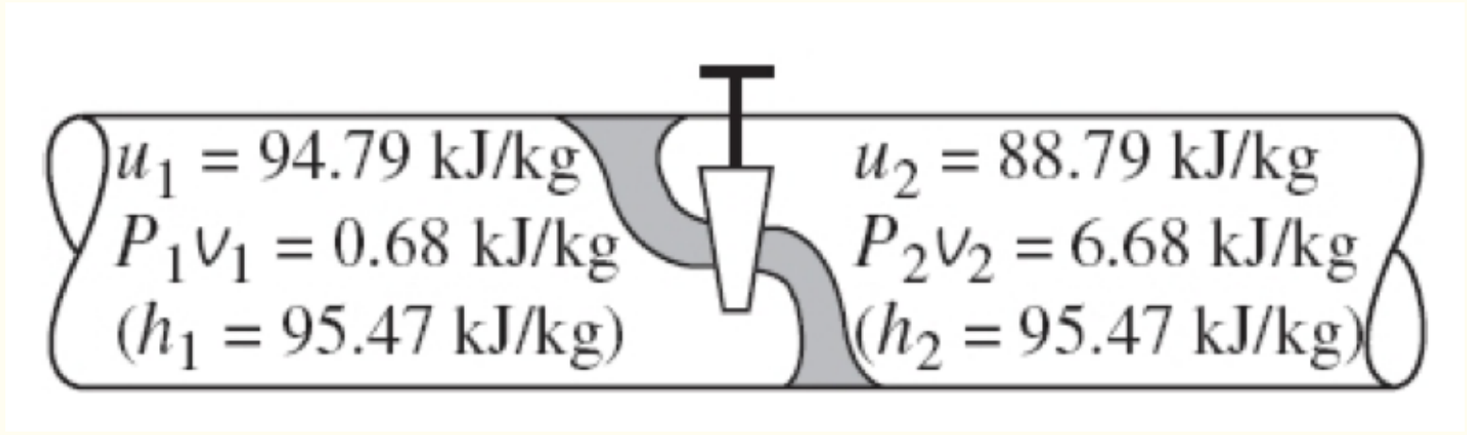


(resolver en pizarra)

Respuestas: $x_2=0.34$, $\Delta T=-53.63°C$

Ejercicio #3

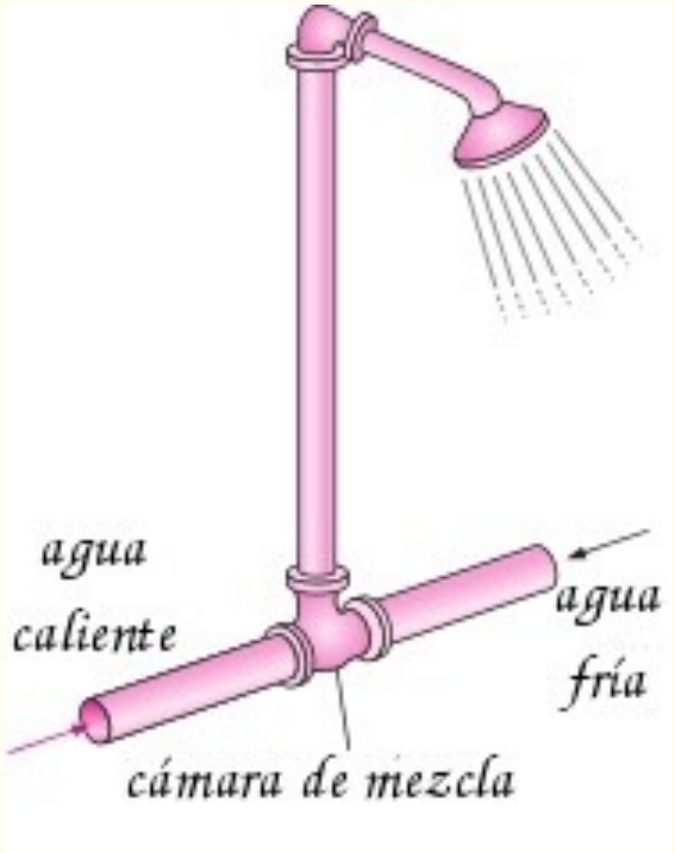
Un último comentario: este resultado podría parecer extraño, ya que parecería que energía se está perdiendo. ¿Cómo entenderlo?

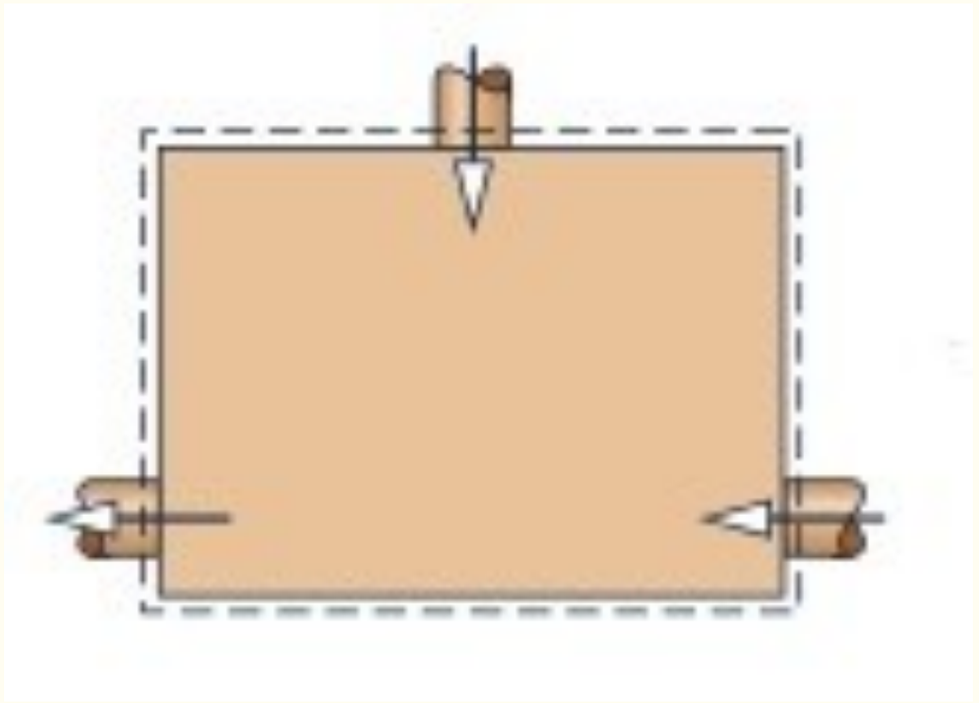


Respuesta: La temperatura disminuye durante el proceso a consecuencia de que el 34% del refrigerante se vaporiza y la energía necesaria para hacerlo la absorbe del mismo refrigerante

Más Ejemplos de Sistemas de Flujo Estacionario

Cámaras de Mezclado





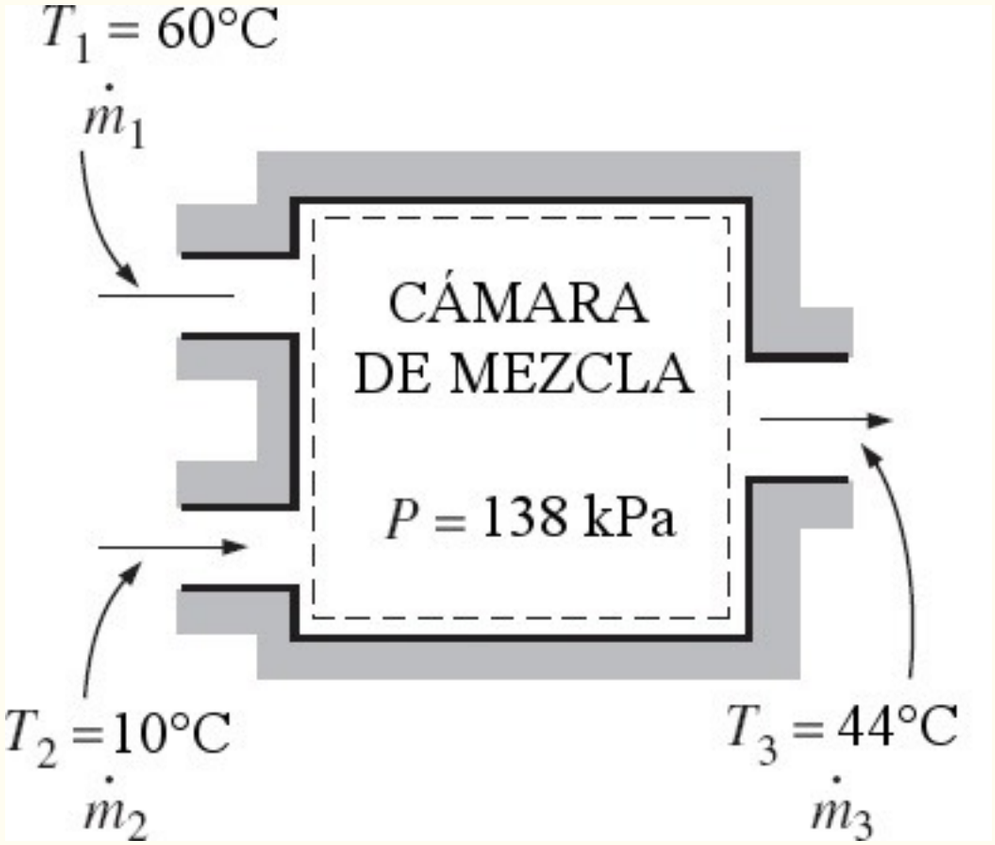
¿Su función? Proveer un lugar donde se mezclen dos o más fluídos

¿Aplicaciones? Duchas, … etc.

Ejercicio #4

(Ejercicio resuelto 5.9 en C&B con algunas modificaciones)

Consideremos una ducha doméstica donde agua caliente a 60°C es mezclada con agua fría a 10°C. Si se busca tener una corriente estacionaria de agua temperada a 44°C, determine el cociente de las tasas de flujo de agua caliente y fría. Asuma que las pérdidas de calor son despreciables en la cámara de mezcla y que la misma tiene lugar a una presión de 138kPa.



Para discusión antes de hacer el problema:

¿Más o menos qué valor esperamos que tenga el resultado (menor a 1, mayor a 1, cero…. etc)?

(resolver en pizarra)

TABLE A–5

Saturated water—Pressure table

		Specific volume, m^3/kg		*Internal energy, kJ/kg*			*Enthalpy, kJ/kg*			*Entropy, kJ/kg · K*		
Press., P kPa	Sat. temp., T_{sat} °C	Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_{fg}	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_{fg}	Sat. vapor, s_g
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
20	60.06	0.001017	7.6481	251.40	2204.6	2456.0	251.42	2357.5	2608.9	0.8320	7.0752	7.9073
25	64.96	0.001020	6.2034	271.93	2190.4	2462.4	271.96	2345.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8302
30	69.09	0.001022	5.2287	289.24	2178.5	2467.7	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675
40	75.86	0.001026	3.9933	317.58	2158.8	2476.3	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6691
50	81.32	0.001030	3.2403	340.49	2142.7	2483.2	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931
75	91.76	0.001037	2.2172	384.36	2111.8	2496.1	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
101.325	99.97	0.001043	1.6734	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545
125	105.97	0.001048	1.3750	444.23	2068.8	2513.0	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841
150	111.35	0.001053	1.1594	466.97	2052.3	2519.2	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231

Con esta tabla podemos confirmar fácilmente que, a 138kPa, estamos en la región de líquido comprimido en los tres casos

TABLE A–4

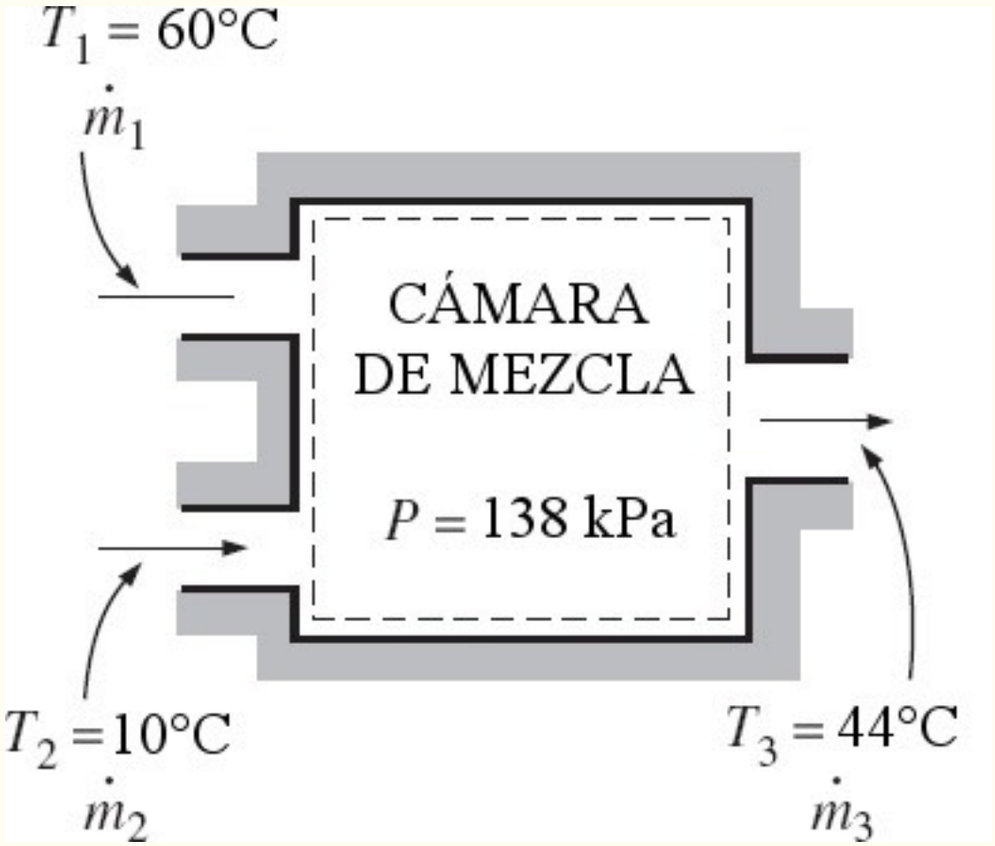
Saturated water—Temperature table

		Specific volume, m^3/kg		*Internal energy, kJ/kg*			*Enthalpy, kJ/kg*			*Entropy, kJ/kg · K*		
Temp., T °C	Sat. press., P_{sat} kPa	Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_{fg}	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_{fg}	Sat. vapor, s_g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151

Ejercicio #4

(Ejercicio resuelto 5.9 en C&B con algunas modificaciones)

Consideremos una ducha doméstica donde agua caliente a 60°C es mezclada con agua fría a 10°C. Si se busca tener una corriente estacionaria de agua temperada a 44°C, determine el cociente de las tasas de flujo de agua caliente y fría. Asuma que las pérdidas de calor son despreciables en la cámara de mezcla y que la misma tiene lugar a una presión de 138kPa.



Para discusión antes de hacer el problema:

¿Más o menos qué valor esperamos que tenga el resultado (menor a 1, mayor a 1, cero…. etc)?

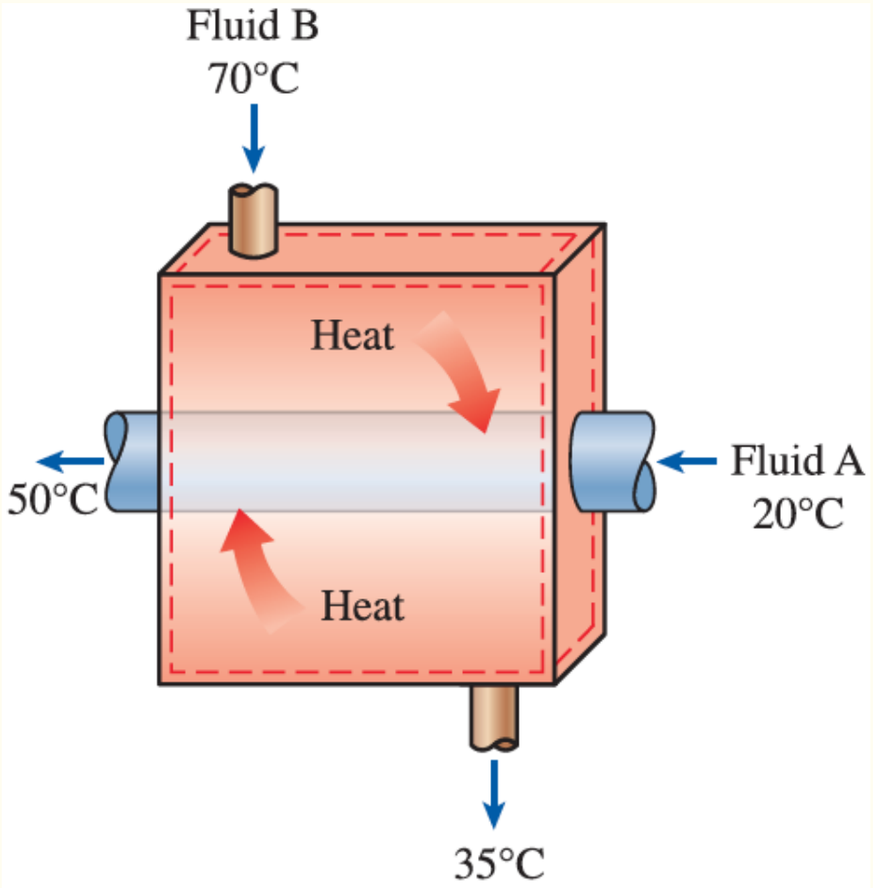
(resolver en pizarra)

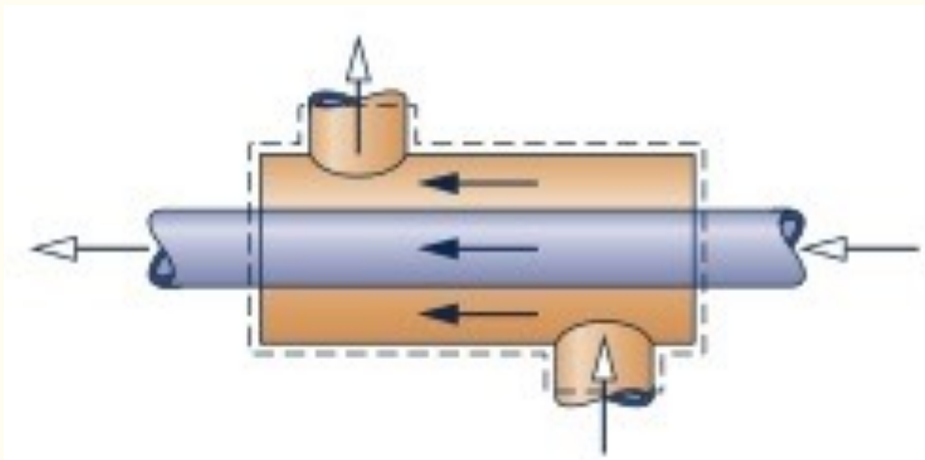
Respuesta: 2.1

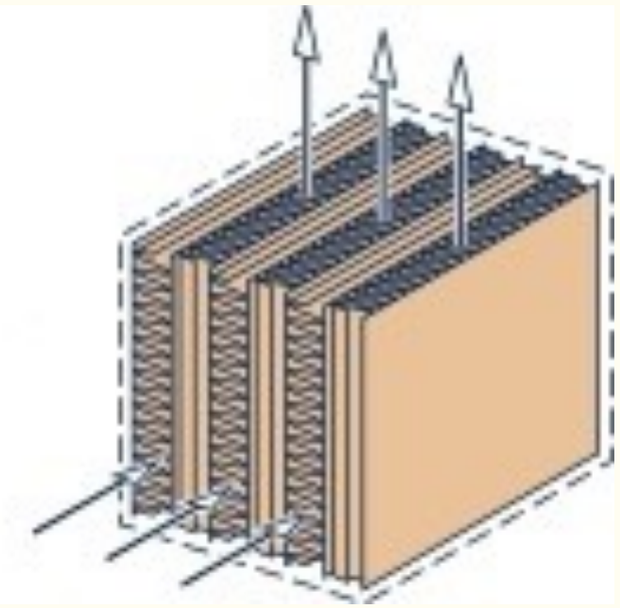
Recordatorio: no hay tablas de líquido comprimido a presiones bajas, por lo que hay que aproximar sus propiedades con las del líquido saturado a la temperatura correspondiente. La presión aquí la dan sólo para que podamos confirmar el hecho que en los tres casos estamos lidiando con líquido comprimido.

Más Ejemplos de Sistemas de Flujo Estacionario

Intercambiadores de Calor







Dispositivos en donde dos flujos intercambian calor <u>sin mezclarse</u>

¿Aplicaciones? Automóviles, calefacción, industria… etc.

Más Ejemplos de Sistemas de Flujo Estacionario

Tuberías y Ductos

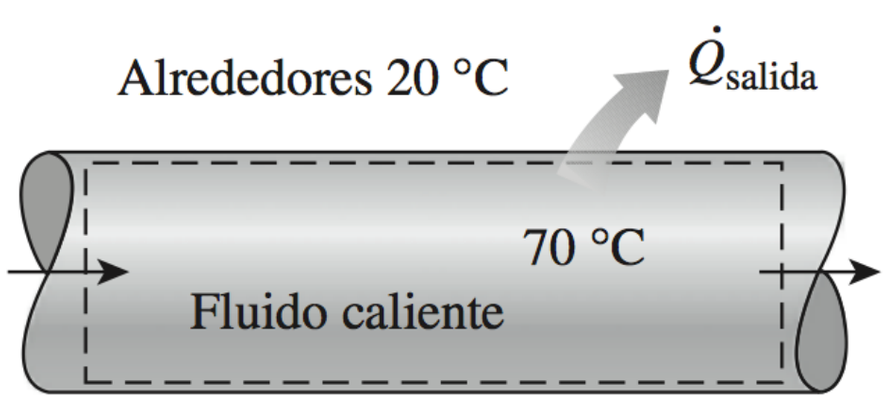


FIGURA 5-39

Las pérdidas de calor desde un fluido en movimiento por una tubería o ducto no aislado hacia el ambiente más frío podrían ser muy significativas.

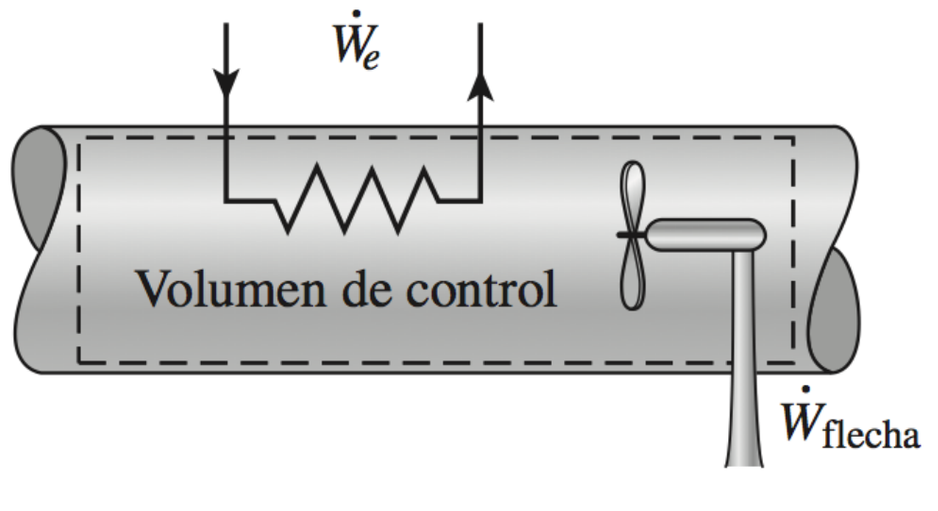


FIGURA 5-40

El flujo por una tubería o ducto podría implicar más de una forma de trabajo al mismo tiempo.

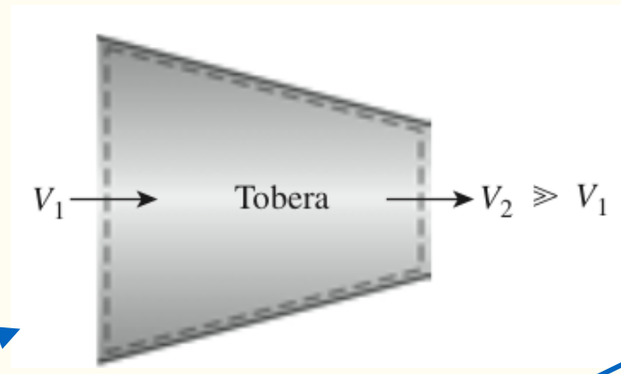
¿Su función? Transferir líquidos y/o gases

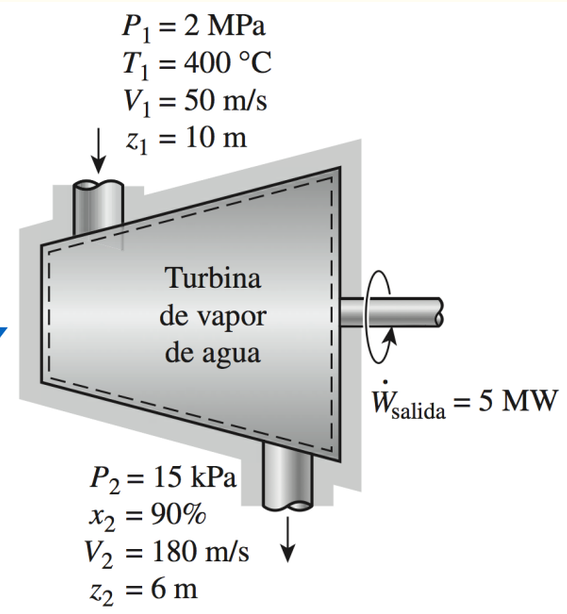
¿Aplicaciones? ¡En todas partes!

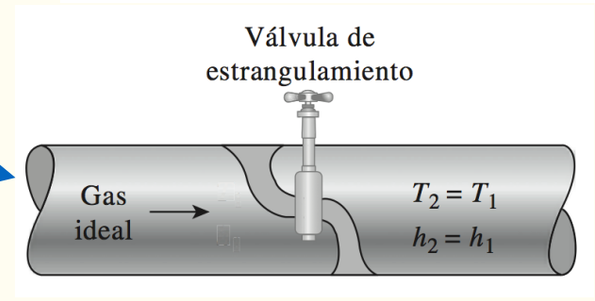
Resumen: Sistemas de Flujo Estacionario

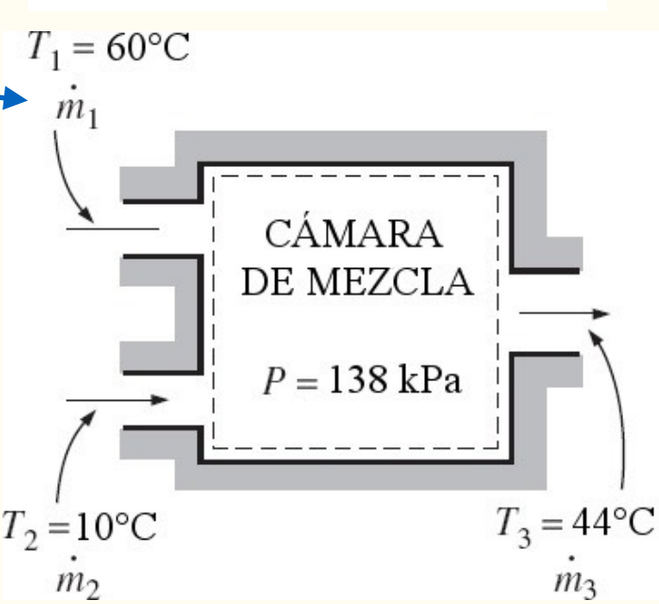
Estos son los tipos de sistemas con flujo estacionario que mencionamos:

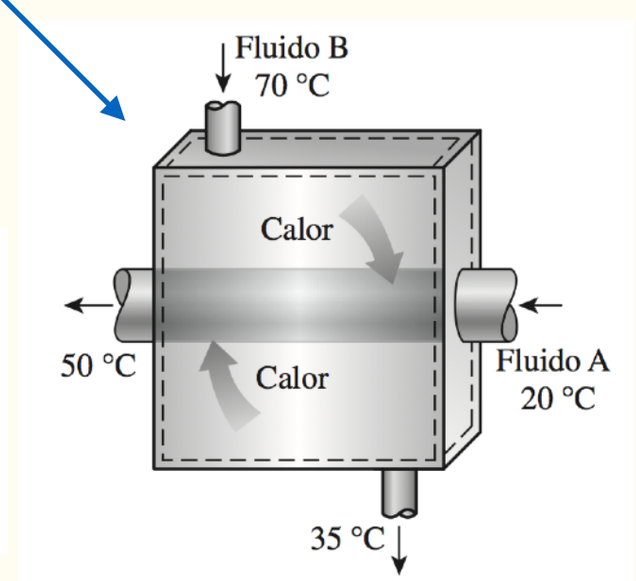
- Difusores y toberas
- Turbinas, compresores, bombas
- Válvulas reguladoras y/o tapones porosos
- Cámaras de mezcla
- Intercambiadores de calor
- Ductos y tuberías

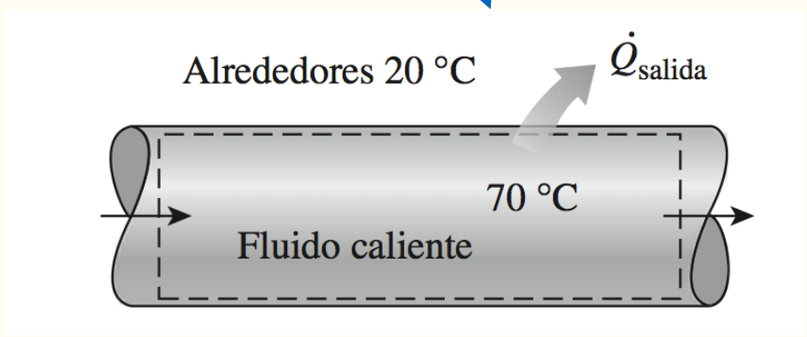












Deben familiarizarse con todos, aunque en realidad los principios son los mismos (aprendan a aplicar bien conservación de energía, y sabrán manejar todos)

Nos queda la última parte del Capítulo 5:

CAPÍTULO

5

ANÁLISIS DE MASA Y ENERGÍA DE VOLÚMENES DE CONTROL

En el capítulo 4 se aplicó a sistemas cerrados la relación de balance de energía expresada como $E_{entrada} - E_{salida} = \Delta E_{sistema}$. En este capítulo se amplía el análisis de energía a sistemas en los que hay flujo másico a través de sus fronteras, es decir, volúmenes de control, con énfasis particular en sistemas de flujo estacionario.

En este capítulo se inicia con el desarrollo de la relación general de *conservación de la masa* para volúmenes de control y se continúa con una explicación del trabajo de flujo y la energía de flujos de fluido. Luego, se aplica el balance de energía a sistemas que involucran *procesos de flujo estacionario* y se analizan dispositivos comunes con este tipo de flujo como toberas, difusores, compresores, turbinas, válvulas de estrangulamiento, cámaras de mezclado e intercambiadores de calor. Por último, se aplica el balance de energía a *procesos de flujo no-variable,* como la carga y descarga de recipientes.

OBJETIVOS

En el capítulo 5, los objetivos son:

- Desarrollar el principio de conservación de la masa.
- Aplicar el principio de conservación de la masa a varios sistemas que incluyen volúmenes de control de flujo estacionario y no estacionario.
- Aplicar la primera ley de la termodinámica como enunciado del principio de conservación de la energía para volúmenes de control.

5-5 ▪ ANÁLISIS DE PROCESOS DE FLUJO NO ESTACIONARIO

Durante un proceso de flujo estacionario no ocurren cambios dentro del volumen de control; por esto, no hay que preocuparse de lo que sucede dentro de las fronteras. No tener que preocuparse de ningún cambio dentro del volumen de control, con el tiempo simplifica en gran medida el análisis.

Sin embargo, muchos procesos en los que se tiene interés tienen que ver con *cambios* dentro del volumen de control con tiempo. Esta clase de procesos se conocen como de *flujo no estacionario* o *flujo transitorio*. Obviamente, las relaciones de flujo estacionario desarrolladas antes no son aplicables a estos procesos. Cuando se analiza un proceso de flujo no estacionario es importante estar al tanto del contenido de masa y energía del volumen de control, así como de las interacciones de energía a través de la frontera.

Sistemas de flujo **no** estacionario

(Sección 5.5 del C&B)

Flujo No Estacionario

Las ecuaciones que hemos estado manejando son estas:

Balance de masa:

$$\dot{m}_{vc} = \sum_{entradas} \dot{m} - \sum_{salidas} \dot{m}$$

Balance de energía:

$$\dot{E}_{vc} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_{entradas} \dot{m}\theta - \sum_{salidas} \dot{m}\theta$$

$$\theta = e + P\nu = u + \frac{v^2}{2} + g\,z + P\nu = h + v^2/2 + g\,z$$

¿Qué pasa si no tenemos flujo estacionario?

Las **ecuaciones no cambian**, pero ahora tenemos que:

$$\dot{E}_{vc} \neq 0 \quad \text{y} \quad \dot{m}_{vc} \neq 0$$

Flujo No Estacionario

Cuando teníamos flujo estacionario resultaba más útil hablar de tasas de cambio (i.e. derivadas con respecto al tiempo, como flujos másicos y potencias)

Pero los procesos transitorios (no estacionarios) son procesos que **tienen una duración finita**

En estos casos por lo general **resulta más útil hablar de estados finales e iniciales**, así como de la masa/energía que entró y salió:

Balance de masa: $$m_{entra} - m_{sale} = \Delta m_{sistema}$$

Balance de energía: $$E_{entra} - E_{sale} = \Delta E_{sistema}$$

Flujo No Estacionario

Nos queda entonces que:

Balance de masa:

$$m_{entra} - m_{sale} = \Delta m_{sistema} = (m_{final} - m_{inicial})_{VC}$$

Balance de energía:

$$E_{entra} - E_{sale} = \Delta E_{sistema}$$

$$\Delta E_{sistema} = Q_{neto} - W_{neto} + \sum_{entradas} m\theta - \sum_{salidas} m\theta$$

O, en otras palabras:

$$\left(Q_{entra} + W_{entra} + \sum_{entradas} m\theta\right) - \left(Q_{sale} + W_{sale} + \sum_{salidas} m\theta\right) = \Delta E_{sistema}$$

$$\Delta E_{sistema} = [m_{final}\, e_{final} - m_{inicial}\, e_{inicial}]_{sistema}$$

(donde e=u+ec+ep es la energía por unidad de masa del fluido que está dentro del VC)

Casos Especiales y Ejemplos

Si las variaciones de ec y ep son despreciables, nos queda:

$$Q_{neto} - W_{neto} = \sum_{salidas} m\theta - \sum_{entradas} m\theta + [(mu)_{fin} - (mu)_{ini}]_{VC}$$

Algunos ejemplos de procesos con flujo transitorio (no estacionario):

- Llenar un recipiente desde una corriente principal
- Arrancar o parar turbinas, compresores, bombas y motores
- Descargar un recipiente presurizado
- Inflar globos o neumáticos
- Cocinar en una olla a presión

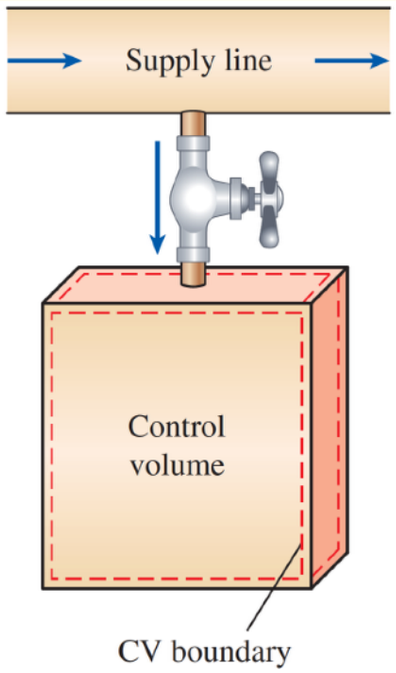


FIGURA 5-43
La carga de un recipiente rígido desde una línea de suministro es un proceso de flujo no estacionario porque tiene relación con cambios en el volumen de control.

Procesos de Flujo Uniforme

En la vida real, el análisis de un sistema con flujo no-estacionario puede ser muy complicado, debido a que las propiedades de los flujos de entrada y de salida pueden cambiar con el tiempo y/o la posición.

Aquí nos vamos a restringir a **procesos de flujo uniforme**: las propiedades de un fluído en cualquier entrada o salida no cambian con el tiempo o con la posición transversal

En otras palabras, el flujo en cualquier entrada o salida es uniforme y estacionario. Esto es una buena aproximación para la mayoría de los procesos no estacionarios.

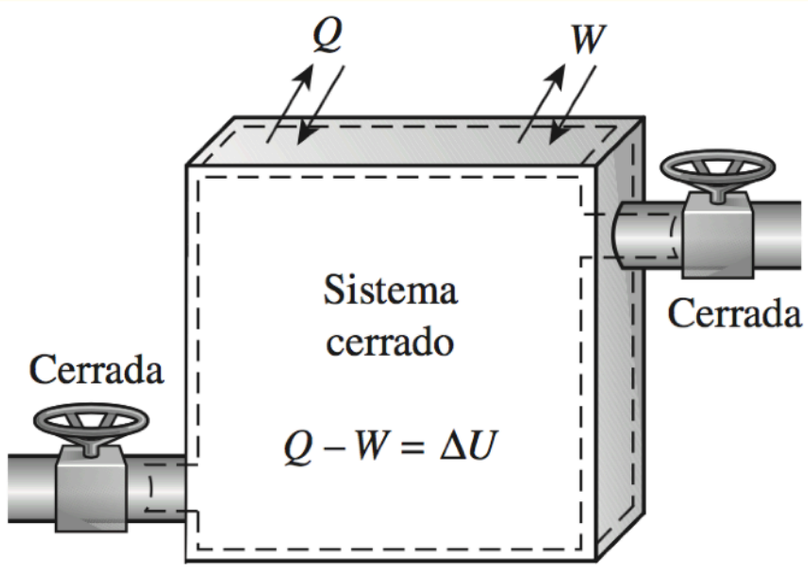


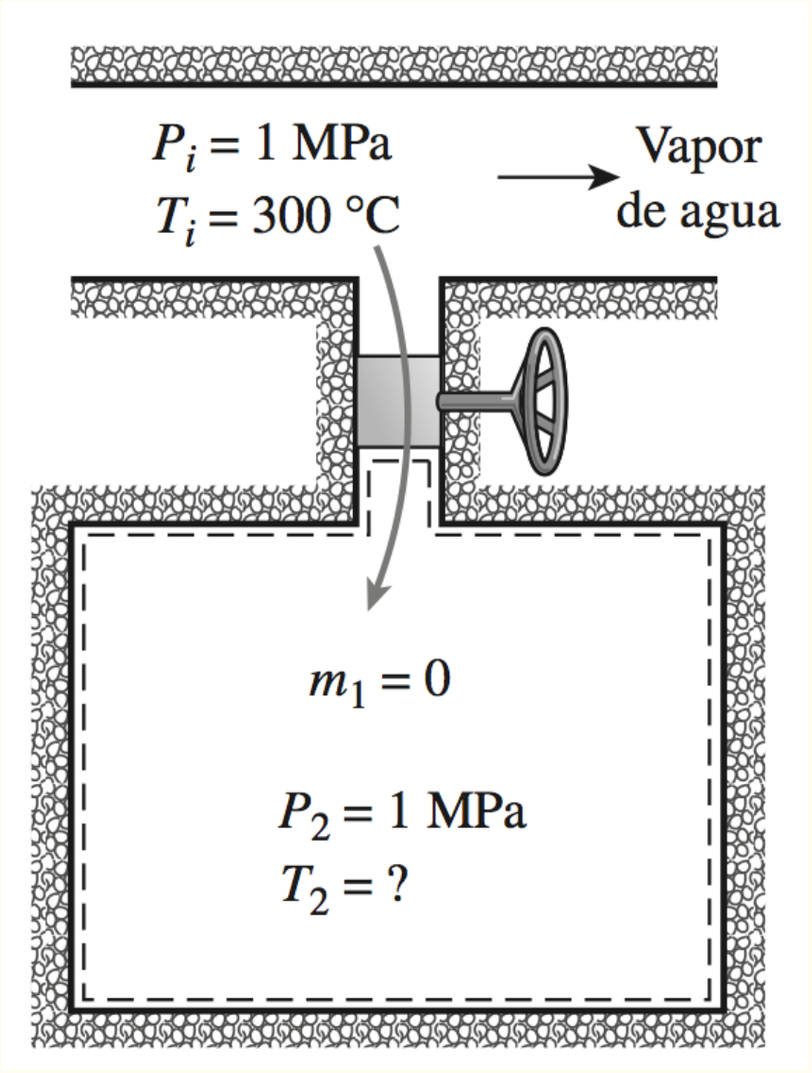
FIGURA 5-45

La ecuación de la energía de un sistema de flujo uniforme se reduce a la de un sistema cerrado cuando todas las entradas y salidas están cerradas.

Ejercicio #1

(Ejemplo Resuelto 5.12 en C&B, con solución entera)

Un tanque rígido y aislado que está inicialmente vacío es conectado, mediante una válvula, a la línea principal que lleva vapor a 1 MPa y 300°C. La válvula es abierta y el vapor comienza a fluir lentamente hacia el tanque hasta que la presión alcanza 1MPa, momento en que la válvula es cerrada. Determine la temperatura del vapor en el tanque.



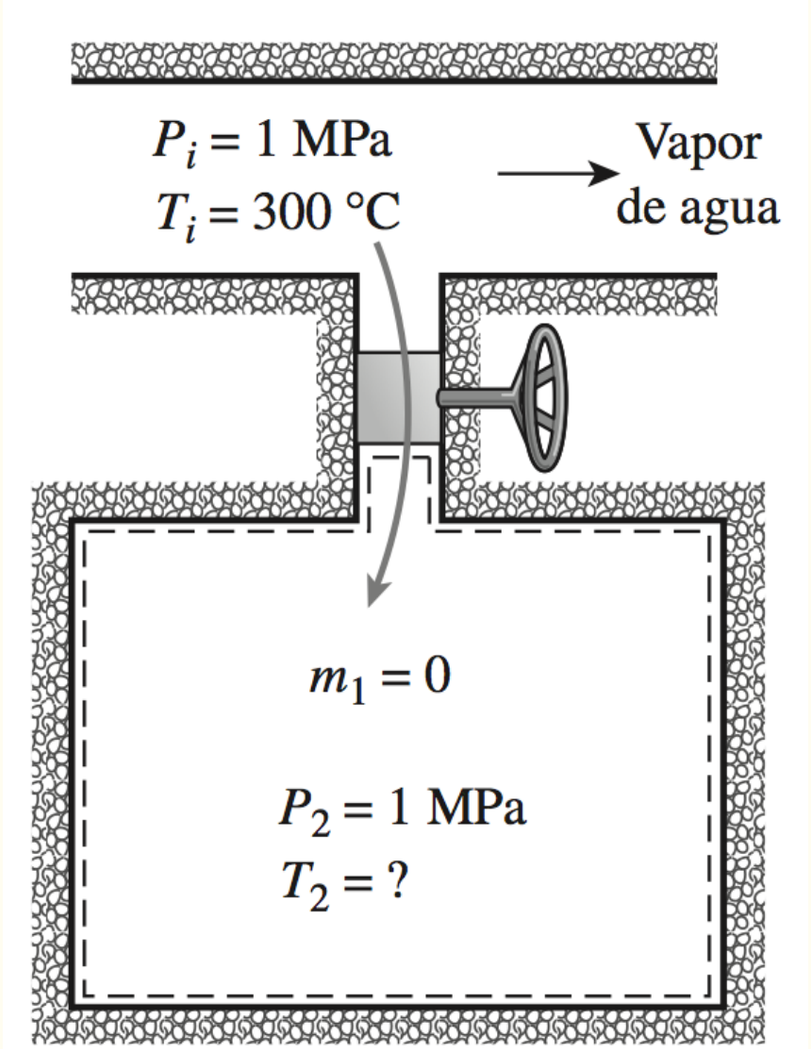
Para discusión antes de hacer el problema:

¿Qué vamos a tomar como el sistema (volumen de control)?

¿T_2 va a ser igual, menor, o mayor a T_1?

Ejercicio #1

Un tanque rígido y aislado que está inicialmente vacío es conectado, mediante una válvula, a la línea principal que lleva vapor a 1 MPa y 300°C. La válvula es abierta y el vapor comienza a fluir lentamente hacia el tanque hasta que la presión alcanza 1MPa, momento en que la válvula es cerrada. Determine la temperatura del vapor en el tanque.



El tanque es el volumen de control

Para el vapor, $ec \approx 0$ y $ep \approx 0$

El tanque está quieto, $\Delta EC = 0$ y $\Delta EP = 0$

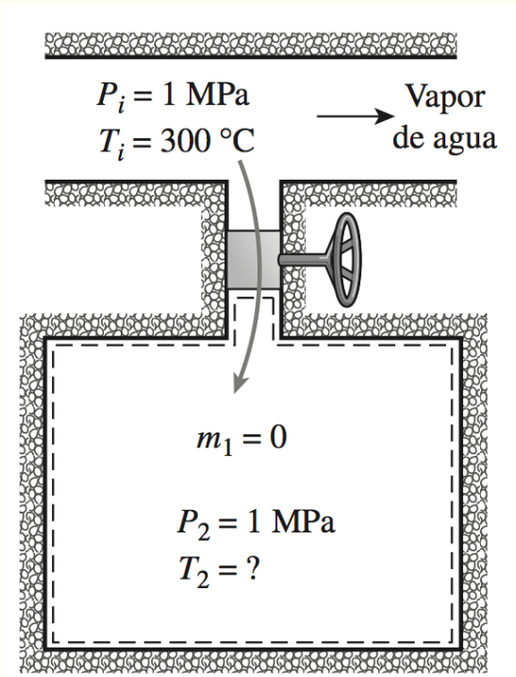
$W = 0$ $\quad$ $Q = 0$

$\Delta E_{sistema} = \Delta U_{sistema}$

$m_{inicial} = 0$

Una entrada de masa y no hay salida de masa

Ejercicio #1



Balance de masa,

$$\Delta m_{sistema} = m_{entra} - m_{sale} \quad \longrightarrow \quad m_{entra} = m_{final}$$

Balance de energía,

$$\Delta E_{sistema} = E_{entra} - E_{sale} \quad \longrightarrow \quad m_{entra}\, h_{entrada} = m_{final}\, u_{final}$$

Entonces,

$$u_{final} = h_{entrada}$$

La energía interna del vapor en el tanque es igual a la entalpía del vapor que está entrando al tanque

TABLE A–6

Superheated water (*Continued*)

T °C	*v* m³/kg	*u* kJ/kg	*h* kJ/kg	*s* kJ/kg · K	*v* m³/kg	*u* kJ/kg	*h* kJ/kg	*s* kJ/kg · K	*v* m³/kg	*u* kJ/kg	*h* kJ/kg	*s* kJ/kg · K
	P = 1.00 MPa (179.88°C)				*P* = 1.20 MPa (187.96°C)				*P* = 1.40 MPa (195.04°C)			
Sat.	0.19437	2582.8	2777.1	6.5850	0.16326	2587.8	2783.8	6.5217	0.14078	2591.8	2788.9	6.4675
200	0.20602	2622.3	2828.3	6.6956	0.16934	2612.9	2816.1	6.5909	0.14303	2602.7	2803.0	6.4975
250	0.23275	2710.4	2943.1	6.9265	0.19241	2704.7	2935.6	6.8313	0.16356	2698.9	2927.9	6.7488
300	0.25799	2793.7	3051.6	7.1246	0.21386	2789.7	3046.3	7.0335	0.18233	2785.7	3040.9	6.9553
350	0.28250	2875.7	3158.2	7.3029	0.23455	2872.7	3154.2	7.2139	0.20029	2869.7	3150.1	7.1379
400	0.30661	2957.9	3264.5	7.4670	0.25482	2955.5	3261.3	7.3793	0.21782	2953.1	3258.1	7.3046
500	0.35411	3125.0	3479.1	7.7642	0.29464	3123.4	3477.0	7.6779	0.25216	3121.8	3474.8	7.6047
600	0.40111	3297.5	3698.6	8.0311	0.33395	3296.3	3697.0	7.9456	0.28597	3295.1	3695.5	7.8730
700	0.44783	3476.3	3924.1	8.2755	0.37297	3475.3	3922.9	8.1904	0.31951	3474.4	3921.7	8.1183
800	0.49438	3661.7	4156.1	8.5024	0.41184	3661.0	4155.2	8.4176	0.35288	3660.3	4154.3	8.3458
900	0.54083	3853.9	4394.8	8.7150	0.45059	3853.3	4394.0	8.6303	0.38614	3852.7	4393.3	8.5587
1000	0.58721	4052.7	4640.0	8.9155	0.48928	4052.2	4639.4	8.8310	0.41933	4051.7	4638.8	8.7595
1100	0.63354	4257.9	4891.4	9.1057	0.52792	4257.5	4891.0	9.0212	0.45247	4257.0	4890.5	8.9497
1200	0.67983	4469.0	5148.9	9.2866	0.56652	4468.7	5148.5	9.2022	0.48558	4468.3	5148.1	9.1308
1300	0.72610	4685.8	5411.9	9.4593	0.60509	4685.5	5411.6	9.3750	0.51866	4685.1	5411.3	9.3036

Las propiedades del vapor [**Tabla A-6**] a la entrada son

$P_{entrada}$ = 1 MPa y $T_{entrada}$ = 300°C $\longrightarrow$ $h_{entrada}$ = 3051.6 kJ/kg

Las propiedades del vapor en el estado final son

$P_{entrada}$ = 1 MPa y u_{final} = 3051.6 kJ/kg $\longrightarrow$ T_{final} = 456.1°C

(nota: se utilizó interpolación lineal)

Ejercicio #1

¿Por qué subió la temperatura?

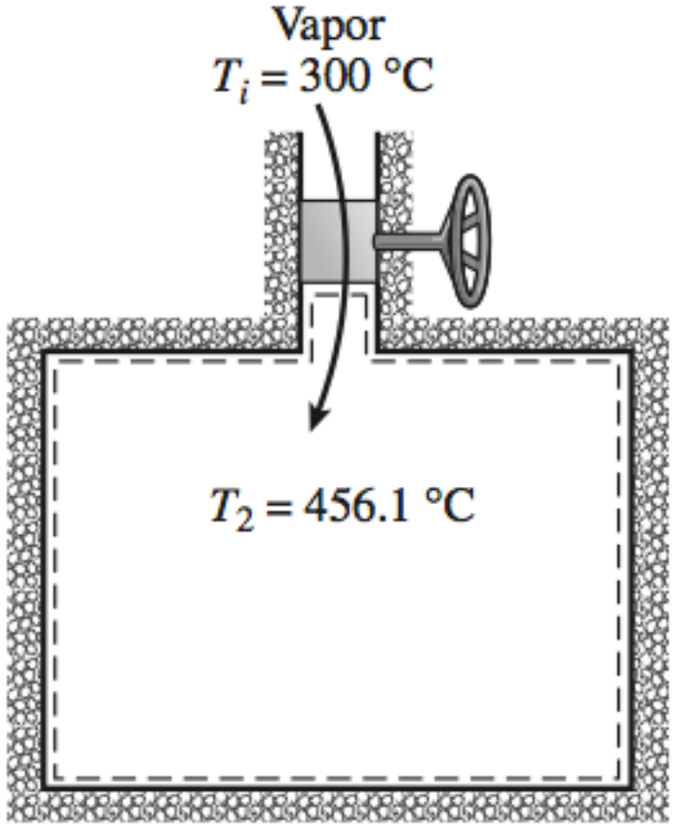


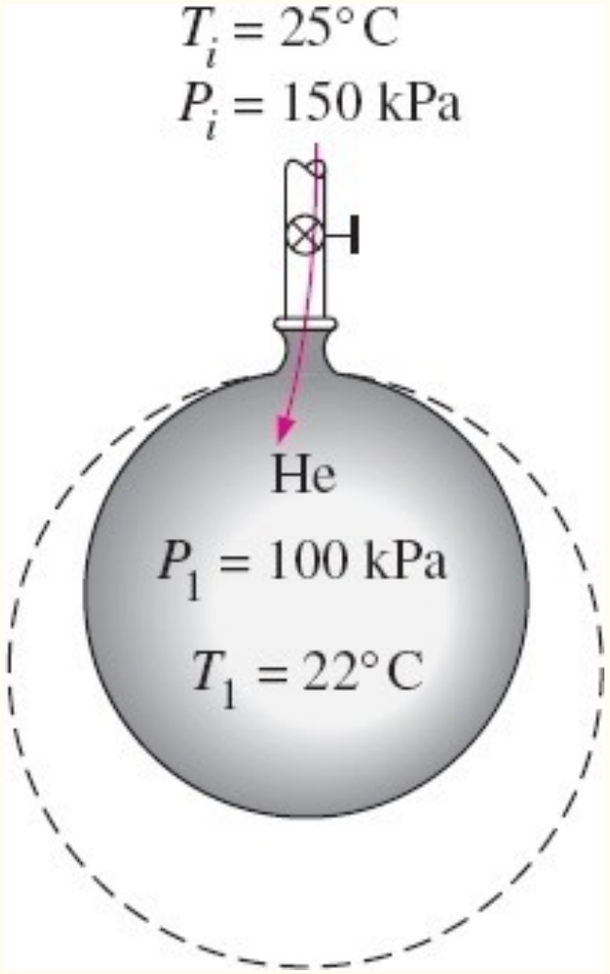
FIGURA 5-48

La temperatura del vapor de agua aumenta de 300 a 456.1 °C cuando entra al recipiente, como resultado de energía de flujo que se convierte en energía interna.

Ejercicio #2

(casi igual al 5.138 del C&B, con solución entera)

Un globo contiene inicialmente 65 m³ de Helio en condiciones atmosféricas, 100kPa y 22°C. El globo se conecta mediante una válvula a un tanque de helio, cuya presión y temperatura son 150kPa y 25°C respectivamente. Se abre la válvula y el helio entra al globo hasta que se logra la presión de equilibrio. El material del globo tiene la propiedad de que su volumen aumenta linealmente como la presión. Si nose transfiere calor durante el proceso, determinar la temperatura final del globo.



<u>Para discusión antes de hacer el problema:</u>

¿Cúal es nuestro sistema? ¿Tenemos un volumen de control?

¿T_2 va a ser igual, menor, o mayor a T_1?

TABLE A – 1

Molar mass, gas constant, and critical-point properties

Substance	Formula	Molar mass, M kg/kmol	Gas constant, R kJ/kg · K*	*Critical-point properties* Temperature, K	Pressure, MPa	Volume, m^3/kmol
Air	—	28.97	0.2870	132.5	3.77	0.0883
Ammonia	NH_3	17.03	0.4882	405.5	11.28	0.0724
Argon	Ar	39.948	0.2081	151	4.86	0.0749
Benzene	C_6H_6	78.115	0.1064	562	4.92	0.2603
Bromine	Br_2	159.808	0.0520	584	10.34	0.1355
n-Butane	C_4H_{10}	58.124	0.1430	425.2	3.80	0.2547
Carbon dioxide	CO_2	44.01	0.1889	304.2	7.39	0.0943
Carbon monoxide	CO	28.011	0.2968	133	3.50	0.0930
Carbon tetrachloride	CCl_4	153.82	0.05405	556.4	4.56	0.2759
Chlorine	Cl_2	70.906	0.1173	417	7.71	0.1242
Chloroform	$CHCl_3$	119.38	0.06964	536.6	5.47	0.2403
Dichlorodifluoromethane (R-12)	CCl_2F_2	120.91	0.06876	384.7	4.01	0.2179
Dichlorofluoromethane (R-21)	$CHCl_2F$	102.92	0.08078	451.7	5.17	0.1973
Ethane	C_2H_6	30.070	0.2765	305.5	4.48	0.1480
Ethyl alcohol	C_2H_5OH	46.07	0.1805	516	6.38	0.1673
Ethylene	C_2H_4	28.054	0.2964	282.4	5.12	0.1242
Helium	He	4.003	2.0769	5.3	0.23	0.0578
n-Hexane	C_6H_{14}	86.179	0.09647	507.9	3.03	0.3677
Hydrogen (normal)	H_2	2.016	4.1240	33.3	1.30	0.0649
Krypton	Kr	83.80	0.09921	209.4	5.50	0.0924

TABLE A–2

Ideal-gas specific heats of various common gases

(*a*) At 300 K

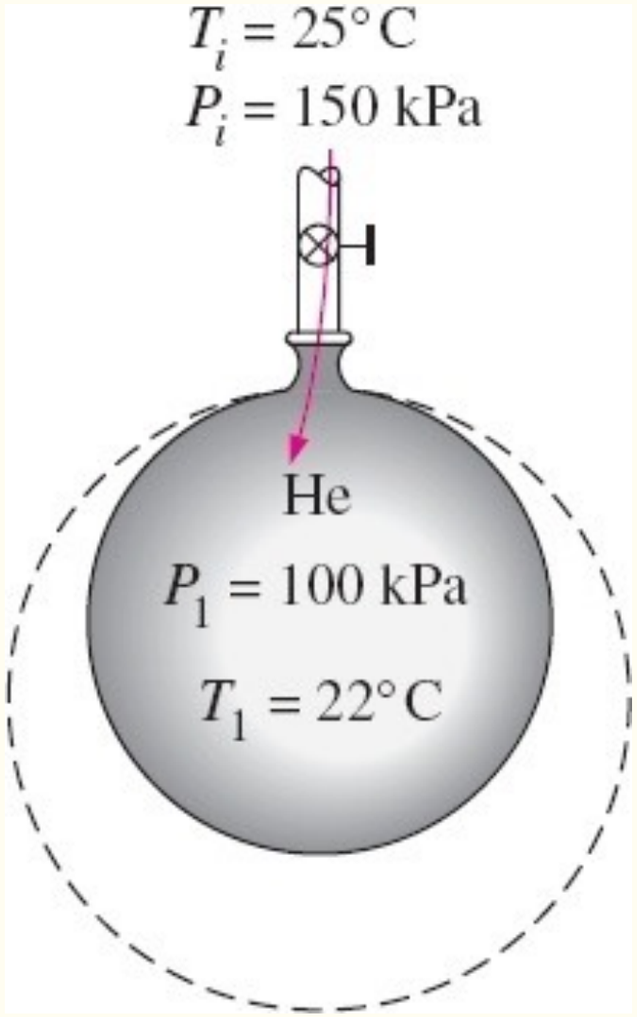
Gas	Formula	Gas constant, R kJ/kg · K	c_p kJ/kg · K	c_v kJ/kg · K	k
Air	—	0.2870	1.005	0.718	1.400
Argon	Ar	0.2081	0.5203	0.3122	1.667
Butane	C_4H_{10}	0.1433	1.7164	1.5734	1.091
Carbon dioxide	CO_2	0.1889	0.846	0.657	1.289
Carbon monoxide	CO	0.2968	1.040	0.744	1.400
Ethane	C_2H_6	0.2765	1.7662	1.4897	1.186
Ethylene	C_2H_4	0.2964	1.5482	1.2518	1.237
Helium	He	2.0769	5.1926	3.1156	1.667
Hydrogen	H_2	4.1240	14.307	10.183	1.405
Methane	CH_4	0.5182	2.2537	1.7354	1.299
Neon	Ne	0.4119	1.0299	0.6179	1.667
Nitrogen	N_2	0.2968	1.039	0.743	1.400
Octane	C_8H_{18}	0.0729	1.7113	1.6385	1.044
Oxygen	O_2	0.2598	0.918	0.658	1.395
Propane	C_3H_8	0.1885	1.6794	1.4909	1.126
Steam	H_2O	0.4615	1.8723	1.4108	1.327

Note: The unit kJ/kg · K is equivalent to kJ/kg · °C.

Source: Chemical and Process Thermodynamics 3/E by Kyle, B. G., © 2000. Adapted by permission of Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ.

Ejercicio #2

Un globo contiene inicialmente 65 m³ de Helio en condiciones atmosféricas, 100kPa y 22°C. El globo se conecta mediante una válvula a un tanque de helio, cuya presión y temperatura son 150kPa y 25°C respectivamente. Se abre la válvula y el helio entra al globo hasta que se logra la presión de equilibrio. El material del globo tiene la propiedad de que su volumen aumenta linealmente como la presión. Si nose transfiere calor durante el proceso, determinar la temperatura final del globo.



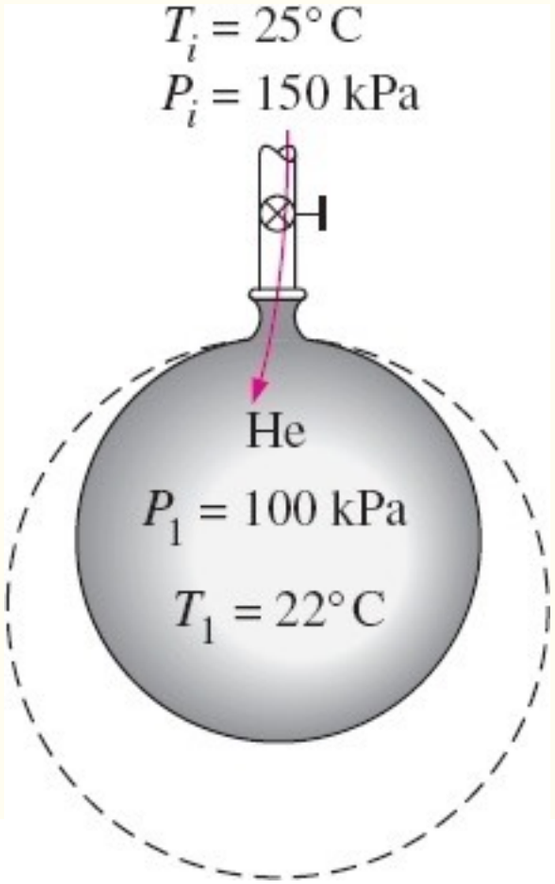
Helio es un gas ideal

$R_{He} = 2.0769$ kJ/kg K [**Tabla A-1**]

$c_p = 5.1926$ kJ/kg K y $c_v = 3.1156$ kJ/kg K [**Tabla A-2**]

$ec \approx 0$ y $ep \approx 0$ $\quad$ $W = W_{exp}$ y $Q = 0$

Ejercicio #2



Balance de masa,

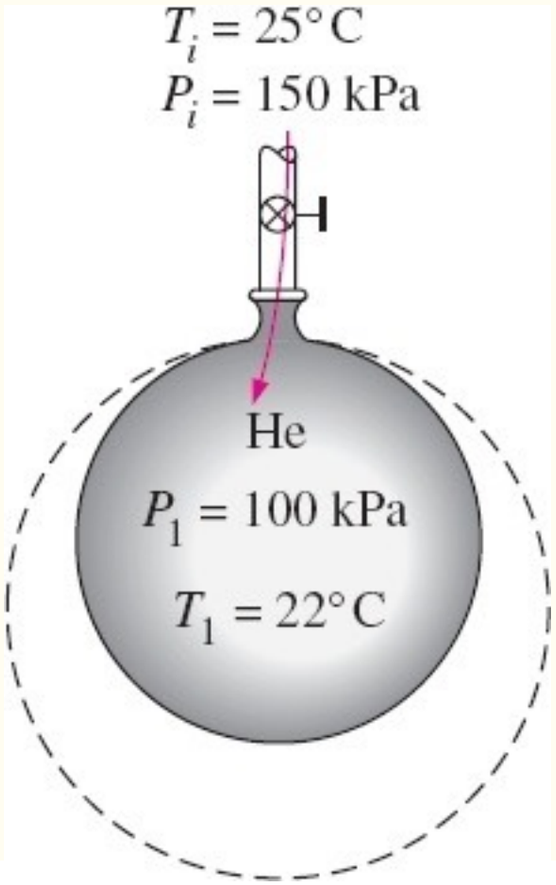
$$m_{entra} - m_{sale} = \Delta m_{sistema} \quad \longrightarrow \quad m_{entra} = m_{final} - m_{inicial}$$

Balance de energía,

$$\Delta E_{sistema} = E_{entra} - E_{sale}$$

$$W_{exp} + m_{final}\, u_{final} - m_{inicial}\, u_{inicial} = m_{entra}\, h_{entra}$$

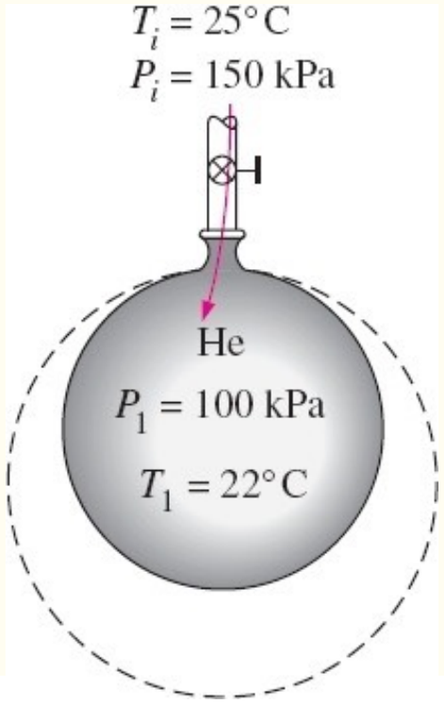
Ejercicio #2



$$m_{inicial} = \frac{P_{inicial}\, V_{inicial}}{R_{He}\, T_{inicial}} = 10.61 \text{ kg} \qquad V_{final} = \frac{P_{final}}{P_{inicial}}\, V_{inicial} = 97.5 \text{ m}^3$$

$$m_{final} = \frac{P_{final}\, V_{final}}{R_{He}\, T_{final}} = \frac{7041.74}{T_{final}} \text{kg} \qquad m_{entra} = \frac{7041.74}{T_{final}} - 10.61 \text{ kg}$$

Ejercicio #2



El trabajo de expansión hecho por el Helio es

$$W_{exp} = \left(\frac{P_{final} + P_{inicial}}{2} \right) (V_{final} - V_{inicial}) = 4062.5 \text{ kJ}$$

Del balance de energía teníamos

$$W_{exp} = m_{entra}\, c_p\, T_{entrada} - m_{final}\, c_v\, T_{final} + m_{inicial}\, c_v\, T_{inicial}$$

Nota: aquí se asume que el c_p y el c_v son constantes y que h(0)=u(0)=0, lo cual es una muy buena aproximación para el Helio

Sustituyendo y resolviendo,

$$T_{final} = 333.6 \text{ K}$$

Nota: Hay varias formas de expresar el Wexp. Por ejemplo,

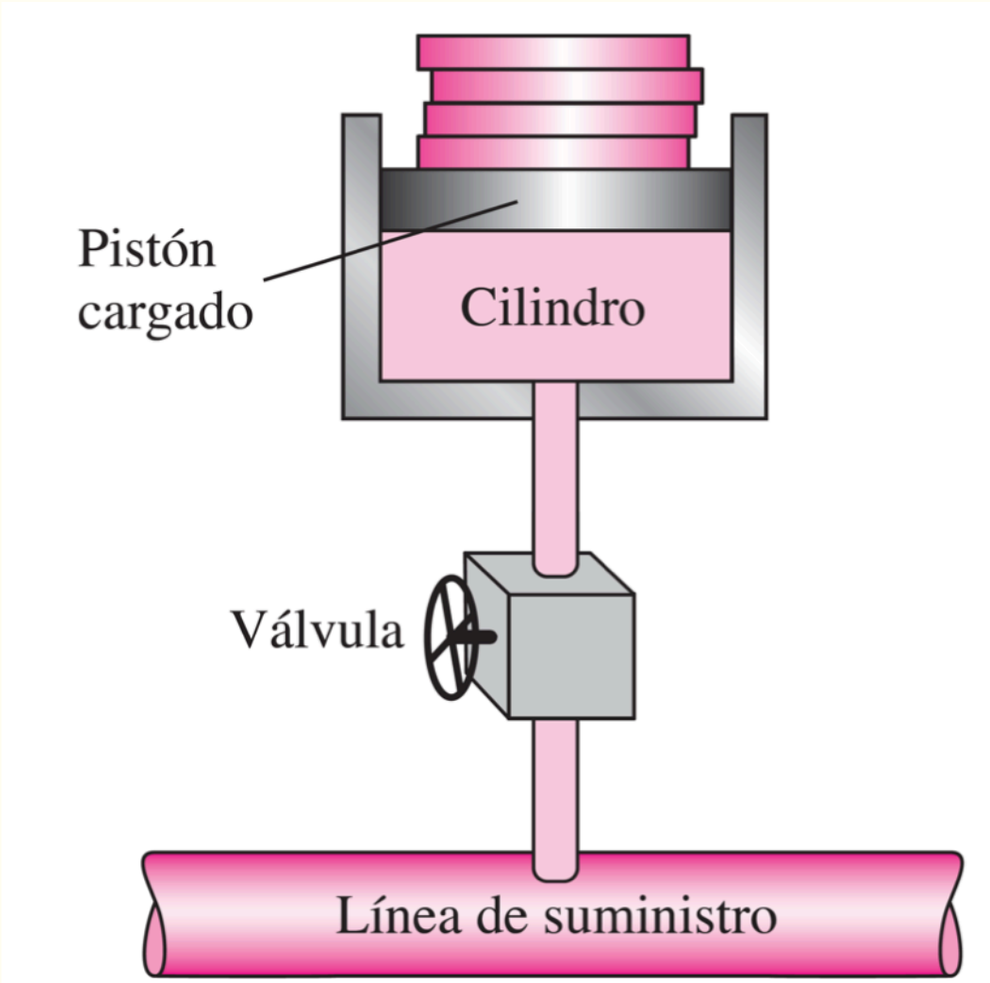
$$W_{\exp} = \frac{P_{ini}}{V_{ini}} \left(\frac{V_{fin}^2 - V_{ini}^2}{2} \right) = \frac{P_{fin}}{V_{fin}} \left(\frac{V_{fin}^2 - V_{ini}^2}{2} \right) = \frac{P_{fin} V_{fin} - P_{ini} V_{ini}}{2}$$

Usted puede verificar que todos den el mismo resultado numérico

Ejercicio #3

(I2, 2016-2)

El pistón con carga del dispositivo que se ve en la figura mantiene en 1200 kPa la presión dentro del cilindro. Al principio, el sistema no contiene masa. Entonces se abre la válvula y el vapor de agua que pasa por la línea de suministro entra al cilindro, hasta que el volumen es 0,5 m^3. Este proceso es adiabático y el vapor de agua en la línea de suministro permanece a 2000 kPa y 250°C. Determine (a) la temperatura final (y la calidad, si corresponde) del vapor en el cilindro y (b) el trabajo total producido al llenar este dispositivo.



(resolver en pizarra)

TABLA A-6

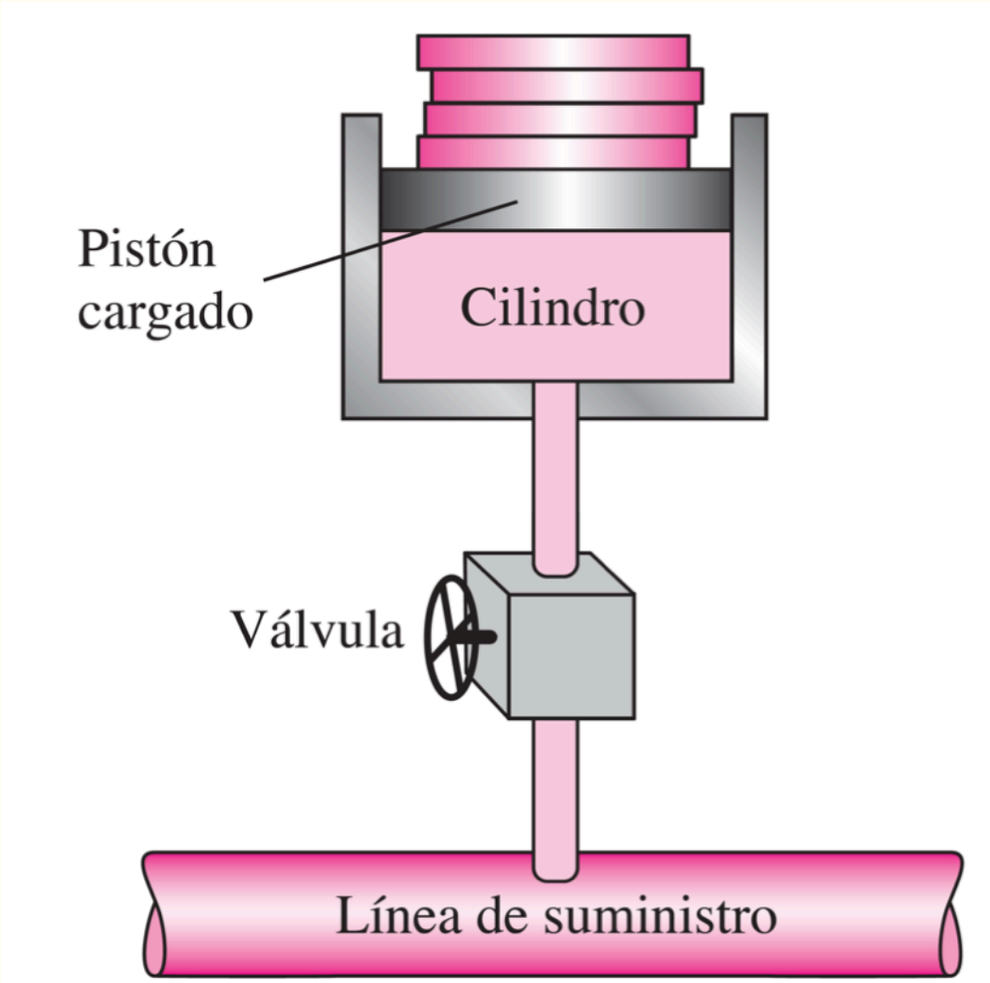
Vapor de agua sobrecalentado (*continuación*)

T °C	*v* m³/kg	*u* kJ/kg	*h* kJ/kg	*s* kJ/kg · K	*v* m³/kg	*u* kJ/kg	*h* kJ/kg	*s* kJ/kg · K	*v* m³/kg	*u* kJ/kg	*h* kJ/kg	*s* kJ/kg · K
	P = 1.00 MPa (179.88 °C)				*P* = *1.20* MPa (187.96 °C)				*P* = 1.40 MPa (195.04 °C)			
Sat.	0.19437	2582.8	2777.1	6.5850	0.16326	2587.8	2783.8	6.5217	0.14078	2591.8	2788.9	6.4675
200	0.20602	2622.3	2828.3	6.6956	0.16934	2612.9	2816.1	6.5909	0.14303	2602.7	2803.0	6.4975
250	0.23275	2710.4	2943.1	6.9265	0.19241	2704.7	2935.6	6.8313	0.16356	2698.9	2927.9	6.7488
300	0.25799	2793.7	3051.6	7.1246	0.21386	2789.7	3046.3	7.0335	0.18233	2785.7	3040.9	6.9553
350	0.28250	2875.7	3158.2	7.3029	0.23455	2872.7	3154.2	7.2139	0.20029	2869.7	3150.1	7.1379
400	0.30661	2957.9	3264.5	7.4670	0.25482	2955.5	3261.3	7.3793	0.21782	2953.1	3258.1	7.3046
500	0.35411	3125.0	3479.1	7.7642	0.29464	3123.4	3477.0	7.6779	0.25216	3121.8	3474.8	7.6047
600	0.40111	3297.5	3698.6	8.0311	0.33395	3296.3	3697.0	7.9456	0.28597	3295.1	3695.5	7.8730
700	0.44783	3476.3	3924.1	8.2755	0.37297	3475.3	3922.9	8.1904	0.31951	3474.4	3921.7	8.1183
800	0.49438	3661.7	4156.1	8.5024	0.41184	3661.0	4155.2	8.4176	0.35288	3660.3	4154.3	8.3458
900	0.54083	3853.9	4394.8	8.7150	0.45059	3853.3	4394.0	8.6303	0.38614	3852.7	4393.3	8.5587
1000	0.58721	4052.7	4640.0	8.9155	0.48928	4052.2	4639.4	8.8310	0.41933	4051.7	4638.8	8.7595
1100	0.63354	4257.9	4891.4	9.1057	0.52792	4257.5	4891.0	9.0212	0.45247	4257.0	4890.5	8.9497
1200	0.67983	4469.0	5148.9	9.2866	0.56652	4468.7	5148.5	9.2022	0.48558	4468.3	5148.1	9.1308
1300	0.72610	4685.8	5411.9	9.4593	0.60509	4685.5	5411.6	9.3750	0.51866	4685.1	5411.3	9.3036
	P = 1.60 MPa (201.37 °C)				*P* = 1.80 MPa (207.11 °C)				*P* = 2.00 MPa (212.38 °C)			
Sat.	0.12374	2594.8	2792.8	6.4200	0.11037	2597.3	2795.9	6.3775	0.09959	2599.1	2798.3	6.3390
225	0.13293	2645.1	2857.8	6.5537	0.11678	2637.0	2847.2	6.4825	0.10381	2628.5	2836.1	6.4160
250	0.14190	2692.9	2919.9	6.6753	0.12502	2686.7	2911.7	6.6088	0.11150	2680.3	2903.3	6.5475
300	0.15866	2781.6	3035.4	6.8864	0.14025	2777.4	3029.9	6.8246	0.12551	2773.2	3024.2	6.7684
350	0.17459	2866.6	3146.0	7.0713	0.15460	2863.6	3141.9	7.0120	0.13860	2860.5	3137.7	6.9583
400	0.19007	2950.8	3254.9	7.2394	0.16849	2948.3	3251.6	7.1814	0.15122	2945.9	3248.4	7.1292
500	0.22029	3120.1	3472.6	7.5410	0.19551	3118.5	3470.4	7.4845	0.17568	3116.9	3468.3	7.4337
600	0.24999	3293.9	3693.9	7.8101	0.22200	3292.7	3692.3	7.7543	0.19962	3291.5	3690.7	7.7043
700	0.27941	3473.5	3920.5	8.0558	0.24822	3472.6	3919.4	8.0005	0.22326	3471.7	3918.2	7.9509
800	0.30865	3659.5	4153.4	8.2834	0.27426	3658.8	4152.4	8.2284	0.24674	3658.0	4151.5	8.1791
900	0.33780	3852.1	4392.6	8.4965	0.30020	3851.5	4391.9	8.4417	0.27012	3850.9	4391.1	8.3925
1000	0.36687	4051.2	4638.2	8.6974	0.32606	4050.7	4637.6	8.6427	0.29342	4050.2	4637.1	8.5936
1100	0.39589	4256.6	4890.0	8.8878	0.35188	4256.2	4889.6	8.8331	0.31667	4255.7	4889.1	8.7842
1200	0.42488	4467.9	5147.7	9.0689	0.37766	4467.6	5147.3	9.0143	0.33989	4467.2	5147.0	8.9654
1300	0.45383	4684.8	5410.9	9.2418	0.40341	4684.5	5410.6	9.1872	0.36308	4684.2	5410.3	9.1384

Ejercicio #3

(I2, 2016-2)

El pistón con carga del dispositivo que se ve en la figura mantiene en 1200 kPa la presión dentro del cilindro. Al principio, el sistema no contiene masa. Entonces se abre la válvula y el vapor de agua que pasa por la línea de suministro entra al cilindro, hasta que el volumen es 0,5 m^3. Este proceso es adiabático y el vapor de agua en la línea de suministro permanece a 2000 kPa y 250°C. Determine (a) la temperatura final (y la calidad, si corresponde) del vapor en el cilindro y (b) el trabajo total producido al llenar este dispositivo.



(resolver en pizarra)

Respuestas: (a) 236.5°C, (b) W=600 kJ

¡Terminamos con Sistemas Abiertos!

A continuación se incluyen dos problemas extra que no hicimos en clase. Espero les sirvan.

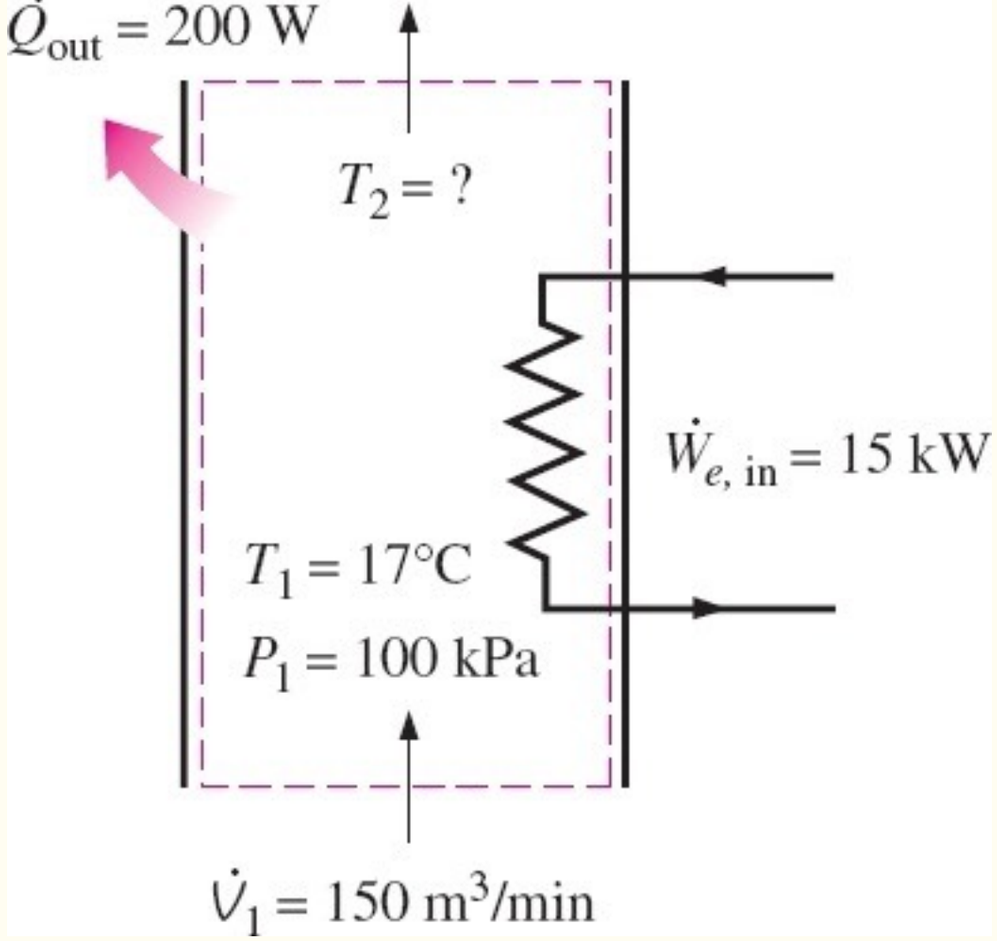


Nota: se le agradece a al Profesora Griselda García por su ayuda en la compilación de estos problemas

Ejercicio #1

(Ejemplo Resuelto 5.11 en C&B, con solución entera)

Un sistema de calefacción usado en muchas casas consiste en un ducto con calentadores a resistencia; el aire es calentado a medida que fluye por la resistencia. Consideremos un sistema de calentamiento eléctrico de 15 kW. El aire entra a la sección de calentamiento a 100 kPa y 17^{o}C siendo el flujo de aire 150 m^3/min. Si el calor es liberado por el aire en el ducto a una tasa de 200 W, determinar la temperatura de salida del aire.

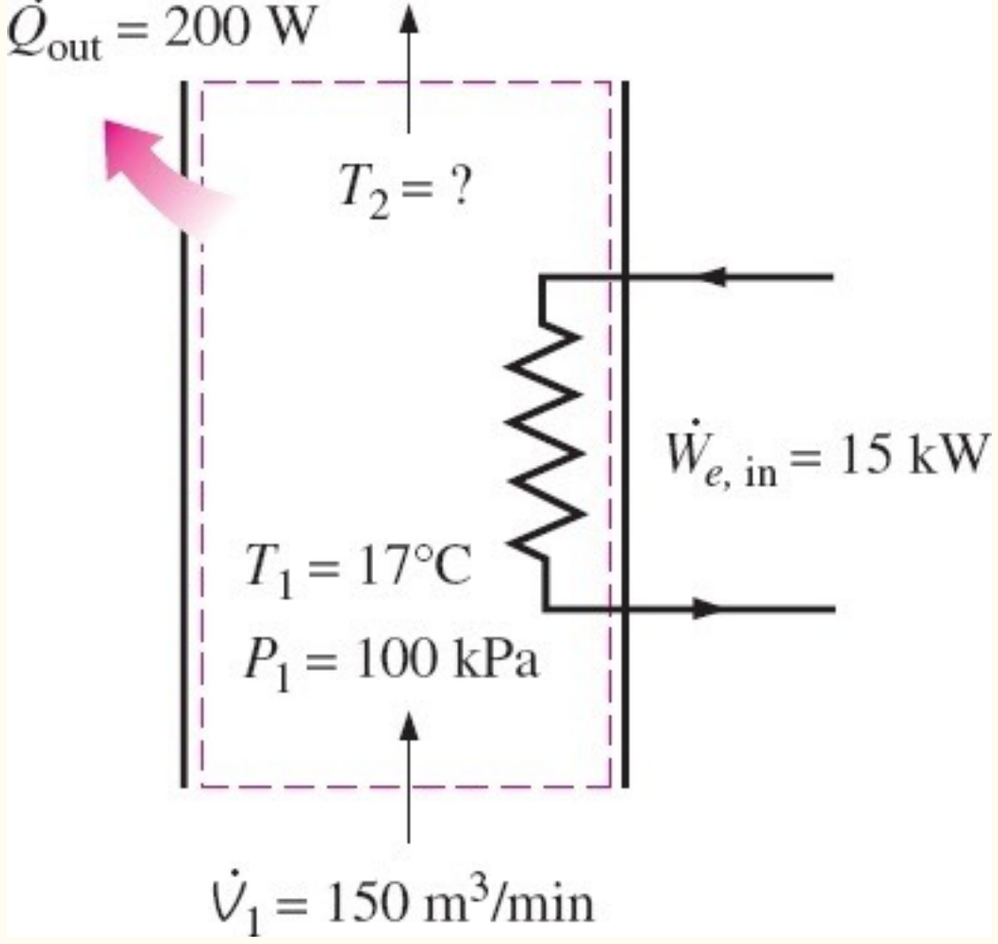


<u>Preguntas conceptuales:</u>

¿Más o menos qué valor esperamos que tenga el resultado (menor a 1, mayor a 1, cero… etc)?

Ejercicio #1

Un sistema de calefacción usado en muchas casas consiste en un ducto con calentadores a resistencia; el aire es calentado a medida que fluye por la resistencia. Consideremos un sistema de calentamiento eléctrico de 15 kW. El aire entra a la sección de calentamiento a 100 kPa y 17^{o}C siendo el flujo de aire 150 m^3/min. Si el calor es liberado por el aire en el ducto a una tasa de 200 W, determinar la temperatura de salida del aire.



$$\Delta m_{vc} = 0 \text{ y } \Delta E_{vc} = 0$$

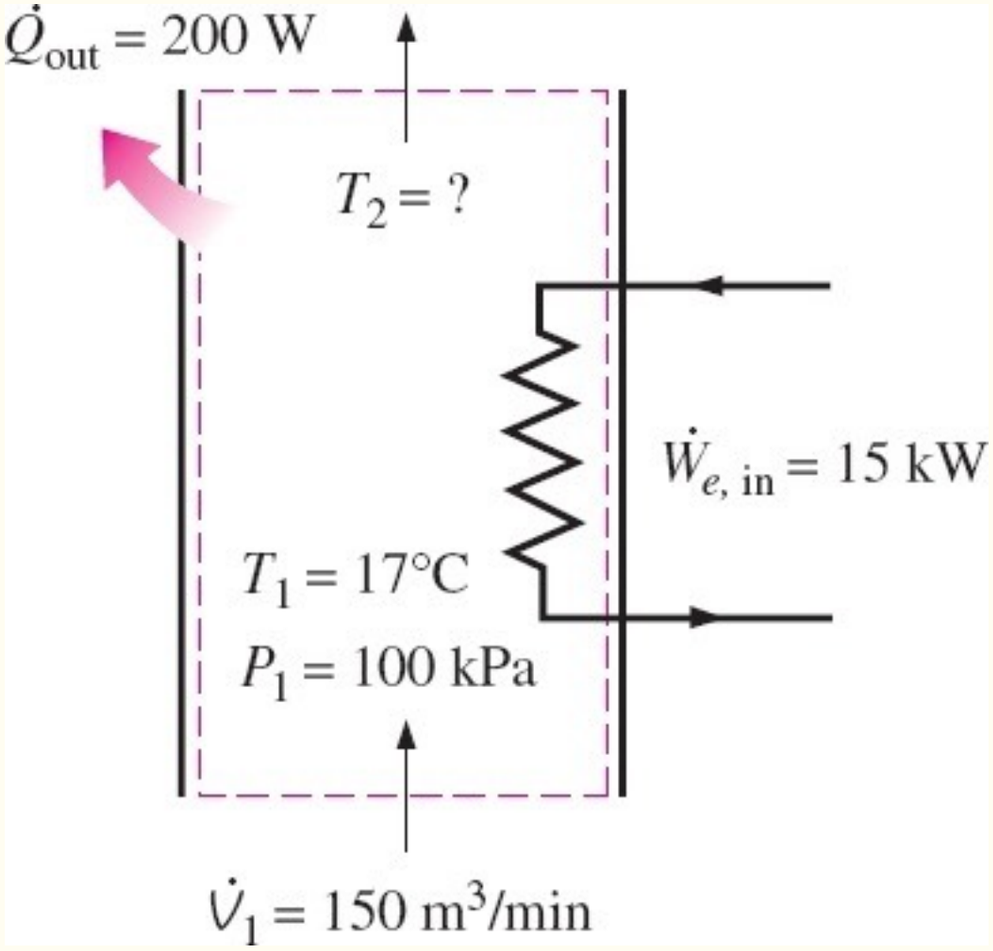
$$T_e \gg T_{cr}^{aire} \text{ y } P_e \ll P_{cr}^{aire} \rightarrow \text{gas ideal}$$

$$\Delta ec \approx 0 \quad \Delta ep \approx 0$$

$$\dot{m}_{entrada} = \dot{m}_{salida} = \dot{m}$$

$$c_p^{aire} = c_{p,T_{amb}}^{aire} = constante$$

Ejercicio #1



$$\dot{E}_{entrada} = \dot{E}_{salida} \longrightarrow \dot{W}_e + \dot{m}\,h_e = \dot{Q}_s + \dot{m}\,h_s$$

Q_s es la cantidad de calor que se pierde desde el VC

W_e es el trabajo eléctrico suminstrado al VC

TABLE A–2

Ideal-gas specific heats of various common gases

(*a*) At 300 K

Gas	Formula	Gas constant, R kJ/kg · K	c_p kJ/kg · K	c_v kJ/kg · K	k
Air	—	0.2870	1.005	0.718	1.400
Argon	Ar	0.2081	0.5203	0.3122	1.667
Butane	C_4H_{10}	0.1433	1.7164	1.5734	1.091
Carbon dioxide	CO_2	0.1889	0.846	0.657	1.289
Carbon monoxide	CO	0.2968	1.040	0.744	1.400
Ethane	C_2H_6	0.2765	1.7662	1.4897	1.186
Ethylene	C_2H_4	0.2964	1.5482	1.2518	1.237
Helium	He	2.0769	5.1926	3.1156	1.667
Hydrogen	H_2	4.1240	14.307	10.183	1.405
Methane	CH_4	0.5182	2.2537	1.7354	1.299
Neon	Ne	0.4119	1.0299	0.6179	1.667
Nitrogen	N_2	0.2968	1.039	0.743	1.400
Octane	C_8H_{18}	0.0729	1.7113	1.6385	1.044
Oxygen	O_2	0.2598	0.918	0.658	1.395
Propane	C_3H_8	0.1885	1.6794	1.4909	1.126
Steam	H_2O	0.4615	1.8723	1.4108	1.327

Note: The unit kJ/kg · K is equivalent to kJ/kg · °C.

Source: Chemical and Process Thermodynamics 3/E by Kyle, B. G., © 2000. Adapted by permission of Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ.

Ejercicio #1

$$\Delta h = h_s - h_e = c_p \, \Delta T \text{ y } c_p = c_{p,T_{amb}}^{aire} = 1.005 \text{ kJ/(kg } ^oC) \quad \textbf{[tabla A-2]}$$

$$\dot{W}_e - \dot{Q}_s = \dot{m} \, c_p \, (T_s - T_e)$$

El volumen del aire a la entrada es $\nu_e = R_{aire} \, T_e / P_e = 0.832$ m^3/kg, donde $R_{aire} = 0.287$ kPa m^3/kg. **[tabla A-1]**

La tasa de variación de masa resulta ser $\dot{m} = \dot{V}_e / \nu_e = 3.0$ kg/s.

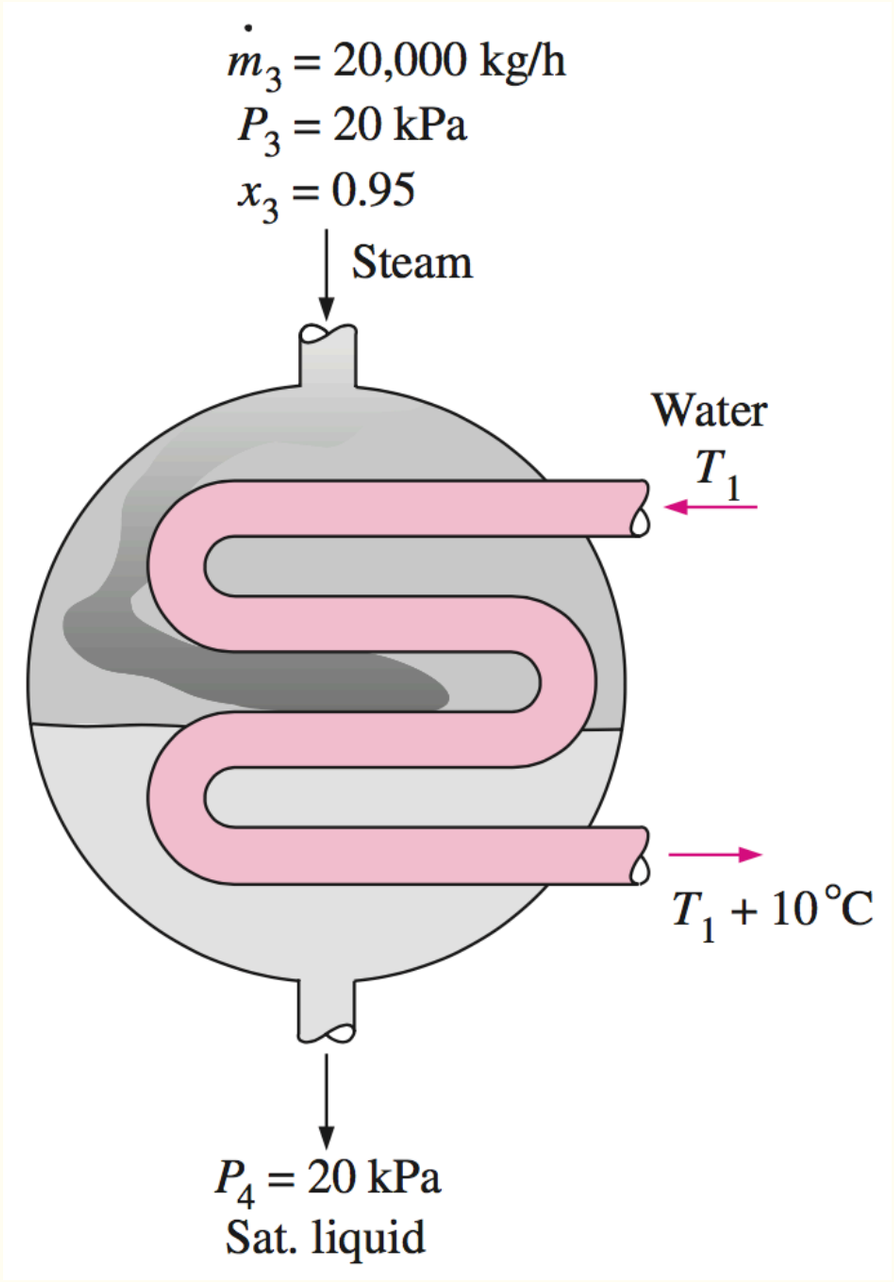
La temperatura del aire al entrar al ducto es $T_e = 17^oC$ y al salir es

$$T_s = T_e + \frac{\dot{W}_e - \dot{Q}_s}{\dot{m} \, c_p} \quad \longrightarrow \quad T_s = 21.9^oC$$

Ejercicio #2

(I2 del 2015-2 y 5.85 del C&B 5ed)

En una planta eléctrica 20000kg/h de vapor entran a un condensador a 20kPa con una calidad de 95%. El vapor se enfría haciendo circular agua de un río cercano a 15°C por las tuberías del condensador. Para evitar contaminación térmica en el ambiente, el agua del río no puede experimentar una variación de temperatura mayor a 10°C. Si el vapor sale del condensador como líquido saturado a 20kPa, determine el flujo de masa de agua requerido. Sin hacer cálculos adicionales, argumente cuánto varía su resultado si la temperatura del río es de 5°C.



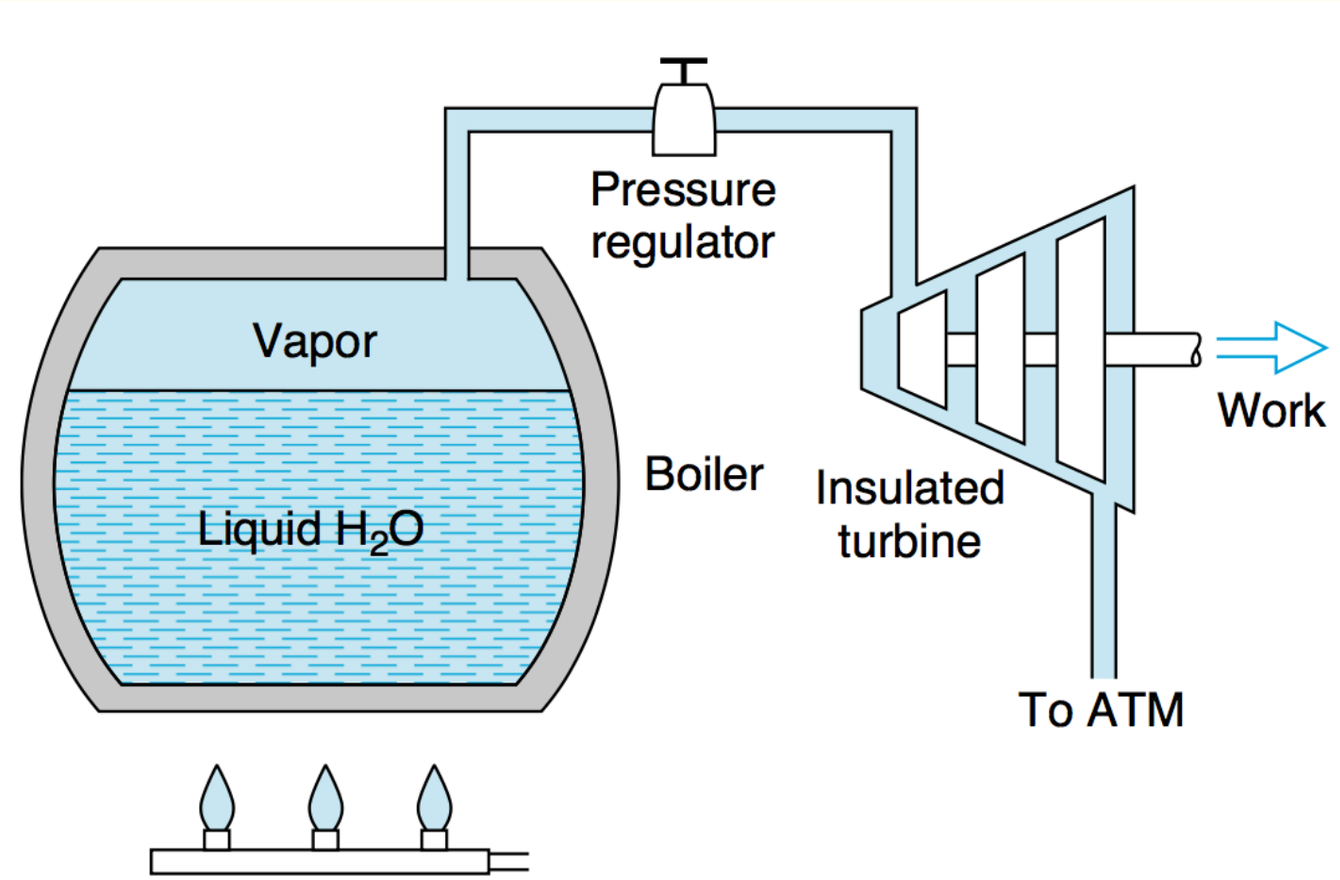
(resolver en pizarra)

Respuesta: 297.32 kg/s. Si la temperatura del río varía el resultado casi no se afecta, ya que $h_{f@25°C} - h_{f@15°C} \approx h_{f@15°C} - h_{f@5°C}$

Ejercicio #3

(Borgnakke 6.138)

Una máquina térmica basada en una turbina se muestra en la figura. La caldera tiene un volumen de 100L y contiene inicialmente líquido saturado con una muy pequeña cantidad de vapor saturado a 100kPa. Después se añade calor a la caldera. Un regulador de presión, que mantiene constante la presión, se mantiene cerrado hasta que la presión en la caldera alcanza 700 kPa. El vapor saturado entra entonces a la turbina a 700kPa y sale a la atmósfera también como vapor saturado pero a 100 kPa. La caldera se apaga cuando ya no hay líquido en ella. Encuentre (a) el trabajo total hecho por la turbina y (b) el calor transferido a la caldera en el proceso.



(resolver en pizarra)

TABLA A-5

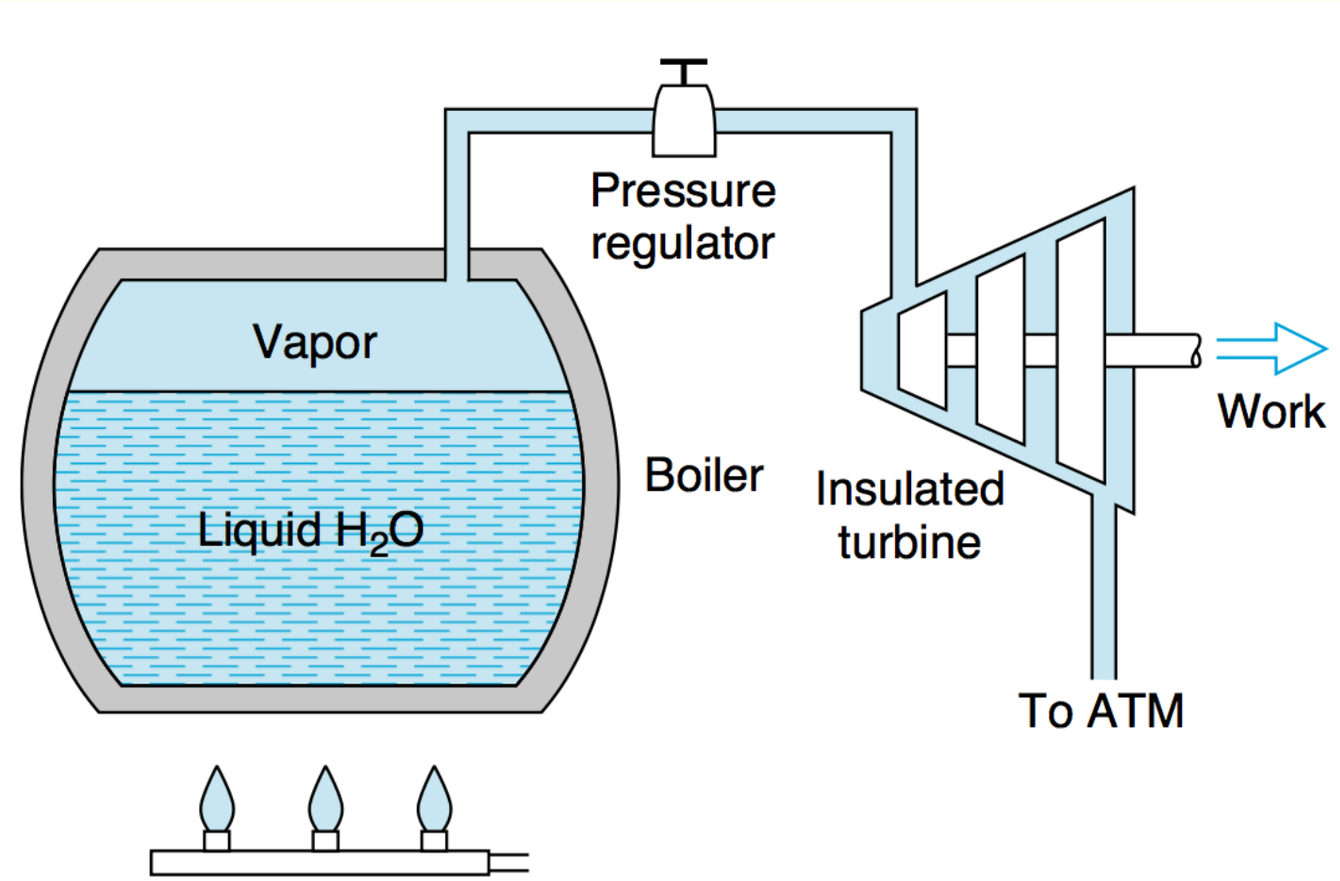
Agua saturada. Tabla de presiones

		Volumen específico, m^3/kg		*Energía interna, kJ/kg*			*Entalpía, kJ/kg*			*Entropía, kJ/kg · K*		
Pres., P kPa	Temp. sat., T_{sat} °C	Líq. sat., v_f	Vapor sat., v_g	Líq. sat., u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Líq. sat, h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Líq. sat., s_f	Evap., s_{fg}	Vapor sat., s_g
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
20	60.06	0.001017	7.6481	251.40	2204.6	2456.0	251.42	2357.5	2608.9	0.8320	7.0752	7.9073
25	64.96	0.001020	6.2034	271.93	2190.4	2462.4	271.96	2345.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8302
30	69.09	0.001022	5.2287	289.24	2178.5	2467.7	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675
40	75.86	0.001026	3.9933	317.58	2158.8	2476.3	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6691
50	81.32	0.001030	3.2403	340.49	2142.7	2483.2	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931
75	91.76	0.001037	2.2172	384.36	2111.8	2496.1	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
101.325	99.97	0.001043	1.6734	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545
125	105.97	0.001048	1.3750	444.23	2068.8	2513.0	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841
150	111.35	0.001053	1.1594	466.97	2052.3	2519.2	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231
175	116.04	0.001057	1.0037	486.82	2037.7	2524.5	487.01	2213.1	2700.2	1.4850	5.6865	7.1716
200	120.21	0.001061	0.88578	504.50	2024.6	2529.1	504.71	2201.6	2706.3	1.5302	5.5968	7.1270
225	123.97	0.001064	0.79329	520.47	2012.7	2533.2	520.71	2191.0	2711.7	1.5706	5.5171	7.0877
250	127.41	0.001067	0.71873	535.08	2001.8	2536.8	535.35	2181.2	2716.5	1.6072	5.4453	7.0525
275	130.58	0.001070	0.65732	548.57	1991.6	2540.1	548.86	2172.0	2720.9	1.6408	5.3800	7.0207
300	133.52	0.001073	0.60582	561.11	1982.1	2543.2	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917
325	136.27	0.001076	0.56199	572.84	1973.1	2545.9	573.19	2155.4	2728.6	1.7005	5.2645	6.9650
350	138.86	0.001079	0.52422	583.89	1964.6	2548.5	584.26	2147.7	2732.0	1.7274	5.2128	6.9402
375	141.30	0.001081	0.49133	594.32	1956.6	2550.9	594.73	2140.4	2735.1	1.7526	5.1645	6.9171
400	143.61	0.001084	0.46242	604.22	1948.9	2553.1	604.66	2133.4	2738.1	1.7765	5.1191	6.8955
450	147.90	0.001088	0.41392	622.65	1934.5	2557.1	623.14	2120.3	2743.4	1.8205	5.0356	6.8561
500	151.83	0.001093	0.37483	639.54	1921.2	2560.7	640.09	2108.0	2748.1	1.8604	4.9603	6.8207
550	155.46	0.001097	0.34261	655.16	1908.8	2563.9	655.77	2096.6	2752.4	1.8970	4.8916	6.7886
600	158.83	0.001101	0.31560	669.72	1897.1	2566.8	670.38	2085.8	2756.2	1.9308	4.8285	6.7593
650	161.98	0.001104	0.29260	683.37	1886.1	2569.4	684.08	2075.5	2759.6	1.9623	4.7699	6.7322
700	164.95	0.001108	0.27278	696.23	1875.6	2571.8	697.00	2065.8	2762.8	1.9918	4.7153	6.7071
750	167.75	0.001111	0.25552	708.40	1865.6	2574.0	709.24	2056.4	2765.7	2.0195	4.6642	6.6837

Ejercicio #3

(Borgnakke 6.138)

Una máquina térmica basada en una turbina se muestra en la figura. La caldera tiene un volumen de 100L y contiene inicialmente líquido saturado con una muy pequeña cantidad de vapor saturado a 100kPa. Después se añade calor a la caldera. Un regulador de presión, que mantiene constante la presión, se mantiene cerrado hasta que la presión en la caldera alcanza 700 kPa. El vapor saturado entra entonces a la turbina a 700kPa y sale a la atmósfera también como vapor saturado pero a 100 kPa. La caldera se apaga cuando ya no hay líquido en ella. Encuentre (a) el trabajo total hecho por la turbina y (b) el calor transferido a la caldera en el proceso.



(resolver en pizarra)

Respuestas:
(a) 224.8 MJ, (b) 8.4 MJ

Próxima clase: Segunda Ley de la Termodinámica

