

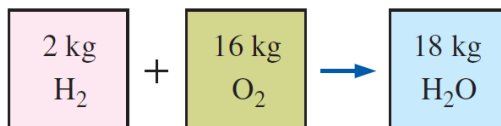
V. Análisis de masa y energía de volúmenes de control

Objetivos:

1. Desarrollar el principio de conservación de masa.
2. Aplicar el principio de conservaciones de masa a varios sistemas incluyendo volúmenes de control en estado estable y no estable.
3. Aplicar la primera ley de la termodinámica como el postulado del principio de conservación de energía a volúmenes de control.
4. Identificar la energía transportada por un flujo que cruza una superficie de control como la suma de la energía interna, el trabajo de flujo, la energía cinética, y la energía potencial.
4. Comentar el postulado de conservación de energía para algunos dispositivos comunes de estado estable (toberas, difusores, turbinas, válvulas, e intercambiadores de calor).
5. Aplicar el balance de energía a un proceso general de estado no estable con particular énfasis en procesos de flujo uniforme.

1. Conservación de masa

El principio de conservación de masa es uno de los principios fundamentales en la naturaleza.



Técnicamente, la masa no es exactamente conservada. Resulta que la masa m y la energía E pueden ser convertidas de una forma a otra de acuerdo a la conocida expresión propuesta por Einstein:

$$E = mc^2$$

Donde $c = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$ representa la velocidad de la luz en el vacío.

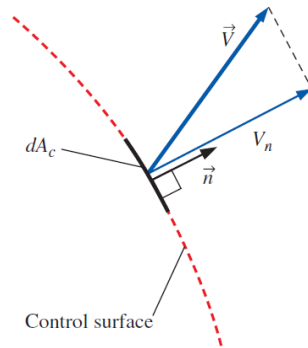
Todos los sistemas químicos y físicos exhiben interacciones de energía con sus alrededores, pero la cantidad de energía involucrada es equivalente a una cantidad extremadamente pequeña de masa en comparación con la masa total del sistema. Sin embargo, en reacciones nucleares, la masa equivalente a la cantidad de energía que interactúa es significativa. Por lo tanto, a menos de que se trate de reacciones nucleares, consideraremos que tanto la masa como la energía son cantidades conservativas.

V. Análisis de masa y energía de volúmenes de control

1. Conservación de masa

Flujo másico y flujo volumétrico

El flujo másico \dot{m} es la cantidad de masa que fluye a través de una sección transversal por unidad de tiempo.



$$\delta \dot{m} = \rho V_n dA_c$$

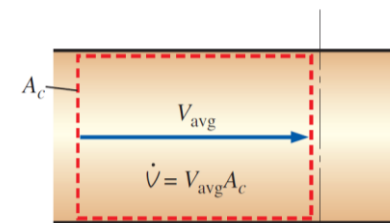
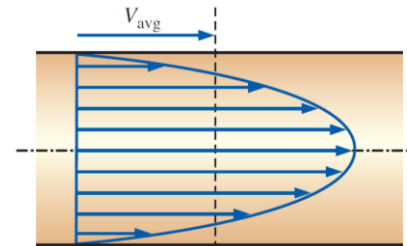
Donde $\delta \dot{m}$ es el diferencial de flujo másico, ρ es la densidad del fluido, dA_c es un elemento de área diferencial en una sección transversal de una tubería, y V_n la velocidad normal a dA_c .

Por lo tanto:

$$\dot{m} = \int_{dA_c} \delta \dot{m} = \int_{dA_c} \rho V_n dA_c \quad [\text{kg/s}]$$

Aquí la velocidad nunca es uniforme a través de la sección transversal debido a la condición de no deslizamiento y por lo tanto se suele definir una velocidad promedio V_{prom} para expresar el flujo másico.

$$V_{prom} = \frac{1}{A_c} \int_{dA_c} V_n dA_c$$



Cross section

V. Análisis de masa y energía de volúmenes de control

1. Conservación de masa

Flujo másico y flujo volumétrico

El flujo másico \dot{m} y el flujo volumétrico \dot{V} se relacionan de la siguiente manera:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

Principio de conservación de masa

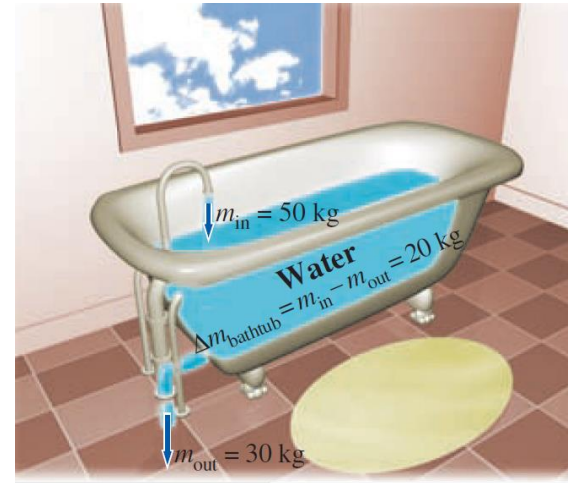
La transferencia neta de masa desde o hacia un volumen de control durante un intervalo de tiempo Δt es igual al cambio neto de masa total dentro del volumen de control durante Δt .

$$m_{entra} - m_{sale} = \Delta m_{VC}$$

Donde $\Delta m_{VC} = m_{final} - m_{inicial}$ es el cambio en la masa del volumen de control durante el proceso.

Por unidad de tiempo la expresión anterior quedaría como:

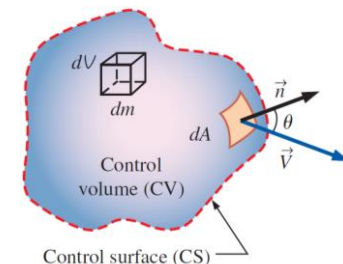
$$\dot{m}_{entra} - \dot{m}_{sale} = \frac{dm_{VC}}{dt} \quad [\text{kg/s}]$$



La masa total dentro del volumen de control en cualquier instante de tiempo t está determinada por:

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

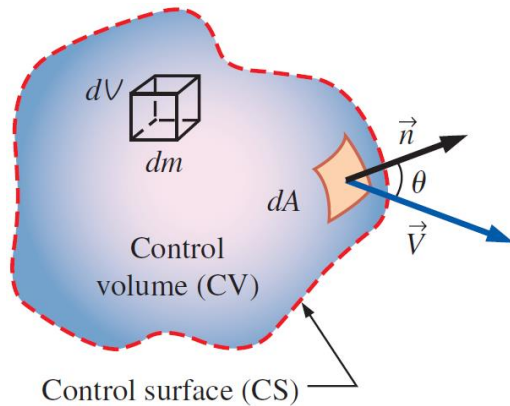
Donde dV es el cambio diferencial del volumen de control.



V. Análisis de masa y energía de volúmenes de control

1. Conservación de masa

Principio de conservación de masa



En tanto que, la componente normal de la velocidad V_n estaría dada por:

$$V_n = |V| \cos \theta = \vec{V} \cdot \vec{n}$$

Y el flujo másico diferencial $\delta \dot{m}$ podría re escribirse entonces como:

$$\delta \dot{m} = \rho V_n dA = \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA$$

Sí la expresión anterior se integra sobre la superficie de control anterior se tendrá el flujo másico neto $\dot{m}_{neto} = \dot{m}_{sale} - \dot{m}_{entra}$ que interactúa con el volumen de control.

$$\dot{m}_{neto} = \int_{SC} \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA$$

Por lo tanto el principio de conservación de masa podría re escribirse como:

$$m_{entra} - m_{sale} = \Delta m_{VC} \rightarrow \Delta m_{VC} + \dot{m}_{sale} - \dot{m}_{entra} = 0$$

$$\frac{d}{dt} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = 0$$

Sí la integral de superficie se divide por partes se tendrá que:

$$\int_{SC} \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = \sum_{salida} \rho |V_n| A - \sum_{entrada} \rho |V_n| A$$

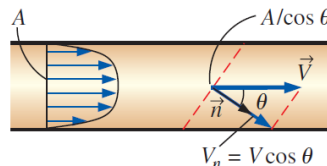
Donde A representa el área de una entrada o salida, y los símbolos de sumatoria son usados para enfatizar que todas las entradas y salidas deben ser consideradas.

V. Análisis de masa y energía de volúmenes de control

1. Conservación de masa

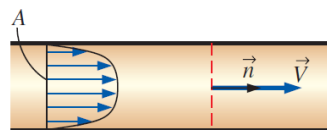
Principio de conservación de masa

Ha de decirse que existe considerable flexibilidad en la selección de un volumen de control cuando se resuelve un problema. Sin embargo, suele ser conveniente seleccionar un volumen de control cuya superficie de control sea normal al flujo en todas las localizaciones en donde cruza el flujo. Ya que de esta manera el producto punto $\vec{V} \cdot \vec{n}$ es simplemente la magnitud de la velocidad.



$$\dot{m} = \rho(V \cos \theta)(A/\cos \theta) = \rho VA$$

(a) Control surface at an angle to the flow



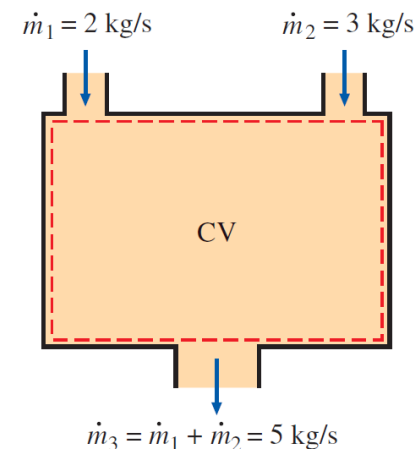
$$\dot{m} = \rho VA$$

(b) Control surface normal to the flow

En el caso de que se trate de un sistema que se mueve o se deforma, en las expresiones anteriores se debe reemplazar la velocidad absoluta por la velocidad relativa.

Balance de masa para proceso de estado estable

Durante un proceso de estado estable la cantidad de masa dentro del volumen de control no cambia con el tiempo. Consecuentemente el principio de conservación de masa requiere que la cantidad total de masa que entra a un volumen de control sea igual a la cantidad de masa que sale de un volumen de control.



V. Análisis de masa y energía de volúmenes de control

1. Conservación de masa

Balace de masa para proceso de estado estable

$$\int_{SC} \rho(\vec{V} \cdot \vec{n})dA = 0$$

$$\sum_{salida} \rho|V_n|A - \sum_{entrada} \rho|V_n|A = 0$$

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

Caso especial: flujo incompresible

En el caso de fluidos incompresibles, la densidad es contante y por lo tanto para un sistema de estado estable, del principio de conservación de masa se tendrá que:

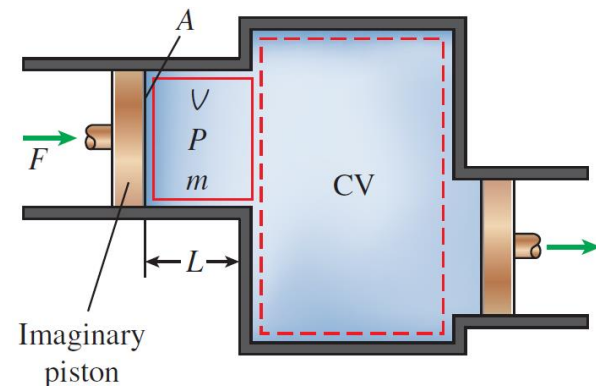
$$\sum_{entrada} \dot{v} = \sum_{salida} \dot{v}$$

Ha de comentarse que esta es una forma simplificada del principio de conservación de masa para el caso en cuestión y no debe interpretarse como un “principio de conservación de volumen”.

2. Trabajo de flujo y energía total de un fluido fluyendo

Trabajo de flujo

A diferencia de los sistemas cerrados, los volúmenes de control involucran el paso de flujo másico a través de sus fronteras, y esto requiere de un cierto trabajo. A este trabajo se le conoce como trabajo de flujo o energía de flujo.



V. Análisis de masa y energía de volúmenes de control

2. Trabajo de flujo y energía total de un fluido fluyendo

Si la presión del fluido es denotada como P y el área de sección transversal del elemento de fluido como A , la fuerza F aplicada sobre el fluido por el pistón imaginario estaría dada por:

$$F = PA$$

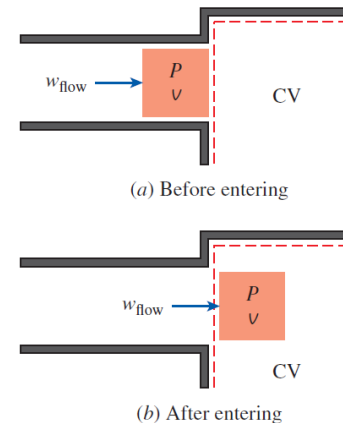
Para empujar el elemento de fluido dentro del volumen de control, esta fuerza debe actuar a través de una distancia L , por lo tanto el trabajo de flujo W_{flujo} estaría dado por:

$$W_{flujo} = FL = PAL = P\mathcal{V} \quad [\text{kJ}]$$

Y el flujo por unidad de masa w_{flujo} estaría dado por:

$$w_{flujo} = Pv \quad [\text{kJ}/\text{kg}]$$

Esta relación es la misma ya sea que el fluido este entrando o saliendo del volumen de control.



Energía total de un fluido fluyendo

La energía total por unidad de masa θ de un fluido fluyendo hacia o desde un volumen de control estaría dada por:

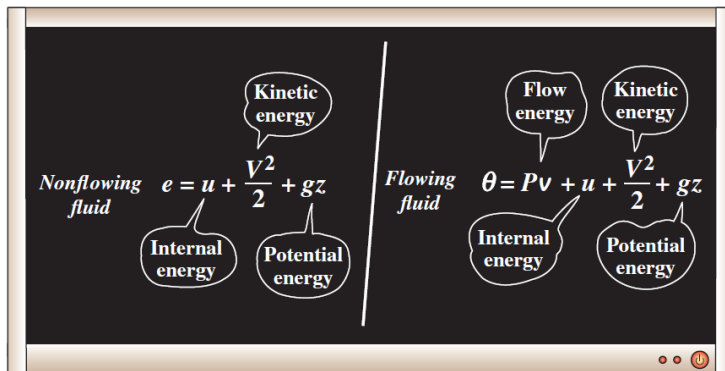
$$\theta = Pv + u + ke + pe \quad [\text{kJ}/\text{kg}]$$

Donde ke representa la energía cinética, pe la energía potencial, y $Pv + u$ la entalpía (h).

V. Análisis de masa y energía de volúmenes de control

2. Trabajo de flujo y energía total de un fluido fluyendo

Energía total de un fluido fluyendo



Energía transportada por masa

La energía total transportada por masa m , E_{masa} , es simplemente el producto $m\theta$, siempre y cuando las propiedades de la masa sean uniformes. El flujo total de energía transportado por masa \dot{E}_{masa} sería entonces $\dot{m}\theta$.

$$E_{masa} = m(h + ke + pe) \quad [\text{kJ}]$$

$$\dot{E}_{masa} = \dot{m}(h + ke + pe) \quad [\text{kW}]$$

En términos generales, la energía transportada por masa hacia o desde un volumen de control puede que no sea fácil de determinar en vista de que las propiedades de la masa en cada entrada o salida pueden cambiar con el tiempo así como también sobre la sección transversal.

Por ejemplo:

$$E_{masa, entrada} = \int_{m_{entrada}} (h_{entrada} + ke_{entrada} + pe_{entrada}) \delta m_{entrada}$$

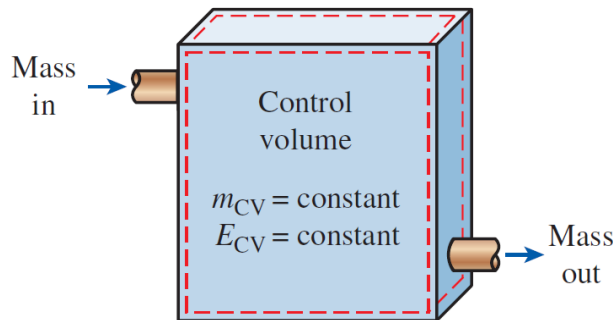
3. Análisis de energía en sistemas de estado estable.

Un gran número de dispositivos ingenieriles (turbinas, compresores, o toberas) operan por largos periodos de tiempo bajo las mismas condiciones una vez el periodo de arranque (periodo transitorio) es completado y se alcanzan condiciones estacionarias. A estos dispositivos se les conoce como *dispositivos de flujo estable*.

V. Análisis de masa y energía de volúmenes de control

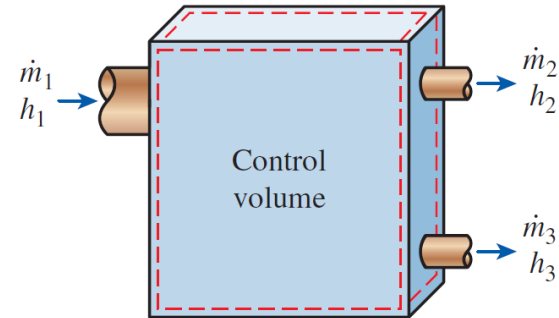
3. Análisis de energía en sistemas de estado estable.

Este tipo de dispositivos pueden ser representados razonablemente bien por un proceso idealizado, llamado proceso de flujo estable (proceso a través del cual un fluido fluye a través de un volumen de control establemente o sin que sus propiedades cambien con el tiempo).



Para este tipo de procesos recuerde que del balance de masa se tiene:

$$\sum_{\text{entrada}} \dot{m} = \sum_{\text{salida}} \dot{m}$$



También durante un proceso de flujo estable, el contenido total de energía de un volumen de control se mantiene constante y por lo tanto el cambio de energía total dentro de este es cero.

$$E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} = \Delta E_{VC} = 0 \quad [\text{kJ}]$$

Lo cual se puede expresar por unidad de tiempo como:

$$\dot{E}_{\text{entrada}} - \dot{E}_{\text{salida}} = \frac{dE_{VC}}{dt} = 0 \quad [\text{kW}]$$

$$\dot{E}_{\text{entrada}} = \dot{E}_{\text{salida}}$$

En caso tal de que se tenga más de una entrada y una salida, se debe considerar la energía transportada por masa en todas las entradas y todas las salidas.

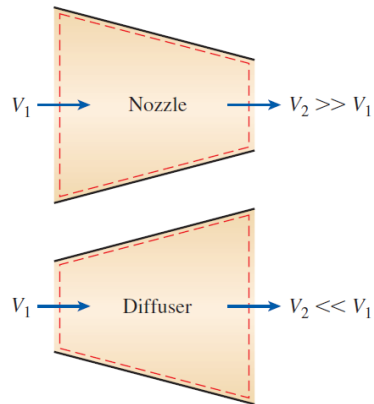
V. Análisis de masa y energía de volúmenes de control

4. Algunos dispositivos de flujo estable.

Toberas y difusores

Una *tobera* es un dispositivo utilizado para incrementar la velocidad del fluido a costas de la presión.

Un *difusor* es un dispositivo utilizado para disminuir la velocidad del fluido a costas de la presión.



En estos tipos de dispositivos se suele considerar que:

$$\dot{Q} \approx 0, \quad \dot{W} = 0, \quad \Delta pe \cong 0$$

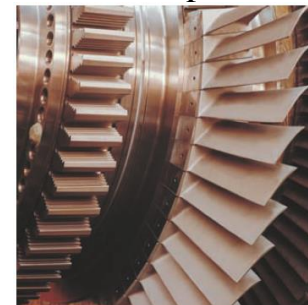
Turbinas y compresores (abanicos, bombas)

Las *turbinas* son dispositivos que toman energía del fluido.

En las turbinas típicamente la transferencia de calor es despreciable porque están bien aisladas $\dot{Q} \approx 0$. De igual forma, en vista de que el cambio de entalpía es considerablemente mayor se suelen despreciar los cambios de energía cinética y potencial.

Los *compresores*, *bombas*, y *abanicos* son dispositivos que dan energía al fluido.

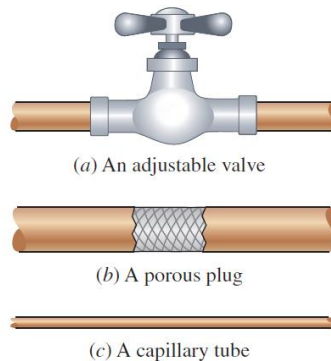
En el caso de los compresores y bombas el cambio de energía cinética y potencial también suele ser despreciable. Y a menos de que se dé información al respecto, también se puede suponer que la transferencia de calor es despreciable.



V. Análisis de masa y energía de volúmenes de control

4. Algunos dispositivos de flujo estable.

Válvulas de estrangulación



Una *válvula de estrangulación* es cualquier tipo de dispositivo que restrinja el flujo y cause una caída significativa en la presión. A diferencia de las turbinas, la caída de presión no involucra ningún tipo de trabajo y suele estar acompañada de una considerable caída en la temperatura.

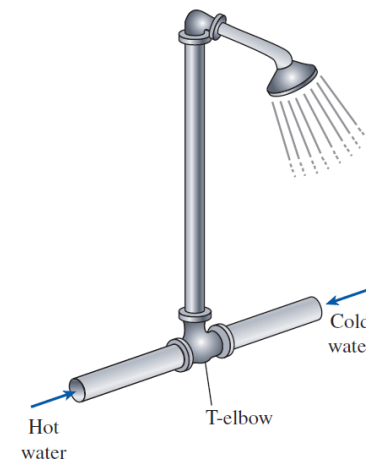
Estos dispositivos se suelen considerar adiabáticos (ya que los procesos en ellos son demasiado rápidos y no hay suficiente área efectiva para que se dé la transferencia de calor). Los cambios de energía cinética y potencial en este tipo de válvulas también suelen ser despreciables.

Lo anterior ha llevado a que ha estos dispositivos se les considere isoentálpicos. Sea el estado inicial denotado como 1 y el final como 2:

$$u_1 + P_1 v_1 = u_2 + P_2 v_2$$

Cámaras de mezcla (intercambiadores de contacto directo)

Una cámara de mezcla es cualquier dispositivo en donde se mezclen dos o más flujos directamente. El principio de conservación de masa para estos dispositivos requiere que el flujo total que entra a ellos sea igual al flujo total que sale.

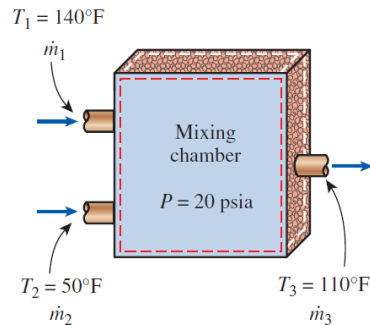


V. Análisis de masa y energía de volúmenes de control

4. Algunos dispositivos de flujo estable.

Cámaras de mezcla (intercambiadores de contacto directo)

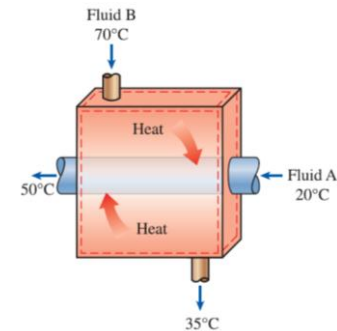
Estos dispositivos suelen estar bien aislados y no involucran ningún tipo de trabajo. También, los cambios en la energía cinética y potencia de los flujos suelen ser despreciables.



Intercambiadores de calor de contacto indirecto

Un *intercambiador de contacto indirecto* es un dispositivo a través del cual dos flujos intercambian calor sin mezclarse.

Bajo condiciones estacionarias de operación, el flujo másico de cada flujo que entra al intercambiador permanece constante.



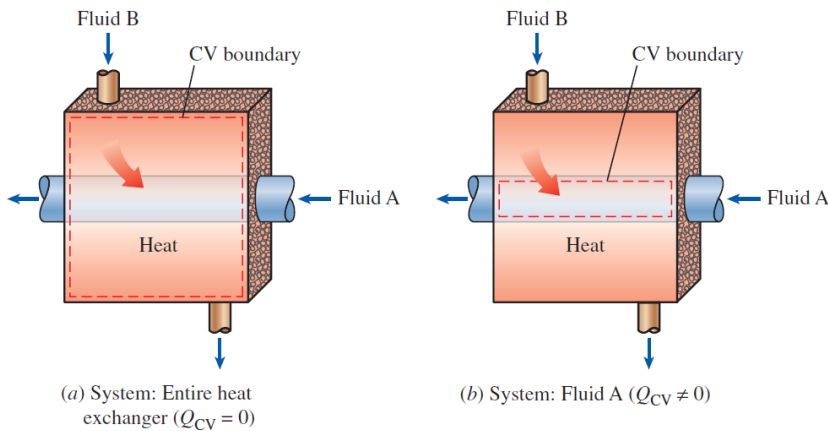
Estos dispositivos generalmente no involucran interacciones de trabajo y los cambios de energía cinética y potencial suelen ser despreciables.

La razón de transferencia de calor, en tanto, va a depender de cómo se seleccione el volumen de control. Si el intercambiador de calor completo es seleccionado como volumen de control, la transferencia de calor es despreciable ya que suelen estar bien aislados.

V. Análisis de masa y energía de volúmenes de control

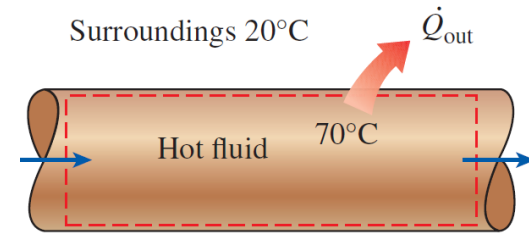
4. Algunos dispositivos de flujo estable.

Intercambiadores de calor de contacto indirecto



Ductos y tuberías

En los ductos y tuberías dependiendo de su extensión la ganancia o pérdida de calor puede ser significativa. De igual forma los cambios de energía cinética y potencial (a menos de que se den cambios de elevación en el fluido al ser transportado a un punto más alto por medio de la tubería) suelen ser despreciables.



5. Análisis de energía de procesos de flujo no estable.

Un *proceso no estable* o *transitorio* es aquel que involucra cambios con respecto al tiempo dentro del volumen de control. Aquí se trata con los cambios por unidad de tiempo que ocurren dentro del volumen de control en un intervalo de tiempo determinado.

Para estos tipos de procesos del balance de masa y de energía se tendrá:

$$m_{entra} - m_{sale} = \Delta m_{VC}$$

$$E_{entrada} - E_{salida} = \Delta E_{VC}$$

V. Análisis de masa y energía de volúmenes de control

5. Análisis de energía de procesos de flujo no estable.

En general los procesos no estables son difíciles de analizar producto de que las propiedades de la masa en las entradas y salidas pueden cambiar durante el proceso en función del tiempo. Sin embargo, la mayoría de los procesos pueden ser representados con razonable exactitud a partir de procesos de flujo uniforme:

Un flujo uniforme es aquel que en cualquier entrada o salida es uniforme y estable, y consecuentemente las propiedades del flujo no cambian con el tiempo o con la posición sobre la sección transversal de una entrada o salida. En caso tal de que cambien, son promediadas y tratadas como constantes para el proceso entero.