

PREFACIO

El entendimiento adecuado de la Termodinámica es fundamental para la formación de profesionales en diferentes áreas de ingeniería. Son muchos ingenieros: químicos, mecánicos, materiales, producción que requieren del conocimiento de la termodinámica para el desempeño de sus actividades en el ámbito profesional.

Este texto tiene como meta facilitar al estudiante la comprensión de los temas fundamentales del curso de termodinámica, mediante el desarrollo de una metodología para la resolución de los problemas prácticos y la adquisición de destreza para la resolución de los mismos de una manera eficaz.

El texto está conformado por cinco capítulos, en cada uno de los cuales se presenta un resumen de los conceptos básicos, así como de las leyes o principios fundamentales. Además, se desarrolla de una manera detallada y concreta diferentes problemas (más de 50!) para guiar al estudiante en la resolución de problemas prácticos y finalmente, se presenta una serie de 135 problemas propuestos de diferentes niveles de dificultad para que el estudiante pueda ejercitar lo aprendido.

En el primer capítulo se presentan los conceptos fundamentales de la termodinámica y el tema de sistemas de unidades. El capítulo dos presentamos los conceptos de temperatura, presión, el uso de tablas termodinámicas y de las ecuaciones de estado. En este capítulo se explica detalladamente el uso de las tablas y como resolver problemas prácticos donde se empleen las mismas.

El capítulo tres introduce los conceptos de trabajo y calor, conceptos que serán empleados en el capítulo cuatro para desarrollar la primera ley de la termodinámica. Finalmente, en el capítulo cinco se desarrolla la segunda ley de la termodinámica.

Al final del cuaderno de trabajo, en los anexos, se presentan evaluaciones que le servirán al estudiante para medir el grado de conocimientos adquiridos.

Esperamos que al finalizar el curso, los estudiantes hayan adquirido los conocimientos necesarios par continuar con otros cursos de termodinámica y que los conocimientos adquiridos perduren en el tiempo para que puedan ser empleados en su vida profesional.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN	
	1.1 Definiciones y Conceptos básicos	1
	1.2 Dimensiones y Unidades	3
	Problemas resueltos	4
	Problemas propuestos	7
	Respuesta a los problemas propuestos	8
 CAPÍTULO 2	 PROPIEDADES DE LAS SUSTANCIAS PURAS	
	2.1 Definiciones	9
	2.2 Presión	10
	2.3 Temperatura	13
	2.4 Equilibrio de fases en sustancias puras: diagramas termodinámicos	14
	2.5 Uso de tablas termodinámicas	17
	2.6 Ecuación de gas ideal	18
	2.7 Diagrama de compresibilidad	19
	2.8 Uso de tablas termodinámicas disponibles	
	En Internet	22
	Problemas resueltos	23
	Problemas propuestos	48
	Respuesta a los problemas propuestos	55
 CAPÍTULO 3	 TRABAJO Y CALOR	
	3.1 Trabajo	60
	3.2 Calor	63
	Problemas resueltos	64
	Problemas propuestos	73
	Respuesta a los problemas propuestos	76
 CAPÍTULO 4	 PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA	
	4.1 Primera ley para un sistema sometido a un ciclo	77
	4.2 Primera ley para procesos no cíclicos (sistemas cerrados)	77
	4.3 Aplicación de la primera ley a sistemas cerrados	80
	4.4 Ley de la conservación de la masa	80
	4.5 Primera ley para sistemas abiertos	82
	4.6 Aplicación de la primera ley para sistemas	

	abiertos en estado estacionario	83
4.7	Primera ley para sistemas abiertos en estado no estacionario	75
	Problemas resueltos	87
	Problemas propuestos	103
	Respuesta a los problemas propuestos	108
CAPÍTULO 5	SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA	
5.1	Definiciones y conceptos fundamentales	110
5.2	Desigualdad de Clausius: segunda ley de la termodinámica para un ciclo	114
5.3	Segunda ley de la termodinámica para sistemas cerrados	114
5.4	Segunda ley de la termodinámica para sistemas abiertos	115
5.5	Relación de la entropía con otras propiedades termodinámicas	117
5.6	Representación de procesos termodinámicos en el diagrama T-s	119
5.7	Eficiencia de equipos de trabajo continuo	121
	Problemas resueltos	122
	Problemas propuestos	136
	Respuesta a los problemas propuestos	141
ANEXOS		144

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Definiciones y Conceptos básicos.

La **termodinámica** es una ciencia que trata las transformaciones de la energía (i.e., la conversión de energía química en energía eléctrica, o la conversión de calor en trabajo).

La termodinámica se puede dividir en:

Termodinámica clásica: se ocupa del efecto global o promedio de las interacciones moleculares individuales. Introduce el concepto del “continuo”, que no es más que considerar una sustancia como continua y no como compuesta de muchas moléculas. Es decir, se estudia la sustancia desde un punto de vista **macroscópico**, donde los parámetros físicos pueden medirse con instrumentos o ser percibidos por nuestros sentidos. En el caso de la presión ejercida por un gas, cuando se usa un manómetro, lo que se mide es la fuerza promedio que ejerce el gas sobre las paredes del recipiente que lo contiene, y no los cambios de cada molécula al chocar con dichas paredes. Siempre se estudiarán volúmenes más grandes que las dimensiones de las moléculas.

Termodinámica estadística: considera las moléculas en forma independiente y se analiza su acción en grupo mediante métodos estadísticos o probabilísticos. El estudio se hace entonces desde un punto de vista **microscópico**.

Sistema

Un **sistema** es la región del espacio, definida por un observador, que se desea estudiar. Está rodeada por una superficie denominada **frontera** o **límite**. Estos límites pueden ser reales o ficticios, fijos o móviles. La región exterior a los límites de un sistema y contigua a él constituye sus **alrededores**. El conjunto de sistema, frontera y alrededores se conoce usualmente como **universo**.

Los sistemas termodinámicos generalmente se clasifican en dos grandes categorías: sistemas cerrados y abiertos.

Sistemas cerrados: son aquellos en los cuales NO hay flujo de materia a través de los límites del sistema. El sistema cerrado siempre contiene la misma cantidad de materia. No intercambian masa pero sí pueden intercambiar energía. Un caso particular de sistema cerrado es el que se llama **aislado**, el cual no intercambia materia ni energía con otro sistema o con sus alrededores.

Sistemas abiertos: son aquellos en los cuales existe intercambio de materia a través de las fronteras. Puede ser que en un sistema abierto el cambio neto de masa sea igual a cero, es decir, que el flujo de masa que entra al sistema sea igual al flujo de masa que sale del mismo. En el caso de los sistemas abiertos la frontera o límite suele llamarse **volumen de control**.

De acuerdo a los intercambios con los alrededores se pueden clasificar los límites de un sistema como:

- impermeables o permeables: de acuerdo a que haya o no flujo de masa a través de ellos
- rígidos o móviles: si se efectúa o no trabajo

- adiabáticos o diatérmicos: cuando no se transfiere calor o la transferencia de calor es instantánea

Propiedades termodinámicas

Una propiedad termodinámica es una característica del sistema la cual puede observarse directa o indirectamente. Generalmente las propiedades termodinámicas se clasifican en dos grandes categorías: propiedades intensivas y propiedades extensivas.

Las **propiedades intensivas** no dependen de la masa o extensión del sistema, i.e., la temperatura, la presión, la densidad.

Las **propiedades extensivas** sí dependen de la masa del sistema, i.e., el volumen, el peso, la fuerza.

El cociente de dos propiedades extensivas es una propiedad intensiva. El cociente de cualquier propiedad extensiva entre la masa será una propiedad intensiva comúnmente llamada **específica**.

Fase y Estado

Una **fase** está definida como una cantidad de materia homogénea en todas sus partes. En la naturaleza existen comúnmente cuatro fases: sólida, líquida, gaseosa y plasma.

El **estado** de una sustancia está conformado por el conjunto de parámetros físicos que describen por completo la forma en que existe dicha sustancia.

Proceso y Ciclo

Un **proceso** ocurre cuando el sistema pasa de un estado termodinámico a otro. Existen procesos termodinámicos donde una de las propiedades permanece constante, ellos reciben nombres específicos, a saber:

Propiedad constante:

Temperatura

Presión

Volumen

Proceso Isotérmico

Proceso Isobárico

Proceso Isocórico o Isométrico

Un **ciclo** es un proceso o conjunto de procesos que hacen regresar al sistema a su estado original.

Equilibrio

Un sistema está en equilibrio termodinámico si sus propiedades no cambian sin un estímulo externo (calor, fuerza, etc.). El equilibrio entre sistemas o entre un sistema y sus alrededores puede ser:

- mecánico: si tienen igual presión
- térmico: si tienen igual temperatura
- difusivo: si tiene igual potencial químico

Para que exista **equilibrio termodinámico** debe existir equilibrio mecánico, térmico y difusivo.

1.2. Dimensiones y Unidades.

Dimensión: es el nombre atribuido a una variable física que se puede medir u observar en la naturaleza y por ende, es el resultado de una medición.

Magnitud: es el número obtenido como resultado de la medición al comparar la variable física con una de referencia seleccionada por el usuario. Viene etimológicamente de *magno* (grande) y tiene como sinónimo tamaño.

Unidad: representa la cuantificación de la medición.

Por ejemplo:

Dimensión ¿qué se mide?	Magnitud ¿cuánto mide?	Unidad ¿en qué se mide?
Masa [M]	3	kg, lb, g
Tiempo [t]	5	s, año, h, min
Volumen [L ³]	7	m ³ , gal, pie ³

Sistemas de unidades

Para poder estudiar las magnitudes físicas se debe escoger un sistema de dimensiones primarias que sirva para expresar las magnitudes a ellas relacionadas. En el área de ingeniería en la actualidad se toman 7 magnitudes primarias para especificar cualquier propiedad física, a saber: masa, longitud, tiempo, temperatura, corriente eléctrica, intensidad luminosa y cantidad de materia.

Se pueden clasificar los sistemas de unidades en: absolutos, físicos o gravitacionales y técnicos o ingenieriles.

Absolutos: son aquellos cuyas dimensiones secundarias se obtienen directamente a partir de las primarias (se dice entonces que el sistema es coherente) y cuya validez es universal. Emplean 3 dimensiones fundamentales en mecánica: masa, longitud y tiempo. Entre los sistemas absolutos se encuentran: el internacional o SI, cgs, MTS y el sistema inglés, como se ilustra a continuación:

Dimensión	SI	cgs	MTS	Inglés
Masa [M]	kg	g	ton	lbm
Longitud [L]	m	cm	m	pie
Tiempo [t]	s	s	s	s

Gravitacionales o Físicos: son aquellos que emplean como dimensiones fundamentales la fuerza, la longitud y el tiempo. Estos sistemas son coherentes ya que las dimensiones derivadas se obtienen de las leyes físicas directamente. A continuación se muestran las unidades fundamentales para los sistemas internacional e inglés.

Dimensión	SI	Inglés
Fuerza [F]	kgf	lbf
Longitud [L]	m	pie
Tiempo [t]	s	s

Técnicos o Ingenieriles: utilizan 4 dimensiones fundamentales: masa, longitud, fuerza y tiempo, a saber:

Dimensión	S. métrico ingenieril	S. ingenieril inglés
Longitud [L]	m	pie
Masa [M]	kg	lbm
Fuerza [F]	kgf	lbf
Tiempo [t]	s	s

Estos sistemas son incoherentes ya que las dimensiones derivadas no se obtienen de las leyes físicas directamente.

Problemas resueltos

1.- Clasifique los siguientes sistemas:

a) Un termo que contiene café caliente.

El sistema seleccionado es el café. Este es un sistema cerrado, ya que la masa de café dentro del termo siempre es la misma. La frontera es rígida y el sistema es adiabático debido a que no hay transferencia de calor con los alrededores a través de las paredes del termo.

b) El vaciado de un globo.

El sistema sería el gas, i.e. aire, helio, etc., contenido dentro del globo. Éste sería un sistema abierto, ya que hay transferencia de masa a través de los límites del sistema. Adicionalmente, posee fronteras móviles ya que el globo se desinfla.

c) Una olla de presión.

Si se considera el agua contenida dentro de la olla como el sistema, éste será cerrado y con frontera fija.

Si se procede a calentar el agua, el sistema seguirá siendo cerrado hasta que se alcance la temperatura de ebullición, momento en el cual comenzará a ser un sistema abierto. Durante este proceso la frontera sigue siendo fija y hay transferencia de calor y masa simultáneamente.

2.- Indique si las siguientes propiedades son intensivas o extensivas:

a) La gravedad.

Es una propiedad intensiva, ya que se puede obtener como la división de dos propiedades extensivas ($g = F/m$).

b) La energía cinética.

Es una propiedad extensiva, ya que depende de la masa.

3.- Un lingote de plomo de densidad $11,3 \text{ g/cm}^3$ y volumen 1 dm^3 , ha sido pesado por una balanza de resorte en el Polo Norte, donde la aceleración de la gravedad es $9,8324 \text{ m/s}^2$. ¿Cuál es el peso del plomo expresado en N y kgf?. ¿Qué indicaría la balanza de resorte en el Ecuador, donde la gravedad es $9,7805 \text{ m/s}^2$?

Es necesario determinar la masa del lingote de plomo, ya que ésta es invariante a la aceleración de la gravedad del lugar donde se encuentre el lingote, para ello recordando que

$$\rho = \frac{m}{V}$$

despejando la masa $m = \rho V$, se obtiene

$$m = 11,33 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} 1\text{dm}^3 \frac{10^3 \text{ cm}^3}{1 \text{ dm}^3} = 11330 \text{ g} \quad \text{o} \quad m = 11,33 \text{ kg}$$

Por lo tanto el peso del lingote en el Polo Norte será

$$p = m g$$

$$p = 11,33 \text{ kg} \cdot 9,8324 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 111,401092 \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2} = 111,401092 \text{ N}$$

recordando que

$$1 \text{ kgf} = 1 \text{ kg} \cdot 9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 9,80665 \text{ N}$$

el peso del lingote en kgf será

$$p = 111,401092 \text{ N} \frac{1 \text{ kgf}}{9,80665 \text{ N}} = 11,35974997 \text{ kgf}$$

y en el Ecuador

$$p = 11,33 \text{ kg} \cdot 9,7805 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 110,813065 \text{ N} = 11,2997879 \text{ kgf}$$

4.- El coeficiente de transferencia de calor por convección de un tubo al aire se calcula en forma simplificada mediante la ecuación:

$$h = 0,026 \frac{G^{0,6}}{D^{0,4}}$$

donde:

h: coeficiente de transferencia de calor, [BTU/h pie² °F]

G: flujo de masa, [lbm/h pie²]

D: diámetro exterior del tubo, [pie]

a) Se quiere obtener h en [cal/min cm² °C]. ¿Cuál sería la nueva constante de la ecuación en lugar de 0,026?.

b) Si ahora se quiere evaluar la ecuación con G en [g / min cm²] y D en [cm]. ¿Cuál sería el nuevo valor de la constante?.

a) Para determinar la nueva constante, es necesario realizar un cambio de unidades en la ecuación, para ello

$$h' \left[\frac{cal}{min \cdot cm^2 \cdot ^\circ C} \right] = h \left[\frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot ^\circ F} \right] \cdot \frac{251,9958 cal}{1 BTU} \cdot \frac{1 h}{60 min} \cdot \frac{1 pie^2}{929,0304 cm^2} \cdot \frac{1,8 \Delta^\circ F}{1 \Delta^\circ C}$$

$$h' = 0,0081 h$$

finalmente sustituyendo la expresión anterior en la ecuación original se obtiene, el nuevo valor de la constante

$$h' = 2,12 \times 10^{-4} \frac{G^{0,6}}{D^{0,4}}$$

b) Al hacer el cambio de unidades para G y D se tiene

$$G \left[\frac{lb}{h \cdot pie^2} \right] = G' \left[\frac{g}{min \cdot cm^2} \right] \cdot \frac{1 lb}{454 gr} \cdot \frac{60 min}{1 h} \cdot \frac{929,0304 cm^2}{1 pie^2}$$

$$G = 122,779 G'$$

$$D [pie] = D' [cm] \cdot \frac{1 pie}{30,48 cm}$$

$$D = 0,0328 D'$$

Al sustituir las expresiones anteriores en la ecuación original, se obtiene

$$h = 0,026 \cdot \frac{(122,779 G')^{0,6}}{(0,0328 D')^{0,4}}$$

$$h = 1,828 \frac{G^{0,6}}{D^{0,4}}$$

Problemas propuestos

1.- Seleccione la respuesta correcta (V o F).

- La aceleración de la gravedad es una propiedad intensiva.
- Un proceso es una sucesión de estados termodinámicos donde el estado inicial y final es el mismo.
- El sistema de unidades técnico o ingenieril es un sistema incoherente.
- Un °F equivale a 1,8 °C.
- Un sistema se encuentra en equilibrio termodinámico si es incapaz de experimentar espontáneamente algún cambio de estado.
- La termodinámica es una ciencia descubierta en el siglo XV.
- Un sistema aislado es el que se compone de un sistema abierto o cerrado y sus alrededores.
- Dos estados termodinámicos son idénticos si todas las posibles mediciones físicas a nivel macroscópico son iguales. Esto implica que cada molécula que forma parte del sistema tiene la misma localización y velocidad en los dos estados.
- Si una propiedad extensiva se divide entre la masa del sistema la propiedad resultante sigue siendo extensiva.

2.- Indique si las siguientes propiedades son intensivas (I) o extensivas (E).

- P, T, v, m, F, L, ρ , μ , M, V

3.- Indique si los siguientes sistemas son abiertos (A) o cerrados (C).

- una pelota
- un motor de automóvil
- un aire acondicionado
- una cafetera
- una bomba de agua
- el aire contenido en un caucho

4.- La escala de un dinamómetro está calibrada para dar lecturas de libra-masa (lbm) en un lugar donde la aceleración de la gravedad tiene un valor estándar de 32,174 pie/s². Si este instrumento se usa en un lugar donde la aceleración de la gravedad es de 32,300 pie/s². ¿Cuál es la masa de un objeto que registra un peso de 15 lbf en la escala de dicho instrumento?

5.- El coeficiente de transmisión de calor, h, para el calentamiento o enfriamiento de la región de flujo laminar viene dada por la ecuación empírica:

$$h = 24,2c^{\frac{1}{3}}k^{\frac{2}{3}}\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,14}\frac{W^{\frac{1}{3}}}{D_iL\mu^{\frac{1}{3}}}$$

donde

h: coeficiente de transmisión de calor, [BTU / (h pie² °F)]

c: calor específico, [BTU / (lb °F)]

μ: viscosidad del fluido, [lb/(h pie)]

μ_w: viscosidad del fluido en la pared, [lb/(h pie)]

k: conductividad térmica, [BTU / (h pie °F)]

W: velocidad de flujo de masa, [lb/ h]

D_i: Diámetro del tubo, [pie]

L: longitud del camino recorrido por el fluido, [pie]

Calcular el valor de la constante que se debe utilizar en esta ecuación, en vez de 24,2, si todas las unidades están en el sistema cgs.

6.- La ecuación:

$$\mu = 3,24t^{-\frac{1}{2}} + 1,02t$$

se utiliza para convertir el tiempo de flujo, t [s] a μ viscosidad [lb/(pie s)]. Obtener una ecuación equivalente para la viscosidad en función del tiempo, en minutos, cuando las unidades de la viscosidad son [kg/(m s)]

Respuestas a los problemas propuestos

1.- V F V F V F F F F

2.- I I I E E E I I I E

3.- C A A A A C

CAPÍTULO 2

PROPIEDADES DE LA SUSTANCIA PURA

En este capítulo se definirán algunas de las propiedades básicas de mayor interés para los sistemas termodinámicos tales como: presión, temperatura, volumen específico, etc. También se establecerán las relaciones físicas entre estas propiedades para el caso de sustancias puras.

2.1. Definiciones.

Sustancia Pura

Una sustancia pura es aquella que tiene una composición química homogénea e invariante, es decir, si en todos los puntos del sistema existe la misma composición independientemente de la fase en que se encuentre.

Densidad

Se define la densidad como el límite de la relación de la masa de un sistema entre su volumen cuando el volumen se hace lo más pequeño posible sin perder homogeneidad (V')

$$\rho = \lim_{V \rightarrow V'} \left(\frac{m}{V} \right) \quad (2.1)$$

Se puede expresar en kg/m^3 , g/cm^3 , lb/pe^3 , etc. Además, es importante recordar que es una propiedad intensiva.

Volumen específico

Se define como el volumen por unidad de masa, es decir, el inverso de la densidad

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (2.2)$$

Se expresa en m^3/kg , cm^3/g , pe^3/lb , etc.; también es una propiedad intensiva.

Se define también el volumen específico molar (volumen por unidad de cantidad de material). La relación entre el volumen específico molar y el volumen específico es el peso molecular

$$\bar{v} = v M \quad (2.3)$$

Densidad relativa o gravedad específica

Es la relación existente entre la densidad de una sustancia y la densidad de una sustancia de referencia. Generalmente esta sustancia de referencia es el agua a 4°C para líquidos y para los gases se utiliza el aire.

$$g_e = \frac{\rho}{\rho_{\text{agua}}^{4^\circ C}} \quad \text{ó} \quad g_e = \frac{\rho}{\rho_{\text{aire}}} \quad (2.4)$$

Peso específico

Es el producto entre la densidad y la magnitud de la aceleración de la gravedad

$$\gamma = \rho g \quad (2.5)$$

Se puede expresar en N/m^3 , lb/pulg^3 , lb/pie^3 . Es una propiedad intensiva.

2.2. Presión.

Se define como el cociente de la componente normal de una fuerza dada (F_N) entre el área sobre la cual actúa

$$P = \lim_{A \rightarrow A'} \frac{F_N}{A} \quad (2.6)$$

Se puede expresar en pascal (Pa), lb/pie^2 , lb/pulg^2 (psi), kgf/m^2 , mmHg, bar, torr.

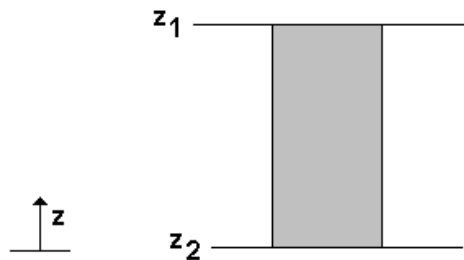
Presión hidrostática

Cuando un fluido se encuentra en reposo, él ejerce en todo punto una fuerza que es perpendicular a un elemento de área definido en el seno del fluido y que además es independiente de la orientación de dicho elemento. La presión resultante de esta fuerza se denomina presión hidrostática.

$$\underline{\nabla} P = \rho \underline{g} \quad (2.7)$$

donde $\underline{\nabla}$ es el operador matemático denominado gradiente y \underline{g} es el vector aceleración de la gravedad.

Ejemplo: Presión ejercida por una columna de fluido, como se muestra en la figura



Al aplicar la ecuación (2.7)

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g \Rightarrow dP = -\rho g dz \quad (2.8)$$

Si la densidad del fluido es constante, se tiene al integrar

$$P_2 - P_1 = \rho g (z_1 - z_2) \quad (2.9)$$

De no ser la densidad constante, es necesario conocer su funcionalidad con z , para poder llevar a cabo la integración.

En este punto se puede señalar mediante un ejemplo una clara distinción entre los líquidos y los gases. Para un líquido, por ejemplo agua, una columna de 10 m produce en su base una presión de

$$\Delta P = \rho g z = 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 10 \text{ m} = 98100 \text{ Pa}$$

mientras que una columna similar de aire sólo produce una presión de

$$\Delta P = \rho g z = 1,2 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 10 \text{ m} = 118 \text{ Pa}$$

o sea, dos órdenes de magnitud menor. Para efectos prácticos se puede considerar que el peso de una columna de gas es despreciable a menos que las columnas sean de una magnitud de cientos de metros.

Presión atmosférica estándar

Se define como la presión ejercida por una columna de mercurio de 760 mm de altura ($\rho_{\text{Hg}}=13,5951 \text{ gr/cm}^3$) y la aceleración de la gravedad estándar ($g=9,80665 \text{ m/s}^2$).

$$\Delta P = \rho g z = 13,5951 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,80665 \text{ m/s}^2 \cdot 760 \text{ mm} = 101325 \text{ Pa}$$

Existen diferentes dispositivos para medir la presión, entre ellos se tienen los manómetros tipo Bourdon, piezoeléctricos y diferenciales.

Niveles de presión

Las presiones que toman como punto de referencia la presión atmosférica, se llaman presiones relativas (o manométricas). Las presiones referidas al cero absoluto (vacío perfecto) se denominan presiones absolutas, entonces

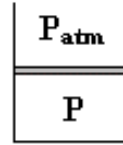
$$P_{abs} = P_{man} + P_{atm} \quad (2.10)$$

Si $P_{abs} < P_{atm}$ el instrumento dará una lectura negativa, denominada presión de vacío. En la práctica se suele utilizar el valor absoluto de ésta.

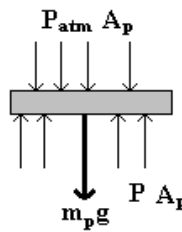
Presión ejercida sobre superficies sólidas: sistema cilindro-pistón

Un sistema importante desde el punto de vista termodinámico es el sistema cilindro-pistón, ya que se puede estudiar con él el comportamiento volumétrico de una sustancia en forma sencilla. Consiste en un cilindro hueco con paredes rígidas y fijas. En la parte superior posee

un émbolo o pistón que por lo general tiene la libertad de moverse (como se muestra en la figura), a menos que posea un tope o pasador. Se supone que no hay fugas ni roce entre el pistón y el cilindro.



Al realizar un diagrama del cuerpo libre del pistón se obtiene



Si el cilindro está estático, las fuerzas deben estar equilibradas

$$\sum F = 0 = PA_p - m_p g - P_{atm} A_p \Rightarrow P = P_{atm} + \frac{m_p g}{A_p} \quad (2.11)$$

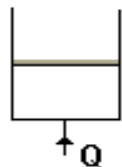
A continuación se presentan los casos típicos que se encuentran en un sistema cilindro-pistón:

a) pistón sin movimiento



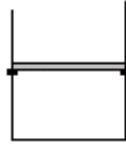
$$P = P_{atm} + \frac{m_p g}{A_p}$$

b) Intercambio de calor.
(velocidad del pistón constante)



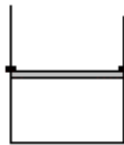
$$P = P_{atm} + \frac{m_p g}{A_p}$$

c) Topes inferiores



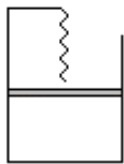
$$P \leq P_{atm} + \frac{m_p g}{A_p}$$

d) Topes superiores



$$P \geq P_{atm} + \frac{m_p g}{A_p}$$

e) Resorte



$$P = P_{atm} + \frac{m_p g}{A_p} + \frac{K \Delta X}{A_p}$$

f) Horizontal



$$P = P_{atm}$$

2.3. Temperatura.

La temperatura nace como un concepto intuitivo que cuantifica desde el punto de vista macroscópico la capacidad de los cuerpos de transferir calor. A escala microscópica la temperatura es una medida del estado de vibración molecular de las sustancias.

Ley cero de la termodinámica: si dos cuerpos A y B se encuentran en equilibrio térmico y, a su vez, el cuerpo B está en equilibrio térmico con un tercer cuerpo C, entonces A y C están también en equilibrio térmico.

Para la medición de la temperatura se ha aprovechado el uso de ciertas propiedades físicas como el volumen, la conductividad eléctrica, etc., que varían con la temperatura. Estas propiedades físicas que experimentan cambios con la temperatura se denominan propiedades termométricas. Haciendo uso de estas propiedades, se han desarrollado instrumentos de medición de temperatura, siendo los más conocidos el termómetro de bulbo y los termopares o termocuplas.

Escalas de temperatura

Existen dos tipos de escalas comúnmente usadas: Fahrenheit y Celsius. La relación entre ellas es

$$T(^{\circ}F) = 1,8T(^{\circ}C) + 32 \quad (2.12)$$

Para definir una escala de temperatura es necesario tomar dos puntos de referencia. Los puntos de referencia utilizados, por ejemplo en la escala Celsius, son el punto de congelación del agua (temperatura de una mezcla de hielo y agua en equilibrio a 1 atm) y el punto de ebullición del agua (a 1 atm).

Es posible demostrar experimentalmente que existe un punto mínimo de temperatura al cual se le puede asignar el valor “cero absoluto”. Éste se consigue al extrapolar las curvas de P en función de T para diferentes gases, cuando la presión es prácticamente cero. Para la escala centígrada el cero absoluto se encuentra en $-273,15$ y para la escala Fahrenheit el cero se encuentra a $-459,67$, independientemente del gas empleado. Surgen así las escalas absolutas de temperatura llamadas Kelvin (K) y Rankine (R), respectivamente.

La relación con las escalas absolutas será

$$T(K) = T(^{\circ}C) + 273,15 \quad (2.13)$$

$$T(R) = T(^{\circ}F) + 459,67 \quad (2.14)$$

Observese que

$$\Delta T(K) = \Delta T(^{\circ}C) \quad (2.15)$$

$$\Delta T(R) = \Delta T(^{\circ}F) \quad (2.16)$$

y además

$$\Delta T(^{\circ}F) = 1,8 \Delta T(^{\circ}C) \quad (2.17)$$

$$\Delta T(R) = 1,8 \Delta T(K) \quad (2.18)$$

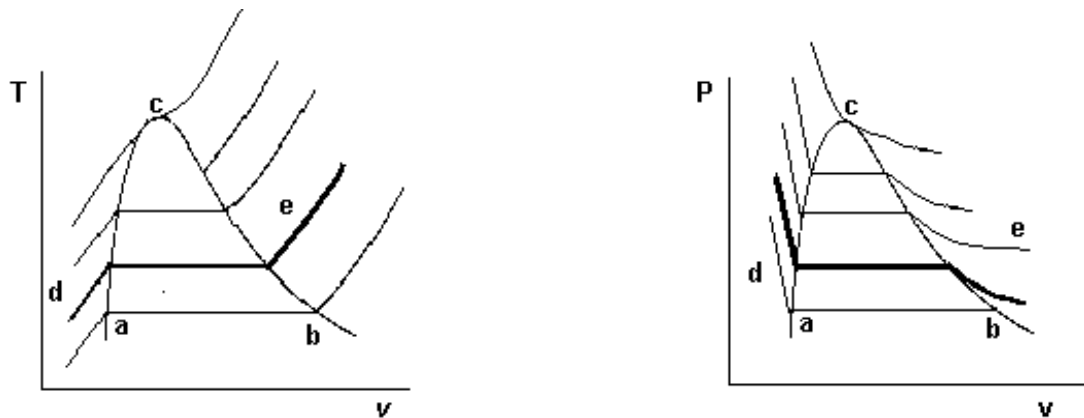
2.4. Equilibrio de fases en sustancias puras: diagramas termodinámicos.

Para definir el estado de una sustancia pura se necesitan dos propiedades termodinámicas intensivas independientes (regla de las fases de Gibbs). La presión, la temperatura y el volumen específico de una sustancia pura están relacionados entre sí, y suelen representarse en un diagrama denominado superficie termodinámica. Las proyecciones de esta superficie suelen realizarse sobre los planos, P-v, T-v y P-T.

A continuación se presentan los diagramas, P-v, T-v y P-T para el equilibrio líquido-vapor.

En estos diagramas se pueden observar los siguientes puntos:

a: punto donde aparece la primera burbuja de vapor y se le denomina **líquido saturado** o punto de burbuja. El volumen específico correspondiente a este punto se le denomina v_f .



b: es el punto donde desaparece la última gota de líquido y se le denomina **vapor saturado** o punto de rocío. El volumen específico correspondiente a este punto se le denomina v_g .

Los puntos en la zona **d** se denominan **líquido comprimido** o subenfriado y los de la zona **e** **vapor sobrecalentado** o recalentado.

La curva en forma de campana **acb** se denomina **domo de saturación** y representa el lugar geométrico de todos los puntos de líquido saturado y vapor saturado. La línea **ac** se denomina línea de líquido saturado y la línea **cb** línea de vapor saturado.

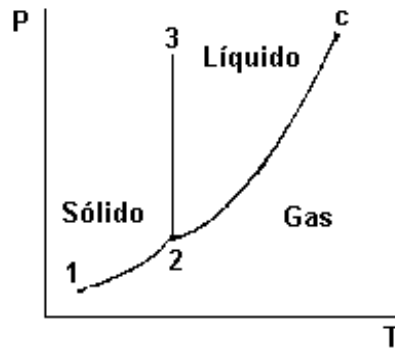
Para altas presiones, se observa que la diferencia entre los volúmenes específicos de líquido y vapor en equilibrio se va haciendo menor hasta llegar a un punto **c** denominado **punto crítico** en el cual ambas fases tienen las mismas propiedades. La presión, el volumen y la temperatura en el punto crítico se conocen como propiedades críticas y son características de cada sustancia. Para temperaturas o presiones mayores que las críticas, las fases líquida y vapor no se diferencian sensiblemente en su transición de manera que la distinción entre ellas se hace difusa físicamente.

En el diagrama P-v, la línea más gruesa es una línea de temperatura constante o isoterma, mientras que en el diagrama T-v, la línea más gruesa es una línea de presión constante, llamada también isóbara.

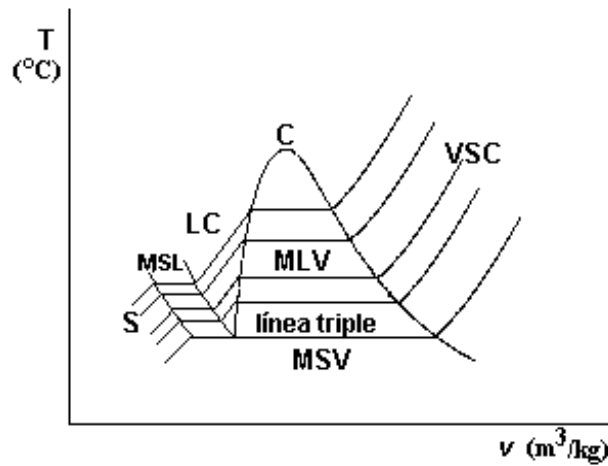
En el diagrama P-T al punto **2** se le conoce con el nombre de punto triple y se define como el estado en el cual las tres fases pueden estar presentes y en equilibrio.

En este diagrama se pueden observar tres líneas de equilibrio diferentes:

- equilibrio sólido-líquido (**2-3**) (fusión- solidificación)
- equilibrio líquido-vapor (**2-C**) (evaporación- condensación)
- equilibrio sólido-vapor (**1-2**) (sublimación- solidificación)



Los diagramas P-v y T-v se pueden extender de manera que incluyan también la fase sólida así como los equilibrios sólido- vapor y sólido-líquido. El siguiente diagrama muestra dichos equilibrios y adicionalmente la zona de sólido. En él se resalta la denominada línea triple que corresponde al punto 2 del diagrama P-T. Para presiones y temperaturas inferiores a la línea triple la sustancia pasará del estado sólido al vapor (o viceversa) directamente, proceso denominado sublimación. Por encima de la línea triple, y por debajo del punto crítico, para una misma temperatura, la sustancia atravesará los estados de mezcla sólido-líquido, líquido comprimido y mezcla líquido-vapor hasta llegar al vapor sobrecalentado. De forma equivalente se puede construir un diagrama P-v que muestre los mismos estados.



La **calidad** (x), también llamada título, es una variable que permite determinar la relación entre la masa de vapor y la masa total de una mezcla en equilibrio

$$x = \frac{m_g}{m_T} \tag{2.19}$$

Por lo tanto en el equilibrio, el volumen específico viene dado por

$$v = (1 - x)v_f + xv_g \quad (2.20)$$

La calidad varía entre 0 y 1, donde 0 corresponde al estado de líquido saturado y 1 al vapor saturado.

En el caso de equilibrio sólido-vapor, el subíndice f de la ecuación (2.20) deberá cambiarse por i y al valor de calidad cero se le denomina sólido saturado.

Otra forma de representar la relación entre la presión, la temperatura y el volumen específico son las llamadas tablas termodinámicas.

2.5. Uso de tablas de propiedades termodinámicas.

Las tablas se dividen fundamentalmente en cuatro secciones:

1.- Tablas de saturación o equilibrio líquido-vapor: corresponden a los puntos ubicados dentro del domo de saturación. Un punto de estas tablas está perfectamente definido cuando:

- Se especifica P y v y se observa que para esa P , $v_f \leq v \leq v_g$.
- Se especifica T y v y se observa que para esa T , $v_f \leq v \leq v_g$.
- Se especifica P y x .
- Se especifica T y x .

En esta tabla, los valores de la primera línea corresponde a las condiciones del punto triple y los valores de la última línea de la tabla corresponden al punto crítico.

2.- Tablas de saturación o equilibrio sólido-vapor: donde se encuentran alistados los puntos ubicados dentro del domo de saturación sólido-vapor. Al igual que para el equilibrio líquido-vapor, un punto está perfectamente definido sí:

- Se especifica P y v y se observa que para esa P , $v_i \leq v \leq v_g$.
- Se especifica T y v y se observa que para esa T , $v_i \leq v \leq v_g$.
- Se especifica P y x .
- Se especifica T y x .

Estas tablas no están disponibles para todas las sustancias por su poco interés práctico.

3.- Tablas de vapor sobrecalentado y

4.- Tablas de líquido comprimido.

Para estas dos últimas tablas se deben especificar dos variables P y T , P y v o T y v para definir un estado.

En general para ubicar un punto en la tabla de propiedades cuando no se sabe en que región está, se recomienda el siguiente procedimiento:

Si se conoce T o P , se ubica el estado correspondiente en la tabla de saturación líquido-vapor y se obtiene así P_{sat} o T_{sat} y v_f y v_g para ese estado. Entonces de acuerdo al valor que se tenga de la otra variable especificada, se puede determinar el estado en que se encuentra la sustancia:

Dada la presión:

Si $T > T_{\text{sat}} \Rightarrow$ vapor sobrecalentado

Si $T = T_{\text{sat}} \Rightarrow$ saturación

Si $T < T_{\text{sat}} \Rightarrow$ líquido comprimido

Dada la temperatura:

Si $P < P_{\text{sat}} \Rightarrow$ vapor sobrecalentado

Si $P = P_{\text{sat}} \Rightarrow$ saturación

Si $P > P_{\text{sat}} \Rightarrow$ líquido comprimido

Dada la temperatura o la presión:

Si $v > v_g \Rightarrow$ vapor sobrecalentado

Si $v_f < v < v_g \Rightarrow$ saturación

Si $v < v_f \Rightarrow$ líquido comprimido

2.6. Ecuación de gas ideal.

Adicionalmente las relaciones entre las propiedades PvT se pueden expresar como una relación matemática de la forma

$$f(P,T,v) = 0 \quad (2.21)$$

la cual se denomina “ecuación de estado” por ser una descripción del estado termodinámico de una sustancia. La ecuación de estado más simple es la ecuación de gas ideal. Para presiones suficientemente bajas se puede escribir, para todos los gases

$$\frac{P\bar{v}}{T} = \bar{R} \Rightarrow P\bar{v} = \bar{R}T \quad (2.22)$$

donde \bar{R} se denomina constante universal de los gases, y su valor es 8,31451 kJ/(kmol K) en el sistema internacional. Otras formas de expresar esta ecuación serían

$$\begin{aligned} PV &= mRT \\ PV &= n\bar{R}T \\ Pv &= RT \end{aligned} \quad (2.23)$$

donde

$$R = \frac{\bar{R}}{M} \quad (2.24)$$

siendo M el peso molecular y R la constante específica del gas.

Esta ecuación se aplica generalmente a presiones menores de 10 atm (1 MPa) o cuando la relación entre la temperatura y la temperatura crítica de la sustancia es mayor que 2.

2.7. Diagrama de compresibilidad.

Para gases reales la ecuación de gas ideal puede modificarse introduciendo un factor de corrección denominado factor de compresibilidad (Z)

$$Pv = ZRT \quad (2.25)$$

Una relación de Z con otras propiedades termodinámicas se consigue a través de las llamadas propiedades reducidas. Una propiedad reducida es la relación entre el valor de la propiedad y el valor de la propiedad en el punto crítico

Temperatura reducida

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad (2.26)$$

Presión reducida

$$P_r = \frac{P}{P_c} \quad (2.27)$$

Empíricamente se ha determinado que, aproximadamente, todos los gases tienen el mismo factor de compresibilidad a las mismas T_r y P_r , esto se conoce como el **principio de estados correspondientes**.

En el punto crítico el valor del factor de compresibilidad debería ser el mismo para todas las sustancias. En realidad se observa que Z_c está comprendido entre 0,2 y 0,3 para la mayoría de ellas. El diagrama del factor de compresibilidad generalizado, con Z graficado contra P_r (con T_r como parámetro) aparece en muchos textos. Para las sustancias más comunes Z_c tiene un valor alrededor de 0,27-0,29; por esta razón se utiliza con mucha frecuencia diagramas de compresibilidad a Z_c constante. Por ejemplo, el diagrama de compresibilidad para $Z_c = 0,29$ se encuentra en la figura de la página siguiente. También se presenta el diagrama de compresibilidad ampliado para el rango de P_r entre 0 y 1.

Es necesario recordar que los factores de compresibilidad generalizados son sólo aproximaciones, sin embargo, si se necesita información PvT sobre una sustancia, en una región donde no se han hecho medidas experimentales (o no se dispone de la información) el diagrama generalizado dará con toda probabilidad resultados cercanos a la realidad.

OJO SI LAS GRAFICAS de DIAGRAMA DE COMPRESIBILIDAD NO VAN AQUÍ

HAY QUE CAMBIAR LA NUMERACIÓN DE LA PAGINA

Colocar aquí diagrama de $Z_c = 0.27$

2.8. Uso de tablas de propiedades termodinámicas disponibles en Internet.

Las tablas termodinámicas que frecuentemente se encuentran en páginas web, así igual que las encontradas normalmente en los apéndices de los libros de termodinámica, presentan los resultados obtenidos a partir de ecuaciones de estado multiparamétricas específicas para cada sustancia pura. En otras palabras, son tablas obtenidas a partir de ecuaciones de estado complejas que cumple con la ecuación (2.21) para cada fluido.

Por ejemplo, el “**webbook**” se puede acceder a través de la página web del NIST (National Institute of Standard Technology): <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/> para obtener las propiedades termodinámicas de una sustancia pura a condiciones determinadas. También se pueden elaborar tablas termodinámicas a las condiciones deseadas, o visualizar los resultados en forma gráfica de manera inmediata. Los resultados pueden ser exportados en diferentes formatos incluyendo formatos tipo texto, Excel, Power Point, imágenes (gif, jpeg) etc.

Problemas resueltos

Los ejercicios que a continuación se presentan, están resueltos utilizando las tablas termodinámicas del libro “Fundamentals of Thermodynamics” realizado por Claus Borgnakke and Richard E. Sonntag, 7^{ma} edición. Si se utiliza para la resolución de los problemas otra referencia bibliográfica deben obtenerse resultados similares, ya que ellos dependerán de la precisión de las tablas utilizadas.

1.- Determine el estado termodinámico (P, T, v , x, fase) de las siguientes sustancias:

a) Agua a 200 °C y 100 kPa

Para definir el estado, es conveniente leer la presión de saturación de las tablas.

$$P_{\text{sat}}(200\text{ °C}) = 1553,8\text{ kPa}$$

$P = 100\text{ kPa} < P_{\text{sat}}(200\text{ °C}) \Rightarrow$ vapor sobrecalentado, por lo tanto la calidad no se encuentra definida.

De igual forma se podría llegar a la misma conclusión al leer la temperatura de saturación de las tablas.

$$T_{\text{sat}}(100\text{ kPa}) = 99,62\text{ °C}$$

$$T = 200\text{ °C} > T_{\text{sat}}(100\text{ kPa}) \Rightarrow \text{vapor sobrecalentado.}$$

En la tabla de vapor sobrecalentado se puede leer directamente el valor del volumen específico del agua a la presión (100 kPa) y temperatura ($T=200\text{ °C}$) deseada: $v = 2,1723\text{ m}^3/\text{kg}$.

b) Agua a 17 °C como vapor saturado

Debido a que la sustancia se encuentra en vapor saturado el volumen específico será directamente v_g a la temperatura dada. En las tablas se encuentra

T(°C)	$v_g\text{ (m}^3/\text{kg)}$
15	77,925
20	57,7897

Existen muchos puntos de propiedades termodinámicas que no aparecen en las tablas. Para encontrar su valor se utiliza la interpolación lineal. Este método se basa en suponer que la relación entre dos puntos conocidos es una línea recta y el punto desconocido se encuentra sobre ella. La ecuación general de la recta es

$$Y = \left(\frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} \right) (X - X_1) + Y_1$$

Entonces

$$v_x = \left(\frac{v_2 - v_1}{T_2 - T_1} \right) (T - T_1) + v_1$$

$$v_x = \left(\frac{57,7897 - 77,925}{20 - 15} \right) (17 - 15) + 77,9253$$

$$v_x = 69,87 \quad m^3 / kg$$

c) Agua a 250 kPa y 225 °C

Primero se verificará en que estado se encuentra.

$P_{\text{sat}}(225 \text{ °C}) = 2547,7 \text{ kPa}$. Como $P < P_{\text{sat}} \Rightarrow$ vapor sobrecalentado.

Ahora en las tablas de vapor sobrecalentado no aparece explícitamente ni la presión ni la temperatura deseada, entonces es necesario “diseñar” la columna de esta tabla realizando una doble interpolación. Esta doble interpolación se puede llevar a cabo en dos sentidos:

a) primero hallar por interpolación, para 200 kPa y para 300 kPa, el volumen a 225 °C y posteriormente interpolar estos volúmenes para la temperatura de 225 °C

T (°C)	v (m ³ /kg)	
	P=200 (kPa)	P=300 (kPa)
200	1,08034	0,71629
225	v_1	v_2
250	1,19880	0,79636

$$v_1 = \left(\frac{1,19880 - 1,08034}{250 - 200} \right) (225 - 200) + 1,08034 = 1,13957$$

$$v_2 = \left(\frac{0,79636 - 0,71629}{250 - 220} \right) (225 - 200) + 0,71629 = 0,75633$$

Ahora, se realiza la interpolación a 250 kPa

P (kPa)	v (m ³ /kg)
200	1,13957
250	
300	0,75633

obteniendo $v = 0,94975 \text{ m}^3/\text{kg}$.

b) hallar por interpolación el volumen para 250 kPa a 200 °C y 250 °C y luego, interpolar para hallar el volumen a 225 °C

P (kPa)	v (m ³ /kg)	
	T=200 (°C)	T=250 (°C)
200	1,08034	1,19880
250	v_1	v_2
300	0,71629	0,79636

$$v_1 = \left(\frac{0,71629 - 1,08034}{300 - 200} \right) (250 - 200) + 1,08034 = 0,89832$$

$$v_1 = \left(\frac{0,79636 - 1,19880}{300 - 200} \right) (250 - 200) + 1,19880 = 0,99758$$

se realiza la interpolación para 225 °C

T (°C)	v (m ³ /kg)
200	0,89832
225	
250	0,99758

finalmente, $v = 0,94975$ m³/kg.

Como era de esperarse, ambos resultados son iguales.

d) Agua a 20.000 kPa y 100 °C

De las tablas de saturación se concluye que el estado es líquido comprimido ya que $P > P_{\text{sat}}$ a $T = 100$ °C o $T < T_{\text{sat}}$ a $P = 20.000$ kPa. En la tabla de líquido comprimido se obtiene directamente que $v = 0,001034$ m³/kg.

Sin embargo en la mayoría de los casos no se dispone de estas tablas por lo que se hace necesario realizar la siguiente aproximación: se aproxima el volumen de líquido comprimido al volumen del líquido saturado a la misma temperatura. Si se utiliza este caso como ejemplo: en la tabla de saturación “entrando por temperatura” a $T = 100$ °C se obtiene $v_f = 0,001044$ m³/kg.

Este último valor es una buena aproximación al volumen de líquido comprimido (con un error del orden de 1%).

¿Se puede realizar esta aproximación “entrando por presión”?

A $P = 20.000$ kPa de la tabla de saturación se obtiene $v_f = 0,002035$ m³/kg. Si se compara este valor con el obtenido de la tabla de líquido comprimido, el error es de mayor magnitud. Por lo tanto se puede concluir que NO se debe realizar la aproximación por presión.

e) Amoníaco a T= 27 °C y P = 150 kPa

Para definir el estado, se debe buscar primero la presión de saturación en las tablas.

$P_{\text{sat}}(27 \text{ °C}) = ?$ este valor no aparece directamente en la tabla por lo cual sería necesario interpolar, sin embargo, si observamos los valores de la presión a las temperaturas 25 °C y 30 °C tenemos

$P_{\text{sat}}(25 \text{ °C}) = 1003,2$ kPa $< P_{\text{sat}}(27 \text{ °C}) < P_{\text{sat}}(30 \text{ °C}) = 1167,0$ kPa de lo que se puede concluir fácilmente que

$P = 150$ kPa $< P_{\text{sat}}(27 \text{ °C}) \Rightarrow$ vapor sobrecalentado, por lo tanto la calidad no se encuentra definida.

En la tabla de vapor sobrecalentado se puede leer directamente la presión deseada (150 kPa) pero es necesario realizar la interpolación entre 20 °C y 30 °C.
a 150 kPa

T (°C)	v (m ³ /kg)
20	0,9382
27	?
30	0,9723

Interpolando se obtiene

$$v = \left(\frac{0,9723 - 0,9382}{30 - 20} \right) (27 - 20) + 0,9382 = 0,96207 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

f) Agua a T = 120 °C y P = 400 kPa

Para determinar el estado

$P_{\text{sat}}(120 \text{ °C}) = 198,5 \text{ kPa} < P \Rightarrow$ líquido comprimido, la calidad no se encuentra definida.

Pero las tablas de líquido comprimido comienzan en 500 kPa, por lo que para obtener un estimado del volumen se puede aproximar el volumen del líquido comprimido al volumen de líquido saturado determinado a partir de la tabla de saturación, teniendo como dato **la temperatura**, por lo que $v = 0,001060 \text{ m}^3/\text{kg}$.

g) Amoníaco a $v = 0,145516 \text{ m}^3/\text{kg}$ y $x = 0,5$

Como la calidad es un dato del estado, se sabe que el estado es un equilibrio, pero no se sabe cual. Para ello se lee primero los valores de v_f y v_g para el equilibrio líquido-vapor, pero se observa que el valor dado ($v = 0,145516 \text{ m}^3/\text{kg}$) se puede encontrar en un amplio rango de temperaturas; entonces se hace necesario realizar una primera aproximación para ubicarse lo más cercano al resultado.

Si se toma en cuenta que

$v_g \gg v_f$ entonces como primera aproximación se podría tomar

$$v = (1 - x)v_f + xv_g \approx xv_g \Rightarrow v_g \approx \frac{v}{x} \approx \frac{0,145516}{0,5} \approx 0,29 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Al intentar ubicar este punto en la tabla se observa que 0 °C, sería una buena aproximación; entonces se calcula la calidad a esta temperatura y posteriormente se verifica si ésta es igual a 0,5 (de forma análoga se puede evaluar la función objetivo: $f(x) = x - 0,5 = ?$).

Es de hacer notar que la tabla de saturación del amoníaco reporta directamente

$$v_{fg} = v_g - v_f$$

Por lo tanto

$$x = \frac{v - v_f}{v_g - v_f} = \frac{0,145516 - 0,001566}{0,28763} = 0,50047$$

lo cual se puede tomar como el resultado correcto, y entonces $P = 429,6 \text{ kPa}$.

h) R-134a $T = 72 \text{ }^\circ\text{C}$ y $P = 520 \text{ kPa}$

Para definir el estado, se lee la presión de saturación de las tablas.

$P_{\text{sat}}(72 \text{ }^\circ\text{C}) = ?$. Este dato no aparece en forma directa en la tabla. De la misma manera que en el ejercicio e), se puede verificar que $P_{\text{sat}}(70 \text{ }^\circ\text{C}) = 2117 \text{ kPa} < P_{\text{sat}}(72 \text{ }^\circ\text{C}) < P_{\text{sat}}(75 \text{ }^\circ\text{C}) = 2364,4 \text{ kPa}$ pudiendo afirmar entonces que $P = 520 \text{ kPa} < P_{\text{sat}}(72 \text{ }^\circ\text{C}) \Rightarrow$ vapor sobrecalentado, la calidad no se encuentra definida.

En la tabla de vapor sobrecalentado se debe realizar una interpolación doble, esto es

$T \text{ }^\circ\text{C}$	$P= 500 \text{ kPa}$	$P= 520 \text{ kPa}$	$P= 600 \text{ kPa}$
70	0,05247		0,04311
72			
80	0,05435		0,04473

Se puede obtener primero el valor de los volúmenes específicos manteniendo las temperaturas, es decir, a $70 \text{ }^\circ\text{C}$ y a $80 \text{ }^\circ\text{C}$ para 520 kPa para posteriormente interpolar a $72 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 1); o se podrían determinar los volúmenes específicos a $72 \text{ }^\circ\text{C}$ tanto a 500 kPa como a 600 kPa y posteriormente interpolara 520 kPa (caso 2). En ambos casos se obtendría prácticamente el mismo resultado.

Caso 1:

$$v_{(520\text{kPa}, 70^\circ\text{C})} = \left(\frac{0,04311 - 0,05247}{600 - 500} \right) (520 - 500) + 0,05247 = 0,050598 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$v_{(520\text{kPa}, 80^\circ\text{C})} = \left(\frac{0,04473 - 0,05435}{600 - 500} \right) (520 - 500) + 0,05435 = 0,052426 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Finalmente interpolando entre estos valores

$$v_{(520\text{kPa}, 72^\circ\text{C})} = \left(\frac{0,052426 - 0,050598}{80 - 70} \right) (72 - 70) + 0,050598 = 0,050964 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Caso 2:

$$v_{(500\text{kPa}, 72^\circ\text{C})} = \left(\frac{0,05435 - 0,05247}{80 - 70} \right) (72 - 70) + 0,05247 = 0,052846 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$v_{(600 \text{ kPa}, 72^\circ\text{C})} = \left(\frac{0,04473 - 0,04311}{80 - 70} \right) (72 - 70) + 0,04311 = 0,043434 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

por último

$$v_{(520\text{kPa}, 72^\circ\text{C})} = \left(\frac{0,043434 - 0,052846}{600 - 500} \right) (520 - 500) + 0,052846 = 0,050964 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Los resultados obtenidos en los dos casos son de nuevo idénticos.

i) Agua a $T = 78,6^\circ\text{C}$ y $P = 46,5 \text{ kPa}$

Primero, se verificará en que estado se encuentra la sustancia, para ello en las tablas de saturación $T_{\text{sat}} (P=46,5 \text{ kPa}) = ?$. No se puede leer directamente el valor. En este caso, a diferencia del ejemplo e), es necesario interpolar con el fin de averiguar cual es la temperatura de saturación que le corresponde a 46,5 kPa ya que el valor suministrado de temperatura ($78,6^\circ\text{C}$) se encuentra entre los valores reportados por la tabla, no pudiendo llegar a una conclusión inmediata. Debe recordarse que en el caso del agua, se hubiera podido resolver el problema tomando la temperatura como dato e interpolando la presión.

P (kPa)	T($^\circ\text{C}$)
38,58	75
46,5	
47,39	80

$$P_{(78,6^\circ\text{C})} = \left(\frac{80 - 75}{47,39 - 38,58} \right) (46,5 - 38,58) + 75 = 79,49^\circ\text{C}$$

$T = 78,6^\circ\text{C} < T_{\text{sat}} (P=46,6 \text{ kPa}) \Rightarrow$ líquido comprimido. (la calidad no se encuentra definida).

Pero las tablas de líquido comprimido comienza en 500 kPa, por lo que se aproximará el volumen del líquido comprimido al volumen del líquido saturado entrando por T. Interpolando se obtiene

$$v_{(170\text{kPa}, 25^\circ\text{C})} = \left(\frac{0,001029 - 0,001026}{80 - 75} \right) (78,6 - 75) + 0,001026 = 0,00102816 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

j) Metano a $T = -78,15^\circ\text{C}$ (195 K) y $P = 4000 \text{ kPa}$

Para definir el estado, se lee la presión de saturación de las tablas.

$T_{\text{sat}} (4000 \text{ kPa}) = ?$. En la tabla se puede verificar que $T_{\text{sat}} (3863,2 \text{ kPa}) = 185 \text{ K} < T_{\text{sat}} (4000 \text{ kPa}) < T_{\text{sat}} (4520,5 \text{ kPa}) = 190 \text{ K}$ por lo que se puede concluir, sin necesidad de interpolar, que la sustancia se encuentra en vapor sobrecalentado ($T = 195 \text{ K} > T_{\text{sat}} (4000 \text{ kPa})$). La calidad no se encuentra definida.

Al estudiar las tablas de vapor sobrecalentado se observa que a 4000 kPa la tabla comienza en 200 K, por lo que será entonces necesario realizar una interpolación entre la tabla de saturación y la tabla de vapor sobrecalentado, para ello a la presión de 4000 kPa se tiene

T (K)	v (m^3/kg)
186,10 (T_{sat})	0,01160
195	

200

0,01763

lo cual produce $v = 0,015461 \text{ m}^3/\text{kg}$

k) R-410a a $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ y $P = 400 \text{ kPa}$

En la tabla de saturación $P_{\text{sat}}(60 \text{ }^\circ\text{C}) = 3836,9 \text{ kPa}$.

$P = 400 \text{ kPa} < P_{\text{sat}}(60 \text{ }^\circ\text{C}) \Rightarrow$ vapor sobrecalentado, por lo tanto la calidad no se encuentra definida.

En las tablas de vapor sobrecalentado se encuentra directamente que el volumen específico a estas condiciones es $v = 0,09207 \text{ m}^3/\text{kg}$.

l) Agua a $v = 0,001047 \text{ m}^3/\text{kg}$ y $P = 392 \text{ kPa}$

Para definir el estado, es conveniente verificar si $v_f < v < v_g$ a la presión dada. En la tabla de saturación no se encuentra la presión directamente, sin embargo se puede notar que el volumen específico dado es menor que los valores de v_f correspondientes a las presiones de 375 kPa y 400 kPa dentro de las cuales se encuentra 392 kPa, entonces para $v = 0,001047 \text{ m}^3/\text{kg} \Rightarrow$ líquido comprimido, la calidad no se encuentra definida.

En las tablas de líquido comprimido la primera presión que aparece es 500 kPa por lo que para obtener un estimado de la temperatura se realizará la aproximación de que el volumen del líquido comprimido es aproximadamente igual al volumen del líquido saturado. Así se busca a que T $v_f = 0,001047 \text{ m}^3/\text{kg}$, al buscar en la tabla se encuentra $T = 105 \text{ }^\circ\text{C}$.

m) Agua a $v = 434 \text{ m}^3/\text{kg}$ y $P = 0,151 \text{ kPa}$

Al entrar a la tabla de saturación se puede notar que la presión es inferior a la presión del punto triple (primera línea de la tabla) y el volumen es mayor. Es necesario determinar el estado a partir de la tabla de saturación sólido-vapor. Para $P = 0,151 \text{ kPa}$, se obtiene $v_i = 0,0010881 \text{ m}^3/\text{kg}$ y $v_g = 785,907 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Como $v_i < v < v_g$ se tiene una mezcla en equilibrio sólido - vapor (MSV) y la temperatura es $-16 \text{ }^\circ\text{C}$.

Finalmente la calidad será

$$x = \frac{v - v_i}{v_g - v_i} = 0,55223$$

n) Agua , tres fases:sólido-líquido-gas

Al conocer que el agua se encuentra en tres fases, el estado corresponde al punto triple. De las tablas de mezcla líquido-vapor o de mezcla sólido-vapor se lee la temperatura y la presión: $T = 0,01 \text{ }^\circ\text{C}$; $P = 0,6113 \text{ kPa}$. El volumen específico no se puede determinar ya que no se conoce la calidad.

ñ) Agua a $v = 360 \text{ m}^3/\text{kg}$ y $x = 0,1$

Teniendo la calidad como dato se sabe que el sistema se encuentra en un equilibrio, pero no se sabe cual. Se busca primero si existen temperaturas o presiones en el equilibrio líquido-vapor para las cuales $v_f < v < v_g$, se observa que el valor dado ($v = 360 \text{ m}^3/\text{kg}$) no está en dichas tablas, se busca entonces en las tablas del equilibrio sólido-vapor.

En las tablas de equilibrio sólido-vapor se puede ver que para temperaturas comprendidas entre -8° y -40°C se cumple que $v_i < v < v_g$. Si se toma en cuenta que $v_g \gg v_i$ entonces, como primera aproximación se podría decir

$$v = (1-x)v_s + xv_g \approx xv_g \Rightarrow v_g \approx \frac{v}{x} \approx \frac{360}{0,1} \approx 3600 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Al intentar ubicar este punto en la tabla se observa que -32°C sería una buena aproximación; entonces al calcular el volumen específico a esta temperatura con $v_i = 0,0010854 \text{ m}^3/\text{kg}$ y $v_g = 3601,822 \text{ m}^3/\text{kg}$, éste es igual a

$$v = v_s + x \cdot (v_g - v_i) = 360,18 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

lo cual se puede tomar como el resultado correcto.

o) Argón a 0,49 MPa y 77 °C

Como no se dispone de las tablas para el argón se recurrirá al diagrama de compresibilidad. Primero es necesario calcular Z_c para verificar si su valor es cercano al valor del Z_c de la carta generalizada a emplear ($Z_c=0,29$), las constantes críticas para el argón son $T_c = 150,8 \text{ K}$, $P_c=4,87 \text{ MPa}$, $v_c = 0,00188 \text{ m}^3/\text{kg}$ y la constante particular del gas $R=0,2081 \text{ kJ/kg K}$, entonces

$$Z_c = \frac{P_c v_c}{RT_c} = \frac{4,87 * 10^6 \text{ Pa} \cdot 0,00188 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}}{0,2081 \frac{\text{kJ}}{(\text{kg K})} \cdot \frac{1000 \text{ J}}{1 \text{ kJ}} \cdot 150,8 \text{ K}} = 0,291$$

este resultado indica que se puede emplear la carta generalizada correspondiente a $Z_c=0,29$. Si el valor de Z_c hubiese diferido del reportado por la carta generalizada se deberá emplear otra carta con el Z_c correspondiente.

$$T_r = \frac{T}{T_c} = \frac{(77 + 273,15) \text{ K}}{150,8 \text{ K}} = 2,32 \quad \text{y} \quad P_r = \frac{P}{P_c} = \frac{0,49 \text{ MPa}}{4,87 \text{ MPa}} = 0,1$$

En la figura diagrama de compresibilidad con T_r y P_r se lee directamente el valor de $Z = 1$, que corresponde al estado de vapor sobrecalentado, y por lo tanto la calidad no se encuentra definida. Para determinar el volumen específico se utilizará entonces la ecuación de gas ideal

$$v = \frac{RT}{P} = \frac{0,2081 \text{ kJ}/(\text{kg K}) \cdot 350,15 \text{ K}}{4900 \text{ kPa}} = 0,014871 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

p) **Monóxido de Carbono a 93,3 K y $x = 0,2$ ($T_c = 132,9$ K, $P_c = 3,50$ MPa, $v_c = 0,00333$ m³/kg, $R = 0,2968$ kJ/kg K por lo que $Z_c = 0,295$)**

Para el monóxido de carbono se empleará el diagrama de compresibilidad con $Z_c=0,29$. Con la temperatura crítica se obtiene $T_r = 0,7$. Al observar el diagrama se puede ver que la curva de $T_r = 0,7$ atraviesa el domo de saturación y sale hacia la zona de vapor sobrecalentado. Debido a que como dato se tiene la calidad se puede concluir que el estado es mezcla líquido-vapor por lo que la presión y la temperatura son propiedades dependientes. Del diagrama se obtiene directamente que $P_r = 0,1$.

Se puede observar que para $T_r = 0,7$ (o $P_r = 0,1$) se pueden ubicar dos puntos en el domo (de manera semejante a lo observado en el diagrama P- v) correspondientes a los estados de líquido saturado y vapor saturado que se denominaran Z_f y Z_g . Del diagrama se obtiene $Z_f = 0,02$ y $Z_g = 0,9$ y se determina Z como

$$Z = (1 - x)Z_f + xZ_g$$

resultando $Z = 0,196$. Sustituyendo los datos en la ecuación (2.25) se obtiene $v = 0,015507$ m³/kg.

q) **Oxígeno a 10,08 MPa y 0,005080 m³/kg ($T_c = 154,6$ K, $P_c = 5,04$ MPa, $v_c = 0,00229$ m³/kg, $R = 0,2598$ kJ/kg K por lo tanto $Z_c = 0,287$)**

Para determinar el estado se empleará el diagrama de compresibilidad con $Z_c=0,29$. Aunque se dispone de dos propiedades termodinámicas no se puede determinar el estado directamente del diagrama ya que en éste no se representa el volumen específico, por lo que es necesario entonces realizar un proceso iterativo.

- 1.- Suponer T_r
- 2.- Leer Z con T_r y $P_r = P/P_c = 2$
- 3.- Calcular v de la ecuación (2.25)
- 4.- Verificar si v calculado = v dato

Otra forma de verificarlo es crear una función $f = v - 0,005080 = 0$ que permitirá obtener la respuesta correcta cuando dicha función sea igual a cero

T_r	Z	v calculada (m ³ /kg)	$f = v_{calculada} - v_{dato}$
1,1	0,4	0,00239	-0,002689
1,3	0,7	0,004184	-0,000896
1,5	0,83	0,004961	-0,000119
2	0,95	0,005678	+ 0,000598

El cambio de signo de la función f , indica que la respuesta se encuentra entre los valores calculados y será necesario interpolar para buscar el valor que justamente anula la función. Interpolando entre $T_r = 1,5$ y $T_r = 2$ se obtiene $T_r = 1,5830$ por lo que $T = 244,73$ K = - 28,41 °C.

r) **Propano a 48,75 °C y 0,0123 m³/kg. ($T_c=369,8$ K, $P_c=4,25$ MPa, $v_c=0,00454$ m³/kg, $R=0,1886$ kJ/kg K por lo tanto $Z_c=0,287$)**

Para esta sustancia se empleará el diagrama de compresibilidad. En este caso, conocido el valor de T_c , se obtiene $T_r = 0,87$ y, como es menor a la unidad (punto crítico), la sustancia se puede encontrar en mezcla líquido-vapor, en vapor sobrecalentado o en líquido comprimido. Al observar el diagrama se puede ver que la curva de $T_r = 0,87$ atraviesa el domo de saturación y sale hacia la zona de vapor sobrecalentado y líquido comprimido. Al igual que cuando se usan las tablas termodinámicas, se realizan los cálculos primero suponiendo que se encuentra en saturación y debe verificarse esta suposición. Para un valor de $T_r = 0,87$, dentro del domo de saturación le corresponde un valor de $P_r = 0,45$. Se leen los valores de Z_f y Z_g correspondientes para determinar v_f y v_g y así definir el estado en que se encuentra.

Para $T_r = 0,87 \Rightarrow Z_f = 0,08$ y $Z_g = 0,70$ se calcula entonces v_f y v_g como:

$$v_f = \frac{Z_f RT}{P} = \frac{0,08 \cdot 0,1886 \text{ kJ}/(\text{kg K}) (48,75 + 273,15) \text{ K}}{(0,45) (4250 \text{ kPa})} = 0,00254 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_g = \frac{Z_g RT}{P} = \frac{0,70 \cdot 0,1886 \text{ kJ}/(\text{kg K}) (48,75 + 273,15) \text{ K}}{(0,45) (4250 \text{ kPa})} = 0,020816 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Como $v_f < v < v_g \Rightarrow$ mezcla líquido-vapor, la presión es $P = P_r \cdot P_c = 1,9125 \text{ MPa}$ y se puede determinar la calidad

$$x = \frac{v - v_f}{v_g - v_f} = \frac{0,0123 \text{ m}^3/\text{kg} - 0,00254 \text{ m}^3/\text{kg}}{0,020816 \text{ m}^3/\text{kg} - 0,00254 \text{ m}^3/\text{kg}} = 0,534$$

s) Propano a 48,75 °C y 0,052654 m³/kg (T_c=369,8 K, P_c=4,25 MPa, v_c=0,00454 m³/kg, R=0,1886 kJ/kg K por lo que Z_c=0,287)

Se empleará el diagrama de compresibilidad para $Z_c = 0,29$ y, para determinar el estado, se debe calcular v_f y v_g . Estos valores se obtuvieron en el problema anterior y para este caso se observa que $v > v_g$ por tanto, el estado es vapor sobrecalentado. Se debe realizar un proceso iterativo como el empleado en el problema 1q).

- 1.- Suponer P_r
- 2.- Leer Z con P_r y $T_r = 0,87$
- 3.- Calcular v
- 4.- Verificar si $f = v - 0,052654 = 0$

P_r	Z	v calculada (m ³ /kg)	$f = v \text{ dato} - v \text{ calculada}$
0,3	0,82	0,039045	-0,01322
0,2	0,85	0,067107	+ 0,014453

Interpolando entre $P_r = 0,3$ y $P_r = 0,2$ se obtiene $P_r = 0,2522$ por lo que $P = P_r P_c = 1,072 \text{ MPa}$

t) Agua a 250 kPa y 225 °C (use el webbook)

Al acceder el webbook a través de la página web del NIST: <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/> se obtiene la siguiente pantalla

Propiedades termofísicas de sistemas fluidos

Están disponibles algunas propiedades termofísicas exactas para varios fluidos. Estos datos incluyen las siguientes propiedades:

- Densidad
- C_p
- Entalpia
- Energía interna
- Viscosidad
- Coeficiente de Joule-Thomson
- Volumen específico
- C_v
- Entropía
- Velocidad del sonido
- Conductividad térmica
- Tensión superficial (Solamente curva de saturación)

Por favor siga los pasos siguientes para seleccionar los datos requeridos.

- Por favor escoja las especies de interés:
- Por favor escoja las unidades que desea usar:

Magnitud	Unidades
Temperatura	<input type="radio"/> Kelvin <input checked="" type="radio"/> Celsius <input type="radio"/> Fahrenheit <input type="radio"/> Rankine
Presión	<input checked="" type="radio"/> MPa <input type="radio"/> bar <input type="radio"/> atm. <input type="radio"/> torr <input type="radio"/> psia
Densidad	<input type="radio"/> mol/l <input type="radio"/> mol/m ³ <input type="radio"/> g/ml <input checked="" type="radio"/> kg/m ³ <input type="radio"/> lb-mole/ft ³ <input type="radio"/> lbm/ft ³
Energía	<input checked="" type="radio"/> kJ/mol <input type="radio"/> kJ/kg <input type="radio"/> kcal/mol <input type="radio"/> Btu/lb-mole <input type="radio"/> kcal/g <input type="radio"/> Btu/lbm
Velocidad	<input checked="" type="radio"/> m/s <input type="radio"/> ft/s <input type="radio"/> mph
Viscosidad	<input checked="" type="radio"/> uPa*s <input type="radio"/> Pa*s <input type="radio"/> cP <input type="radio"/> lbm/ft*s
Tensión superficial*	<input checked="" type="radio"/> N/m <input type="radio"/> dyn/cm <input type="radio"/> lb/ft <input type="radio"/> lb/in

*Solo se encuentran disponibles los valores de tensión superficial a lo largo de la curva de saturación.

- Escoja los datos deseados:
 - Propiedades Isotérmicas
 - Propiedades de saturación- Incrementos de temperatura
 - Propiedades Isobáricas
 - Propiedades de saturación- Incrementos de presión
 - Propiedades isocóricas
- Por favor seleccione la convención del estado patrón deseada:
-

Como se puede observar en la figura anterior en el paso 1 se puede seleccionar el fluido de trabajo (agua en este ejercicio) y en el paso 2 las unidades en que se desean colocar los datos y obtener los resultados (en este caso °C, MPa y kg/m³). En el paso 3 se selecciona que tipo de tabla termodinámica se desea elaborar: a) isotérmica o isobárica para la región de una sola fase (vapor sobrecalentado o líquido comprimido) o las tablas de saturación en incrementos de temperatura o presión.

Para los cálculos PvT que estaremos realizando en este capítulo el paso cuatro se deja por defecto, y finalmente se pulsa el boton para continuar en el paso 5.

La siguiente pantalla se muestra a continuación:

Isothermal Properties for Water

This option will supply data on a constant temperature curve over the specified pressure range. Values should not extend outside the mini to a maximum of 201 data points; increments resulting in a larger number of points will be adjusted upward to limit the number of points computed.

1. Enter temperature in selected units:

225 (Acceptable range: 0.01 to 1001.9 C)

2. Enter pressure range and increment in selected units:

P_{Low} 0.25 (min value: 0.0 MPa)

P_{High} 0.30

$P_{Increment}$ 0.01

- * The maximum pressure limit is the lowest of the following values:

- o 1000.0000 MPa
- o The pressure at which a density of 1332. kg/m3 is reached.

3. Check here if you want to use the display applet (requires Java capable browser)

4. Number of digits to be displayed in tables (does not effect accuracy of computations): 5

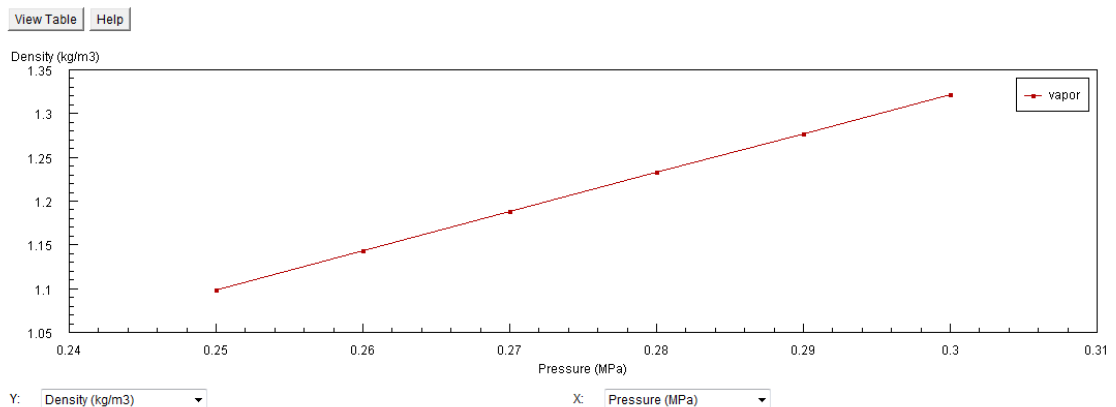
5.

Donde en este ejemplo se ha seleccionado la temperatura de 225 °C y la presión de 0,25 MPa. Como no es posible obtener los datos para un punto específico, en este caso se ha elegido obtener una pequen atable de datos hasta 0,30 MPa con un incremento de presión de 0,01 MPa. Es de obserbar que los rangos de valores maximos y minimos que se pueden trabajar con ese fluido de trabajo son dados. Al presionar el botón para obtener los resultados se obtienen por defecto los resulados en forma grafica como se muestra en la siguiente figura:

Es de hacer notar que los ejes x e y se pueden cambiar fácilmente.

Fluid Data

Isothermal Data for T = 225.00 C



Si se presiona el botón de ver la tabla “view table” se obtendrá:

Fluid Data

Isothermal Data for T = 225.00 C

Temperature (C)	Pressure (MPa)	Density (kg/m3)	Volume (m3/kg)	Internal Energy (kJ/mol)	Phase
225.00	0.25000	1.0990	0.90993	48.488	vapor
225.00	0.26000	1.1434	0.87455	48.483	vapor
225.00	0.27000	1.1879	0.84180	48.478	vapor
225.00	0.28000	1.2325	0.81138	48.472	vapor
225.00	0.29000	1.2770	0.78306	48.467	vapor
225.00	0.30000	1.3217	0.75662	48.461	vapor

Donde en este caso nos indica que el agua a 225 °C y 0,25 MPa posee un volumen específico de 0,90993 m³/kg, en el estado de vapor sobrecalentado.

Es importante recordar que estas tablas termodinámicas se obtienen de ecuaciones de estado multiparamétricas. La sección de Referencias al final de la misma página indica la ecuación de estado utilizada por la elaboración de dicha tabla, y en la próxima pantalla se muestra como ejemplo las referencias para el agua. Adicionalmente en la sección de datos auxiliares se muestran entre otras las propiedades críticas del fluido en estudio.

Auxiliary Data

Reference States

Internal energy	U = 0 at 273.16 K for saturated liquid.
Entropy	S = 0 at 273.16 K for saturated liquid.

Additional fluid properties

Critical temperature (T _c)	373.946 C
Critical pressure (P _c)	22.0640 MPa
Critical density (D _c)	322.000000 kg/m3
Acentric factor	0.3443
Normal boiling point	99.9743 C
Dipole moment	1.855 Debye

References

Equation of state and auxiliary model

Wagner, W.; Pruss, A., *The IAPWS formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use*, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 2002, 31, 2, 387-535. [all data]

Finalmente al comparar el resultado obtenido en este ejercicio, $v = 0,90993 \text{ m}^3/\text{kg}$, con el obtenido en el ejercicio 1c) $v = 0,94975 \text{ m}^3/\text{kg}$. La diferencia ($\sim 4 \%$) puede ser atribuida no sólo al proceso de interpolación doble realizado en el ejercicio 1c, sino a la diferencia de ecuaciones multiparamétricas utilizadas para el agua.

u) **R-134a** $T = 72\text{ °C}$ y $P = 520\text{ kPa}$ (use el webbook)

Al realizar el procedimiento descrito en el ejercicio anterior, seleccionando R-134a como fluido de trabajo, y a manera de ejemplo propiedades isobáricas y realizando la tabla de 72 °C a 80 °C con un incremento de un grado se obtiene:

Fluid Data

Isobaric Data for $P = 0.52000\text{ MPa}$

Temperature (C)	Pressure (MPa)	Density (kg/m ³)	Volume (m ³ /kg)	Internal Energy (kJ/mol)	Phase
72.000	0.52000	19.747	0.050640	44.341	vapor
73.000	0.52000	19.675	0.050825	44.430	vapor
74.000	0.52000	19.604	0.051010	44.520	vapor
75.000	0.52000	19.533	0.051195	44.609	vapor
76.000	0.52000	19.463	0.051379	44.699	vapor
77.000	0.52000	19.394	0.051563	44.788	vapor
78.000	0.52000	19.325	0.051746	44.878	vapor
79.000	0.52000	19.257	0.051929	44.968	vapor
80.000	0.52000	19.189	0.052112	45.058	vapor

Donde se puede observar que el el R-134a a 72 °C y 520 kPa posee un volumen específico de $0,05064\text{ m}^3/\text{kg}$, en el estado de vapor sobrecalentado. En este caso la pequeña diferencia entre el resultado obtenido al comparar con el resultado del ejercicio 1h) $v = 0,05096\text{ m}^3/\text{kg}$, se debe no sólo a la interpolación doble realizada en el ejercicio 1h) sino al espaciado de las tablas utilizadas en dicho ejercicio, ya que la ecuación de estado multiparamétrica para el R-134a usada es la misma en ambos ejercicios.

v) **Propano** a $48,75\text{ °C}$ y $0,0123\text{ m}^3/\text{kg}$. (use el webbook)

Al realizar el procedimiento descrito en el ejercicio 1t), seleccionando propano como fluido de trabajo, y a manera de ejemplo propiedades de saturación isotérmicas, y realizando la tabla desde $48,75\text{ °C}$ con un incremento de $0,05\text{ °C}$ se obtiene:

Fluid Data**Data on Saturation Curve**

[View XY Plot](#)

Temperature (C)	Pressure (MPa)	Density (kg/m3)	Volume (m3/kg)	Internal Energy (kJ/mol)	Phase
48.750	1.6676	undefined	undefined	undefined	liquid and vapor
48.750	1.6676	451.34	0.0022156	14.539	liquid
48.750	1.6676	37.466	0.026691	25.435	vapor
48.800	1.6694	undefined	undefined	undefined	liquid and vapor
48.800	1.6694	451.25	0.0022161	14.546	liquid
48.800	1.6694	37.512	0.026658	25.437	vapor
48.850	1.6713	undefined	undefined	undefined	liquid and vapor
48.850	1.6713	451.15	0.0022166	14.552	liquid
48.850	1.6713	37.559	0.026625	25.439	vapor
48.900	1.6731	undefined	undefined	undefined	liquid and vapor
48.900	1.6731	451.05	0.0022170	14.559	liquid
48.900	1.6731	37.605	0.026592	25.440	vapor
48.950	1.6749	undefined	undefined	undefined	liquid and vapor
48.950	1.6749	450.96	0.0022175	14.565	liquid
48.950	1.6749	37.652	0.026559	25.442	vapor
49.000	1.6768	undefined	undefined	undefined	liquid and vapor
49.000	1.6768	450.86	0.0022180	14.572	liquid
49.000	1.6768	37.698	0.026527	25.444	vapor
49.050	1.6786	undefined	undefined	undefined	liquid and vapor
49.050	1.6786	450.76	0.0022185	14.578	liquid
49.050	1.6786	37.745	0.026494	25.446	vapor

Donde se puede leer que: $v_f = 0,0022156 \text{ m}^3/\text{kg}$ y $v_g = 0,026691 \text{ m}^3/\text{kg}$. Como $v_f < v < v_g$, se puede concluir que el propano se encuentra en el estado de saturación (mezcla liquid-vapor) a 1,6676 MPa, y se puede determinar la calidad

$$x = \frac{v - v_f}{v_g - v_f} = \frac{0,0123 \text{ m}^3 / \text{kg} - 0,002215 \text{ m}^3 / \text{kg}}{0,026691 \text{ m}^3 / \text{kg} - 0,002215 \text{ m}^3 / \text{kg}} = 0,41$$

Al comparar estos resultados con los valores obtenidos utilizando el diagrama de compresibilidad generalizado en el ejercicio 1r) $P = 1,9125 \text{ MPa}$ y $x = 0,53$, se puede concluir que el uso del diagrama de compresibilidad cuando no se dispone de tablas termodinámicas da como resultado buenas aproximaciones, si el diagrama de compresibilidad es usado adecuadamente.

w) Propano a 48,75 °C y 0,052654 m³/kg. (use el webbook)

Al comparar el valor de v con los obtenidos en el ejercicio anterior, se puede concluir que a estas condiciones el propano se encuentra como vapor sobrecalentado.

Al seguir el procedimiento para obtener las propiedades isotérmicas del propano con un incremento de presión de 0,01 MPa se obtiene, que a 48,75 °C y 0,052654 m³/kg el propano tiene una presión de 0,992 MPa. El resultado obtenido en el ejercicio 1s) al utilizar el diagrama de compresibilidad adecuado se obtuvo $P = 1,072 \text{ MPa}$, que nuevamente demuestra la utilidad del diagrama de compresibilidad cuando no se dispone de las tablas termodinámicas adecuadas.

Fluid Data

Isothermal Data for T = 48.750 C

Temperature (C)	Pressure (MPa)	Density (kg/m3)	Volume (m3/kg)	Internal Energy (kJ/mol)	Phase
48.750	0.99000	18.931	0.052824	26.241	vapor
48.750	0.99100	18.953	0.052761	26.240	vapor
48.750	0.99200	18.976	0.052698	26.239	vapor
48.750	0.99300	18.999	0.052635	26.238	vapor
48.750	0.99400	19.021	0.052573	26.237	vapor
48.750	0.99500	19.044	0.052510	26.236	vapor
48.750	0.99600	19.067	0.052447	26.235	vapor
48.750	0.99700	19.090	0.052385	26.234	vapor
48.750	0.99800	19.112	0.052322	26.233	vapor
48.750	0.99900	19.135	0.052260	26.232	vapor
48.750	1.00000	19.158	0.052198	26.231	vapor

x) Agua a $v = 0,001047 \text{ m}^3/\text{kg}$ y $P = 392 \text{ kPa}$ (use el webbook)
 Al seguir el procedimiento descrito en el ejercicio 1t) se obtiene:

Fluid Data

Isochoric Data for D = 955.11 kg/m3

Temperature (C)	Pressure (MPa)	Density (kg/m3)	Volume (m3/kg)	Quality	Phase
104.60	0.34985	955.11	0.0010470	undefined	liquid
104.61	0.36540	955.11	0.0010470	undefined	liquid
104.62	0.38096	955.11	0.0010470	undefined	liquid
104.63	0.39651	955.11	0.0010470	undefined	liquid
104.64	0.41207	955.11	0.0010470	undefined	liquid
104.65	0.42763	955.11	0.0010470	undefined	liquid
104.66	0.44319	955.11	0.0010470	undefined	liquid
104.67	0.45875	955.11	0.0010470	undefined	liquid
104.68	0.47431	955.11	0.0010470	undefined	liquid
104.69	0.48987	955.11	0.0010470	undefined	liquid
104.70	0.50543	955.11	0.0010470	undefined	liquid

Donde se puede leer que: el agua a $v = 0,001047 \text{ m}^3/\text{kg}$ y 392 kPa se encuentra como líquido comprimido a $104.63 \text{ }^\circ\text{C}$. El resultado obtenido para las mismas condiciones en el ejercicio 1l) fue de $105 \text{ }^\circ\text{C}$, lo que demuestra una vez más la utilidad del procedimiento utilizado en el ejercicio 1l.

y) Oxígeno a $10,08 \text{ MPa}$ y $0,005080 \text{ m}^3/\text{kg}$ (use el webbook)

Al utilizar el webbook se obtiene una temperatura de $-39 \text{ }^\circ\text{C}$, que se compara con la temperatura obtenida en el ejercicio 1q: $T = -28,41 \text{ }^\circ\text{C}$.

Fluid Data

Isochoric Data for $D = 196.85 \text{ kg/m}^3$

View XY Plot

Temperature (C)	Pressure (MPa)	Density (kg/m3)	Volume (m3/kg)
-40.000	10.016	196.85	0.0050800
-39.000	10.084	196.85	0.0050800
-38.000	10.152	196.85	0.0050800
-37.000	10.220	196.85	0.0050800
-36.000	10.288	196.85	0.0050800
-35.000	10.356	196.85	0.0050800
-34.000	10.424	196.85	0.0050800
-33.000	10.492	196.85	0.0050800
-32.000	10.560	196.85	0.0050800
-31.000	10.627	196.85	0.0050800
-30.000	10.695	196.85	0.0050800

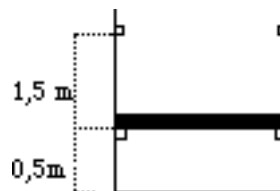
2.- Se tiene un dispositivo como el mostrado en la figura, el cual contiene 40 kg de agua a una temperatura de 70°C . El pistón posee una masa de 551,02 kg, se encuentra a 0,5 m de la base y con un espesor despreciable.

a) Determine el estado inicial (P, T, v, x).

b) Se calienta el agua lentamente hasta que su calidad sea del 10 %. Determine su estado (P, T, v, x).

c) Se sigue calentando el agua hasta que su temperatura sea de 300°C . Si un manómetro diferencial cuyo fluido de trabajo es CCl_4 estuviera conectado al agua, ¿qué diferencia de presión reportaría en ese instante?

Datos adicionales: Presión atmosférica: 100 kPa; Área del pistón: 4 m^2 ; aceleración de la gravedad: $9,8 \text{ m/s}^2$; $\rho(\text{CCl}_4) = 1590 \text{ kg/m}^3$.



a) Estado 1.

El volumen del pistón viene dado por

$$V = A_p \cdot h = 4 \text{ m}^2 \cdot 0,5 \text{ m} = 2 \text{ m}^3$$

por lo que el volumen específico es

$$v = \frac{V}{m} = \frac{2 \text{ m}^3}{40 \text{ kg}} = 0,05 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

para determinar la presión es necesario determinar primero en que estado se encuentra, para ello, de la tabla de saturación del agua se obtiene para $T_{\text{sat}} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$

$$v_f = 0,001023 \text{ m}^3/\text{kg} \quad \text{y} \quad v_g = 5,04217 \text{ m}^3/\text{kg}$$

como $v_f < v < v_g \Rightarrow$ saturación (ELV), entonces $P = P_{\text{sat}} = 31,188 \text{ kPa}$ y

$$x = \frac{v - v_f}{v_g - v_f} = \frac{0,05 - 0,001023}{5,04217 - 0,001023} = 0,009715$$

b) Estado 2.

Como se está calentando lentamente hasta aumentar la calidad a 0,10 se pueden presentar tres situaciones: a) se alcanza la calidad de 0,10 sin que el pistón se eleve de los topes inferiores, con lo cual el sistema se mantendría en saturación a la misma T y P, b) si la presión alcanzada por el calentamiento llega a la presión de equilibrio el pistón se elevará a esta P y el proceso se llevaría a P constante desde la altura de 0,5 m hasta justo tocar los topes superiores a una altura de 2 m, o c) la presión es mayor que la P de equilibrio y el pistón esta ejerciendo fuerza sobre los topes superiores.

La presión de equilibrio se puede calcular realizando un balace de fuerzas en el pistón:

$$P = P_{\text{atm}} + \frac{m_p g}{A_p} = 100 \text{ kPa} + \frac{551,02 \text{ kg} \times 9,8 \text{ m/s}^2}{4 \text{ m}^2} \times \frac{1 \text{ kPa}}{1000 \text{ Pa}} = 101,3 \text{ kPa}$$

Ahora, suponiendo que el pistón toca justo los topes se determinará el volumen específico en este estado hipotético. Si el volumen real es menor a este volumen, entonces el pistón no ha tocado los topes y la presión sería la calculada en el paso anterior.

a $P = 101,3 \text{ kPa}$ se obtiene de las tablas $v_f = 0,001044 \text{ m}^3/\text{kg}$ y $v_g = 1,6729 \text{ m}^3/\text{kg}$

$$v = (1 - x)v_f + xv_g = (1 - 0,1)0,001044 + 0,1(1,6729) = 0,16823 \text{ m}^3/\text{kg}$$

el volumen ocupado sería

$$V = v \times m = 0,16823 \text{ m}^3/\text{kg} \times 40 \text{ kg} = 6,7292 \text{ m}^3$$

y el volumen real del pistón hasta los topes es

$$V = A_p \times h = 4 \text{ m}^2 \times 2 \text{ m} = 8 \text{ m}^3$$

Como el volumen calculado ($6,7292 \text{ m}^3$) es menor al volumen real del cilindro se puede concluir que el pistón no ha tocado los topes superiores sino que se ha desplazado a la presión de equilibrio, por lo tanto las condiciones del estado 2 son $P = 101,3 \text{ kPa}$. $T = T_{\text{sat}}(101,3 \text{ kPa}) = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ y $v = 0,16823 \text{ m}^3/\text{kg}$.

c) Si se aumenta la temperatura es lógico suponer que el pistón llegará a los topes superiores, si esto fuera cierto el volumen específico de este estado vendría dado por

$$v = \frac{V}{m} = \frac{8m^3}{40kg} = 0,20 m^3 / kg$$

Con este volumen y la temperatura dada se puede determinar el estado. Para ello a 300 °C de las tablas de saturación se obtiene: $v_f = 0,001404 m^3/kg$ y $v_g = 0,02167 m^3/kg$.

Como $v = 0,20 m^3/kg > v_g \Rightarrow$ vapor sobrecalentado.

En las tablas de vapor sobrecalentado, al ubicar la temperatura de 300 °C y un volumen de $0,20 m^3/kg$ se observa que es necesario realizar una interpolación entre las presiones de 1200 kPa y 1400 kPa.

A 300 °C		
P = 1200 kPa	P = ?	P = 1400 Pa
$v = 0,21382 m^3/kg$	$v = 0,20 m^3/kg$	$v = 0,18228 m^3/kg$

Al interpolar se obtiene $P = 1287,63 kPa$.

Ahora sólo falta comprobar que el pistón llegó a los topes, para ello basta con comparar esta presión con la presión de equilibrio (determinada en el apartado b).

Como $P = 1287,63 kPa > 101,35 kPa$ el pistón si tocó los topes y las condiciones calculadas anteriormente corresponden al estado 3.

Para determinar que diferencia de presión reportaría el manómetro en este instante, es necesario recordar que los cálculos anteriores fueron realizados en presiones absolutas y que el manómetro reporta presiones relativas (o manométricas), entonces el manómetro reportará

$$P_{man} = P_{abs} - P_{atm} = 1287,63kPa - 100kPa = 1187,63kPa$$

3.- Se tienen dos recipientes A y B conectados mediante una válvula que se encuentra inicialmente cerrada. El recipiente A posee un volumen de $1 m^3$ y el cilindro B dispone en su interior de un pistón, cuyo diámetro es 1 m. El tanque A contiene nitrógeno a una temperatura de $-23,15 °C$; además, posee un manómetro el cual indica una presión de 550 kPa. El cilindro B contiene de igual forma, nitrógeno a una temperatura de 175 K; este cilindro dispone en su interior de un pistón, de espesor despreciable y masa 400 kg, que se encuentra en la posición de equilibrio (a una altura de 2,5 m respecto a la base del tanque). Estas características definen el estado 1.

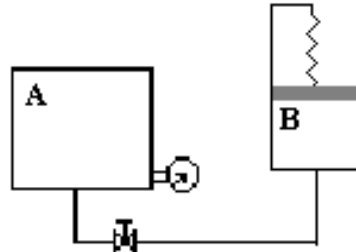
Se abre la válvula hasta que el sistema alcanza el equilibrio termodinámico, siendo la temperatura del tanque A de 200 K. En este momento se cierra la válvula (estado 2).

A continuación (con la válvula cerrada) se procede a calentar el tanque B hasta que el pistón alcance una altura de 6 m respecto a la base del cilindro (estado 3).

a) Especifique todas las propiedades (P , v , T , x) y las masas en cada uno de los tres estados, para cada uno de los tanques.

b) Indique en el diagrama T-v los estados por los que pasa el nitrógeno en el tanque A y en el diagrama P-v los estados que atraviesa el nitrógeno en el tanque B.

Datos adicionales: Presión atmosférica: 100 kPa, aceleración de la gravedad: 9,8 m/s²; constante de elasticidad del resorte: 15 kN/m. Resuelva el problema utilizando las tablas.



a) Estado 1.

Tanque A: (Nitrógeno).

$$T_{A1} = -23,15 \text{ }^\circ\text{C} = 250 \text{ K.}$$

$$P_{\text{man}} = 550 \text{ kPa.}$$

Es importante recordar que el manómetro reporta presiones relativas (o manométricas), entonces la presión absoluta será

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{man}} + P_{\text{atm}} = 550 \text{ kPa} + 100 \text{ kPa} = 650 \text{ kPa} = P_{A1}$$

De las tablas de saturación se observa que a 650 kPa, no se puede leer directamente la temperatura de saturación, sería necesario interpolar, pero vemos que en este caso no es necesario ya que $T_{\text{sat}}(541,1 \text{ kPa}) = 95 \text{ K} < T_{\text{sat}}(650 \text{ kPa}) < T_{\text{sat}}(779,2 \text{ kPa}) = 100 \text{ K}$ y entonces se puede concluir fácilmente que $T = 250 \text{ K} > T_{\text{sat}}(650 \text{ kPa}) \Rightarrow$ vapor sobrecalentado, por lo tanto la calidad no se encuentra definida.

En la tabla de vapor sobrecalentado es necesario realizar una interpolación doble

T(K)	P= 600 kPa	P= 650 kPa	P= 800 kPa
240	0,11803		0,08835
250	0,12308	0,11529	0,09217
260	0,12813		0,09599

Al interpolar siguiendo el procedimiento explicado, por ejemplo en el problema 1c) se obtiene $v_{A1} = 0,11529 \text{ m}^3/\text{kg}$

Tanque B (nitrógeno).

$$T_{B1} = 175 \text{ K}$$

$$m_p = 400 \text{ kg}$$

Al realizar un balance de fuerzas sobre el pistón se obtiene

$$P_{B1} = \frac{mg}{A_p} + P_{atm}$$

donde el área del pistón, A_p , viene dada por

$$A_p = \pi r^2 = \pi(0,5 \text{ m})^2 = 0,7853982 \text{ m}^2$$

entonces

$$P_{B1} = \frac{400 \text{ kg} \times 9,8 \text{ m/s}^2}{0,7853982 \text{ m}^2} + 100 \text{ kPa} \frac{1000 \text{ Pa}}{1 \text{ kPa}} = 104999 \text{ Pa} = 105 \text{ kPa}$$

De las tablas de saturación se observa que $T_{\text{sat}}(101,3 \text{ kPa}) = 77,3 \text{ K}$ y $T_{\text{sat}}(137 \text{ kPa}) = 80 \text{ K}$. Por lo tanto $T = 175 \text{ K} > T_{\text{sat}}(105 \text{ kPa}) \Rightarrow$ vapor sobrecalentado.

De la tabla de vapor sobrecalentado se obtiene

T(K)	P= 100 kPa	P= 105 kPa	P= 200 kPa
160	0,47263		0,23519
175	0,51756	0,50484	0,25786
180	0,53254		0,26542

Después de realizar la interpolación doble se obtiene $v_{B1} = 0,50484 \text{ m}^3/\text{kg}$

Estado 2.

Tanque A:

$$T_{A2} = 200 \text{ K}$$

Tanque B:

$$T_{B2} = 200 \text{ K}$$

$$T_{A2} = T_{B2} = T_2$$

Si el sistema se encuentra en equilibrio termodinámico quiere decir que se encuentra también en equilibrio mecánico (igual presión), es decir: $P_{A2} = P_{B2} = P_2$

De un balance de fuerzas sobre el pistón, se obtiene

$$P_{B2} = P_2 = \frac{mg}{A_p} + P_{atm} + \frac{K\Delta X}{A_p}$$

pero

$$\Delta V = \Delta X A_p \Rightarrow \Delta X = \frac{\Delta V}{A_p} = \frac{V - V_e}{A_p}$$

como en este caso $V_e = V_1$, sustituyendo

$$P_{B2} = P_2 = \frac{mg}{A_p} + P_{atm} + \frac{K\Delta X}{A_p} = \frac{mg}{A_p} + P_{atm} + \frac{K(V_2 - V_1)}{A_p^2}$$

donde

$$V_1 = V_A + V_B = 1 \text{ m}^3 + \pi \times r^2 \times h = 1 \text{ m}^3 + \pi \times (0,5 \text{ m})^2 \times 2,5 \text{ m} = 2,9635 \text{ m}^3$$

pero para el estado 2 no se conoce la altura a la cual llegó el pistón ni la masa que queda en cada tanque, por lo que es más conveniente expresar el estado 2 como un todo (A+B) colocando el volumen en función del volumen específico como

$$v_2 = \frac{V_2}{m_2} \Rightarrow V_2 = v_2 m_2$$

donde

$$m_2 = m_{A1} + m_{B1} = \frac{V_A}{v_{A1}} + \frac{V_B}{v_{B1}} = \frac{1 \text{ m}^3}{0,11529 \text{ m}^3/\text{kg}} + \frac{1,9635 \text{ m}^3}{0,50484 \text{ m}^3/\text{kg}} = 12563 \text{ kg}$$

Al sustituir en el balance de fuerzas se obtiene $P_2 (\text{kPa}) = 32,9273 + 305,498v_2$.

Hasta este momento se conoce la temperatura del sistema y una relación entre la presión y el volumen, por lo tanto el estado se encuentra determinado ya que se disponen de las tablas termodinámicas, pero para resolverlo es necesario realizar un proceso iterativo (“tanteo”). El procedimiento a seguir podría ser

- 1.- Suponer P_2 .
- 2.- Leer v_2 de tablas.
- 3.- Verificar si la presión supuesta es igual a la calculada con la ecuación del balance de fuerzas.

P_2 supuesta (kPa)	v_2 (m ³ /kg)	P_2 calculada (kPa)	$f = P_{\text{supuesta}} - P_{\text{calculada}}$
100	0,59231	213,876	-113,877
200	0,29551	123,2050	+ 76,795

Interpolando se obtiene para $f = 0$ el valor de $P_2 = 159,72 \text{ kPa}$ y $v_2 = 0,4150 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Nótese que la interpolación a $f = 0$ se realizó entre valores muy distantes a cero (-113,877 y 76,795). Aunque esto no es lo deseable, la tabla del nitrógeno no proporciona datos entre 100 kPa y 200 kPa que permitan reducir el error.

Estado 3.
Tanque A:

$$\begin{aligned}T_{A3} &= T_{A2} = 195,5 \text{ K} \\P_{A3} &= P_{A2} = 154,34 \text{ kPa} \\v_{A3} &= v_{A2} = 0,421209 \text{ m}^3/\text{kg}\end{aligned}$$

Tanque B:

$$L_{B3} = 6 \text{ m}$$

La presión se puede determinar a partir del balance de fuerzas

$$P_{B3} = \frac{mg}{A_p} + P_{atm} + \frac{K\Delta X}{A_p} = \frac{mg}{A_p} + P_{atm} + \frac{K(L_3 - L_e)}{A_p} = 171,84 \text{ kPa}$$

Del estado 2 se sabe que la masa total es 11,8555 kg, por lo tanto la masa dentro del tanque B será

$$m_{B3} = m_T - m_{A3} = m_T - \frac{V_A}{v_{A3}} = 10,12 \text{ kg}$$

y el volumen específico en el tanque B en este estado

$$v_{B3} = \frac{V_{B3}}{m_{B3}} = \frac{L_3 A_p}{m_{B3}} = 0,464 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Se conoce la presión y el volumen específico del estado B3, por lo que dicho estado está definido. Falta determinar la temperatura, para ello se debe realizar una interpolación doble en la tabla de vapor sobrecalentado. Es de resaltar, que el valor del volumen específico está comprendido entre valores de temperatura diferentes para las presiones de 100 kPa y 200 kPa.

A P= 100 kPa

T (K)	$v(\text{m}^3/\text{kg})$
140	0,41253
160	0,47263
?	0,464

$$v_{(100 \text{ kPa}, 0,464 \text{ m}^3 / \text{kg})} = \left(\frac{160 - 140}{0,47263 - 0,41253} \right) (0,464 - 0,41253) + 140 = 157,13 \text{ K}$$

A P= 200 kPa

T (K)	$v(\text{m}^3/\text{kg})$
300	0,44503
350	0,51952
?	0,464

$$v_{(200 \text{ kPa}, 0,464 \text{ m}^3/\text{kg})} = \left(\frac{350 - 300}{0,51952 - 0,44503} \right) (0,464 - 0,44503) + 300 = 312,73 \text{ K}$$

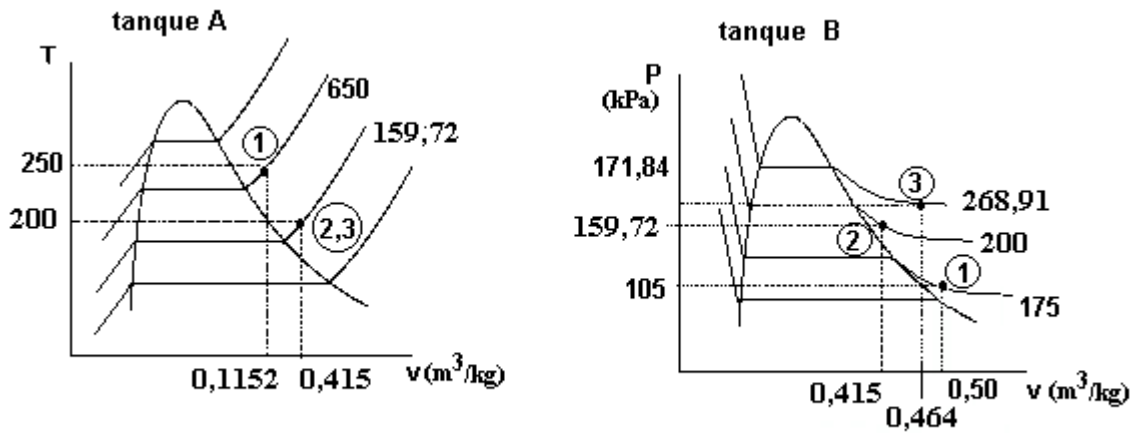
Finalmente para $v=0,464 \text{ m}^3/\text{kg}$

T (K)	P (kPa)
157,13	100
312,73	200
?	171,84

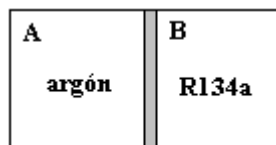
$$v_{(171,84 \text{ kPa}, 0,464 \text{ m}^3/\text{kg})} = \left(\frac{312,13 - 157,13}{200 - 100} \right) (171,84 - 100) + 157,13 = 268,91 \text{ K}$$

De esta manera se obtiene $T_{B3} = 268,91 \text{ K}$.

Al representar los diferentes estados por los que atraviesa el nitrógeno en cada tanque en los diagramas T-v y P-v.



4.- Un pistón altamente conductor de calor separa argón y R-134a en un cilindro, tal como se muestra en la figura. Los volúmenes iniciales de A y B son iguales a $0,5 \text{ m}^3$ cada uno. La temperatura inicial en ambos compartimientos es $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y el volumen de R-134a líquido es 2% del volumen total en B. Si se transfiere calor de A a B hasta que la calidad en B sea del 88%, determine todas las propiedades (P, T, v, x) de cada sustancia en los estados iniciales y finales.



Estado 1.

Tanque B: (R-134a)

$$V_{B1} = 0,5 \text{ m}^3$$

$$T_{B1} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\%V_{fB1} = 0,02$$

Bajo estas condiciones el R-134a se encuentra en mezcla líquido-vapor, por lo que directamente de las tablas se obtiene $P = 572,8 \text{ kPa}$ y $v_f = 0,000817 \text{ m}^3/\text{kg}$ y $v_g = 0,03606 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Por consiguiente la calidad vendrá dada por

$$x_{B1} = \frac{m_g}{m_g + m_f} = \frac{V_g/v_g}{\frac{V_g}{v_g} + \frac{V_f}{v_f}} = \frac{\%V_g V/v_g}{\frac{\%V_g V/v_g}{v_g} + \frac{\%V_f V/v_f}{v_f}} = \frac{1}{1 + \frac{\%V_f v_g}{(1 - \%V_f)v_f}}$$

al sustituir los valores en la ecuación anterior se obtiene $x_{B1} = 0,5261$ y con esta calidad se puede obtener el volumen específico a partir de la ecuación (2.20): $v_{B1} = 0,019358 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Tanque A: (argón)

$$V_{A1} = 0,5 \text{ m}^3$$

$$T_{A1} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

Además se conoce que $R = 0,2081 \text{ kJ/kg K}$; $T_c = 150,8\text{K}$; $P_c = 4,87 \text{ MPa}$, $v_c = 0,00188 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Al realizar un balance de fuerzas en el pistón se puede concluir que $P_{A1} = P_{B1} = 572,8 \text{ kPa}$.

Del diagrama de compresibilidad se obtiene:

$$\left. \begin{array}{l} T_{A1} = 20 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow T_r = T/T_c = 1,94 \\ P_{A1} = 572,8 \text{ kPa} \Rightarrow P_r = P/P_c = 0,12 \end{array} \right\} Z \approx 1$$

Se puede entonces calcular

$$v_{A1} = \frac{RT_{A1}}{P_{A1}} = 0,1065 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Estado 2.

$$X_{B2} = 0,88$$

$T_{A2} = T_{B2} = T_2$, ya que el pistón es altamente conductor de calor (diatérmico).

$P_{A2} = P_{B2} = P_2$, del balance de fuerzas.

Si se conociera T_2 o P_2 o una relación adicional el problema estaría completamente definido. En este caso, por ser un sistema rígido, se conoce que el volumen total permanece constante

$$V_T = 1 \text{ m}^3 = m_A v_{A2} + m_B v_{B2}$$

Ya que el R-134a se encuentra en equilibrio líquido-vapor y suponiendo que el argón se continúa comportando como un gas ideal, la ecuación anterior puede ser expresada como

$$m_A \frac{RT_2}{P_2} + m_B (0,12v_f + 0,88v_g) - 1 = f$$

donde las masas pueden ser calculadas a partir de los estados iniciales dando como resultado $m_A = V_{A1} / v_{A1} = 4,69 \text{ kg}$ y $m_B = V_{B1} / v_{B1} = 25,83 \text{ kg}$.

Un posible esquema de resolución sería

- 1.- Suponer T_2 .
- 2.- Leer P_2 , v_f y v_g de la tabla de saturación del R-134a.
- 3.- Verificar que se cumpla la ecuación anterior.

T_2 (°C)	P_2 (kPa)	v_f (m ³ /kg)	v_g (m ³ /kg)	f
20	572,87	0,000817	0,03606	0,321686
25	666,3	0,000829	0,03098	0,14348
30	771,0	0,000843	0,02671	-0,006508

Interpolando entre 25 (°C) y 30 (°C) se obtiene $T_2 = 29,78 \text{ °C}$ y $P_2 = 766,46 \text{ kPa}$. Para el R-134a $v_f = 0,000842 \text{ m}^3/\text{kg}$, $v_g = 0,02689 \text{ m}^3/\text{kg}$ (interpolando a $T_2 = 29,78 \text{ °C}$) por lo que el volumen específico es $0,023764 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Para el argón, con T_2 y P_2 se debe verificar que se comporta como gas ideal. En el diagrama de compresibilidad, para $T_r = T / T_c = 2$ y $P_r = P / P_c = 0,157$ se obtiene $Z = 1$, y por lo tanto el volumen específico será $0,082248 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Problemas propuestos

- 1.- Seleccione la respuesta correcta (V o F).
 - () En un diagrama T-v el equilibrio sólido-vapor se encuentra sobre la línea triple.
 - () La presión atmosférica es equivalente a 10 m de agua.
 - () Si se tiene P y v_i se encuentra definido el estado de una mezcla sólido-vapor.
 - () El factor de compresibilidad Z es siempre menor o igual a la unidad.
 - () Las propiedades críticas T_c , P_c , Z_c son constantes para un compuesto dado.
 - () La temperatura del punto triple del agua es $0,01 \text{ °C}$.

- () La presión manométrica es la presión atmosférica más la presión absoluta.
- () La constante universal de los gases es $0,7302 \text{ atm pie}^3 / \text{lbm R}$.
- () La presión ejercida por un fluido siempre actúa en dirección normal a la superficie del fluido considerado.
- () El manómetro Bourdon mide la presión absoluta de un sistema.
- () Al representar gráficamente Pv/T en función de P , para diferentes sustancias, si P tiende a cero, estas curvas convergen a un mismo valor.
- () En el Valle de Sartenejas la presión atmosférica es 760 mmHg y la aceleración de la gravedad es $9,81 \text{ m/s}^2$.

2.- Un termómetro Celsius y otro Fahrenheit están sumergidos en un fluido. Si la lectura del termómetro Fahrenheit es numéricamente el doble de la del termómetro Celsius. ¿Cuál será la temperatura del fluido expresada en R y K?

3.- Se compara la escala Celsius con una nueva escala de temperatura denominada M, obteniéndose el siguiente resultado:

T (°C)	X (cm)	T* (°M)
100	52,5	100
0	7,5	0

La relación entre la propiedad termométrica X y las escalas de temperatura es:

$$T = aX + b$$

$$T^* = cX^2 + d$$

siendo a, b, c y d constantes a ser determinadas a partir de los datos suministrados. Deducir la expresión para convertir los °C a °M.

4.- Si dos termómetros, uno en °C y otro en °F, sumergidos en un sistema indican el mismo valor numérico. ¿Cuál es la temperatura del sistema?

5.- En la escala de temperatura Reaumur se asigna un valor de cero al punto de fusión del agua y un valor de 80 al punto de ebullición, ¿Cuál es la temperatura del cero absoluto en esta escala?

6.- Complete la siguiente tabla usando el procedimiento que considere más exacto.

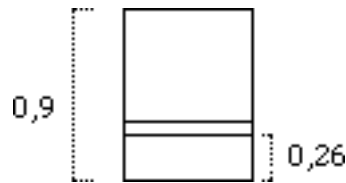
Sustancia	Temperatura (°C)	Presión (MPa)	Volumen Específico (m ³ /kg)	Calidad	Región
Agua			206,14	0,85	
Amoníaco		1	0,1598		
Helio	24,08		0,233447		
Oxígeno	-118,57		0,002293		
R-134a	39,4	1,4			
Nitrógeno		0,779		0,8	
Agua		10,547			LS
Amoníaco	50			1	
R-134a		0,2	0,12895		
Aire	200	0,2			
R-134a		1,8	0,000917		
R-134a			0,0123382	0,8	
n-C ₄ H ₁₄	88			0,5	
CH ₄	-83,15	4			
Agua		0,3613	0,004		
Agua		0,0005176	150		
Agua	374,14	22,09			
Agua		0,0005176	0,0050321		
Amoníaco		0,23	0,001504		
R-134a	70	1,3			
Óxido nitroso	23		0,0023		
Metano	-161,81	0,1			
Amoníaco		0,175	0,78		
Agua			1215	0,93	
R-134a		0,6614	0,000648		
CO ₂	25	0,1			

Agua		0,0000309		0,35	
Dióxido de azufre		5	0,002		
Nitrógeno	-163,15	2,5135			
R-134a			0,0327	0,7	
Oxígeno	200	8			
Propano			0,0139	0,7	
Agua		3,2	0,13		
R-134a	115	1,7			
Oxígeno	1179	5			
Helio	24,08		0,233447		
Nitrógeno			0,031313	0,69	
Agua		0,8920	0,001096		
Hidrógeno		0,7	1,7566		
Oxígeno	-218,8	0,00015			
R-134a	145	2,5			
Metano	-94,15	3,5			
Amoníaco	25	0,75			
Nitrógeno	-178,15	0,5411			
R-134a			0,02	0,45	
Agua		3,09E-05	1240		
Oxígeno	-148,15	2			
Metano		4	0,012373		
Amoníaco	24	1,31155			
R-134a		1,80	0,01421		
Agua	300		0,001330		
Nitrógeno	-147,05	3,4			
Agua	-21			0,82	
Argón	-137,25		0,006921		
Nitrógeno	-46,15	2			

Amoníaco		1		0,8	
Metano	500	1			
Oxígeno	-210,15			0,25	
Agua	142		0,12		
Hidrógeno		0,7	1,7766		
Metano		1,8	0,03117		

7.- Se tiene un dispositivo como el mostrado en la figura. El comportamiento A contiene 5 kg de agua y el compartimiento B 10 kg de *n*-butano. Inicialmente, el manómetro conectado al compartimiento A indica una presión de 0,75 MPa y el pistón se encuentra a una altura de 0,26 m (estado 1). Se calienta el agua hasta que el pistón llega a una altura de 0,3 m. En este momento, el agua posee una calidad de 0,92 (estado 2). Determine los estados 1 y 2 (*P*, *T*, *v*, *x*) en A y B. Indique la posición de los puntos en los diagramas *T-v* y *T-P*.

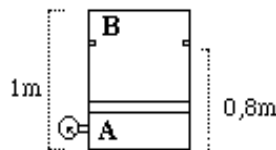
Datos adicionales: $A_p = 1 \text{ m}^2$; $g = 10 \text{ m/s}^2$; $m_p = 0,5 \text{ kg}$; $P_{\text{atm}} = 0,1 \text{ MPa}$.



8.- Se dispone de un sistema como el mostrado en la figura. En el compartimiento A hay 2 kg de agua y en el B 1,5 kg de nitrógeno. Ambos compartimientos están separados por un pistón adiabático. Inicialmente el pistón se encuentra a 0,4 m del fondo, en el compartimiento A la temperatura es de 165 °C y el manómetro indica una presión de 600,5 kPa (estado 1). Se calienta el compartimiento A hasta que el pistón alcance una altura de 0,6 m, momento en que la calidad del agua es 80% (estado 2). Se sigue calentando el sistema hasta que la temperatura en A es de 1200 °C y en B es de 300 K (estado 3). Determine:

- Los estados 1, 2 y 3 del agua (*P*, *T*, *v*, *x*, fase) y la altura que alcanza el pistón en el estado 3.
- Los estados 1 y 3 del nitrógeno (*P*, *T*, *v*, *x*, fase).
- Represente los estados 1, 2 y 3 del agua en los diagramas *T-v* y *P-T*.

Datos adicionales: área del pistón: 0,2 m², masa del pistón: 10 kg, aceleración de la gravedad: 9,8 m/s², presión atmosférica: 100 kPa.



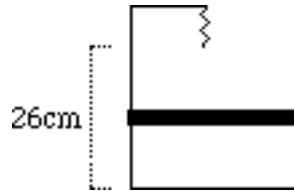
9.- Considere un arreglo cilindro-pistón el cual contiene 40 gramos de agua a una temperatura de 450 °C y una presión de 7,8 MPa (estado 1). Se retira calor del sistema hasta que el pistón

se encuentra a 30 cm medidos respecto a la base del cilindro (estado 2). Se continúa retirando calor hasta que el sistema alcanza una temperatura de 150 °C.

- Defina el estado inicial e indique la altura a la que se encuentra el pistón.
- Defina el estado 2.
- Defina el estado 3 e indique donde se encuentra el pistón.

Datos adicionales: constante de elasticidad del resorte: 0,997 kN/m; área del pistón: 0,0005 m²; presión atmosférica: 0,1 MPa.

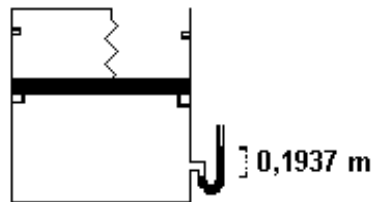
NOTA: El resorte no está soldado al pistón por lo que se encuentra libre a 26 cm.



10.- Considere un arreglo cilindro-pistón el cual contiene 40 kg de agua con una calidad del 50%, el pistón descansa sobre los topes y el resorte no ejerce ninguna fuerza.

- Defina el estado inicial.
- Se transmite calor hasta una temperatura de 125 °C en donde comienza a elevarse el pistón. Determine el estado.
- Se sigue calentando hasta una temperatura de 386 °C llegando justo el pistón a los topes. Determinar la presión y el volumen.
- Se continúa calentando hasta una temperatura de 800 °C. Determinar la presión.

Datos adicionales: constante de elasticidad del resorte: 0,1 kN/m; área del pistón: 0,05 m²; densidad del líquido manométrico: 13600 kg/m³, presión atmosférica: 0,1 MPa; masa del pistón: 667,2 kg; altura del líquido manométrico: 0,1937 m.



11.- Se tienen dos cilindros A y B de área transversal 0,1 m² y 0,01 m² respectivamente, que están conectados mediante una válvula de paso que se encuentra inicialmente cerrada. El cilindro A contiene en su interior argón a una temperatura de 207,31°C, además, posee un manómetro el cual indica una presión de 400 kPa. En el cilindro B se encuentra contenido amoníaco a una temperatura de - 8 °C y una calidad de 30,66 %, este cilindro dispone en su interior de un pistón, de altura despreciable y masa 5,102 kg, reposando en el fondo. Estas características definen el estado 1.

Se abre la válvula de paso lentamente, de modo que el argón comienza a fluir hacia el tanque B de manera isotérmica. Cuando el manómetro del tanque A indica una presión de 300

kPa, se cierra la válvula. En este momento el pistón se encuentra a 5,26 m de la base del cilindro B (estado 2).

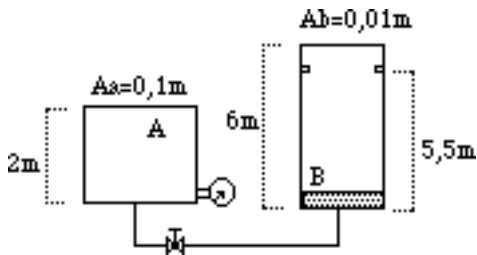
A continuación (con la válvula cerrada) se procede a calentar el tanque B hasta que el pistón toque los topes, momento en el cual la calidad del amoníaco es de 12,43 % (estado 3).

a) Especifique todas las propiedades (P , v , T , x), en cada uno de los tres estados, para el argón y para el amoníaco.

b) ¿Por qué no se utiliza un manómetro diferencial de mercurio (densidad del mercurio: $13,6 \text{ g/cm}^3$)?. Justifique su respuesta.

c) Indique en los diagramas $T-v$ y $P-v$ los diferentes estados por los que atraviesa el amoníaco.

Datos adicionales: presión atmosférica: 100 kPa, aceleración de gravedad: $9,8 \text{ m/s}^2$.



12.- Se tiene un tanque dividido en dos compartimientos A (helio) y B (amoníaco) por un pistón de masa 5 kg cuya área es $0,1 \text{ m}^2$. El recipiente mide 40 cm de altura y el pistón está en la mitad. En la parte superior del compartimiento A se encuentra suspendido un resorte de 1,5 dm de longitud y una constante elástica de 15 N/mm. En el estado inicial, la presión del helio es 0,2 MPa y la temperatura $60 \text{ }^\circ\text{C}$, mientras que el amoníaco tiene una calidad del 60%. Se calienta el compartimiento B y se enfría el A hasta que el pistón alcance una altura de 0,3 m, momento en el cual la temperatura del amoníaco es de $100 \text{ }^\circ\text{C}$ (estado 2). Se fija ahora el pistón con una clavija y se detiene el calentamiento. Se abre en este momento la válvula del tanque inferior, dejando salir 20 g de amoníaco. Al final de la operación y después de haber enfriado de nuevo el amoníaco, la calidad en B es del 85 % (estado 3). Calcule:

a) La masa de helio y amoníaco en el estado 1.

b) La temperatura del helio en el estado 2.

c) La temperatura final del amoníaco en el estado 3.

d) Represente los estados 1, 2 y 3 para el amoníaco en un diagrama $T-v$.

13.- Un automovilista equipa los neumáticos de su vehículo con una válvula de seguridad, de manera que la presión interior (manométrica) nunca exceda de 240 kPa. Inicia un viaje con una presión de 200 kPa y una temperatura de $23 \text{ }^\circ\text{C}$ en el aire de los neumáticos. Durante el prolongado viaje la temperatura de los neumáticos alcanza $83 \text{ }^\circ\text{C}$. Cada uno de ellos contiene 0,11 kg de aire. Determine:

a) La masa de aire que escapa de cada neumático.

b) Temperatura a la cual comienza a salir el aire.

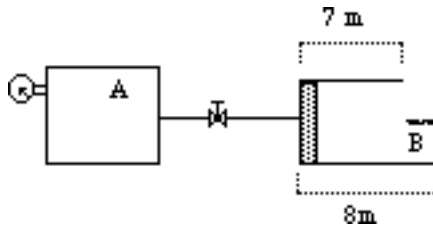
c) Presión de los neumáticos cuando la temperatura vuelve a $23 \text{ }^\circ\text{C}$.

Datos adicionales: $T_c(\text{aire}) = 132,5 \text{ K}$; $P_c(\text{aire}) = 3,77 \text{ MPa}$; $M(\text{aire}) = 28,96$.

14.- Se tiene un dispositivo conformado por un tanque de $1,5 \text{ m}^3$ conectado mediante una válvula a un cilindro dispuesto horizontalmente y abierto a la atmósfera de área transversal 0,3

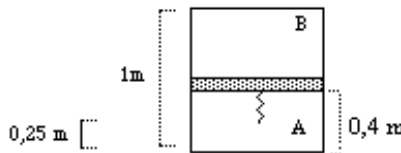
m². El cilindro posee en el extremo izquierdo un pistón de masa 20 kg y en el extremo derecho un resorte (K=0,05 kN/m) que se encuentra a 7 m de la base. El tanque contiene 111 kg de *n*-butano con una calidad de 25 % (estado 1). A continuación el tanque se calienta hasta 300 °C (estado 2), en este momento se abre la válvula y se dejan fluir 2,5 kg de *n*-butano hacia el pistón de manera isotérmica (estado 3). Se cierra la válvula. Calcule:

- a) Presión y temperatura del *n*-butano en el tanque en el estado 1.
- b) Longitud que se desplaza el pistón en el estado 3.
- c) Lectura del manómetro Bourdon en el estado 3. Indique si podría sustituirse por un manómetro diferencial de mercurio ($\rho = 13,6 \text{ g/cm}^3$). Justifique su respuesta.



15.- Se tiene el sistema mostrado en la figura. El compartimiento A contiene 1 kg de agua con una calidad de 6,4 % y el B contiene 3 kg de neón. El cilindro tiene en su interior un pistón de masa 10 kg y área transversal 0,1 m² con un resorte (K=158 kN/m) que cuelga de él y cuyo extremo inferior se encuentra a 0,25 m de la base del cilindro y el pistón a 0,4 m (estado 1). El compartimiento B es sometido a calentamiento hasta que A alcanza una temperatura de 40 °C y en ese momento la altura del pistón es 0,1 m con respecto a la base (estado 2). Defina:

- a) Los estados 1 y 2 para ambos compartimientos.
- b) Dibuje en el diagrama P-T el proceso ocurrido en el agua.



Respuestas a los problemas propuestos

1.- F V F F V V F V F F V

2.- La temperatura en Rankine será 443,69 y en Kelvin 248,53

3.- $T^* (\text{°M}) = 0,0075 T^2 + 0,25 T + 2,08$ donde T viene en °C

4.- -40

5.- -212,52 °

6.-

Sustancia	Temperatura (°C)	Presión (MPa)	Volumen Específico (m ³ /kg)	Calidad	Región
Agua	-2,02	0,00052	206,14	0,85	MSV
Amoníaco	74,91	1	0,1598	N.E.D.	VSC
Helio	24,08	2,71	0,233447	N.E.D.	VSC
Oxígeno	-118,57	5,0427	0,002293	punto	critico
R-134a	39,4	1,4	0,00087	N.E.D.	L.C.
Nitrógeno	-173,15	0,779	0,02537	0,8	MLV
Agua	315	10,547	0,001472	0	LS
Amoníaco	50	2,032	0,0635	1	VS
R-134a	52,96	0,2	0,12895	N.E.D.	VSC
Aire	200	0,2	0,67897	N.E.D.	VSC
R-134a	52,4	1,8	0,000917	N.E.D.	LC
R-134a	49,76	1,310	0,0123382	0,8	MLV
n-C ₄ H ₁₀	88	1,197	0,0175	0,5	MLV
CH ₄	-83,15	4	0,01237	N.E.D.	VSC
Agua	140	0,3613	0,004	0,0058	MLV
Agua	-2	0,0005176	150	0,6206	MSV
Agua	374,14	22,09	0,003155	Punto	critico
Agua	-2	0,0005176	0,0050321	1,6 E-5	MSV
Amoníaco	-20	0,23	0,001504	N.E.D.	LC
R-134a	70	1,3	0,017767	N.E.D.	VSC
Óxido nitroso	23	5,3798	0,0023	0,2237	MLV
Metano	-161,81	0,1	No se puede	definir	MLV
Amoníaco	7,02	0,175	0,78	N.E.D.	VSC
Agua	-21,548	0,000089	1215	0,93	MSV

R-134a	-85	0,6614	0,000648	N.E.D.	LC
CO₂	25	0,1	0,88497	N.E.D.	VSC
Agua	-32	0,0000309	1260	0,35	MSV
Dióxido de azufre	129,55	5	0,002	0,1853	MLV
Nitrógeno	-163,15	2,5135	0,001613	N.E.D.	LC
R-134a	12,087	0,445	0,0327	0,7	MLV
Oxígeno	200	8	0,016215	N.E.D.	VSC
Propano	65.59	2,343	0,0139	0,7	MLV
Agua	639,89	3,2	0,13	N.E.D.	VSC
R-134a	115	1,7	0,02001	N.E.D.	VSC
Oxígeno	1179	5	0,075496	N.E.D.	VSC
Helio	24,08	2,71	0,233447	N.E.D.	VSC
Nitrógeno	-178.15	0,5411	0,031313	0,69	MLV
Agua	155	0,8920	0,001096	N.E.D.	LC
Hidrógeno	25	0,7	1,7566	N.E.D.	VSC
Oxígeno	-218,8	0,00015	No se puede	definir	Pto. Triple
R-134a	145	2,5	0,01049	N.E.D.	VSC
Metano	-94,15	3,5	0,003574	N.E.D.	LC
Amoníaco	25	0,75	0,17869	N.E.D.	VSC
Nitrógeno	-178,15	0,5411	No se puede	definir	MLV
R-134a	9,066	0,4	0,02	0,45	MLV
Agua	-32	3,09E-05	1240	0,34	MSV
Oxígeno	-148,15	2	0,00107	N.E.D.	LC
Metano	-83,14	4	0,012373	N.E.D.	VSC
Amoníaco	24	1,31155	0,001655	N.E.D.	LC
R-134a	148,54	1,8	0,01421	N.E.D.	VSC
Agua	300	30	0,001330	N.E.D.	LC
Nitrógeno	-147,05	3,4	0,003184	N.E.D.	Pto. Crítico
Agua	-21	9,44E-05	1019,63	0,82	MSV

Argón	-137,25	2,33	0,006921	0,79	MLV
Nitrógeno	-46,15	2	0,03577	N.E.D.	VSC
Amoníaco	24,9	1	0,1033	0,8	MLV
Metano	500	1	0,3967	N.E.D.	VSC
Oxígeno	-210,15	0,00238	3,9545	0,25	MLV
Agua	142	0,3829	0,12	0,246	MLV
Hidrógeno	28,4	0,7	1,7766	N.E.D.	VSC
Metano	-110,26	1,8	0,03117	0,876	MLV

7.-

Estado	P (MPa)	T (°C)	v (m ³ /kg)	X
1a	0,85	172,96	0,052	0,22
1b	0,85	130,79	0,064	VSC
2a	3	235,45	0,060	0,92
2b	3,07	940,32	0,060	VSC

8.-

Estado	P (kPa)	T (°C)	v (m ³ /kg)	X
1a	700,5	165	0,04	0,1432
1b	700,5	-83,9	0,08	VSC
2a	2727	228,28	0,060	0,8
3a	8517	1200	0,080	VSC
3b	3600	300 K	0,0266	VSC

9.-

Estado	P (MPa)	T (°C)	v (m ³ /kg)	X	altura (m)
1	7,8	450	0,03937	VSC	3,14
2	2,13	212,36	0,00375	0,027	0,30
3	2,057	150	0,001041	LC	0,087

10.-

Estado	P (MPa)	T (°C)	v (m ³ /kg)	X
1	0,1258	105,99	0,6879	0,5
2	0,23	125	0,6879	0,8925
3	0,4		0,7561	

d) P = 0,66 MPa.

11.-

Estado	P (kPa)	T (°C)	v (m ³ /kg)	X
a	31,19		0,05	0,0097
b	101,35	100	0,1681	0,1

c) $\Delta P = 1,1875$ MPa.

12.- a) $m_{\text{He}} = 5,78\text{E-}03$ kg ; $m_{\text{H}_2\text{O}} = 0,05596$ kg ; b) $T_{\text{He}} = 273,74$ K ; c) $T_{\text{NH}_3} = -30,38$ °C.

13.- a) $m_s = 0,006$ kg ; b) $T_s = 335,46$ K ; c) $P_f = 282,7$ kPa.

14.- a) $P_1 = 856$ kPa ; $T_1 = 346,31$ K ; b) $L = 6,69$ m ; c) $P = 4,8$ MPa. No la altura es muy grande 37,4 m.

15.-

Estado	P (kPa)	T (°C)	v (m ³ /kg)	X
1a	299,31	133,4	0,04	
1b	298,33		0,02	0,4758
2a	7,38		0,01	0,00046
3b	85,4	26,7	0,03	0,2371

CAPÍTULO 3

TRABAJO Y CALOR

El concepto de energía fue introducido por primera vez por Newton, y se conoce como la capacidad para producir un efecto. Es una magnitud escalar que no puede observarse directamente, pero que puede registrarse y valorarse por medidas indirectas. En el sistema internacional su unidad es el **Joule**.

La energía puede existir en diferentes formas, interna o transitoria, y cualquier forma de energía puede convertirse en otra distinta. La conversión puede ser completa o parcial.

La energía interna es la asociada con la configuración y el movimiento de las moléculas, átomos y partículas sub-atómicas relativas a su centro de masa; son ejemplo de este tipo la energía potencial, cinética, química y atómica o molecular.

La energía en transición es la asociada a una diferencia de potencial: gradiente de fuerza, temperatura y/o potencial eléctrico, dando lugar a una transferencia de trabajo mecánico, calor y/o energía eléctrica, siendo las dos primeras las que se estudiarán en este capítulo.

3.1. Trabajo.

Definición mecánica

El trabajo mecánico es el producto de una fuerza externa que actúa en los límites de un sistema por la distancia a lo largo de la cual se desplaza su línea de acción. Matemáticamente se puede definir el trabajo como

$$W = \int_c \underline{F} \cdot d\underline{s} \quad (3.1)$$

Considerando el movimiento en una sola dirección, el trabajo realizado es

$$W_{1-2} = \int_{x_1}^{x_2} F_x dx \quad (3.2)$$

donde F_x es la componente de la fuerza en la dirección del desplazamiento.

Un sistema NO contiene trabajo, sino que puede tener la capacidad de realizar un trabajo, o el trabajo puede ser realizado sobre él.

Definición termodinámica

El trabajo que no es de naturaleza mecánica, y por lo tanto no puede expresarse por medio de la ecuación anterior, puede reconocerse como trabajo con el siguiente criterio: un sistema ejecuta un trabajo si el único efecto en el medio exterior (alrededores) pudiese ser el levantamiento de un peso.

El trabajo por unidad de tiempo, se denomina potencia y viene dado por

$$\dot{W} = \frac{\partial W}{\partial t} \quad [\dot{W}]: \text{watt} \quad ; \quad 1 \text{ w} = 1 \text{ J/s} \quad (3.3)$$

El trabajo por unidad de masa se denomina trabajo específico y viene dado por

$$w = \frac{W}{m} \quad [w]: \text{ J/kg} \quad (3.4)$$

Convención de signos

La convención de signos se elige de forma arbitraria. La más utilizada, y la adoptada en este libro es:



Trabajo realizado **sobre** el sistema: - (negativo)

Trabajo realizado **por** el sistema: + (positivo)

Trabajo en sistemas simplemente compresibles

Si se sustituye la ecuación (2.6) en la (3.2) se obtiene la siguiente expresión para el trabajo

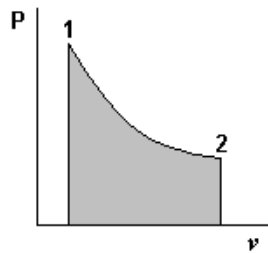
$$W_{1-2} = \int_1^2 P dV \quad (3.5.a)$$

que, en términos específicos es

$$w_{1-2} = \int_1^2 P dv \quad (3.5.b)$$

Esta ecuación es válida sólo en aquellos procesos que pasan por infinitos estados de equilibrio, los cuales son llamados procesos de cuasiequilibrio o cuasiestáticos.

El proceso de expansión-compresión puede representarse en un diagrama P-v de la siguiente manera



De este diagrama se observa que el trabajo está representado por el área bajo la curva. Si el proceso se lleva a cabo del estado 1 al estado 2 el trabajo es efectuado por el sistema, en caso contrario sería realizado sobre el sistema. Puesto que el área bajo la curva representa el trabajo, es evidente que éste no sólo es una función de los estados 1 y 2, sino que depende de la trayectoria que se sigue cuando se va de un estado a otro. Por esta razón el trabajo es una función de trayectoria, o en el lenguaje matemático es una diferencial inexacta, lo que se puede escribir como

$$W_{1-2,A} = \int_1^2 \partial W \neq W_2 - W_1 \quad (3.6)$$

donde A indica la trayectoria utilizada. Mientras que las propiedades termodinámicas, por ser funciones de punto, son diferenciales exactas y la integración es simple

$$\int_1^2 dV = V_2 - V_1 \quad (3.7)$$

Como se observa, es necesario conocer la relación entre P y V para poder realizar la integración, dependiendo de dicha relación se pueden obtener las siguientes expresiones:

Relación	Expresión para el trabajo	
V constante	$W_{1-2} = \int_1^2 PdV = 0$	(3.8)

P constante	$W_{1-2} = \int_1^2 PdV = P \int_1^2 dV = P(V_2 - V_1)$	(3.9)
-------------	---	-------

$P = a+bV$	$W_{1-2} = \int_1^2 PdV = a(V_2 - V_1) + \frac{b}{2}(V_2^2 - V_1^2)$	(3.10)
------------	--	--------

Gas ideal PV constante	$W_{1-2} = \int_1^2 PdV = \int_1^2 \frac{mRT}{V} dV = mRT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = mRT \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$	(3.11)
---------------------------	--	--------

Gas ideal PV ⁿ constante	$W_{1-2} = \int_1^2 PdV = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{1-n}$	(3.12)
--	--	--------

Al representar un proceso cíclico en el diagrama P-V el trabajo es el área encerrada por la curva. Si el ciclo se recorre en el sentido horario el trabajo será positivo y si se recorre en sentido antihorario será negativo.

3.2. Calor.

El calor es una forma de energía que se transfiere debido a una diferencia de temperatura, es una función de trayectoria y por lo tanto su diferencial es inexacta:

$$Q_{1-2} = \int_1^2 \delta Q \neq Q_2 - Q_1 \quad (3.13)$$

El calor transferido por unidad de tiempo se denomina potencia calórica o flujo de calor y se define como

$$\dot{Q} = \frac{\partial Q}{\partial t} \quad [\dot{Q}]: \text{ watt} \quad (3.14)$$

y el calor por unidad de masa se representa como

$$q = \frac{Q}{m} \quad [q]: \text{ J / kg} \quad (3.15)$$

Convención de signos



Calor que **entra** al sistema: + (positivo)

Calor que **sale** del sistema: - (negativo)

El proceso donde $Q = 0$ se denomina adiabático.

Calor específico es el calor requerido para que una unidad de masa de una sustancia eleve su temperatura en un grado. Se define de la siguiente manera:

$$C = \frac{\partial q}{\partial T} \quad \Rightarrow \quad \delta q = C dT \quad (3.16)$$

integrando

$$q_{1-2} = \int_1^2 C dT \quad (3.17)$$

Comparación entre calor y trabajo

- a) calor y trabajo son fenómenos transitorios. Los sistemas nunca tienen calor o trabajo.
- b) calor y trabajo son fenómenos de límite. Cruzan los límites del sistema.
- c) calor y trabajo son funciones de trayectoria. Sus diferenciales son inexactas.

Problemas resueltos

1.- En un sistema cilindro-pistón se encuentran 0,1 kg de oxígeno. Las condiciones iniciales son 20 °C y 150 kPa. Lentamente se van añadiendo pesas al pistón y el oxígeno se comprime isotérmicamente hasta 500 kPa. Calcular el trabajo realizado durante el proceso.

Como los estados se encuentran definidos, se puede obtener del diagrama de compresibilidad, conociendo las constantes críticas ($T_c=154,6$ K, $P_c=5,04$ MPa, $v_c=0,005080$ m³/kg, $R= 0,2598$ kJ/kg K por lo que $Z_c=0,2958$), el valor de Z.

Estado 1:

$$\left. \begin{array}{l} T_1 = 20 \text{ °C} \Rightarrow T_r = 1,9 \\ P_1 = 150 \text{ kPa} \Rightarrow P_r = 0,03 \end{array} \right\} Z \approx 1$$

Estado 2:

$$\left. \begin{array}{l} T_2 = 20 \text{ °C} \Rightarrow T_r = 1,9 \\ P_2 = 500 \text{ kPa} \Rightarrow P_r = 0,1 \end{array} \right\} Z \approx 1$$

Por lo tanto se utilizará para la resolución del problema la ecuación de gas ideal.

Como las pesas se agregan lentamente se puede considerar el proceso cuasiestático, entonces, por ser un proceso isotérmico y un gas ideal, el trabajo vendrá dado por la ecuación (3.11) que, al sustituir los valores se obtiene

$$W = mRT \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = 0,1 \text{ kg} \cdot 0,2598 \text{ kJ}/(\text{kg K}) \cdot 293,15 \text{ K} \ln\left(\frac{150 \text{ kPa}}{500 \text{ kPa}}\right)$$

$$W = -9,1695 \text{ kJ}$$

el signo negativo significa que el trabajo es realizado **sobre** el sistema.

2.- Un sistema cilindro-pistón que contiene aire (como gas ideal) se somete a un ciclo que consta de los siguientes procesos:

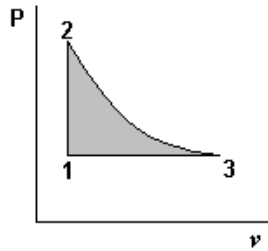
- a.- el aire se calienta a volumen constante desde el estado 1 al estado 2.
- b.- luego se expande a temperatura constante desde el estado 2 al 3 en el cual $P_3 = P_1$.
- c.- finalmente se enfría a presión constante hasta retornar al estado 1.

Si se conocen T_1 y T_2 , determine la expresión del trabajo por unidad de masa realizado en el ciclo en función de estas variables.

El trabajo total viene dado por

$$W_{1-1} = W_{1-2} + W_{2-3} + W_{3-1}$$

que en un diagrama P-v se vería de la siguiente manera:



Como el proceso de 1 a 2 es isocórico, el trabajo es cero. El trabajo de 2 a 3 viene dado por la ecuación (3.11) debido a que el proceso es isotérmico y se comporta como gas ideal y la ecuación (3.9) representa el trabajo de 3 a 1 por ser un proceso isobárico.

La ecuación (3.11) viene expresada en función de la relación entre volúmenes o presiones, como en este caso se conocen T_1 y T_3 se debe colocar la relación V_3/V_2 en función de T_3 y T_1 .

$$P_2V_2 = mRT_2 \quad \text{y} \quad P_3V_3 = mRT_3 \quad \text{como} \quad T_2 = T_3$$

se obtiene

$$P_2V_2 = P_3V_3 \quad \Rightarrow \quad \frac{V_3}{V_2} = \frac{P_2}{P_3}$$

pero además se sabe que $P_1 = P_3$ y $P = mRT/V$

$$\frac{V_3}{V_2} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{mRT_2/V_2}{mRT_1/V_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

es decir, el trabajo en el proceso de 2 a 3 viene dado por

$$W_{2-3} = mRT_2 \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$$

El trabajo de 3 a 1 expresado en función de la temperatura será

$$W_{3-1} = P_1(V_1 - V_3) = P_1 \left(\frac{mRT_1}{P_1} - \frac{mRT_3}{P_3} \right) = mR(T_1 - T_3)$$

y entonces el trabajo total

$$W_{1-1} = mR \left[T_2 \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) + (T_1 - T_2) \right]$$

finalmente, por unidad de masa

$$w_{1-1} = R \left[T_2 \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) + (T_1 - T_2) \right]$$

3.- Calcule el trabajo del problema 2 resuelto en el capítulo anterior.

En el estado inicial el pistón descansa sobre los topes inferiores. El pistón comenzará a elevarse cuando alcance la presión de equilibrio ($P=101,35$ kPa). En este momento comenzará a realizar trabajo hasta llegar a los topes superiores, estado que se denominará 2a.

El trabajo efectuado será entonces

$$W_{1-2a} = \int_1^{2a} P dV = P(V_{2a} - V_1) = 101,35 \text{ kPa} (8 \text{ m}^3 - 2 \text{ m}^3) = 608,1 \text{ kJ}$$

En forma equivalente, este resultado se pudo haber obtenido como la suma de los trabajos de 1-2 y de 2-2a.

$$W_{1-2a} = \int_1^2 P dV + \int_2^{2a} P dV = P(V_2 - V_1) + P(V_{2a} - V_2) = 608,1 \text{ kJ}$$

4.- Calcule el trabajo del problema 3 resuelto en el capítulo anterior.

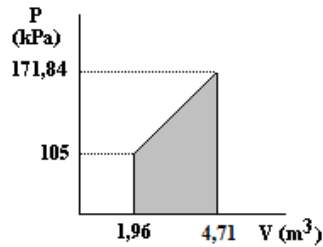
El trabajo se efectúa desde el estado 1B hasta el 3B. Durante este proceso la relación entre P y V es lineal (compresión del resorte) y por lo tanto la expresión del trabajo viene dada por la ecuación (3.10).

$$W_{1-3} = \int_1^3 P dV = \left(\frac{m_p g}{A_p} + P_{atm} - \frac{KV_e}{A_p^2} \right) (V_{B3} - V_{B1}) + \frac{K}{2A_p^2} (V_{B3}^2 - V_{B1}^2)$$

Siendo los valores de $V_e = V_{B1} = 1,9535 \text{ m}^3$ y $V_{B3} = 4,7124 \text{ m}^3$ se obtiene

$$W_{1\rightarrow3} = \left(\frac{400 \text{ kg } 9,8 \text{ m/s}^2}{0,7853 \text{ m}^2} \frac{1 \text{ kPa}}{1000 \text{ Pa}} + 100 \text{ kPa} - \frac{15 \text{ kN/m}}{(0,7853 \text{ m})^2} 1,9635 \text{ m}^3 \right) (4,6736 - 1,9635) \text{ m}^3 + \frac{15 \text{ kN/m}}{2 (0,7853 \text{ m})^2} \left((4,6736)^2 - (1,9635)^2 \right) = 376,15 \text{ kJ}$$

En forma alternativa, se podría calcular el trabajo como el área bajo la curva en un diagrama P-V, que en este caso no sería más que el área de un trapecio

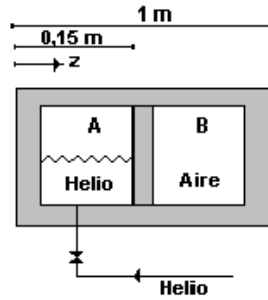


$$W_{1\rightarrow3} = (V_{B3} - V_{B1}) P_1 + \frac{(V_{B3} - V_{B1})(P_{B3} - P_{B1})}{2} = (V_{B3} - V_{B1}) \left(P_1 + \frac{(P_{B3} - P_{B1})}{2} \right)$$

$$W_{1\rightarrow3} = \frac{(P_{B3} + P_{B1})(V_{B3} - V_{B1})}{2} = 380,65 \text{ kJ}$$

5.- Un sistema que consta de dos compartimientos A (helio) y B (aire), ambos de comportamiento ideal, están separados por un pistón adiabático. Inicialmente el compartimiento A se encuentra a 1 bar y 300 K y en el compartimiento B la temperatura es de 25 °C. En este momento el pistón se encuentra a 0,15 m como se muestra en la figura. Si se suministra helio al compartimiento A hasta que el pistón se encuentra a una distancia de 0,6 m, calcule el trabajo realizado por el helio.

Datos adicionales: área del pistón: 0,02 m²; masa del pistón: 1,5 kg; constante de elasticidad del resorte: 5 kN/m; posición de equilibrio del resorte: 0,1 m; para el aire se cumple que PV^{1,4} es una constante.



Para determinar el trabajo realizado por el helio se debe conocer la relación entre P y V . Esta relación se puede obtener a partir del balance de fuerzas aplicado sobre el pistón

$$P_A = P_B + \frac{K(V_A - V_{equilibrio})}{A_p^2}$$

de aquí se puede observar que P_B es función del volumen, por lo que antes de realizar la integración se debe conocer dicha funcionalidad. De la relación dada para el aire

$$P_B = \frac{P_{B1} V_{B1}^{1.4}}{V_B^{1.4}} = \frac{cte}{V_B^{1.4}}$$

además se cumple en todo momento

$$V_T = 0,02 \text{ m}^3 = V_A + V_B$$

Al sustituir las expresiones anteriores en el balance de fuerzas se llega a

$$P_A = \frac{cte}{(0,02 - V_A)^{1.4}} + \frac{K(V_A - V_{equilibrio})}{A_p^2}$$

Integrando la expresión anterior con respecto al volumen se obtiene

$$P_A = ??? + \frac{K(V_A)^2}{2A_p^2} - \frac{K(V_{equilibrio})V}{A_p^2}$$

Comment [CMC1]: Falta integrar el primer termino o no se pone

Se requiere conocer el volumen del compartimeiento B en cada estado, el cual se puede calcular como:

$$V_{B1} = A_p L_1 = 0,02 \text{ m}^2 \cdot 0,85 \text{ m} = 0,017 \text{ m}^3$$

$$V_{B2} = A_p L_2 = 0,02 \text{ m}^2 \cdot 0,4 \text{ m} = 0,008 \text{ m}^3$$

sustituyendo los datos en la expresión

¿???????

el trabajo realizado por el helio

$$W = 1,31 \text{ kJ}$$

Nótese que este trabajo también se puede obtener partiendo del hecho de que el trabajo realizado por el helio es el mismo trabajo realizado sobre el aire

$$W_A = -W_B$$

ya que para el aire $PV^{1.4}$ es una constante, el trabajo viene dado por la expresión (3.12).

$$W_{B1-2} = \int_{V_{B1}}^{V_{B2}} P dV = \frac{P_{B2} V_{B2} - P_{B1} V_{B1}}{1 - n}$$

Para evaluar dicha expresión se requiere conocer la presión del compartimiento B en cada estado. Conociendo la presión P_{A1} se realiza un balance de fuerzas en el pistón, el cual viene dado por la expresión

$$P_{A1} - P_{B1} - \frac{K \Delta X}{A_p} = 0$$

de esta expresión se obtiene la presión en el compartimiento B

$$P_{B1} = 100 \text{ kPa} - \frac{5 \text{ kN/m} (0,15 - 0,1) \text{ m}}{0,02 \text{ m}^2} = 87,50 \text{ kPa}$$

Para obtener la presión del compartimiento B en el estado 2, se sabe que para el aire se cumple $PV^{1.4} = \text{constante}$, entonces $P_{B1} V_{B1}^{1.4} = P_{B2} V_{B2}^{1.4}$, despejando P_{B2} se obtiene

$$P_{B2} = \frac{P_{B1} V_{B1}^{1,4}}{V_{B2}^{1,4}} = \frac{87,50 \text{ kPa} (0,017 \text{ m}^3)^{1,4}}{(0,008 \text{ m}^3)^{1,4}} = 251,36 \text{ kPa}$$

Sustituyendo los valores en la expresión del trabajo, se llega a

$$W_{B1-2} = \int_{V_{B1}}^{V_{B2}} P dV = \frac{P_{B2} V_{B2} - P_{B1} V_{B1}}{1-n} = \frac{251,36 \text{ kPa} (0,008 \text{ m}^3) - 87,5 \text{ kPa} (0,017 \text{ m}^3)}{1-1,4} = -1,31 \text{ kJ}$$

por lo tanto el trabajo realizado por el helio es $W_B = 1,31 \text{ kJ}$.

6.- Calcular para el problema 4 resuelto en el capítulo anterior

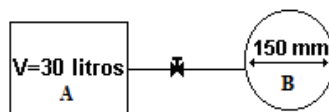
- El trabajo realizado por el argón.
- El trabajo realizado por el R134a.
- El trabajo realizado por todo el sistema.

Para determinar el trabajo del argón o del R134a sería necesario conocer la relación entre la presión y el volumen. Para el caso del argón se podría suponer que se comporta como gas ideal entonces se tendría una relación entre P y v , pero al no conocer la trayectoria que sigue el proceso (p.e. isotérmica) es imposible realizar la integración para el cálculo del trabajo. Se puede resaltar que a pesar de que los estados iniciales y finales de cada sustancia fueron determinados, el trabajo realizado por (o sobre) cada sustancia no puede ser calculado.

El trabajo realizado por todo el sistema (argón + R134a) es cero ya que no hay trabajo que cruce los límites del sistema.

7.- Un globo esférico con un diámetro inicial de 150 mm, contiene R134a a 100 kPa y está conectado a un tanque de paredes rígidas, cuyo volumen es de 30 litros. Dicho tanque contiene R134a a 500 kPa. Todo el conjunto se encuentra inicialmente a 20 °C. La válvula que conecta el globo con el tanque se abre y se permite que el sistema alcance el equilibrio termodinámico. Durante el proceso se produce una transferencia de calor a todo el conjunto, de tal forma que la temperatura se mantiene constante (20 °C). Suponiendo que la presión en el globo es proporcional al diámetro en todo momento, calcule

- Presión final del sistema.
- Trabajo realizado por el R134a



- El estado final del sistema tanque + globo es el mismo ya que se encuentra en equilibrio termodinámico. De este estado sólo se conoce la temperatura y se puede calcular su masa a partir de los estados iniciales como

$$m_2 = m_{A1} + m_{B1}$$

donde los volúmenes específicos se obtienen directamente de la tabla de vapor sobrecalentado esto es: $P_{A1} = 500 \text{ kPa}$ y $T_{A1} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ se obtiene $v_{A1} = 0,04226 \text{ m}^3/\text{kg}$ y $P_{B1} = 100 \text{ kPa}$ y $T_{B1} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ $v_{B1} = 0,23392 \text{ m}^3/\text{kg}$, sustituyendo se obtiene

$$m_{A1} = \frac{V_{A1}}{v_{A1}} = \frac{0,030 \text{ m}^3}{0,04226 \text{ m}^3/\text{kg}} = 0,7099 \text{ kg}$$

$$m_{B1} = \frac{V_{B1}}{v_{B1}} = \frac{\frac{\pi}{6} d^3}{v_{B1}} = \frac{0,00177 \text{ m}^3}{0,23392 \text{ m}^3/\text{kg}} = 0,00757 \text{ kg}$$

finalmente

$$m_2 = 0,85057 \text{ kg}$$

Falta conocer otra propiedad termodinámica para poder definir el estado. En este caso se cuenta con la relación entre la presión y el volumen del globo

$$P = kD$$

Donde k se puede determinar a partir de las condiciones iniciales como

$$k = \frac{P_{B1}}{D_{B1}} = 666,66 \text{ kN/m}$$

Un posible esquema de resolución sería

- 1.- Suponer P_2
- 2.- Con P_2 y $T_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ leer v_2 de las tablas
- 3.- Calcular V_2 como $V_2 = m_2 v_2$
- 4.- Calcular V_{B2} como $V_{B2} = V_2 - 0,03 \text{ m}^3$
- 5.- Calcular P_2 de la relación $P_2 = kD_{B2} = k \left(\frac{6V_{2B}}{\pi} \right)^{1/3}$
- 6.- Verificar que la presión supuesta sea igual a la presión calculada.

P_2 supuesta (kPa)	v_2 (m^3/kg)	V_2 (m^3)	V_{B2} (m^3)	P_2 calculada (kPa)	$f = P_{\text{supuesta}} - P_{\text{calculada}}$ (kPa)
200	0,11436	0,08205	0,05205	309,06	109,06
300	0,07441	0,05338	0,02338	236,78	-63,21

Interpolando se obtiene para $f = 0$ el valor de $P_2 = 263,32 \text{ kPa}$ y $V_{B2} = 0,03389 \text{ m}^3$. NOTA: Observe que existe un amplio rango entre los valores de la función f , sin embargo se realiza la interpolación entre ellos ya que la tabla no proporciona valores de P comprendidos entre 200 y 300 kPa

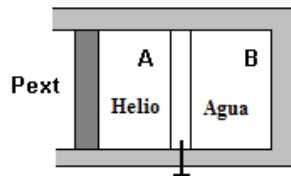
b) El trabajo se puede obtener a partir de la siguiente expresión

$$W = \int_{V_{B1}}^{V_{B2}} P dV = \int_{V_{B1}}^{V_{B2}} k D dV = \int_{V_{B1}}^{V_{B2}} k \sqrt[3]{\frac{6}{\pi}} V^{1/3} dV = k \left(\frac{6}{\pi}\right)^{1/3} \frac{3}{4} \left(V_{B2}^{4/3} - V_{B1}^{4/3}\right) = 6,67 \text{ kJ}$$

8.- Se tiene el sistema mostrado en la figura, en el cual un tanque contiene un pistón adiabático que separa el contenido del tanque de los alrededores. El interior del tanque a su vez está separado en dos compartimientos por un pistón diatérmico: el compartimiento A contiene 1 kg de helio a 400 °C y el compartimiento B contiene 3 kg de agua a 800 kPa . Inicialmente el pistón diatérmico está sujeto a una clavija. Se suelta la clavija y todo el sistema alcanza el equilibrio, en cuyo momento la relación V_A/V_B es igual a 0,5. Calcule:

- La presión y la temperatura de cada compartimiento en el estado final.
- El trabajo realizado por el sistema.

NOTA: las paredes del tanque son adiabáticas. La presión de los alrededores es 100 kPa , y el helio se comporta como un gas ideal.



a) En el estado final la presión será 100 kPa para ambos compartimientos ya que estos alcanzan el equilibrio con los alrededores.

La temperatura de los compartimientos A y B no se conoce, sin embargo será la misma ya que el pistón que los separa es diatérmico. Es de hacer notar que, ya que el pistón que separa los alrededores del compartimiento A es adiabático, la temperatura no es la misma que la de los alrededores.

Al conocer la relación V_A/V_B se pueden definir los estados finales mediante el siguiente procedimiento

- Suponer $T_2 = T_{A2} = T_{B2}$
- Con P_{B2} (100 kPa) y T_{B2} leer v_{B2} de las tablas
- Calcular V_{B2} como $V_{B2} = m_{B2} v_{B2}$
- Calcular V_{A2} como $V_{A2} = 0,5 V_{B2}$
- Calcular T_{A2} de la ecuación de gas ideal $T_{A2} = \frac{P_{A2} V_{A2}}{m_A R_A}$
- Verificar que la temperatura supuesta sea igual a la temperatura calculada.

T_2 supuesta (°C)	v_{B2} (m ³ /kg)	V_{B2} (m ³)	V_{A2} (m ³)	T_{A2} calculada (°C)	$f = T_{A2}$ calculada - T_{A2} supuesta (°C)
300	2,63876	7,91628	3,95814	190,5609	-109,439
250	2,40604	7,21812	3,60906	173,7548	-76,2452
150	1,93636	5,80908	2,90454	139,8363	-10,1637
99,62	1,694 *	5,082	2,541	122,334	22,71402

* este valor es v_g en la tabla de saturación.

Al interpolar entre los valores de f para los cuales la función cambia de signo se obtiene $T_2 = 134,28$ °C, $V_{A2} = 2,7911$ m³ y $V_{B2} = 5,5822$ m³.

b) Para calcular el trabajo sólo se dispone, por los momentos, de la ecuación (3.5) la cual es válida sólo para procesos de cuasiequilibrio. El proceso de expansión brusca que se lleva a cabo en el sistema (A+B) no cumple con esta condición. Sin embargo, el trabajo que realiza el sistema es igual al trabajo realizado sobre el alrededor y éste se puede calcular, a partir de la mecánica elemental, como el trabajo realizado por una fuerza constante sobre un cuerpo que se desplaza una distancia x en la dirección de la fuerza, en este caso la fuerza es igual a $P_{atm} \cdot A_p$

Es necesario calcular el volumen del compartimiento A y B en el estado inicial, para ello conociendo que $P_{B1} = 800$ kPa y $T_{A1} = 400$ °C (por ser diatérmico) en la tabla de vapor sobrecalentado se lee directamente que $v_{B1} = 0,38426$ m³/kg con lo cual se puede calcular el $V_{B1} = m_{B2} v_{B2} = 1,1527$ m³.

Por otro lado el volumen inicial en el tanque A puede ser calculado de la ecuación de gas ideal, obteniéndose $V_{A1} = 13,98$ m³.

Así el trabajo será

$$W_{A+B} = -W_{alr} = P_{atm} (V_{(A+B)2} - V_{(A+B)1}) = 100kPa (8,3733 - 15,13)m^3 = -675,3 kJ$$

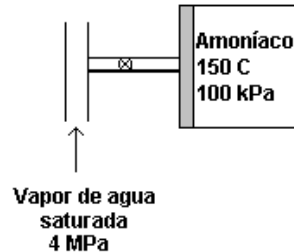
Problemas propuestos

1.- Un globo de 0,0014 m³ se encuentra conectado a una línea de aire de 151,987 kPa y 21 °C. Inicialmente el globo contiene aire a 101,325 kPa y a una temperatura de 21 °C. Se abre la válvula que conecta el globo con la línea de llenado hasta que alcanza el equilibrio mecánico. Si se sabe que la presión en el globo es proporcional a $V^{0,1}$ determine el trabajo realizado para inflar el globo.

2.- Por una tubería circula vapor de agua saturada a 4 MPa. Conectado a esta tubería por medio de una válvula (inicialmente cerrada), se tiene un tanque rígido de 1 m³ con amoníaco a

150 °C y 100 kPa y un pistón aislante, sin fricción y de espesor despreciable como se indica en la figura. Se abre la válvula lentamente hasta que el agua deja de fluir al tanque y simultáneamente el amoníaco intercambia calor con el ambiente, de manera que su temperatura permanece constante. Determine

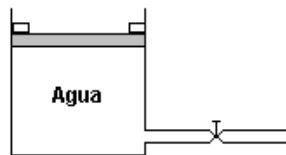
- El trabajo realizado por el amoníaco.
- El trabajo realizado por el agua.
- El trabajo total.



3.- Dentro de un sistema cilindro-pistón, tal como se muestra en la figura, se tiene agua a una presión de 145,08 psia y una temperatura de 200 °C (estado 1). Se comienza a retirar lentamente calor del sistema, manteniendo cerrada la válvula de suministro, hasta que en el cilindro exista una mezcla líquido-vapor con una calidad del 60 % (estado 2). En ese momento se abre la válvula de suministro y se introduce agua lentamente al sistema manteniendo la temperatura constante hasta alcanzar una presión en su interior de 3500 kPa (estado 3). Determine

- Masa de agua en el sistema en el estado 1.
- Temperatura y presión del sistema en el estado 2.
- Masa de agua en el sistema en el estado 3.
- El trabajo realizado durante el proceso.

Datos adicionales: masa del émbolo: 500 kg; volumen del cilindro hasta los topes: 0,15 m³; área transversal del émbolo: 0,3 m²; presión atmosférica: 14,7 psia; aceleración de la gravedad: 10 m/s².



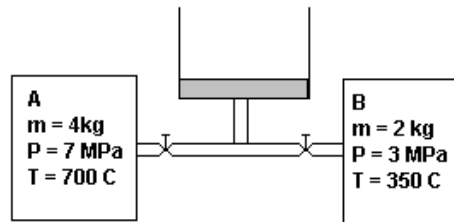
4.- Se tiene un tanque de 0,1 m³ que contiene vapor saturado de agua a 147,93 °C (estado 1). El tanque se calienta hasta llegar a una presión de 1,6 MPa (estado 2). Una vez alcanzada esta condición se abre la válvula que conecta el tanque con un globo adiabático de 0,03095 m³ que contiene inicialmente 0,12 kg de agua a 1 MPa. Se mantiene la válvula abierta hasta alcanzar el equilibrio termodinámico siendo la presión en este momento 1,4 MPa. Determinar

- La presión y la masa inicial en el tanque.
- La temperatura inicial del globo.

- c) La temperatura y la masa en el estado final una vez alcanzado el equilibrio termodinámico.
 d) El trabajo realizado por todo el sistema.

NOTA: existe una relación entre P y V de la forma: $P \text{ (MPa)} = 5,13 V \text{ (m}^3) + 0,841$

5.- Dos tanques A y B contienen agua a las condiciones indicadas en la figura. Ambos tanques están conectados a un cilindro con un pistón de un peso tal que una presión de 1,4 MPa es necesaria para moverlo contra la presión atmosférica. Si se abren las válvulas hasta que todo el sistema alcance 417,3 °C calcule el trabajo realizado.



6.- Un pistón sin fricción ha sido acoplado a un cilindro, el cual está conectado a un resorte. El cilindro contiene CO₂ a 90 °C y 100 kPa. El resorte genera una fuerza tal que la presión es proporcional al volumen. El cilindro se calienta y el pistón se eleva.

- a) Calcule la presión dentro del cilindro cuando la temperatura haya alcanzado los 200 °C.
 b) Calcule el trabajo (kJ/kmol).

7.- Calcule el trabajo del problema 7 propuesto en el capítulo anterior.

8.- Calcule el trabajo efectuado por el agua en el problema 8 propuesto en el capítulo anterior.

9.- Determine para el problema 9 propuesto en el capítulo anterior, el trabajo efectuado durante el proceso.

10.- Calcule el trabajo del problema 10 propuesto en el capítulo anterior.

11.- Calcule el trabajo efectuado durante el proceso llevado a cabo en el problema 11 propuesto en el capítulo anterior.

12.- Determine, para problema 12 propuesto en el capítulo anterior, el trabajo efectuado por el helio.

13.- Calcule el trabajo del problema 13 propuesto en el capítulo anterior.

14.- Para el problema 14 propuesto en el capítulo anterior, calcule el trabajo efectuado en cada compartimiento.

15.- Calcule el trabajo efectuado en el problema 15 propuesto en el capítulo anterior.

Respuestas a los problemas propuestos

1.- $W = 11,025 \text{ kJ}$.

2.- a) $W_{\text{NH}_3} = -318,85 \text{ kJ}$; b) $W_{\text{H}_2\text{O}} = 318,85 \text{ kJ}$; c) $W = 0$.

3.- a) $m_{\text{H}_2\text{O}} = 0,7282 \text{ kg}$; b) $T_2 = 155,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_2 = 0,55 \text{ MPa}$; c) $m_{\text{H}_2\text{O}} = 136,74 \text{ kg}$ d) $W = 0$.

4.- a) $P_{\text{T1}} = 0,45 \text{ MPa}$, $m_{\text{T1}} = 0,2415 \text{ kg}$; b) $T_{\text{G1}} = 300 \text{ }^\circ\text{C}$; c) $T = 904,65 \text{ }^\circ\text{C}$, $m = 0,3615 \text{ kg}$; d) $W = 90 \text{ kJ}$.

5.- $W = 1781 \text{ kJ}$.

6.- a) $P = 114,15 \text{ kPa}$; b) $\bar{w} = 457,18 \text{ kJ/kmol}$.

7.- $W = 0$.

8.- El trabajo se podría calcular desde el punto de vista del agua o del nitrógeno, para ello es necesario conocer la funcionalidad de P con v , la cual no se puede determinar en ninguno de los dos casos, por lo que no se puede calcular el trabajo.

9.- $W = -7,09 \text{ kJ}$.

10.- $W = 778,38 \text{ kJ}$.

11.- $W = 0$.

12.- El trabajo se podría calcular desde el punto de vista del helio o del amoníaco, para ello es necesario conocer la funcionalidad de P con v , la cual no se puede determinar en ninguno de los dos casos, por lo que no se puede calcular el trabajo.

13.- $W = 0$.

14.- $W_A = 0$; $W_B = 200,7 \text{ kJ}$.

15.- $W = 0$.

CAPÍTULO 4

PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

4.1. Primera ley para un sistema cerrado sometido a un ciclo.

A mediados del siglo XIX Joule realizó una serie de experimentos que demostraron que la cantidad de calor medida (expresada en calorías) era siempre directamente proporcional al trabajo realizado. La ley de la conservación de la energía, cuando el sistema realiza un ciclo se puede expresar como

$$Q = W \quad (4.1)$$

En forma general la ecuación anterior puede escribirse de la siguiente manera

$$\oint Q = \oint W \quad (4.2)$$

Es de hacer notar que esto implica, de acuerdo a la convención de signos adoptada, que

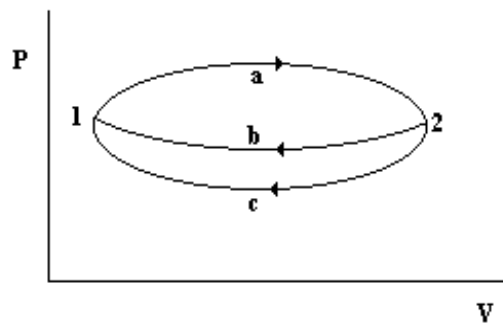
$W > 0 \Rightarrow Q > 0$ (trabajo realizado por el sistema \Rightarrow el sistema absorbe calor)

$W < 0 \Rightarrow Q < 0$ (trabajo realizado sobre el sistema \Rightarrow el sistema desprende calor)

Es importante resaltar que se ha partido del principio físico de que la energía se conserva. Este principio es axiomático ya que no se puede demostrar. Se acepta como verdadero debido a que no se ha observado una aplicación en la que no se cumpla.

4.2. Primera ley para procesos no cíclicos (sistemas cerrados).

Considere un sistema cerrado sometido a un ciclo. El ciclo se recorrerá del estado 1 al 2 siguiendo la trayectoria **a**, y del estado 2 al 1 por dos trayectorias diferentes **b** o **c**, como se puede observar en la figura



Al aplicar la primera ley para procesos cíclicos, ecuación (4.2), a cada uno de los ciclos descritos y combinando dichas ecuaciones se puede obtener

$$\int_{1c}^2 (\delta Q - \delta W) = \int_{1b}^2 (\delta Q - \delta W) \quad (4.3)$$

De esta ecuación se puede observar que la diferencia $(\delta Q - \delta W)$ es una función independiente de la trayectoria. Si se define una función cuyo diferencial sea $(\delta Q - \delta W)$ este diferencial será exacto y dependerá sólo del estado en que se encuentre el sistema y no del proceso al que el sistema este sometido. Esta función se llama **energía total**. Por lo tanto, la ecuación general de primera ley para un sistema cerrado no cíclico se puede expresar como

$$\int_1^2 dE = \int_1^2 (\delta Q - \delta W) \Rightarrow E_2 - E_1 = Q_{12} - W_{12} \quad (4.4)$$

La energía total de un sistema, E , puede ser definida como la suma de todas las formas de energía que contenga el sistema

$$E = E_c + E_p + U + \dots \quad (4.5)$$

donde

E_c : energía cinética (debida a la velocidad de desplazamiento del sistema)

$$E_c = \frac{1}{2} m \langle v \rangle^2 \quad (4.6)$$

E_p : suma de todas las formas de energía potencial que posee el sistema

$$\sum E_p = mgz + \frac{kX^2}{2} + \dots \quad (4.7)$$

U : energía interna que se define como la energía del sistema debida a los estados de excitación, vibración, rotación y traslación de las moléculas.

Sustituyendo la energía total por cada una de sus contribuciones tendremos

$$U_2 - U_1 + \frac{m}{2} (\langle v_2 \rangle^2 - \langle v_1 \rangle^2) + mg(z_2 - z_1) = Q_{12} - W_{12} \quad (4.8)$$

Si el sistema cerrado no experimenta cambios de energía cinética ni potencial durante el proceso, la ecuación anterior se reduce a

$$\Delta U = Q_{12} - W_{12} \quad (4.9)$$

Esta ecuación puede expresarse por unidad de masa como

$$\Delta u = q_{12} - w_{12} \quad (4.10)$$

y también en forma diferencial

$$du = \delta q - \delta w \quad (4.11)$$

Nótese que la primera ley se refiere a cambios de energía interna y no a valores absolutos de ellas.

Intuitivamente la energía interna U es una propiedad extensiva: mientras más masa contenga el sistema mayor va a ser la energía molecular que él contenga. Se puede definir una energía específica como la energía interna total entre la masa del sistema

$$u = \frac{U}{m} \quad [kJ / kg] \quad (4.12)$$

esta es una propiedad intensiva que queda completamente definida al conocer el estado termodinámico del sistema. En las tablas termodinámicas aparece tabulada y se utiliza igual que el volumen específico, es decir:

- en saturación (mezcla líquido-vapor): $u = (1-x) u_f + x u_g$.
- en vapor sobrecalentado y líquido comprimido: se requiere de dos propiedades termodinámicas independientes.
- en líquido comprimido, si no se poseen tablas, se puede realizar la aproximación $u = u_f$ a T_{sat} .

Existe una ecuación matemática que relaciona la energía interna con la presión y el volumen. Debido a que estos parámetros son propiedades termodinámicas la relación entre ellos también será una propiedad termodinámica denominada **entalpía**

$$H = U + PV \quad (4.13)$$

al dividir la ecuación anterior entre la masa, se obtiene la entalpía específica

$$h = u + Pv \quad (4.14)$$

En algunas tablas termodinámicas la entalpía aparece tabulada y al igual que las otras propiedades se cumple que:

- en saturación (mezcla líquido-vapor): $h = (1-x) h_f + x h_g$
- en vapor sobrecalentado y líquido comprimido: se requiere de dos propiedades termodinámicas independientes
- en líquido comprimido, si no se poseen tablas, se puede realizar la aproximación:
 $h = u_f + P v_f = h_f + v_f (P - P_{sat})$. Si $(P - P_{sat}) < 1 \text{ MPa}$ $h \approx h_f(T_{sat})$

Es importante mencionar que los valores de u y h reportados en las tablas no son el resultado de mediciones experimentales. Los valores reportados en estas tablas están basados

en un estado de referencia arbitrario, por ejemplo, para el agua se toma que el valor de la energía interna es cero en el estado de líquido saturado a 0,01 °C (punto triple del agua) o para el amoníaco se toma que el valor de la entalpía de líquido saturado es cero a -40 °C. Note que sólo se necesita especificar la energía interna o la entalpía ya que conocida una de ellas la otra se puede determinar a partir de la relación (4.14).

El estado de referencia elegido no tiene consecuencias en los cálculos, siempre y cuando se emplee la misma tabla termodinámica (o el mismo estado de referencia), ya que en la termodinámica sólo se estudian cambios en las propiedades y no los valores absolutos de ellas.

4.3. Aplicaciones de la primera ley para sistemas cerrados.

La expresión de la primera ley de la termodinámica se puede simplificar de acuerdo al proceso que sufre el sistema. Dichas simplificaciones se muestran en la tabla 4.1.

4.4. Ley de la conservación de la masa.

En los sistemas cerrados la ley de la conservación de la masa o ecuación de continuidad establece que la masa total del sistema es invariante. Cuando se estudian los sistemas abiertos esta ley se puede expresar de la siguiente forma

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{masa que} \\ \text{entra} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{masa que} \\ \text{sale} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{masa} \\ \text{acumulada} \end{array} \right\} \quad (4.15)$$

En un instante de tiempo t, vendría dado por

$$\sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s = \frac{dm}{dt} \quad (4.16)$$

Recordando que

$$\dot{m} = \rho A \langle v \rangle \quad (4.17)$$

la ecuación (4.16) se puede escribir como:

$$\sum (\rho A \langle v \rangle)_e - \sum (\rho A \langle v \rangle)_s = \frac{dm}{dt} \quad (4.18)$$

Tabla 4.1. Aplicaciones de la primera ley de la termodinámica para sistemas cerrados.

Expresión general:

$$U_2 - U_1 + \frac{m}{2}(\langle v_2 \rangle^2 - \langle v_1 \rangle^2) + mg(z_2 - z_1) = Q_{12} - W_{12} \quad (4.8)$$

Proceso	Expresión 1 ^{ra} Ley	Observaciones	Gas Ideal	Observaciones
Isocórico (volumen constante)	$q = u_2 - u_1$	Se desprecian las contribuciones de la energía cinética y la energía potencial.	$u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_v^0 dT$	Se desprecian las contribuciones de la energía cinética y la energía potencial.
Isobárico (presión constante)	$q = h_2 - h_1$	Se desprecian las contribuciones de la energía cinética y la energía potencial. Proceso cuasi-estático.	$u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_p^0 dT$	Se desprecian las contribuciones de la energía cinética y la energía potencial. Proceso cuasi-estático.
Isotérmico (temperatura constante)	$q - w = u_2 - u_1$	Se desprecian las contribuciones de la energía cinética y la energía potencial.	$q = w = RT \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$ $= RT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$	Se desprecian las contribuciones de la energía cinética y la energía potencial. Proceso cuasi-estático.
Energía interna constante	$q = w$	Se desprecian las contribuciones de la energía cinética y la energía potencial.	$q = w$	Se desprecian las contribuciones de la energía cinética y la energía potencial.
Adiabático (q = 0)	$-w = u_2 - u_1$	Se desprecian las contribuciones de la energía cinética y la energía potencial.	$T^{\frac{1}{\gamma-1}} v = \text{constante}$ $T v^{\gamma-1} = \text{constante}$	Se desprecian las contribuciones de la energía cinética y la energía potencial. Proceso cuasi-estático. C_v^0 constante.
Sistema aislado	$u_2 - u_1 = 0$	Se desprecian las contribuciones de la energía cinética y la energía potencial	$u_2 - u_1 = 0$ $\Rightarrow T_2 = T_1$	Se desprecian las contribuciones de la energía cinética y la energía potencial

4.5. Primera ley para sistemas abiertos.

La primera ley de la termodinámica expresa que la energía se conserva

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{energía que} \\ \text{entra} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{c} \text{energía que} \\ \text{sale} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \text{energía} \\ \text{acumulada} \end{array} \right\} \quad (4.19)$$

Se analizarán cada uno de estos términos

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{energía que} \\ \text{entra} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \text{transferencia} \\ \text{de calor} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{energía asociada} \\ \text{a las corrientes} \\ \text{de entrada} \end{array} \right\} \quad (4.20)$$

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{energía que} \\ \text{entra} \end{array} \right\} = \{Q\} + \{E_c + E_p + U + PV\} \quad (4.21)$$

donde PV es lo que se denomina trabajo de flujo y representa el trabajo efectuado por la corriente para entrar al sistema.

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{energía que} \\ \text{sale} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \text{trabajo} \\ \text{efectuado} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{energía asociada} \\ \text{a las corrientes} \\ \text{de salida} \end{array} \right\} \quad (4.22)$$

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{energía que} \\ \text{sale} \end{array} \right\} = \{W\} + \{E_c + E_p + U + PV\} \quad (4.23)$$

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{energía} \\ \text{acumulada} \end{array} \right\} = E_2 - E_1 \quad (4.24)$$

Si las ecuaciones anteriores se expresan en función del tiempo, en términos específicos y recordamos que $H = U + PV$ al reemplazarlas en la ecuación (4.19) se obtiene

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_e \left(\frac{1}{2} \langle v \rangle^2 + gz + h \right)_e - \sum \dot{m}_s \left(\frac{1}{2} \langle v \rangle^2 + gz + h \right)_s = \frac{d \left[m \left(u + \frac{1}{2} \langle v \rangle^2 + gz \right) \right]}{dt} \quad (4.25)$$

La expresión anterior es la forma más expandida en la que se aplicará la primera ley. Como toda ecuación general se puede reducir a casos más sencillos haciendo las simplificaciones pertinentes. Por ejemplo para obtener la expresión para sistemas cerrados basta eliminar los términos de entrada y salida e integrar respecto al tiempo.

Otra simplificación de utilidad es considerar los procesos en estado estacionario. Estos procesos son aquellos en que las condiciones en cada punto del sistema no varían con el tiempo, es decir

$$\frac{dY}{dt} = 0 \quad (4.26)$$

donde Y representa cualquier propiedad.

4.6. Aplicaciones de la primera ley para sistemas abiertos en estado estacionario.

En la tabla 4.2 se muestran los equipos más utilizados en la industria para procesos en estado estacionario.

4.7. Primera ley para sistemas abiertos en estado no-estacionario.

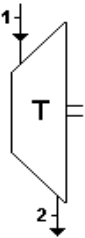
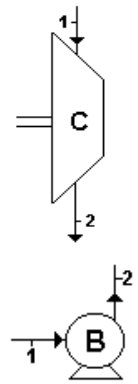
Un sistema en estado no-estacionario es aquel donde existen variaciones de las propiedades con respecto al tiempo pero no con respecto a la posición. Este hecho permite que se pueda integrar la ecuación (4.25) con respecto al tiempo


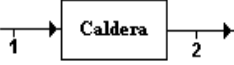
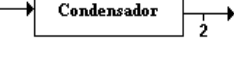
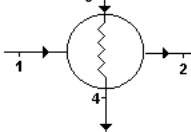
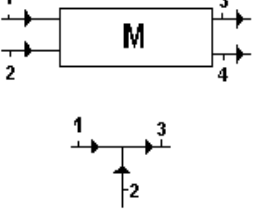
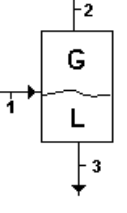
$$Q - W + \sum m_e \left(\frac{1}{2} \langle v \rangle^2 + gz + h \right)_e - \sum m_s \left(\frac{1}{2} \langle v \rangle^2 + gz + h \right)_s = \\ m_2 \left(u + \frac{1}{2} \langle v \rangle^2 + gz \right)_2 - m_1 \left(u + \frac{1}{2} \langle v \rangle^2 + gz \right)_1 \quad (4.27)$$

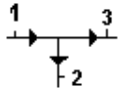
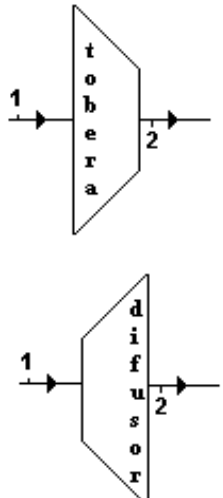
Tabla 4.2. Aplicaciones de la primera ley de la termodinámica a sistemas abiertos en estado estacionario

Expresión general:

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{\langle v_e \rangle^2}{2} + gz_e \right) - \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{\langle v_s \rangle^2}{2} + gz_s \right) = 0$$

Equipo	Representación	Objetivo	Siempre se cumple	En general se cumple	Primera Ley / Continuidad
Turbina		Producción de potencia	$\dot{W} > 0$ $P_2 < P_1$ $h_1 > h_2$	$\Delta E_c = \Delta E_p = 0$ $\dot{Q} = 0$	$\dot{W} = \dot{m}(h_1 - h_2)$ $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$
Compresor y Bomba		Suministrar energía a un fluido	$\dot{W} < 0$ $P_2 > P_1$ $h_1 < h_2$	$\Delta E_c = \Delta E_p = 0$ $\dot{Q} = 0$	$\dot{W} = \dot{m}(h_1 - h_2)$ $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$

Válvula		Disminuir la presión de una corriente	$\dot{W} = 0$ $P_2 < P_1$	$\Delta E_c = \Delta E_p = 0$ $\dot{Q} = 0$	$h_1 = h_2$ $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$
Caldera		Suministrar calor a un fluido	$\dot{W} = 0$	$\Delta E_c = \Delta E_p = 0$ $P_1 = P_2$	$\dot{Q} = \dot{m}(h_2 - h_1)$ $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$
Condensador		Retirar calor de un fluido	$\dot{W} = 0$	$\Delta E_c = \Delta E_p = 0$ $P_1 = P_2$	$\dot{Q} = \dot{m}(h_2 - h_1)$ $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$
Intercambiador Cerrado		Intercambio de calor entre fluidos (los fluidos no se mezclan)	$\dot{W} = 0$	$\Delta E_c = \Delta E_p = 0$ $P_1 = P_2$ $P_3 = P_4$	$\dot{m}_1(h_2 - h_1) = \dot{m}_3(h_4 - h_3)$ $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ $\dot{m}_3 = \dot{m}_4$
Intercambiador Abierto: Mezclador		Intercambio de calor entre fluidos	$\dot{W} = 0$	$\Delta E_c = \Delta E_p = 0$ $P_1 = P_2 = P_3 = P_4$	$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_4 h_4$ $\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3 + \dot{m}_4$
Separador gas-líquido		Separar las corrientes gas-líquido	$\dot{W} = 0$	$\Delta E_c = \Delta E_p = 0$ $\dot{Q} = 0$ $P_1 = P_2 = P_3$ $T_1 = T_2 = T_3$ $h_2 = h_g$ $h_3 = h_f$	$\dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3 \Rightarrow$ $h_1 = (1 - x)h_3 + xh_2$ $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3$

<p>Separador</p>		<p>Separar corrientes</p>	$\dot{W} = 0$ $P_1 = P_2 = P_3$ $T_1 = T_2 = T_3$	$\Delta E_c = \Delta E_p = 0$ $\dot{Q} = 0$	$\dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3$ $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3$
<p>Tobera y difusor</p>		<p>Cambiar la velocidad de la corriente</p>	$\dot{W} = 0$	$\Delta E_p = 0$ $\dot{Q} = 0$	$h_1 - h_2 = \frac{1}{2} \langle v_2 \rangle^2 - \frac{1}{2} \langle v_1 \rangle^2$ $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$

Problemas resueltos

1.- A una tobera adiabática entra vapor de agua a una presión de 40 bar, una temperatura de 400 °C y una velocidad de 10 m/s. A la salida la presión es de 14 bar y la velocidad de 665 m/s. Si el flujo másico es de 2 kg/s. Determinar el área de la salida de la tobera en m².

Del balance de masa,

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s$$

que también se puede expresar, como

$$\rho_e \cdot A_e \cdot \langle v_e \rangle = \rho_s \cdot A_s \cdot \langle v_s \rangle \Rightarrow \frac{A_e \langle v_e \rangle}{v_e} = \frac{A_s \langle v_s \rangle}{v_s}$$

Ya que $\rho = 1/v$.

$$A_s = \frac{\dot{m}_e v_s}{\langle v_s \rangle}$$

Entonces, para determinar el área de salida se necesita conocer el volumen específico del vapor de agua a la salida de la tobera. Ahora de este estado sólo se conoce su presión, por lo tanto se necesita otra propiedad termodinámica para poder definir el estado.

Al realizar el balance de energía, se obtiene

$$h_e + \frac{\langle v_e \rangle^2}{2} = h_s + \frac{\langle v_s \rangle^2}{2}$$

de esta ecuación se puede obtener h_s y con h_s y P_s se tiene el estado determinado.

De las tablas de vapor sobrecalentado se obtiene directamente para $P = 4000$ kPa y $T = 400$ °C la entalpía de entrada, $h_e = 3213,51$ kJ/kg.

Sustituyendo los valores conocidos se obtiene

$$h_s = 3213,51 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \frac{1000\text{J}}{1\text{kJ}} \frac{(\text{kg m/s}^2)\text{m}}{1\text{J}} + \frac{(10\text{ m/s})^2}{2} - \frac{(665\text{ m/s})^2}{2} = 2992,45 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Nota: es importante trabajar con las unidades adecuadas, ya que la entalpía que se lee en las tablas esta en kJ/kg, y el término correspondiente a la energía cinética está en unidades de (m/s)² ó J/kg.

Finalmente con los valores de $P_s = 14000$ kPa y $h_s = 2995,45$ kJ/kg se debe interpolar para obtener el volumen específico a la salida de la tobera.

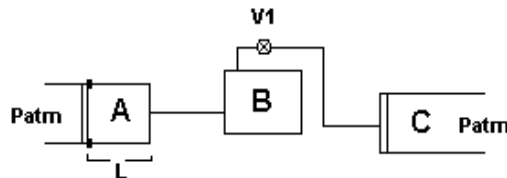
h (kJ/kg)	v (m^3/kg)
3040,35	0,18228
2927,22	0,16350
2992,45	?

$$v_s = 0,174328 m^3 / kg \quad \text{por lo que } A_s = 5,24 \times 10^{-4} m^2.$$

2.- Se tiene un sistema como el mostrado en la figura. El fluido de trabajo es amoníaco. El recipiente A es un cilindro de 0,5 m de diámetro que contiene un pistón de 50 kg de masa, ubicado a una distancia L de 0,6 m y está sostenido inicialmente por unos pasadores.

El amoníaco se encuentra en este tanque a 85 kPa y 30 °C. El tanque rígido B de 250 litros, contiene el fluido a 55 kPa y 0,8966 m^3 / kg . El cilindro-pistón C, de diámetro 0,4 m está vacío. Se liberan los pasadores de A, deslizándose el pistón hasta la base del cilindro. El sistema integrado por A y B es adiabático. Definir los estados 1 y 2 del sistema (P, T, v, x, fase) y las masas en ambos estados.

A continuación se retira el tanque A (se desconecta) y se abre la válvula V1 del tanque B. El proceso finaliza cuando se alcanza el equilibrio mecánico (estado 3). Definir este estado y calcular el calor intercambiado por el sistema. Razone su respuesta.



Estado 1:

Tanque A

$$P_{A1} = 85 \text{ kPa}$$

$$T_{A1} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$d_A = 0,5 \text{ m}$$

$$L = 0,6 \text{ m}$$

Para definir el estado, de la tabla de saturación se obtiene $P_{\text{sat}}(30 \text{ }^\circ\text{C}) = 1167,0 \text{ kPa}$. Como $P < P_{\text{sat}} \Rightarrow$ Vapor sobrecalentado (la calidad no se encuentra definida).

En las tablas de vapor sobrecalentado es necesario realizar una interpolación simple para obtener el valor de v_{A1} a $T=30 \text{ }^\circ\text{C}$.

P (kPa)	v (m^3/kg)
50	2,9458
85	1,90973
100	1,4657

Para determinar la masa se debe calcular el volumen del recipiente, para ello

$$A_{pA} = \pi r^2 = \pi \left(\frac{d_A}{2} \right)^2 = \pi \left(\frac{0,5m}{2} \right)^2 = 0,1963m^2$$

y

$$V_A = LA_{pA} = 0,6m \cdot 0,1963m^2 = 0,1178m^3$$

por lo tanto la masa contenida dentro del tanque A es

$$m_{A1} = \frac{V_A}{v_{A1}} = \frac{0,1178m^3}{1,90973m^3/kg} = 0,061684kg$$

Tanque B

$$P_{B1} = 55 \text{ kPa}$$

$$V_B = 250 \text{ l} = 0,25 \text{ m}^3$$

$$v_{B1} = 0,8966 \text{ m}^3/kg$$

Para determinar el estado se lee en la tabla de saturación a 55 kPa v_f y v_g . Esta presión no se encuentra directamente en la tabla por lo que es necesario realizar una interpolación simple:

P (kPa)	T (°C)	v_f (m^3/kg)	v_g (m^3/kg)
54,5	-45	0,001437	2,00632
55	-44,85	0,001437	1,993129
71,7	-40	0,001450	1,55256

Como $v_f < v < v_g \Rightarrow$ saturación (mezcla líquido-vapor), por lo que la calidad viene dada por

$$x_{B1} = \frac{v - v_f}{v_g - v_f} = \frac{0,8966 - 0,001437}{1,993129 - 0,001437} = 0,449$$

y la temperatura es: $T_{B1} = -44,85 \text{ °C}$.

La masa contenida en este tanque es

$$m_{B1} = \frac{V_B}{v_{B1}} = \frac{0,25m^3}{0,8966m^3/kg} = 0,2788kg$$

Estado 2

En este estado se encuentra la masa total de amoníaco contenida en el tanque B, es decir

$$m_{B2} = m_{A1} + m_{B1} = 0,061684kg + 0,2788kg = 0,3405kg$$

y el volumen específico será

$$v_{B2} = \frac{V_B}{m_{B2}} = \frac{0,25m^3}{0,3405kg} = 0,7342m^3/kg$$

Para definir el estado hace falta otra variable. Al aplicar la primera ley al sistema cerrado conformado por los tanques A y B entre el estado 1 y el estado 2 se obtiene

$$Q_{12} - W_{12} = U_2 - U_1 \Rightarrow -W_{12} = U_2 - U_1 = U_{B2} - U_{A1} - U_{B1}$$

$$-W_{12} = m_{B2}u_{B2} - m_{A1}u_{A1} - m_{B1}u_{B1}$$

En esta expresión se conocen las masas en los dos estados, y las energías internas en el estado 1 pueden ser determinadas a partir interpolaciones simples en la tabla. Para el tanque A se tiene

P (kPa)	u_{A1} (kJ/kg)
50	1393,3
85	1391,83
100	1391,2

y para el tanque B

P (kPa)	u_f (kJ/kg)	u_g (kJ/kg)
54,5	-22,01	1271,4
55	-21,373	1271,5744
71,7	0,001450	1277,4

siendo

$$u_{B1} = (1-x)u_f + xu_g = (1-0,449)(-21,373)kJ/kg + (0,449)1271,5744kJ/kg$$

$$u_{B1} = 559,16038kJ/kg$$

Ahora bien, si se conociera el trabajo realizado durante el proceso se podría obtener, de la expresión de primera ley, la energía interna en el estado 2 y con esto tener definido el estado. Pero el trabajo no puede ser calculado a través de los datos del sistema, ya que en él no se

cumple la condición de cuasiequilibrio. Sin embargo, el trabajo puede ser calculado a partir del trabajo realizado por los alrededores, el cual es un trabajo a presión constante

$$W_{alrededores} = P_{atm} (V_2 - V_1) = P_{atm} V_A = 101,325 \text{ kPa} \cdot 0,1178 \text{ m}^3 = 11,936 \text{ kJ}$$

así

$$W_{sistema} = -W_{alrededores} = -11,936 \text{ kJ}$$

Sustituyendo en la expresión de la primera ley se obtiene

$$u_{B2} = \frac{-(-11,936 \text{ kJ}) + 0,2788 \text{ kg}(559,16 \text{ kJ/kg}) + 0,061684 \text{ kg}(1391,83 \text{ kJ/kg})}{0,3405 \text{ kg}}$$

$$u_{B2} = 745,0321 \text{ kJ/kg}$$

Finalmente el estado B2 se encuentra definido con las variables $v_{B2} = 0,7342 \text{ m}^3/\text{kg}$ y $u_{B2} = 745,0321 \text{ kJ/kg}$. Es necesario entonces determinar en que fase se encuentra el amoníaco. Para ello es conveniente buscar en la tabla de saturación si existen valores de temperatura o presión para los cuales se cumple simultáneamente que $u_f \leq u \leq u_g$ y $v_f \leq v \leq v_g$. Si se cumplen estas condiciones la sustancia se encuentra en equilibrio líquido-vapor, en caso contrario se encontraría en la región de una sola fase.

Al revisar la tabla de saturación se observa que, tanto v_{B2} como u_{B2} se encuentran entre los valores de líquido saturado y vapor saturado para un rango de temperatura comprendido entre $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ y $-25 \text{ }^\circ\text{C}$. Sin embargo, es importante resaltar que la presión de este estado debe estar comprendida entre P_{atm} y P_{B1} , y esta condición sólo se cumple en el rango de temperatura comprendido entre $-45 \text{ }^\circ\text{C}$ y $-30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Un posible esquema de resolución podría ser:

- 1.- Suponer una presión P^s , tal que $P_{B1} \leq P^s \leq P_{atm}$
- 2.- Leer de las tablas T , v_f , v_{fg} , u_f , u_{fg}
- 3.- Calcular x^s como $x^s = \frac{v_{B2} - v_f}{v_g - v_f} = \frac{0,7342 - v_f}{v_{fg}}$
- 4.- Calcular x^* como $x^* = \frac{u_{B2} - u_f}{u_g - u_f} = \frac{745,0321 - u_f}{u_{fg}}$
- 5.- Verificar si $f = x^s - x^* = 0$

Interpolando entre estos valores se obtiene

T(°C)	P(kPa)	v_f (m ³ /kg)	v_{fg} (m ³ /kg)	u_f (kJ/kg)	u_{fg} (kJ/kg)	f
-40	71,7	0,001450	1,55111	-0,10	1277,6	-0,1108
-35	93,3	0,001463	1,21466	21,93	1261,3	0,01369
-35,55	90,93	0,001462	1,2515	19,52	1263,09	0

$v_f = 0,001462 \text{ m}^3/\text{kg}$; $v_{fg} = 1,2515 \text{ m}^3/\text{kg}$; $u_f = 19,52 \text{ kJ/kg}$; $u_{fg}=1263,09 \text{ kJ/kg}$; $P_{B2} = 90,93 \text{ kPa}$; $T_{B2} = -35,55 \text{ °C}$; $x_{B2} = 0,57$.

De manera equivalente se podría haber seguido como esquema de solución alternativo:

- 1.- Suponer una presión P^s , tal que $P_{B1} \leq P^s \leq P_{atm}$
- 2.- Leer de las tablas T, v_f , v_{fg} , u_f , u_g
- 3.- Calcular x^s como $x^s = \frac{v_{B2} - v_f}{v_g - v_f} = \frac{0,7342 - v_f}{v_{fg}}$
- 5.- Calcular u_{B2} como $u_{B2}^s = (1 - x^s)u_f + x^s u_g$
- 6.- Verificar si $f = u_{B2}^s - u_{B2} = 0$

P^s (kPa)	T(°C)	v_f (m^3/kg)	v_{fg} (m^3/kg)	u_f (kJ/kg)	u_g (kJ/kg)	x^s	u_{B2}^s (kJ/kg)	f
71,7	-40	0,001450	1,55111	-0,10	1277,4	0,47	603,39	141,64
93,2	-35	0,001463	1,21466	21,93	1283,3	0,59	771,42	-26,39
89,82	-35,78	0,001461	1,26750	18,47	1282,4	0,57	745,03	0

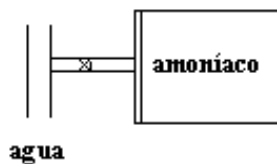
Al interpolar se obtiene $P_{B2} = 89,82 \text{ kPa}$; $T_{B2} = -35,78 \text{ °C}$; $x_{B2} = 0,57$. Esto ejemplifica el uso de diferentes procedimientos iterativos, con la obtención de resultados similares.

Estado 3

La presión en el estado 2 es menor que la presión atmosférica, por lo que el pistón del compartimiento C no se moverá al abrir la válvula V1, no ocurriendo ningún proceso.

3.- Por una tubería aislada circula vapor de agua saturada a 0,4 MPa. Conectado a esta tubería, por medio de una válvula inicialmente cerrada, se tiene un tanque rígido de 1 m^3 con amoníaco a 10 °C y 100 kPa (estado 1) y un pistón aislante, sin fricción de espesor despreciable, como se indica en la figura. Se abre la válvula lentamente hasta que el agua (A) deja de fluir al tanque y simultáneamente el amoníaco (B) intercambia $153,64 \text{ kJ}$ de calor con el ambiente de manera que su temperatura permanece constante. Determinar:

- a) El estado final del amoníaco y su masa.
- b) Masa y temperatura del agua en el estado final dentro del tanque.



Para determinar la masa de amoníaco en el estado final, basta con determinar la masa en el estado inicial ya que por ser un sistema cerrado, la masa permanece constante. Para ello, en la

tabla de saturación del amoníaco se obtiene que $T > T_{\text{sat}} (100 \text{ kPa}) \Rightarrow$ Vapor sobrecalentado. De las tablas de vapor sobrecalentado se obtiene directamente

$$v_{B1} = 1,3647 \text{ m}^3 / \text{kg} \quad u_{B1} = 1357,9 \text{ kJ} / \text{kg}$$

por lo tanto

$$m_B = \frac{V}{v_{B1}} = \frac{1 \text{ m}^3}{1,3647 \text{ m}^3 / \text{kg}} = 0,7328 \text{ kg}$$

En el proceso para llegar al estado final se abre la válvula lentamente hasta que ya no pasa vapor al tanque, esto implica que la presión en el tanque está en equilibrio (mecánico) con la corriente de entrada, entonces

$$P_{B2} = P_{A2} = P_e = 0,4 \text{ MPa} = 400 \text{ kPa}$$

De esta manera se encuentra definido el estado final del amoníaco, $P_{B2} = 400 \text{ kPa}$ y $T_{B2} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$. Para estas condiciones el amoníaco se encuentra en vapor sobrecalentado por lo que en dichas tablas se puede leer

$$v_{B2} = 0,32701 \text{ m}^3 / \text{kg} \quad u_{B2} = 1339,9 \text{ kJ} / \text{kg}$$

b) Para definir el estado final del agua dentro del tanque se necesitan dos propiedades intensivas independientes, y sólo se conoce la presión, por lo tanto es conveniente realizar un balance de energía.

El balance de energía se puede aplicar al sistema completo (agua + amoníaco), o a cada uno de los sistemas por separado. Si se aplica el balance de energía a cada uno de los sistemas:

Para el agua (sistema abierto):

$$-W_A + m_e h_e = m_{A2} u_{A2} - m_{A1} u_{A1}$$

y el balance de masa

$$m_{A2} = m_{A1} + m_e$$

sustituyendo se obtiene,

$$W_A = m_{A2} \cdot (h_e - u_{A2})$$

Para el amoníaco (sistema cerrado):

$$Q - W_B = m_B \cdot (u_{B2} - u_{B1})$$

pero

$$-W_B = W_A$$

entonces combinando las ecuaciones anteriores se tiene

$$m_B \cdot (u_{B2} - u_{B1}) - Q = m_{A2} \cdot (h_e - u_{A2})$$

Antes de continuar, se realizará el balance a todo el sistema para verificar que se obtendría la misma ecuación anterior.

Aplicando primera ley a todo el sistema (agua+amoníaco):

$$Q + m_e h_e = U_2 - U_1$$

donde

$$U_2 = m_{A2} u_{A2} + m_{B2} u_{B2} \quad \text{y} \quad U_1 = m_{A1} u_{A1} + m_{B1} u_{B1} = m_{B1} u_{B1}$$

sustituyendo estas expresiones y el balance de masa en la ecuación de primera ley se obtiene

$$m_B \cdot (u_{B2} - u_{B1}) - Q = m_{A2} \cdot (h_e - u_{A2})$$

Finalmente, esta última expresión se puede colocar en función del estado final del agua dentro del tanque. Si se coloca la masa en función del volumen específico

$$m_{A2} = \frac{V_{A2}}{v_{A2}}$$

donde

$$V_{A2} = V - V_{B2} \quad V_{B2} = m_B \cdot v_{B2} = 0,2396 m^3$$

entonces

$$m_{A2} = \frac{(1 - 0,2396)}{v_{A2}} = \frac{0,7604}{v_{A2}}$$

Por otra parte, el valor de h_e corresponde a la línea de vapor saturado que entra

$$h_e = h_g(P = 0,4MPa) = 2738,53 kJ / kg$$

Luego, tomando en cuenta que el calor tiene que salir del sistema para mantener la temperatura del amoniaco constante, y sustituyendo los valores conocidos en la expresión de primera ley para todo el sistema se obtiene

$$140,4496 \cdot v_{A2} = 2082,3782 - 0,7604 \cdot u_{A2}$$

Con esta ecuación, que es sólo función del estado final del agua, se podrá determinar el estado. Para ello es necesario realizar un procedimiento iterativo o “tanteo”

1.- Suponer T_{A2}

2.- Con T_{A2} y $P_{A2} = 400\text{kPa}$, leer v_{A2} y u_{A2}

3.- Evaluar la función objetivo $f = 140,4496 \cdot v_{A2} + 0,7604 \cdot u_{A2} - 2082,3782 = 0$

Si no se obtiene la precisión deseada se debe suponer otra temperatura, y repetir el procedimiento hasta obtener la precisión deseada.

T_{A2}	v_{A2}	u_{A2}	$f(x)$
250	0,59512	2726,11	74,1402
200	0,53422	2646,83	5,3023
150	0,47084	2564,48	-66,2183

Interpolando a cero se obtiene

$$T_{A2} = 196,29^\circ\text{C} \quad \text{y} \quad v_{A2} = 0,5295\text{m}^3/\text{kg}$$

y

$$m_{A2} = 1,44\text{kg}$$

4.- Resuelva el problema anterior considerando que tanto el agua como el amoníaco se comportan como gases ideales y que adicionalmente la temperatura de la corriente de entrada es $143,63^\circ\text{C}$. Considere que C_v^0 es constante.

a) Para determinar la masa del amoníaco en el estado inicial, sólo se necesita definir dicho estado con la presión y la temperatura. Sustituyendo en la ecuación de gas ideal se obtiene

$$m_{B1} = \frac{P_{B1} V_{B1}}{R_{NH_3} T_{B1}} = \frac{100\text{kPa} \cdot 1\text{m}^3}{0,4882\text{kJ}/(\text{kg K}) \cdot 283,15\text{K}} = 0,7235\text{kg}$$

siendo ésta la misma masa del amoníaco en el estado final, ya que el sistema B es cerrado.

b) Del problema anterior

$$P_{B2} = P_{A2} = P_e = 0,4\text{MPa}$$

y al realizar el balance de energía se obtuvo

$$m_B \cdot (u_{B2} - u_{B1}) - Q = m_{A2} \cdot (h_e - u_{2A})$$

En esta ecuación

$$u_{B2} - u_{B1} = \int_{T_{B1}}^{T_{B2}} C_v^0 dT = C_v^0 (T_{B2} - T_{B1}) = 0$$

$$m_{A2} = \frac{P_{A2} V_{A2}}{R_{H2O} T_{A2}} = \frac{400 \text{ kPa} \cdot 0,7604 \text{ m}^3}{0,4615 \text{ kJ} / (\text{kg K}) T_{A2}} = \frac{659,0682}{T_{A2} \text{ (K)}}$$

se puede expresar h_e y u_{2A} en función de un estado de referencia arbitrario, por ejemplo a $T_{ref} = 298,15 \text{ K}$ la entalpía de referencia puede ser cero, por lo que

$$u_{ref} = h_{ref} - Pv = h_{ref} - RT_{ref} = -137,6022 \text{ kJ} / \text{kg}$$

entonces, siendo $C_p^0 = 1,872 \text{ kJ} / (\text{kg K})$ y $C_v^0 = 1,410 \text{ kJ} / (\text{kg K})$ queda

$$h_e = h_{ref} + C_p^0 (T_e - T_{ref})$$

$$h_e = 0 + 1,872 \text{ kJ} / \text{kg K} ((143,63 + 273,15) - 298,15) \text{ K} = 222,0754 \text{ kJ} / \text{kg}$$

$$u_{A2} = u_{ref} + C_v^0 (T_{A2} - T_{ref})$$

$$u_{A2} = -137,6022 \text{ kJ} / \text{kg} + 1,410 \text{ kJ} / (\text{kg K}) (T_{A2} - 298,15) \text{ K}$$

$$u_{A2} = -557,9877 + 1,41 T_{A2}$$

y sustituyendo las expresiones anteriores en la ecuación de primera ley se obtiene directamente $T_{2A} = 474,745 \text{ K}$ ($201,6 \text{ }^\circ\text{C}$), por lo que $m_{A2} = 1,388 \text{ kg}$.

La solución anterior es independiente del estado de referencia seleccionado. Esto se puede demostrar al tomar otro estado de referencia, por ejemplo a $T_{ref} = 0 \text{ K}$ la entalpía de referencia puede ser cero, resultando

$$u_{ref} = h_{ref} - Pv = h_{ref} - RT_{ref} = 0$$

y entonces

$$h_e = h_{ref} + C_p^0 (T_e - T_{ref}) =$$

$$h_e = 0 + 1,872 \text{ kJ} / \text{kg K} ((143,63 + 273,15) - 0) \text{ K} = 780,21 \text{ kJ} / \text{kg}$$

$$u_{A2} = u_{ref} + C_v^0 (T_{A2} - T_{ref}) = 1,410 T_{A2}$$

sustituyendo las expresiones anteriores en la ecuación de primera ley se obtiene directamente $T_{2A} = 474,84 \text{ K}$ ($201,6 \text{ }^\circ\text{C}$). Con frecuencia se emplea este estado de referencia debido a que los cálculos son más sencillos.

Es importante resaltar que, debido a que la entalpía y la energía interna son dependientes sólo se podrá especificar una de ellas como estado de referencia.

Otra forma de hallar T_{A2} es reemplazar, en la expresión de primera ley

$$h_e = u_e + P_e v_e = u_e + R_{H_2O} T_e$$

quedando

$$0 = Q + m_{2A} \cdot (h_e - u_{2A}) = Q + m_{A2} \cdot (u_e + R_{H_2O} T_e - u_{A2}) = Q + m_{A2} \cdot (u_e - u_{A2}) + m_{A2} R_{H_2O} T_e$$

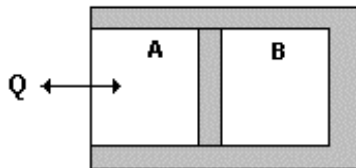
$$Q + m_{A2} C_v^0 (T_e - T_{A2}) + m_{A2} R_{H_2O} T_e = 0$$

$$-153,64 + \frac{659,068}{T_{A2}} 1,41(416,78 - T_{A2}) + \frac{659,068}{T_{A2}} (0,4615)(416,78) = 0$$

de donde se obtiene nuevamente $T_{A2} = 201,6 \text{ }^\circ\text{C}$.

Es oportuno mencionar que bajo estas condiciones la consideración de gas ideal, tanto para el agua como para el amoníaco, es adecuada ya que el error obtenido en el valor de la temperatura al compararlo con el resultado del ejercicio anterior es sólo del 2%.

5.- Se tiene un cilindro dividido por un pistón adiabático, sin fricción, que contiene monóxido de carbono en un lado (B) y agua (A) en el otro, como se muestra en la figura. El volumen que ocupa el monóxido de carbono inicialmente es de 120 litros y el del agua 200 litros encontrándose el monóxido a $150 \text{ }^\circ\text{C}$ y el agua a $100 \text{ }^\circ\text{C}$ con una calidad del 80 %. Bajo estas condiciones el agua intercambia calor lentamente hasta que, en el estado final, la calidad del agua sea del 30 % y el monóxido alcance una temperatura de $90,45 \text{ }^\circ\text{C}$. Calcule la presión final y la cantidad de calor transferido. Suponga que el monóxido de carbono se comporta como un gas ideal.



Para determinar la presión final se realiza un balance de fuerzas en el pistón, obteniéndose $P_{B2} = P_{A2} = P_2$. Adicionalmente se conoce que la calidad para el agua es $x_{A2} = 0,3$.

Hasta este momento, no se tiene definido ninguno de los dos estados finales en los tanques debido a que sólo se conoce una propiedad termodinámica en cada uno. Lo que sí se sabe es que el volumen físico del tanque A+B permanece constante, y éste se puede expresar en función de los volúmenes específicos finales en cada tanque

$$V_T = V_A + V_B = m_A v_{A2} + m_B v_{B2} \quad (a)$$

Un posible algoritmo de cálculo sería:

- 1.- Suponer $P_2 = P_{B2} = P_{A2}$
- 2.- Con P_2 leer en tablas v_f y v_g , y con la calidad $x_{A2} = 0,3$ determinar v_{A2}
- 3.- Con P_2 y $T_{B2} = 90,45$ °C, determinar v_{B2} por medio de la ecuación de gases ideales
- 4.- Verificar si se cumple la ecuación (a), evaluando la función objetivo:

$$f = V_T - m_A v_{A2} - m_B v_{B2} \quad (b)$$

Si no se cumple se debe regresar al paso 1.

Antes de comenzar el proceso iterativo se determinarán los estados iniciales.

Tanque A, agua

$$T_{A1} = 100 \text{ °C}$$

$$x_{A1} = 0,8$$

$$V_{A1} = 0,2 \text{ m}^3$$

Directamente de las tablas se obtiene $P_{A1} = 101,3$ kPa, $v_f = 0,001044$ m³/kg; $v_g = 1,6729$ m³/kg; $u_f = 418,91$ kJ/kg; $u_g = 2506,50$ kJ/kg y se puede calcular fácilmente el volumen específico, la energía interna específica y la masa haciendo uso de las ecuaciones:

$$v = (1-x)v_f + xv_g \quad ; \quad u = (1-x)u_f + xu_g \quad \text{y} \quad m_{A1} = \frac{V_{A1}}{v_{A1}}$$

Así se obtiene

$$v_{A1} = 1,3385 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ y } u_{A1} = 2088,98 \text{ kJ/kg} \text{ y } m_{A1} = 0,149 \text{ kg.}$$

Tanque B, monóxido de carbono

$$T_{B1} = 150 \text{ °C}$$

$$V_{B1} = 0,12 \text{ m}^3$$

Al realizar un balance de fuerzas sobre el pistón, $P_{B1} = P_{A1} = 101,3$ kPa, se puede obtener la masa del monóxido de carbono usando la ecuación de gas ideal ($R_{CO} = 0,2968$ kJ/kg K).

$$m_{B1} = \frac{P_{B1} V_{B1}}{R_{CO} T_{B1}} = 0,0968 \text{ kg}$$

Del enunciado del problema se sabe que se transfiere calor pero no su dirección, por lo que no se conoce *a priori* si la presión del estado final será mayor o menor a la inicial, entonces al realizar el proceso iterativo

P_2 (kPa)	v_f (m ³ /kg)	v_g (m ³ /kg)	v_{A2} (m ³ /kg)	v_{B2} (m ³ /kg)	f
300	0,001073	0,60582	0,182497	0,3597216	0,257987
350	0,001079	0,52425	0,15803	0,3083328	0,266607
100	0,001043	1,694	0,50893	1,0791648	0,139706
50	0,00103	3,24034	0,972823	2,1583296	-0,033877
75	0,001037	2,21711	0,665859	1,4388864	0,081503

e interpolando entre estos dos últimos valores se obtiene $P_2 = 57,34$ kPa. Una vez obtenida P_2 el estado final de ambos compartimientos se encuentra definido.

Para determinar el calor transferido se realiza un balance de energía en el sistema A+B. El trabajo es cero ya que el sistema considerado es un tanque rígido. La expresión final será

$$Q_{12} = m_A(u_{A2} - u_{A1}) + m_B(u_{B2} - u_{B1}) \quad (c)$$

donde $u_{B2} = 995,6495$ kJ/kg, la cual se obtiene interpolando para $P_2 = 57,34$ kPa. Como el cambio de temperatura que experimenta el monóxido de carbono no es considerable, C_v^0 puede considerarse constante (C_v^0 298,15 K y 100 kPa) = 0,744 kJ/(kgK)), la ecuación anterior se puede expresar como

$$Q_{12} = m_A(u_{A2} - u_{A1}) + m_B C_v^0 (T_{B2} - T_{B1}) \quad (d)$$

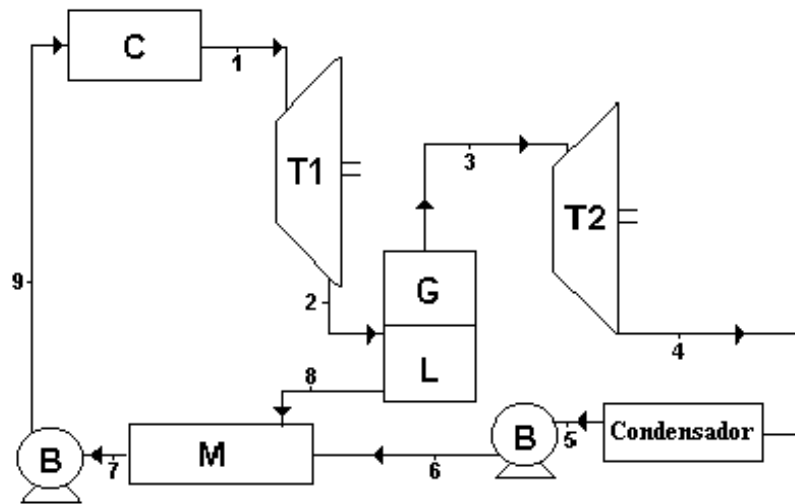
sustituyendo los valores en la ecuación anterior se obtiene $Q_{12} = -167,20$ kJ. El signo negativo indica que el calor es transferido desde el sistema a los alrededores.

Es importante resaltar que la energía interna del compartimiento B también se puede expresar en función de un estado de referencia como

$$u - u_{ref} = C_v^0 (T - T_{ref}) \quad (e)$$

si se sustituye la ecuación (e) en la expresión (c) para los estados B1 y B2 se obtendría la ecuación (d) la cual no depende del estado de referencia seleccionado.

6.- Se tiene el siguiente proceso el cual utiliza agua como fluido de trabajo.



Si todo el sistema, excepto la caldera y el condensador, es adiabático y la bomba B1 maneja un flujo de 25 kg/s.

Determine:

- Flujo másico que circula por la turbina T1.
- Potencia generada por las dos turbinas: T1 y T2.
- Potencia requerida por las bombas: B1 y B2.
- Potencia calorífica intercambiada en la caldera y el condensador.
- Completar la tabla anexa.

Punto	P (MPa)	T (°C)	h (kJ/kg)	x	Fase
1	1,6	600			
2	0,2			0,65	
3	0,2			1	
4	0,05			0,65	
5				0	
6		100			
7					
8	0,2			0	
9		180			

a) Balances de masa en el ciclo:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_9 = \dot{m}_7 \quad \dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_5 = \dot{m}_6 \quad \dot{m}_2 = \dot{m}_3 + \dot{m}_8$$

además se tiene como dato que $\dot{m}_6 = 25 \text{ kg/s}$

Al realizar el balance de energía en el separador gas-líquido

$$\dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_8 h_8$$

La corriente de entrada (2) es mezcla líquido vapor, y las corrientes de salida (3) y (8) son vapor saturado y líquido saturado respectivamente, por lo tanto se puede leer

$$T_2 = T_3 = T_8 = T_{sat}(0,2MPa) = 120,23^\circ C \quad y \quad P_2 = P_3 = P_8 = 0,2MPa$$

$$h_3 = h_g(0,2MPa) = 2706,63kJ/kg \quad h_8 = h_f(0,2MPa) = 504,68kJ/kg$$

$$h_2 = x_2 h_3 + (1 - x_2) h_8 = 1936kJ/kg$$

Además se tiene que $\frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_2} = x_2$ y $\frac{\dot{m}_8}{\dot{m}_2} = 1 - x_2$

y se puede despejar: $\dot{m}_2 = \frac{\dot{m}_3}{x_2} = \frac{25kg/m^3}{0,65} = 38,46kg/s$ y $\dot{m}_8 = \dot{m}_2 - \dot{m}_3 = 13,46kg/s$

b) Aplicando el balance de energía a la turbina 1 se obtiene

$$\dot{W}_{T1} = \dot{m}_2 (h_1 - h_2)$$

donde el valor de la entalpía en el estado 1 se obtiene directamente de las tablas $h_1 = 3693,23kJ/kg$. Sustituyendo valores la potencia de la turbina 1 será $\dot{W}_{T1} = 67583,06kW$

De igual forma para la turbina 2

$$\dot{W}_{T2} = \dot{m}_3 (h_3 - h_4)$$

donde h_4 se determina a partir de: $P_4 = 0,05MPa$ y $x_4 = 0,65$, siendo $h_f = 340,47 kJ/kg$ y $h_g = 2645,87 kJ/kg$

$$h_4 = 1839kJ/kg$$

finalmente

$$\dot{W}_{T2} = 21690,75kW$$

c) Para determinar la potencia requerida por las bombas 1 y 2, se realiza un balance de energía

$$\dot{W}_{B1} = \dot{m}_3 (h_5 - h_6)$$

La corriente 5 se encuentra definida ya que se conoce su presión ($P_5 = P_4 = 0,05MPa$) y su calidad ($x_5 = 0$), entonces el estado es líquido saturado

$$T_5 = 81,33^\circ C \quad \text{y} \quad h_5 = h_f(0,05MPa) = 340,47kJ/kg$$

La corriente 6 también se encuentra definida ya que se conoce la presión ($P_6 = P_7 = P_8 = 0,2MPa$) y $T_6 = 100^\circ C$. El estado es líquido comprimido, y como la presión es muy baja se hace la aproximación por temperatura, de manera que

$$h_6 = h_f(100^\circ C) = 419,02kJ/kg$$

finalmente,

$$\dot{W}_{B1} = -1963,75kW$$

De igual forma para la bomba 2

$$\dot{W}_{B2} = \dot{m}_2(h_7 - h_9)$$

Para definir la corriente 7 es necesario realizar un balance de energía en el mezclador

$$\dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_6 h_6$$

despejando,

$$h_7 = \frac{\dot{m}_8}{\dot{m}_7} h_8 + \frac{\dot{m}_6}{\dot{m}_7} h_6$$

y sustituyendo los valores conocidos se obtiene $h_7 = 449kJ/kg$. Conociendo la entalpía y la presión en la corriente 7 el estado queda definido. De la tabla se concluye que la corriente 7 es líquido comprimido. Para determinar la temperatura se realiza nuevamente la aproximación por temperatura, es decir, se busca una temperatura en la tabla de saturación para la cual $h_f = h_7$ y se lee

T (°C)	h (kJ/kg)
105	440,13
110	461,27

Al interpolar se obtiene $T_7 = 107,1^\circ C$.

La corriente 9 se encuentra definida ya que $P_9 = P_1 = 1,6MPa$ y $T_9 = 180^\circ C$, con estos valores se obtiene líquido comprimido: $h_9 = h_f(180^\circ C) = 763,21kJ/kg$

finalmente

$$\dot{W}_{B2} = -12084,52kW$$

- d) Para determinar la potencia calórica en la caldera y el condensador basta con realizar los balances de energía en cada equipo

Caldera:

$$\dot{Q} = \dot{m}_2(h_1 - h_9) = 112688,57 \text{ kW}$$

Condensador:

$$\dot{Q} = \dot{m}_3(h_5 - h_4) = -37463,25 \text{ kW}$$

- e) Al completar la tabla anexa, se obtiene

Corriente	P (MPa)	T (°C)	h (kJ/kg)	x	Fase
1	1,6	600	3693,23	---	VSC
2	0,2	120,23	1936	0,65	MLV
3	0,2	120,23	2706,63	1	VS
4	0,05	81,33	1839	0,65	MLV
5	0,05	81,33	340,47	0	LS
6	0,2	100	419,02	---	LC
7	0,2	107,1	419	---	LC
8	0,2	120,23	504,68	0	LS
9	1,6	180	763,21	---	LC

Problemas propuestos

1.- Indique si las siguientes aseveraciones son verdaderas (V) o falsas (F):

- () Un volumen de control que cumple con las condiciones de flujo uniforme estado uniforme varía sus propiedades con el tiempo pero no con la posición.
- () En un sistema cerrado el calor intercambiado con los alrededores es nulo.
- () El calor y el trabajo sólo dependen del estado inicial y final del sistema.
- () La entalpía para un gas ideal es función de T y P.
- () El trabajo sobre el vacío es nulo.
- () Para cualquier sustancia siempre que el proceso sea isotérmico, el cambio de energía interna es nula.
- () En un sistema que sufre un proceso adiabático la temperatura es constante.

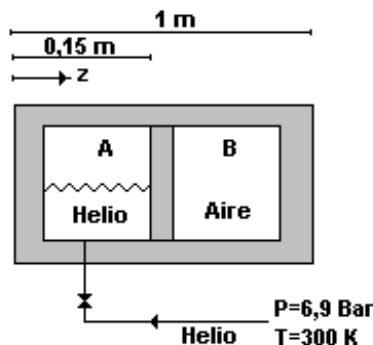
- () La función de una tobera es reducir la energía cinética del fluido.
- () Se dice que un sistema opera en estado estacionario cuando las condiciones en un volumen de control varían con respecto al tiempo.
- () Para cualquier sustancia se cumple que si $Pv^n = \text{constante}$ y $n=\gamma$ el proceso es isotérmico.
- () La energía potencial es una función de la trayectoria.

2.- Halle una relación entre presión y volumen para un proceso adiabático en un sistema cerrado que contiene un gas ideal.

3.- Un tanque rígido esta dividido en dos compartimientos. Ambos contienen agua, donde el lado A se encuentra a una presión de 200 kPa y un volumen específico de $0,5 \text{ m}^3/\text{kg}$. El volumen total del lado A es de 1 m^3 . El lado B contiene 3,5 kg de agua a 0,5 MPa y $400 \text{ }^\circ\text{C}$. Se retira la separación entre estas dos partes y se intercambia calor hasta llegar a una temperatura uniforme de $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Definir el estado final y el calor transferido.

4.- Un estudiante de termodinámica propone modelar el proceso de llenado de un globo suponiendo que la membrana elástica del mismo se comporta como un resorte, oponiéndose a la expansión, como se muestra en la figura. El sistema es adiabático y consta de dos compartimientos A (helio) y B (aire) separados por un pistón adiabático. Las condiciones iniciales del compartimiento A son: $P = 1 \text{ bar}$, $T = 300 \text{ K}$, $L = 0,15 \text{ m}$ y en el compartimiento B se sabe que la temperatura es de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. El área del pistón es de $0,02 \text{ m}^2$ y su masa de 1,5 kg. La constante del resorte es 5 kN/m y su punto de equilibrio se encuentra a $L = 0,1 \text{ m}$. Tanto el helio como el aire se pueden considerar gases ideales con calores específicos constantes. Se pide:

- a) La temperatura en el compartimiento A y en el B cuando el pistón se encuentra a una distancia $L = 0,6 \text{ m}$.
- b) El trabajo realizado por el helio.

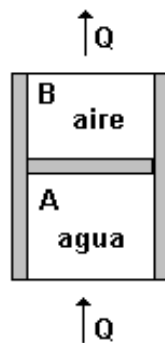


5.- Un compresor adiabático opera con 129 kg/h de aire. Se sabe que durante la compresión aumenta la entalpía del aire en 190 MJ/h . Para retirar todo el calor que se desprende de la

compresión se utiliza una corriente de agua, la cual experimenta un cambio de entalpía de 10 MJ/h. Determine la potencia del compresor.

6.- Se tiene un cilindro aislado por toda su superficie excepto la parte superior e inferior. El cilindro en su interior tiene un pistón adiabático y de masa despreciable, que separa al cilindro en dos compartimientos A y B, los cuales contienen agua y aire respectivamente. El agua inicialmente se encuentra a 101283 Pa y una calidad del 5,8 %; mientras que el aire se encuentra a una temperatura de 37,8 °C. Se le suministra calor a la parte inferior del cilindro hasta que el agua alcanza una temperatura de 130,7 °C como vapor saturado, mientras que simultáneamente por la parte superior se le retira calor de tal forma que la temperatura del aire permanece constante. La masa en cada compartimiento es de 454 gramos. El aire se puede considerar gas ideal con calor específico constante. Determine

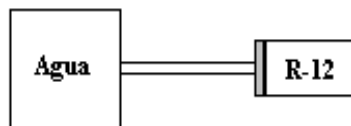
- El volumen específico del aire en el estado final.
- El calor retirado y el trabajo realizado por el aire durante el proceso.
- El calor suministrado al agua.



7.- Un tanque de 100 litros contiene agua a 70 % de calidad y una presión de 1MPa. El tanque está conectado a un pistón, el cual originalmente contiene refrigerante R-12 a una presión de 2 MPa y una temperatura de 100 °C. El volumen del pistón es de 20 litros. Si se suministra calor al tanque, determine

- La potencia calorífica, si al cabo de 1 segundo de comenzar el proceso, la temperatura dentro del tanque es de 200 °C.
- Estado final del agua, si al cabo de 5 segundos el freón 12 ocupa un volumen de 6 litros siendo el proceso en este compartimiento isotérmico.
- Trabajo efectuado sobre el R-12.

Para la resolución de este problema use el webbook (<http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>)

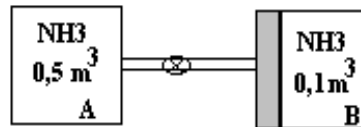


8.- Una industria requiere nitrógeno para sus procesos químicos. El N₂ es utilizado en la planta durante los días de semana y el fin de semana es almacenado en un tanque de 10 m³ de

capacidad. Se ha observado que los viernes en la tarde el tanque contiene 60 % del volumen total como líquido y 40 % como vapor, a una temperatura de $-173,15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Como esta temperatura es menor que la del ambiente, se da inicio a una transferencia de calor desde el ambiente hacia el sistema con una velocidad de $0,24\text{ kW}$ (constante). El tanque posee una válvula de seguridad en la parte superior que se abre cuando la presión absoluta dentro del mismo es de $1,5\text{ MPa}$. Una vez abierta la válvula, la presión dentro del tanque se mantiene constante. Si el fin de semana tiene una duración de 60 h , se desea determinar

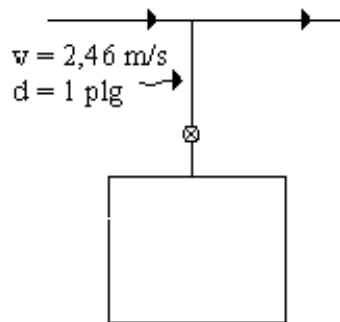
- El estado del nitrógeno al terminar el fin de semana (P, T, v, x).
- ¿Se abre la válvula de seguridad?, ¿sale masa del tanque durante el fin de semana?. Justifique su respuesta.

9.- Un tanque que contiene amoníaco a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 45 % de calidad está conectado a un cilindro-pistón que contiene nitrógeno a 500 kPa y 250 K . El tanque tiene un volumen de $0,5\text{ m}^3$ y está sometido a una potencia calórica constante e igual a 10 kJ/s . Durante el proceso de compresión del nitrógeno se extrae calor ($8,9\text{ kJ/s}$) para mantener su temperatura constante. Calcular la potencia realizada sobre el nitrógeno cuando han transcurrido 10 minutos de haber comenzado el suministro de calor al tanque.



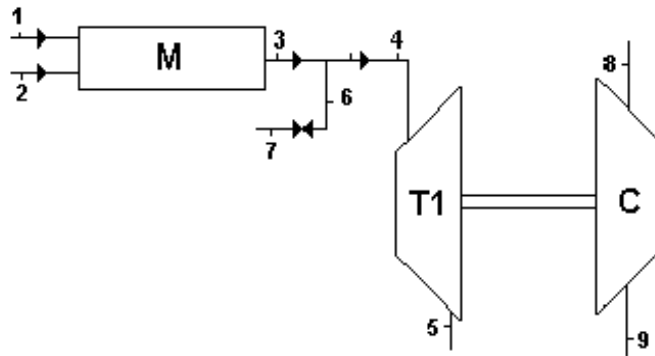
10.- Se tiene un tanque rígido conectado a una línea de vapor saturado a $1,75\text{ MPa}$, tal como se muestra en la figura. Dicho tanque tiene una capacidad de $0,7\text{ m}^3$ e inicialmente contiene agua a 175 kPa con una calidad de 40 %. En un instante dado la válvula que conecta el tanque con la tubería se abre hasta que el flujo cesa. Para alcanzar las condiciones finales deseadas el tanque está rodeado por una resistencia que suministra 2400 W .

- Defina el estado final del tanque (P, T, v, x).
- ¿Qué cantidad de masa se transfirió durante el proceso?.
- ¿Cuánto tiempo dura el proceso?.



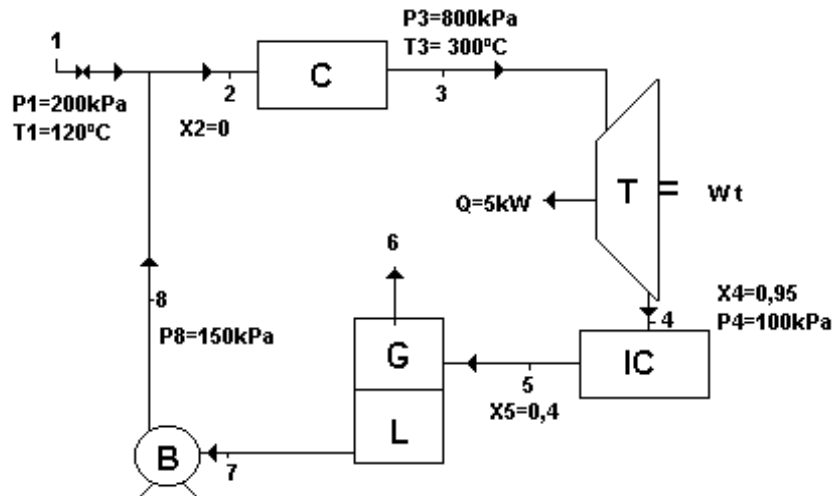
11.- Se tiene un sistema como el mostrado en la figura, en el que dos corrientes de vapor de agua se mezclan adiabáticamente, luego de lo cual se extraen $0,2\text{ kg/s}$ que se hacen pasar a

través de una válvula, a cuya salida se tiene una presión de 700 kPa. El resto del vapor pasa a través de una turbina cuyas condiciones de descarga son $P_5 = 200 \text{ kPa}$ y $x_5 = 0,97$. Se sabe que no hay caídas de presión en las tuberías y se conocen además los siguientes datos: $T_1 = 600 \text{ K}$; $T_2 = 485,57 \text{ K}$; $x_2 = 1$; $m_2 = 2,7 \text{ kg/s}$. Al compresor entra amoníaco a $T_8 = 30 \text{ °C}$ y $P_8 = 0,30 \text{ MPa}$; el caudal en la corriente 8 es de $3,112 \text{ m}^3/\text{s}$, y sale a $T_9 = 135 \text{ °C}$ y $P_9 = 0,9 \text{ MPa}$. Calcular la potencia del compresor y el flujo másico en la corriente 1.



- 12.- En el esquema mostrado en la figura se utiliza una corriente de agua a 200 kPa y 120 °C para producir una determinada potencia de la turbina. Considerando el separador adiabático, la bomba adiabática y que no hay pérdidas de presión en el intercambiador, determine
- La temperatura a la salida del mezclador y la potencia calórica por unidad de masa suministrada en la caldera.
 - Potencia generada en la turbina y la potencia suministrada en la bomba.
 - Flujo másico a la entrada de la turbina.

NOTA: la potencia calórica retirada a la corriente 4 en el intercambiador es de 6209,61 kW.

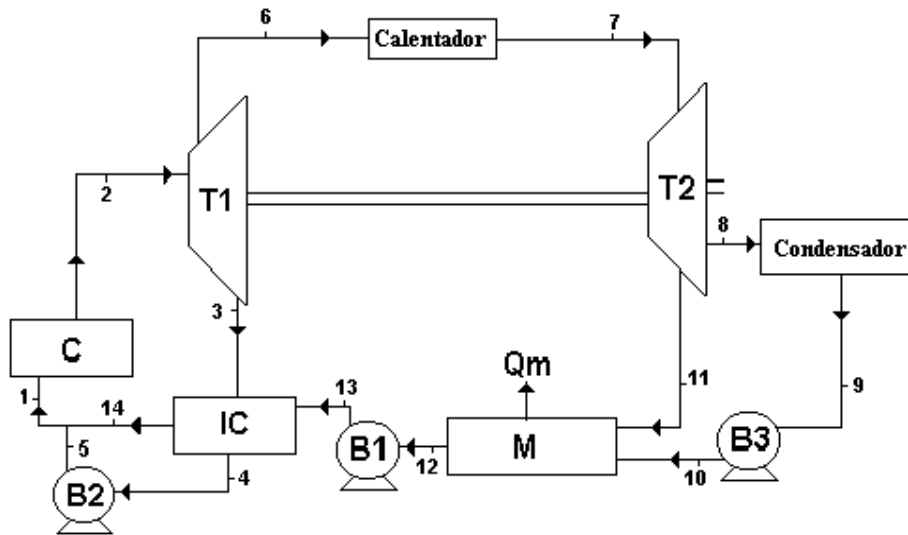


13.- Considere el siguiente ciclo que opera con agua como fluido. Tomando en cuenta que las bombas y turbinas son adiabáticas y que no hay caídas de presión en las tuberías, se desea conocer

- El estado de cada corriente (P , T , h , x , fase).
- Potencia requerida por las bombas 1 y 2.
- Potencia calórica del condensador y la caldera.
- Potencia generada en la turbina 1.

Se dispone de los siguientes datos:

$|\dot{Q}_{mez}| = 573,75 \text{ kW}$; $|\dot{Q}_{calentador}| = 267,65 \text{ kW}$; $|\dot{W}_{T2}| = 375,45 \text{ kW}$; $|\dot{W}_{B3}| = 10 \text{ kW}$;
 $P_1 = 15 \text{ MPa}$; $T_1 = 328,6 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_2 = 450 \text{ }^\circ\text{C}$; $P_3 = 0,8 \text{ MPa}$; $X_3 = 0,75$; $X_4 = 0$; $T_5 = 176,3 \text{ }^\circ\text{C}$;
 $P_6 = 8 \text{ MPa}$, $m_6 = 0,4 \text{ kg/s}$; $T_7 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$; $P_8 = 4 \text{ MPa}$; $X_8 = 0,85$; $X_9 = 0$; $P_{10} = 8 \text{ MPa}$; $P_{11} = 1 \text{ MPa}$;
 $X_{11} = 0,8$; $P_{12} = 5 \text{ MPa}$; $T_{14} = 346 \text{ }^\circ\text{C}$.



Respuestas a los problemas propuestos

1.- V, F, F, F, V, F, F, F, F, F, F, V

2.- $PV^\gamma = \text{constante}$

3.- a) $P = 0,10135 \text{ MPa}$; $x = 0,3430$; MLV ; b) $-7456,47 \text{ kJ}$.

4.- a) $T_A = 404,1 \text{ K}$, $T_B = 403,15 \text{ K}$; b) $1,3075 \text{ kJ}$.

5.- $\dot{W} = -200 \text{ MJ/s}$

6.- a) $v_f = 0,3232 \text{ m}^3/\text{kg}$; b) $Q = W = 41,08 \text{ kJ}$; c) $Q = 949,39 \text{ kJ}$.

7.- a) $\dot{Q} = 412,5 \text{ kJ/s}$; b) $P = 3,34 \text{ MPa}$; $v = 0,1555 \text{ m}^3/\text{s}$; $T = 853,62^\circ\text{C}$; $u = 3769,2 \text{ kJ/kg}$; c) $W = -791,67 \text{ kJ}$

8.- a) $P = 1,08 \text{ MPa}$; $T = 105 \text{ K}$; $v = 0,002348 \text{ m}^3/\text{kg}$; $x = 0,04$; b) no sale masa ya que el calor dato del problema es menor al calor requerido.

9.- $\dot{W} = 0 \text{ kJ/s}$

10.- a) $P = 1,75 \text{ MPa}$, $T = 205,97 \text{ }^\circ\text{C}$, $x = 0,97$, MLV ; b) $m = 4,615 \text{ kg}$; c) $t = 7 \text{ min}$.

11.- $\dot{W} = -1468,65 \text{ kJ/s}$; $\dot{m} = 2,59 \text{ kg/s}$

12.- a) $T = 111,37 \text{ }^\circ\text{C}$; $q = 12946,95 \text{ kJ/kg}$; b) $\dot{W}_T = 2464,475 \text{ kJ/s}$; $W_B = 75,75$ c) $\dot{m} = 5 \text{ kg/s}$

13.- a)

Corriente	P (MPa)	T ($^\circ\text{C}$)	h (kJ/kg)	x	m
1	15	328,6	1512,84	NE	1
2	15	450	3156,2	NE	1
3	0,8	170,43	2257,1	0,75	0,6
4	0,8	170,43	721,11	0	0,6
5	15	176,3	754,51	NE	0,6
6	8	295,06	2729,17	0,98	0,4
7	8	500	3398,3	NE	0,4
8	4	250,4	2544,28	0,85	0,2
9	4	250,4	1087,31	0	0,2
10	8	260,31	1137,31	NE	0,2
11	1	179,91	2375,04	0,8	0,2
12	5	75,92	321,8	NE	0,4
13	15	80	346,19	NE	0,4
14	15	346	2650,18	NE	0,4

b) $\dot{W}_{B1} = -9,75 \text{ kJ/s}$; $\dot{W}_{B2} = -20,04 \text{ kJ/s}$; c) $\dot{Q}_{\text{cond}} = -291,394 \text{ kJ/s}$; $\dot{Q}_{\text{cald}} = 1643,86 \text{ kJ/s}$;

d) $\dot{W}_{T1} = 710,27 \text{ kJ/s}$

CAPÍTULO 5

SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

La segunda ley de la termodinámica permite conocer cuando un proceso es factible o no, por ejemplo, vapor de agua puede condensar espontáneamente al estar en contacto con un medio frío, pero esa agua no puede llegar a ser de nuevo vapor sin suministrarle energía. La primera ley de la termodinámica puede describir ambos procesos pero será la segunda ley la que indicará cuál de los procesos es posible. A continuación se presentan algunas definiciones básicas.

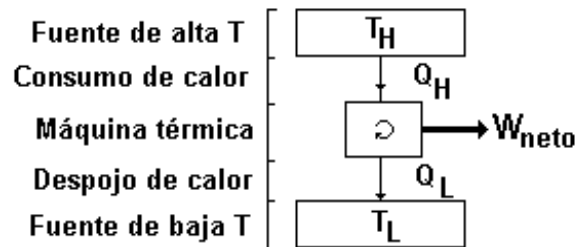
5.1. Definiciones y conceptos fundamentales.

Fuente térmica

Es un sistema suficientemente grande, en equilibrio estable, capaz de ceder o absorber cantidades finitas de calor sin experimentar cambio alguno de temperatura. Por ejemplo: la atmósfera, el mar, *etc.*

Máquina térmica

Es un sistema termodinámico que opera por ciclos y transforma en trabajo neto cierta cantidad neta de calor; un ejemplo de estas máquinas podría ser el ciclo Rankine. Las máquinas térmicas pueden representarse esquemáticamente como



En términos generales para conocer la **eficiencia** de cualquier proceso se debe establecer la relación

$$\text{eficiencia} = \frac{\text{lo que se desea}}{\text{lo que cuesta}} \quad (5.1)$$

La eficiencia para una máquina térmica se conoce como **rendimiento térmico** y vendrá dado por la relación que existe entre el trabajo neto producido y el calor absorbido

$$\eta = \frac{|W_N|}{|Q_H|} \quad (5.2)$$

aplicando la primera ley de la termodinámica a la máquina térmica durante todo el ciclo, la ecuación (5.2) puede expresarse como

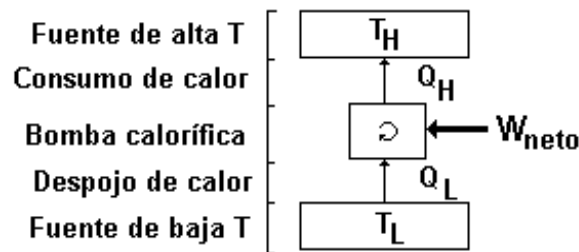
$$\eta = 1 - \frac{|Q_L|}{|Q_H|} \quad (5.3)$$

donde

$$0 \leq \eta < 1$$

Bomba calorífica

Es un sistema termodinámico que, operando cíclicamente, extrae calor de una fuente de baja temperatura y cede calor a otra fuente de alta temperatura. Para realizar este proceso la bomba calorífica recibe energía externa en forma de trabajo. Los ciclos de refrigeración y calefacción son ejemplos de dichas máquinas. El esquema general de una bomba de calor se puede representar como



La eficiencia para los refrigeradores se llama **coeficiente de rendimiento** o coeficiente de operación y viene dado por

$$\beta = \frac{\text{lo que se desea}}{\text{lo que cuesta}} = \frac{\text{retirar calor de un reservorio de baja temperatura}}{\text{trabajo suministrado}} \quad (5.4)$$

$$\beta = \frac{|Q_L|}{|W|} = \frac{1}{\frac{|Q_H|}{|Q_L|} - 1} \quad (5.5)$$

donde

$$0 < \beta < \infty$$

El coeficiente de rendimiento de un **calefactor** viene dado por

$$\beta' = \frac{\text{lo que se desea}}{\text{lo que cuesta}} = \frac{\text{ceder calor a un reservorio de alta temperatura}}{\text{trabajo suministrado}} \quad (5.6)$$

$$\beta' = \frac{|Q_H|}{|W|} = \frac{1}{1 - \frac{|Q_L|}{|Q_H|}} \quad (5.7)$$

donde

$$0 < \beta' < \infty$$

Enunciado de Kelvin-Planck

Es imposible construir una máquina que operando de un modo continuo (en ciclos), sea capaz como único resultado, de absorber calor de una sola fuente térmica y realizar una cantidad equivalente de trabajo. Esto implica que ninguna máquina térmica tiene un rendimiento del 100%.

Enunciado de Clausius

Es imposible construir una máquina cuyo único efecto sea el de transferir calor de una fuente más fría a otra más caliente. Esto implica que no existe ninguna bomba de calor con coeficiente de funcionamiento infinito.

Aunque los enunciados de Kelvin-Planck y Clausius parecen ser distintos, realmente son equivalentes, ya que la violación de uno de ellos lleva consigo la violación del otro.

Los ciclos termodinámicos se dividen generalmente en ciclos de potencia y ciclos de refrigeración. Los ciclos de potencia o dispositivos cíclicos generadores de potencia tienen gran importancia en el estudio de la termodinámica ya que varios sistemas y máquinas se basan en su funcionamiento, como por ejemplo los motores automotrices y las turbinas de gas.

Ciclo de Carnot

El ciclo de Carnot es una máquina térmica que consiste de dos procesos reversibles isotérmicos y dos procesos reversibles adiabáticos. Al ser todos los procesos individualmente reversibles, también el ciclo completo lo es, y si se invierte el ciclo, la máquina térmica se convierte en una bomba de calor. Este es el ciclo más eficiente que puede operar entre dos depósitos de temperatura constante.

Principios de Carnot

Incluye tres proposiciones o corolarios que son de gran utilidad al comparar el funcionamiento de los ciclos:

- Si se tienen dos máquinas térmicas, una reversible y otra no, operando entre los mismos niveles de temperatura entonces

$$\eta_{\text{reversible}} > \eta_{\text{irreversible}} \quad (5.8)$$

- Dos máquinas térmicas reversibles operando entre los mismos niveles de temperatura tienen rendimientos iguales, independientemente de la sustancia de trabajo

$$\eta_{\text{reversible}} = f(T_H, T_L) \quad (5.9)$$

- La relación entre dos temperaturas cualesquiera en la escala absoluta es igual a la relación que existe entre las cantidades de calor absorbida y cedida por una máquina térmica reversible que opera entre dos recintos a dichas temperaturas, es decir

$$\frac{|Q_H|}{|Q_L|} = \frac{T_H}{T_L} \quad (5.10)$$

Ciclo Otto.

Es un ciclo ideal, también llamado máquina de combustión interna. Este proceso se realiza a volumen constante y emplea la misma mezcla de combustible como medio de trabajo por lo que la energía térmica de combustión se encuentra disponible en el interior de la máquina productora de trabajo.

El ciclo Otto que consta de 4 procesos internamente reversibles se denomina comúnmente ciclo Otto de 4 tiempos. El ciclo consta de una compresión isentrópica, una adición de calor a volumen constante (combustión), una expansión isentrópica y finalmente un desprendimiento de calor a volumen constante (enfriamiento).

La eficiencia térmica de un ciclo Otto viene dada en función de la relación de compresión y la relación de capacidades térmicas específicas. El valor de la eficiencia térmica aumenta al aumentar la relación de compresión.

Ciclo Diesel.

El ciclo Diesel, también conocido como ciclo de encendido por compresión, se realiza a presión constante. Difiere del ciclo Otto en que la temperatura al final del proceso de compresión es tal que la combustión se inicia en forma espontánea.

En los motores Diesel sólo el aire se comprime durante el proceso de compresión, y los otros tres procesos son iguales al ciclo Otto. En otras palabras, este ciclo también se compone de 4 procesos internamente reversibles, que solo difiere del ciclo Otto en la fase de combustión. El ciclo Diesel es fundamentalmente función de la relación de compresión, la relación de combustión, y la relación de capacidades térmicas específicas. La eficiencia de éste es siempre menor a la de un ciclo Otto para la misma relación de compresión, si la relación de combustión es mayor que la unidad.

Las eficiencias térmicas de los ciclos Otto y Diesel serán menores que la de un ciclo de Carnot que opere entre los mismos reservorios de temperatura ya que aunque estos ciclos están formados por procesos internamente reversibles, el proceso global involucra irreversibilidades como las transformaciones de calor por diferencia de temperatura finitas.

Hay otros procesos que implican adición de calor isotérmico a temperatura T_H y un proceso de desprendimiento de calor isotérmico a temperatura T_L : el ciclo de Stirling y el ciclo

de Ericsson. En estos ciclos los dos procesos isentrópicos de Carnot son sustituidos por dos procesos de regeneración a volumen constante en el ciclo de Stirling y dos procesos de regeneración a presión constante en el ciclo de Ericsson.

5.2. Desigualdad de Clausius: segunda ley de la termodinámica para un ciclo.

Cualquier ciclo reversible se puede descomponer en un conjunto de ciclos de Carnot, de modo que el efecto del ciclo original sea idéntico al conjunto de ciclos de Carnot. A partir de los corolarios de Carnot se puede demostrar que

$$\oint \left(\frac{\partial Q}{T} \right) \leq 0 \quad (5.11)$$

Si se cumple la igualdad el proceso es reversible y en caso contrario, el proceso será irreversible.

5.3. Segunda ley de la termodinámica para sistemas cerrados.

Considere el sistema cerrado sometido a un ciclo presentado en el apartado 4.2 del capítulo anterior. Al aplicar la ecuación (5.11) para un proceso reversible a cada uno de los ciclos considerados se llega a

$$\int_{2b}^1 \frac{\partial Q}{T} = \int_{2c}^1 \frac{\partial Q}{T} \quad (5.12)$$

esta ecuación demuestra que la integral cíclica de $\delta Q/T$ no depende de la trayectoria, sino de los estados inicial y final, permitiendo definir una propiedad termodinámica llamada **entropía** que se designa con la letra S y se expresa como

$$dS = \left(\frac{\partial Q}{T} \right)_{rev} \quad (5.13)$$

la entropía es una propiedad extensiva que depende del estado termodinámico del sistema. Al igual que la energía interna, la entalpía, etc., se puede definir la entropía específica como

$$s = \frac{S}{m} \quad \left[\frac{kJ}{kg \ K} \right] \quad (5.14)$$

Esta propiedad aparece en las tablas termodinámicas y se determina de la misma manera que la energía interna.

Si el proceso es irreversible, se cumple

$$dS > \left(\frac{\partial Q}{T} \right)_{irr} \quad (5.15)$$

La segunda ley de la termodinámica para un sistema cerrado, se puede expresar en forma general, combinando las ecuaciones (5.13) y (5.15), de la siguiente manera

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T} \quad (5.16)$$

Finalmente, si el sistema es adiabático

$$dS \geq 0 \quad (5.17)$$

La ecuación (5.17) indica que, durante un proceso, la entropía de un sistema aislado (cerrado-adiabático) siempre aumenta o, en el caso límite de un proceso reversible, permanece constante. Esto se conoce como el **principio del incremento de la entropía**. Esta ecuación permitirá entonces establecer la factibilidad de que un proceso se lleve a cabo o no.

Siempre se puede tomar un sistema lo suficientemente grande, llamado universo, que incluya el sistema que se desea estudiar más los alrededores de forma que el sistema total (universo) sea aislado y por lo tanto cumpla con la ecuación (5.17), entonces

$$dS_{\text{universo}} = dS_{\text{sistema}} + dS_{\text{alrededores}} \geq 0 \quad (5.18)$$

o también

$$\Delta S_{\text{universo}} = \Delta S_{\text{sistema}} + \Delta S_{\text{alrededores}} \geq 0 \quad (5.19)$$

donde

$$\Delta S_{\text{sistema}} = m_f s_f - m_i s_i = m(s_f - s_i) \quad (5.20)$$

$$\Delta S_{\text{alrededores}} = \sum_{\text{alrededores}} \left(\frac{Q}{T} \right) \quad (5.21)$$

Es de resaltar que:

- el calor intercambiado durante el proceso se contabiliza en el alrededor, por lo que debe llevar el signo correspondiente, por ejemplo si el calor se le suministra al sistema dicho calor es cedido por el alrededor entonces su signo será negativo.
- cada uno de los términos del lado derecho de la ecuación (5.19) puede aumentar o disminuir e incluso tomar valores negativos, pero la suma total ($\Delta S_{\text{universo}}$) debe cumplir con el principio del incremento de la entropía para que el proceso sea factible espontáneamente.

5.4. Segunda ley de la termodinámica para sistemas abiertos.

En forma general, el balance o contabilidad de una magnitud física K cualquiera puede expresarse de la siguiente manera

$$\left\{ \begin{array}{l} K \text{ que} \\ \text{entra} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} K \text{ que} \\ \text{sale} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} K \text{ que se genera debido a} \\ \text{un proceso termodinámico} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} K \text{ que se} \\ \text{acumula} \end{array} \right\} \quad (5.22)$$

Por ejemplo, si K se refiere a la energía, la primera ley indica que la generación es nula y se obtiene la ecuación (4.25).

Si en vez de considerar la energía se toma en cuenta la entropía se llega a la siguiente expresión

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{entropía} \\ \text{que entra} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{entropía} \\ \text{que sale} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{entropía que se genera debido a} \\ \text{un proceso termodinámico} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{entropía que} \\ \text{se acumula} \end{array} \right\} \quad (5.23)$$

Al identificar cada uno de los términos

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{entropía} \\ \text{que entra} \end{array} \right\} = \sum \dot{m}_e s_e + \int \frac{\partial \dot{Q}}{T} \quad (5.24)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{entropía} \\ \text{que sale} \end{array} \right\} = \sum \dot{m}_s s_s \quad (5.25)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{entropía que} \\ \text{se acumula} \end{array} \right\} = \frac{dS}{dt} = \frac{d(ms)}{dt} \quad (5.26)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{entropía que} \\ \text{se genera} \end{array} \right\} = \dot{\sigma} \quad (5.27)$$

reordenando y sustituyendo términos se obtiene la expresión general de la segunda ley para un sistema abierto

$$\frac{d(ms)}{dt} - \sum \dot{m}_e s_e - \int \frac{\partial \dot{Q}}{T} + \sum \dot{m}_s s_s = \dot{\sigma} \quad (5.28)$$

donde $\dot{\sigma}$ es mayor que cero si el proceso es irreversible e igual a cero si el proceso es reversible, es decir

$$\dot{\sigma} \geq 0 \quad (5.29)$$

$$\frac{d(ms)}{dt} - \sum \dot{m}_e s_e - \int \frac{\partial \dot{Q}}{T} + \sum \dot{m}_s s_s \geq 0 \quad (5.30)$$

En la ecuación anterior el primer término contabilizará el cambio de entropía del sistema, mientras que el resto de los términos, ya que involucran transferencia de masa o calor a través de la frontera, contabilizarán el cambio de entropía de los alrededores. Por lo tanto esta ecuación también se puede expresar de manera equivalente a la ecuación (5.18) como

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_{universo} = \left(\frac{dS}{dt}\right)_{sistema} + \left(\frac{dS}{dt}\right)_{alrededores} \geq 0 \quad (5.31)$$

donde

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_{alrededores} = \sum (\dot{m}_e s_e)_{alrededores} - \sum (\dot{m}_s s_s)_{alrededores} + \int \left(\frac{\partial \dot{Q}}{T}\right)_{alrededores} \quad (5.32)$$

Para un proceso en estado estacionario la ecuación (5.30) se reduce a

$$-\sum \dot{m}_e s_e - \int \frac{\partial \dot{Q}}{T} + \sum \dot{m}_s s_s \geq 0 \quad (5.33)$$

y para un proceso de flujo uniforme (no estacionario), integrando con respecto al tiempo la ecuación (5.30) se reduce a

$$m_f s_f - m_i s_i - \sum m_e s_e - \int \frac{\partial Q}{T} + \sum m_s s_s \geq 0 \quad (5.34)$$

5.5. Relación de la entropía con otras propiedades termodinámicas.

Considere un sistema cerrado que experimenta un proceso reversible. Al aplicar la primera ley de la termodinámica a este sistema se obtiene

$$\partial Q - \partial W = dU$$

pero por la segunda ley de la termodinámica, ecuación (5.13), se sabe que

$$dS = \left(\frac{\partial Q}{T}\right)_{rev}$$

y adicionalmente el trabajo viene dado por la ecuación

$$\partial W = PdV$$

al sustituir las dos últimas ecuaciones en la expresión de la primera ley el resultado es

$$TdS = dU - PdV \quad (5.35)$$

o por unidad de masa

$$Tds = du - Pdv \quad (5.36)$$

por otra parte

$$H = U + PV$$

que en forma diferencial es

$$dH = dU + PdV + VdP \quad (5.37)$$

al sustituir esta última ecuación en la ecuación (5.35) se obtiene

$$TdS = dH - VdP \quad (5.38)$$

o por unidad de masa

$$Tds = dh - v dP \quad (5.39)$$

A pesar de que las ecuaciones (5.35) y (5.38), o (5.36) y (5.39), se desarrollaron para un proceso reversible, son válidas para cualquier proceso cuya masa permanezca constante, ya que son relaciones entre propiedades termodinámicas las cuales son funciones únicamente de los estados final e inicial.

Aplicación a gas ideal

Al combinar las relaciones termodinámicas y las expresiones para un gas ideal: $Pv = RT$, $du = C_v^o dT$ y $dh = C_p^o dT$ se obtiene fácilmente

$$ds = \frac{C_v^o}{T} dT + R \frac{dv}{v} \quad (5.40)$$

y

$$ds = \frac{C_p^o}{T} dT - R \frac{dP}{P} \quad (5.41)$$

al integrar estas dos ecuaciones considerando C_p^o y C_v^o constantes, se obtiene

$$s_f - s_i = C_v^o \ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right) + R \ln\left(\frac{v_f}{v_i}\right) \quad (5.42)$$

y

$$s_f - s_i = C_p^o \ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right) - R \ln\left(\frac{P_f}{P_i}\right) \quad (5.43)$$

Para procesos a entropía constante, denominados **isentrópicos**, las expresiones (5.42) y (5.43) se reducen a

$$\left(\frac{T_f}{T_i}\right) = \left(\frac{v_i}{v_f}\right)^{\gamma-1} \quad (5.44)$$

$$\left(\frac{T_f}{T_i}\right) = \left(\frac{P_f}{P_i}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} \quad (5.45)$$

$$\left(\frac{P_f}{P_i}\right) = \left(\frac{v_i}{v_f}\right)^\gamma \quad (5.46)$$

o de forma general

$$Tv^{\gamma-1} = \text{constante} \quad (5.47)$$

$$TP^{(1-\gamma)/\gamma} = \text{constante} \quad (5.48)$$

$$Pv^\gamma = \text{constante} \quad (5.49)$$

En el caso de que C_p^o y C_v^o no se puedan considerar constantes, en las ecuaciones (5.40) y (5.41) se debe conocer la relación de C_p^o y C_v^o con la temperatura para poder realizar la integración. Esta relación se presenta comúnmente en la literatura en dos formas:

a) polinómica, $C_p^o = a + bT + cT^2 + \dots$

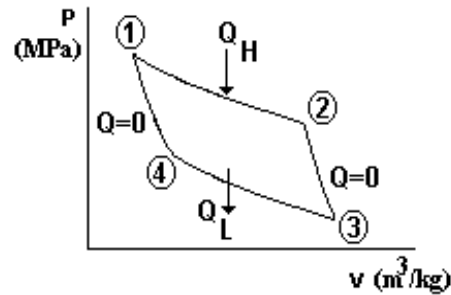
b) en una tabla que agrupa las propiedades de la sustancia como gas ideal, donde $\int_{T_{ref}}^T \frac{C_p^o}{T} dT$ se conoce como s^o .

Para emplear dicha tabla sólo se necesita conocer la temperatura, ya que por ser gases ideales, u , h y s^o son sólo función de la temperatura.

5.6. Representación de procesos termodinámicos en el diagrama T-s.

Cualquier proceso termodinámico puede ser representado en un diagrama T-s. Como ejemplo se tomará el ciclo de Carnot.

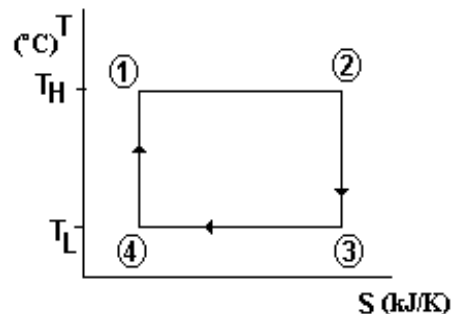
El ciclo de Carnot consta de 4 procesos: 2 adiabáticos y 2 isotérmicos. Estos procesos se pueden representar en el diagrama P-v como



Como todos los procesos son reversibles el cambio de entropía en cada uno viene dado por la ecuación (5.13).

- para los procesos isotérmicos, $\Delta S = \frac{Q}{T}$, es decir:
para el proceso de 1 a 2: $S_2 - S_1 = \frac{Q_H}{T_H}$; $Q_H > 0$
y para el proceso de 3 a 4: $S_4 - S_3 = \frac{Q_L}{T_L}$; $Q_L < 0$
- para los procesos adiabáticos, $\Delta S = 0$, es decir:
para el proceso de 2 a 3: $S_2 = S_3$
y para el proceso de 4 a 1: $S_4 = S_1$

Al representar el ciclo de Carnot en un diagrama T-s se obtiene



Se puede observar que el área bajo la curva 1-2 representa el calor absorbido por el ciclo (Q_H) mientras que el área bajo la curva 3-4 representa el calor cedido (Q_L), entonces el área encerrada dentro de la curva representa el calor neto transferido durante todo el ciclo.

5.7. Eficiencias de equipos de trabajo continuo.

En general es práctico realizar una comparación entre la utilización actual de un equipo de trabajo continuo bajo condiciones dadas y la utilización que debería haber sido alcanzada en un proceso ideal. El proceso ideal será un proceso reversible y adiabático, por lo que de la ecuación (5.13) se deduce entonces que este proceso será isentrópico.

Es importante resaltar que un proceso adiabático reversible es isentrópico, aunque un proceso isentrópico no es necesariamente adiabático reversible.

A continuación se desarrollarán las expresiones de la eficiencia isentrópica para turbinas, compresores y bombas.

Turbina

La eficiencia isentrópica para una turbina viene dada por

$$\eta_T = \frac{\text{trabajo real de la turbina}}{\text{trabajo isentrópico de la turbina}} = \frac{W_T}{W_s} = \frac{\dot{W}_T}{\dot{W}_s} \quad (5.50)$$

donde los trabajos, o potencias, real e isentrópico se obtienen a partir de la primera ley de la termodinámica

$$\eta_T = \frac{\dot{m}(h_1 - h_2)}{\dot{m}(h_1 - h_{2s})} = \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_{2s})} \quad (5.51)$$

siendo

h_1 la entalpía calculada a las condiciones de la entrada (T_1, P_1),

h_2 la entalpía calculada a las condiciones de la salida (T_2, P_2) y

h_{2s} la entalpía calculada a las condiciones de la turbina ideal: de las condiciones de la entrada se calcula s_1 , debido a que la turbina es isentrópica, $s_{2s}=s_1$ y finalmente con P_2 y s_{2s} se determina h_{2s} .

Compresores y bombas

Para los compresores y bombas la eficiencia isentrópica queda definida como

$$\eta_{C o B} = \frac{\text{trabajo isentrópico}}{\text{trabajo real}} = \frac{W_s}{W_{C o B}} = \frac{\dot{W}_s}{\dot{W}_{C o B}} \quad (5.52)$$

Al aplicar la primera ley a estos equipos se obtiene

$$\eta_{C o B} = \frac{\dot{m}(h_1 - h_{2s})}{\dot{m}(h_1 - h_2)} = \frac{(h_1 - h_{2s})}{(h_1 - h_2)} \quad (5.53)$$

y para determinar las entalpías se utiliza el mismo procedimiento descrito para el caso de la turbina.

Para la bomba se puede realizar un procedimiento alternativo para el cálculo del trabajo isentrópico. A partir de la relación termodinámica (5.39) se obtiene

$$0 = dh - v dP \quad \Rightarrow \quad dh = v dP \quad (5.54)$$

y suponiendo que el líquido que atraviesa la bomba es prácticamente incompresible se puede realizar la integración, tomando v constante, y obtener

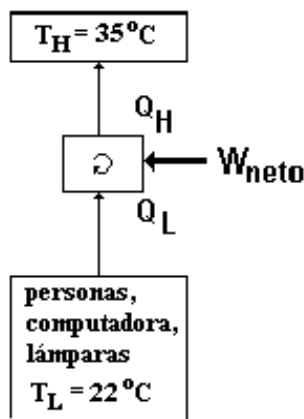
$$h_1 - h_{2s} = v_1 (P_1 - P_2) \quad (5.55)$$

es de resaltar que la ecuación (5.55) no será válida para los compresores ya que éstos trabajan con vapor y la suposición de un vapor incompresible sería incorrecta!

Problemas Resueltos

1.- En una sala climatizada están normalmente tres personas (cuyas generaciones energéticas son equivalentes a 1800 kcal/día, 2400 kcal/día y 2000 kcal/día respectivamente). Adicionalmente una computadora de 250 W está conectada en esta sala así como lámparas equivalentes a 1050 W. Definir totalmente la máquina térmica reversible necesaria para mantener esta sala a 22 °C si la temperatura externa es de 35 °C.

Este problema se puede visualizar como



donde

$$\dot{Q}_1 = 1800 \text{ kcal/día} = 0,0872 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_2 = 2400 \text{ kcal/día} = 0,1162 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_3 = 2000 \text{ kcal/día} = 0,0969 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_4 = 250 \text{ W} = 0,250 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_5 = 1050 \text{ W} = 1,05 \text{ kW}$$

Por lo tanto, el calor que debe ser retirado del cuarto (\dot{Q}_L) para mantenerlo a 22 °C es

$$|\dot{Q}_L| = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 + \dot{Q}_5 = (0,0872 + 0,1162 + 0,0969 + 0,25 + 1,05) \text{ kW} = 1,6003 \text{ kW}$$

A partir de la desigualdad de Clausius para un ciclo reversible

$$\frac{\dot{Q}_L}{T_L} + \frac{\dot{Q}_H}{T_H} = 0 \Rightarrow \dot{Q}_H = -\frac{\dot{Q}_L T_H}{T_L} = -\frac{(1,6003 \text{ kW})(308,15 \text{ K})}{(295,15 \text{ K})} = -1,6708 \text{ kW}$$

donde el signo negativo obtenido en el Q_H indica que, como se esperaba, el calor está saliendo de la bomba calorífica.

Finalmente, aplicando la primera ley al proceso

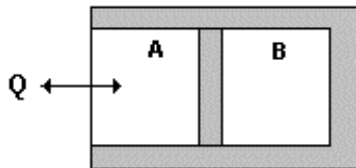
$$\dot{Q} = \dot{W} \Rightarrow \dot{W} = \dot{Q}_H + \dot{Q}_L$$

al sustituir los valores

$$\dot{W} = (-1,6708 + 1,6003) \text{ kW} = -0,0705 \text{ kW}$$

el signo negativo indica que es necesario suministrarle trabajo al sistema para poder retirar calor de una fuente de baja temperatura (22 °C) y transferirlo a la fuente de alta temperatura (35 °C).

2.- Se tiene un cilindro dividido por un pistón adiabático, sin fricción, que contiene monóxido de carbono (B) en un lado y agua (A) en el otro, como se muestra en la figura. El volumen que ocupa el monóxido de carbono inicialmente es de 120 litros y el del agua 200 litros encontrándose el monóxido a 150 °C y el agua a 100 °C con una calidad del 80 %. Bajo estas condiciones el agua intercambia calor lentamente hasta que, en el estado final, la calidad del agua sea del 30%. Calcule la presión final, la cantidad de calor transferido y el cambio de entropía del universo. Suponga que el monóxido de carbono se comporta como un gas ideal.



Debido a que se desea obtener la presión final se realiza un balance de fuerzas en el pistón, resultando de éste que $P_{B2} = P_{A2} = P_2$ y además se conoce que la calidad para el agua es $x_{A2} = 0,3$.

Como en el enunciado se establece que el calor se transfiere al tanque A lentamente se podría suponer que el movimiento del pistón también lo es, por lo que el proceso se puede considerar reversible. Debido a que el proceso en el compartimento B además es adiabático y

el monóxido de carbono es gas ideal se concluye que éste sufre un proceso isentrópico; entonces para el tanque B se conoce

$$s_{B2} - s_{B1} = 0 = \int_{T_{B1}}^{T_{B2}} \frac{C_p^0}{T} dT - R_{CO} \ln \left(\frac{P_{B2}}{P_{B1}} \right)$$

Es necesario saber como es la variación de C_p^0 con la temperatura. La expresión del calor específico en función de la temperatura es de la forma

$$\frac{C_p^0}{R} = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4$$

para el monóxido de carbono las constantes de esta ecuación son: $A = 3,71$; $B = -1,613 \times 10^{-3}$; $C = 3,692 \times 10^{-6}$; $D = -2,032 \times 10^{-9}$ y $E = 0,24 \times 10^{-12}$. Al evaluar la ecuación para $T = 300$ K y $T = 1000$ K los valores de C_p^0 son $1,016$ kJ/kg K y $1,157$ kJ/kg K respectivamente, lo cual demuestra que C_p^0 para el monóxido de carbono puede ser considerado constante en este rango de temperatura. Este comportamiento lo tienen en general los gases monoatómicos como el He, Ne, y Ar en un amplio rango de temperaturas. Sin embargo, este comportamiento no debe ser esperado para gases polares, por ejemplo vapor de agua, o cuadrupolares, dióxido de carbono, donde en el mismo rango de temperaturas se pueden obtener errores en el cálculo del C_p^0 superiores al 100% y 45% respectivamente.

Entonces, al integrar la ecuación del cambio de entropía considerando C_p^0 constante resulta

$$C_p^0 \ln \left(\frac{T_{B2}}{T_{B1}} \right) = R_{CO} \ln \left(\frac{P_{B2}}{P_{B1}} \right)$$

por la propiedad de los logaritmos, la ecuación anterior se puede expresar como

$$T_{B2} = \left(\frac{P_{B2}}{P_{B1}} \right)^{R/C_p^0} \cdot T_{B1} \quad (a)$$

Se debe ahora definir los estados tanto para el agua como para el monóxido de carbono con el fin de conseguir el valor de P_{B2} pero sólo se conoce una propiedad termodinámica en cada uno. Lo que sí se sabe es que el volumen físico total permanece constante, y éste se puede expresar en función de los volúmenes específicos finales en cada tanque

$$V_T = V_A + V_B = m_A v_{A2} + m_B v_{B2} \quad (b)$$

Es necesario realizar un proceso iterativo y un posible algoritmo de cálculo sería:

1.- Suponer $P_2 = P_{B2} = P_{A2}$

- 2.- Leer en tablas v_f y v_g , y con la calidad x_{A2} determinar v_{A2}
- 3.- Con $P_2 = P_{B2}$ y por medio de la ecuación (a) determinar T_{B2}
- 4.- Con P_{B2} y T_{B2} , determinar v_{B2} por medio de la ecuación de gases ideales
- 5.- Verificar si se cumple la ecuación (b), evaluando la función objetivo:

$$f = V_T - m_A v_{A2} - m_B v_{B2} \quad (c)$$

Si no se cumple se debe regresar al paso 1.

Antes de comenzar el proceso iterativo se determinarán los estados iniciales

Tanque A, agua

$$T_{A1} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$x_{A1} = 0,8$$

$$V_{A1} = 0,2 \text{ m}^3$$

De las tablas de saturación se obtiene directamente con $T_{A1} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ el valor de la presión; $P_{A1} = 101,3 \text{ kPa}$, y se puede calcular $v_{A1} = 1,3385 \text{ m}^3/\text{kg}$ y $u_{A1} = 2088,98 \text{ kJ/kg}$. Finalmente $m_{A1} = 0,149 \text{ kg}$.

Tanque B, monóxido de carbono

$$T_{B1} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$V_{B1} = 0,12 \text{ m}^3$$

De un balance de fuerzas en el pistón se llega a que $P_{B1} = P_{A1} = 101,3 \text{ kPa}$, y con la ecuación de gas ideal se obtiene la masa de B, $m_{B1} = 0,0968 \text{ kg}$.

Se procede entonces a realizar el proceso iterativo para determinar P_2 . Se indica en el enunciado del problema que existe un intercambio de calor, pero a *priori* no se conoce la dirección en la que ocurre por lo que no se puede establecer si la presión del estado final será mayor o menor a la inicial. La siguiente tabla presenta ejemplos de cálculo del proceso iterativo

P_2 (kPa)	v_f (m ³ /kg)	v_g (m ³ /kg)	v_{A2} (m ³ /kg)	T_{B2} (K)	v_{B2} (m ³ /kg)	f (m ³)
300	0,001073	0,60582	0,18249	576,66	0,568975	0,237731
350	0,001079	0,52425	0,15803	602,57	0,509604	0,247124
100	0,001043	1,69400	0,50893	421,59	1,247920	0,123371
50	0,00103	3,24034	0,97282	345,99	2,048298	-0,02323
75	0,001037	2,21711	0,66585	388,39	1,532871	0,072405

e interpolando entre estos dos últimos valores se obtiene $P_2 = 56,07 \text{ kPa}$ y $T_{2B} = 356,29 \text{ K}$ ($83,14^\circ\text{C}$). Con la presión se obtiene $u_{A1} = 2088,98 \text{ kJ/kg}$.

Para determinar el calor transferido se realiza un balance de masa y un balance de energía en el sistema A+B, donde el trabajo es nulo debido a que el sistema es un tanque rígido.

$$Q_{12} = m_{2A} u_{2A} + m_{2B} u_{2B} - m_{1A} u_{1A} - m_{1B} u_{1B}$$

$$m_{1A} = m_{2A} = m_A \quad \text{y} \quad m_{1B} = m_{2B} = m_B$$

al sustituir las expresiones del balance de masa en la ecuación de primera ley resulta

$$Q_{12} = m_A (u_{A2} - u_{A1}) + m_B (u_{B2} - u_{B1}) = m_A (u_{A2} - u_{A1}) + m_B C_v^0 (T_{B2} - T_{B1})$$

Se debe determinar u_{A2} de las tablas termodinámicas realizando las interpolaciones necesarias con lo cual resulta $u_{A2} = 992,8041$ kJ/kg y finalmente se obtiene $Q_{12} = -168,15$ kJ. El signo negativo indica que el calor es transferido desde el sistema a los alrededores.

Por último, el cambio de entropía del universo viene dado por

$$\Delta S_{\text{universo}} = \Delta S_{\text{sistema}} + \Delta S_{\text{alrededores}}$$

donde

$$\Delta S_{\text{sistema}} = S_2 - S_1 = m_A (s_{A2} - s_{A1}) + m_B (s_{B2} - s_{B1})$$

y

$$\Delta S_{\text{alrededores}} = \frac{Q}{T_{\text{alrededores}}}$$

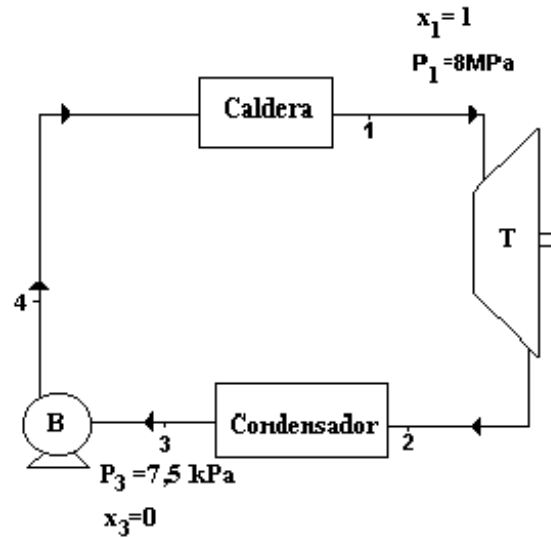
es conveniente recordar que el calor es transferido desde el sistema a los alrededores, es decir, el calor está entrando a los alrededores por lo que al sustituir el calor en esta última ecuación debe tener signo positivo. La temperatura de los alrededores se toma como 298,15 K, y la entropía $s_{A1} = 6,1612$ kJ/kgK (obtenida de las tablas). El cambio de entropía de B debe ser calculado por la ecuación (5.43). Al sustituir los valores correspondientes se obtiene

$$\Delta S_{\text{universo}} = 0, 10 \text{ kJ/kg} \Rightarrow \text{el proceso es posible}$$

3.- Un ciclo de potencia opera con agua como fluido de trabajo. Los procesos de intercambio de calor en la caldera y en el condensador se llevan a cabo con depósitos isotérmicos de 350 °C y 30 °C respectivamente. La eficiencia del ciclo es del 61,5 % del máximo posible entre los depósitos señalados. La eficiencia isentrópica de la bomba es igual a la eficiencia isentrópica de la turbina. Si la potencia neta del ciclo es de 1 MW, determine:

- Eficiencia del ciclo.
- Eficiencia de la bomba y la turbina.
- Entalpía y entropía de las corrientes 2 y 4.
- Flujo másico (kg/s) de agua.
- Cambio de entropía entre las corrientes 3 y 4.

f.- Cambio de entropía del universo.



La máxima eficiencia se puede obtener con un ciclo de Carnot operando bajo los mismos reservorios de temperatura, es decir

$$\eta_{m\acute{a}xima} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{303,15K}{623,15K} = 0,514$$

por lo tanto, la eficiencia del ciclo viene dada por

$$\eta_{ciclo} = 0,615 \eta_{m\acute{a}xima} = 0,3161$$

Para determinar la eficiencia de la bomba y la turbina del enunciado del problema se conoce que

$$\eta_{Turbina} = \eta_{Bomba}$$

donde

$$\eta_{Turbina} = \frac{W_{real}}{W_{i \text{ sen tr\acute{o}pico}}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (a)$$

y

$$\eta_{bomba} = \frac{W_{i \text{ sen tr\acute{o}pico}}}{W_{real}} = \frac{v_3(P_3 - P_4)}{h_3 - h_4} \quad (b)$$

al igualar ambas ecuaciones se obtiene

$$\frac{v_3(P_3 - P_4)}{h_3 - h_4} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (c)$$

Los estado 1, 3 y 2s se encuentran totalmente definidos y las propiedades termodinámicas involucradas se pueden obtener directamente de las tablas termodinámicas, y están resumidas a continuación

Estado	P (kPa)	T(°C)	v (m ³ /kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/(kg K))	x
1	8000	295,06		2757,94	5,7431	1
3	7,5	40,29	0,001008	168,77	0,5763	0
2s	7,5			1788,02	5,7431	0,673

Para obtener h_{2s} se debe primero establecer en que estado se encuentra. Para ello se verifica en la tabla de saturación con $P_{2s} = 7,5$ kPa si $s_f < s < s_g$. Al realizar esta búsqueda se obtiene que $s_f = 0,5763$ kJ/kg K y $s_g = 8,2514$ kJ/kg K, con lo cual se llega a la conclusión que el sistema se encuentra en equilibrio líquido-vapor y se puede calcular la calidad mediante la ecuación

$$x_{2s} = \frac{(s_{2s} - s_f)}{(s_g - s_f)} = \frac{(5,7431 - 0,5763)}{(8,2514 - 0,5763)} = 0,673.$$

Finalmente se obtiene la entalpía como

$$h_{2s} = (1 - x_{2s})h_f + x_{2s}h_g = (1 - 0,673) 168,77 + 0,673 2574,79 = 1788,02 \text{ kJ/kg}$$

Al sustituir estos resultados en la ecuación (c) se dispone de una ecuación con dos incógnitas (h_2 y h_4). Se necesita una relación adicional que en este caso es la expresión de la eficiencia del ciclo:

$$\eta_{ciclo} = 0,3161 = \frac{W_{neto}}{Q_H} = \frac{W_{turbina} + W_{bomba}}{Q_H} = \frac{(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)}{(h_1 - h_4)} \quad (d)$$

En esta ecuación se tienen también como incógnitas h_2 y h_4 . Por lo que se dispone de un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas. Al sustituir los datos en (c) y (d) se obtienen las dos ecuaciones que se presentan a continuación

$$-473336,0876 = h_2 h_4 - 2757,94 h_4 - 168,77 h_2$$

$$h_2 = 2054,925166 + 0,6839 h_4$$

Al resolver este sistema de ecuaciones resulta una ecuación cuadrática en h_4 donde se obtienen dos raíces $h_{4A} = 182,39$ kJ/kg y $h_{4B} = 1015,6621$ kJ/kg con los cuales se calculan dos valores de la entalpía en la corriente 2, $h_{2A} = 2179,66$ kJ/kg y $h_{2B} = 2749,53$ kJ/kg respectivamente. Es necesario elegir cuál par de entalpías es físicamente válida. Con la presión de 8000 kPa en la tabla de saturación se obtiene que $h_f = 1316,61$ kJ/kg lo que lleva a concluir que la corriente 4 se encuentra en líquido comprimido, tal como se esperaba. Al revisar las tablas de líquido comprimido observamos, sin necesidad de interpolar, que ambos valores de h_4 aparentemente podrían ser válidos. Sin embargo, para el valor de $h_{4A} = 182,39$ kJ/kg la temperatura del sistema estaría comprendida entre 40 °C y 50 °C mientras que para $h_{4B} = 1015,6621$ kJ/kg la temperatura oscilaría entre 220 °C y 240 °C lo cual no es físicamente posible, ya que las bombas no son equipos que elevan la temperatura en esa proporción. Por el contrario, en muchas ocasiones una buena aproximación es considerar que las bombas son isotérmicas. Alternativamente se podrían revisar los valores de h_2 . Para $P = 7,5$ kPa y $h_{2A} = 2179,66$ kJ/kg la corriente es mezcla líquido vapor a una temperatura de 40,29 °C, mientras que si h_2 fuera 2749,53 kJ/kg, sería vapor sobrecalentado a una temperatura cercana a los 295 °C, con lo cual se llega a la misma conclusión. Los valores físicamente correctos son: $h_4 = 182,39$ kJ/kg y, $h_2 = 2179,66$ kJ/kg.

Ahora se puede obtener la eficiencia de la bomba y la turbina a través de las ecuaciones (a) o (b) siendo esta eficiencia del 59 %.

Con los valores calculados de h_2 y h_4 y las presiones se obtienen las entropías s_2 y s_4 de la siguiente forma:

Con $P_2 = 7,5$ kPa y $h_2 = 2179,66$ kJ/kg se verifica en la tabla de saturación si $h_f < h_2 < h_g$. En este caso sí se encuentra comprendida por lo cual se puede calcular la calidad

$$x_2 = \frac{(h_2 - h_f)}{(h_g - h_f)} = \frac{(2179,66 - 168,77)}{(2574,79 - 168,77)} = 0,836$$

y la entropía

$$s_2 = (1 - x_2)s_f + x_2s_g = 6,992 \text{ kJ / kg K}$$

Por otro lado, con $P_4 = 8000$ kPa y $h_4 = 182,39$ kJ/kg, es necesario realizar una doble interpolación en la tabla de líquido comprimido para conseguir el valor de s_4

P= 5000 kPa		P= 10000 kPa	
h(kJ/kg)	s(kJ/kg K)	h(kJ/kg)	s(kJ/kg K)
171,95	0,5705	176,36	0,5685
255,28	0,8284	259,47	0,8258

182,39	0,602811	182,39	0,587168
--------	-----------------	--------	-----------------

P (kPa)	s(kJ/kg K)
5000	0,602811
10000	0,587168
8000	0,593425

Resultando finalmente que $s_4 = 0,593425$ kJ/kg K.

El flujo másico (kg/s) de agua se puede determinar a partir de la relación

$$\dot{m} = \frac{\dot{W}_{neto}}{W_{neto}} = \frac{1000 \text{ kW}}{h_1 - h_2 + h_3 - h_4} = \frac{1000 \text{ kW}}{564,66 \text{ kJ}} = 1,77 \text{ kg / s}$$

El cambio de entropía del agua a través de la bomba viene dado por

$$\left(\frac{dS}{dt} \right)_{Bomba} = \dot{m}(s_4 - s_3) = 0,03033 \text{ kJ / (K s)}$$

y el del universo se puede obtener a partir del principio del incremento de la entropía, ecuación (5.31), donde en este caso (por ser un ciclo) el cambio de entropía del sistema es cero, resultando

$$\begin{aligned} \left(\frac{dS}{dt} \right)_{universo} &= \frac{\dot{Q}_H}{T_H} + \frac{\dot{Q}_L}{T_L} = \frac{\dot{m}(h_1 - h_4)}{T_H} + \frac{\dot{m}(h_3 - h_2)}{T_L} = \\ &= \frac{-4558,7235 \text{ kJ / s}}{623,15 \text{ K}} + \frac{559,2753 \text{ kJ / s}}{303,15 \text{ K}} = 4,4253 \text{ kJ / (K s)} \end{aligned}$$

por lo que el proceso es posible.

4.- Determine el calor del problema 3 resuelto en el capítulo anterior si este valor no fuera conocido y si el intercambio se realiza con el ambiente que se encuentra a 7 °C. Adicionalmente verifique si el proceso es posible.

Para determinar el calor intercambiado con el ambiente se aplica la segunda ley de la termodinámica a el amoníaco (sistema cerrado) suponiendo que el proceso que éste experimenta es reversible ya que el pistón se mueve lentamente, por lo que se puede escribir

$$\Delta S_B = m_B(s_{B2} - s_{B1}) = \frac{Q}{T_B}$$

donde s_{B1} y s_{B2} se obtienen directamente de las tablas de vapor sobrecalentado ya que los estados inicial y final para el amoníaco se encuentran determinados: $s_{B1} = 6,2073 \text{ kJ/(kg K)}$ y $s_{B2} = 5,4663 \text{ kJ/(kg K)}$ y como $T = 283,15 \text{ K}$, se obtiene

$$Q = m_B (s_{B2} - s_{B1}) T_B = -153,75 \text{ kJ}$$

este valor coincide con el dado en el enunciado del problema 3 en el capítulo anterior.

Para verificar si el proceso es posible se calculará el cambio de entropía del universo, el cual se puede expresar como

$$\Delta S_{\text{sistema}} = m_{A2} s_{A2} - m_{A1} s_{A1} + m_B (s_{B2} - s_{B1}) = m_{A2} s_{A2} + m_B (s_{B2} - s_{B1})$$

$$\Delta S_{\text{alrededores}} = -m_s s_s + \frac{Q}{T} = -m_{A2} s_s + \frac{(-Q)}{T_0}$$

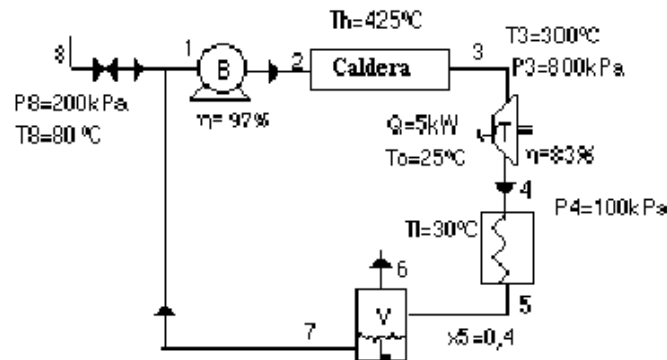
donde $s_s = 6,8958 \text{ kJ/kg K}$ es la entropía del vapor de agua saturada a $0,4 \text{ MPa}$ y s_{A2} se obtiene interpolando, como sigue

$T_{A2} (\text{°C})$	$s_{A2} (\text{kJ/kg K})$
150	6,9299
200	7,1706
196,5	7,1527

Sustituyendo valores se obtiene $\Delta S_{\text{universo}} = 0,3753 \text{ kJ/K}$ por lo que el proceso es posible.

5.- En el esquema mostrado en la figura se utiliza una corriente de agua a 200 kPa y 80 °C para producir una determinada potencia en la turbina. Si la potencia calorífica retirada en el intercambiador de calor es de 6906 kW

- Defina totalmente las ocho corrientes (T , P , x , v , h , s).
- Calcule la potencia y la potencia calorífica en todos los equipos.
- Calcule el flujo másico a la entrada de la turbina.
- Calcule la eficiencia del ciclo.
- Indique si el proceso propuesto es posible.



Las corrientes 3 y 8 se encuentran definidas ya que se conocen dos propiedades termodinámicas. Las corrientes 5, 6 y 7 se encuentran definidas ya que $x_5 = 0,4$; $x_6 = 1$; $x_7 = 0$ y se supone que no hay caída de presión a través del intercambiador con lo cual $P_7 = P_6 = P_5 = P_4 = 100$ kPa. Si se denomina 8' a la corriente que se encuentra a la salida de la válvula, ésta también se encuentra definida ya que se cumple que $h_8 = h_{8'}$ y $P_7 = P_{8'}$.

Así:

Para la corriente 3 al entrar a la tabla de saturación a $P_3 = 800$ kPa la $T > T_{\text{sat}}$ por lo cual está en vapor sobrecalentado, se lee directamente de la tabla $v_3 = 0,32411$ m³/kg; $h_3 = 3056,43$ kJ/kg; $s_3 = 7,2327$ kJ/kg K. Para la corriente 8, con $P_8 = 200$ kPa se obtiene que $T < T_{\text{sat}}$ por lo cual la sustancia se encuentra en líquido comprimido. Al revisar las tablas de líquido comprimido observamos que no se encuentra la presión de 200 kPa por lo cual se debe entrar a la tabla de saturación y leer los valores de las propiedades que corresponden a líquido saturado a la temperatura de 80°C, así: $v_8 = 0,001029$ m³/kg; $h_8 = 334,88$ kJ/kg; $s_8 = 1,0752$ kJ/kg K.

Para la corriente 6 con $P_6 = 100$ kPa y $x_6 = 1$ se lee de la tabla: $T_6 = 99,62$ °C; $v_6 = 1,694$ m³/kg; $h_6 = 2675,46$ kJ/kg; $s_6 = 7,3593$ kJ/kg K. La corriente 7 posee las propiedades correspondientes a líquido saturado a $P = 100$ kPa siendo $T_7 = 99,62$ °C; $v_7 = 0,001043$ m³/kg; $h_7 = 417,44$ kJ/kg; $s_7 = 1,3025$ kJ/kg K. Para la corriente 5 se debe calcular las propiedades de saturación obteniendo $v_5 = 0,67823$ m³/kg; $h_5 = 1320,65$ kJ/kg; $s_5 = 3,7252$ kJ/kg K.

De la corriente 8' se conoce $P_{8'} = 100$ kPa y $h_{8'} = 334,91$ kJ/kg por lo cual se encuentra en líquido comprimido y al realizar las interpolaciones en dicha tabla se obtiene $v_{8'} = 0,001029$ m³/kg; $T_{8'} = 47,57$ °C; $s_{8'} = 1,0752$ kJ/kg K.

Para determinar la corriente 4 se realiza un balance de energía en la turbina

$$\dot{Q}_T - \dot{W}_T + \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_4 h_4 = 0 \quad (\text{a})$$

donde \dot{W}_T ; $\dot{m}_3 = \dot{m}_4$ y h_4 son desconocidos, por lo que son necesarias dos relaciones adicionales.

A partir de la eficiencia de la turbina

$$\eta_T = \frac{\dot{W}_T}{\dot{W}_s} = \frac{\dot{W}_T}{\dot{m}_3 (h_3 - h_{4s})} \quad (\text{b})$$

y adicionalmente si se realiza un balance de energía en el sistema turbina más intercambiador, se obtiene

$$\dot{Q}_I + \dot{Q}_T - \dot{W}_T + \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_5 h_5 = 0 \quad (c)$$

En la ecuación anterior los calores (\dot{Q}_I ; \dot{Q}_T) son negativos ya que salen del sistema.

Para determinar la h_{4s} se conoce $P_4 = 100$ kPa y $s_{4s} = s_3 = 7,2327$ kJ/(kg K). Al ubicar este estado en la tablas se determina que se encuentra en equilibrio líquido-vapor, ya que $s_f \leq s_{4s} \leq s_g$, por lo que la calidad viene dada por

$$x_{4s} = \frac{s - s_f}{s_g - s_f} = \left(\frac{7,2327 - 1,3025}{7,3593 - 1,3025} \right) = 0,979$$

y entonces

$$h_{4s} = h_f + x_{4s}(h_{fg}) = 417,44 + 0,979(2258,02) = 2628,04 \text{ kJ / kg}$$

Sustituyendo los valores hasta ahora conocidos en (a), (b) y (c) se obtiene las siguientes ecuaciones

$$\text{De la ecuación (b)} \quad \eta_T \dot{m}_3 (h_3 - h_{4s}) = \dot{W}_T$$

Sustituyendo en (c) y conociendo que $\dot{m}_3 = \dot{m}_5 = \dot{m}_4$ resulta:

$$\dot{Q}_I + \dot{Q}_T - \eta_T \dot{m}_3 (h_3 - h_{4s}) + \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_5 h_5 = 0$$

De donde se obtiene $\dot{m}_3 = 5$ kg/s y se puede obtener la potencia de la turbina, la cual resulta $\dot{W}_T = 1820,6575$ kW.

La entalpía de la corriente 4 se obtiene despejando directamente de la ecuación (a) $h_4 = 2691,30$ kJ/kg.

La corriente 4 se encuentra entonces definida, siendo su estado vapor sobrecalentado, se requiere realizar interpolaciones, resultado $v_4 = 1,7310$ m³/kg; $T_4 = 107,32$ K; $s_4 = 7,3981$ kJ/kg K.

Para definir la corriente 1 se realiza un balance de energía en el nodo de mezclado

$$\dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_7 h_7 \quad (d)$$

donde $\dot{m}_1 = \dot{m}_3$. Adicionalmente, a partir de la definición de la calidad, se pueden determinar \dot{m}_7 y \dot{m}_8 como

$$\dot{m}_7 = (1 - x_5)\dot{m}_3 \text{ y } \dot{m}_{8'} = \dot{m}_8 = \dot{m}_6 = x_5\dot{m}_3 \quad (\text{e})$$

al sustituir los datos conocidos en las ecuación (e) y (d) se obtienen

$$\dot{m}_7 = 3 \text{ kg/s} \quad \dot{m}_{8'} = 2 \text{ kg/s} \quad h_1 = 384,43 \text{ kJ/kg}$$

Finalmente para determinar la corriente 2 se realiza un balance de energía en la bomba obteniéndose que

$$h_2 = h_1 - \frac{\dot{W}_B}{\dot{m}_3}$$

donde \dot{W}_B se puede expresar en función de la eficiencia de la bomba, resultando

$$h_2 = h_1 - \frac{v_1(P_1 - P_2)}{\eta_B} = 384,43 - \frac{0,00104(100 - 800)}{0,97} = 385,18 \text{ kJ/kg}$$

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos para cada corriente

Corriente	T (°C)	P (kPa)	x	v (m ³ /kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	\dot{m} (kg/s)	Estado
1	91,79	100	NE	0,00104	384,43	1,2130	5	LC
2	91,96	800	NE	0,001038	385,18	1,2151	5	LC
3	300	800	NE	0,32411	3056,43	7,2327	5	VSC
4	107,32	100	NE	1,7310	2691,30	7,3981	5	VSC
5	99,62	100	0,4	0,67823	1320,65	3,7252	5	MLV
6	99,62	100	1	1,694	2675,46	7,3593	2	L sat
7	99,62	100	0	0,001043	417,44	1,3025	3	Vsat
8	80	200	NE	0,001029	334,88	1,0752	2	LC
8'	47,57	100	NE	0,001029	334,91	1,0752	2	LC

Al realizar el balance de energía en cada uno de los equipos se obtiene

En la caldera

$$\dot{Q}_c - \dot{W}_c + \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_3 h_3 \Rightarrow \dot{Q}_c = 5(3056,43 - 385,18) = 13356,25 \text{ kW}$$

En la bomba

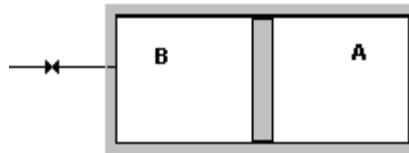
$$\dot{Q}_B - \dot{W}_B + \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_2 h_2 \Rightarrow \dot{W}_B = 5(384,43 - 385,18) = -3,75 \text{ kW}$$

EQUIPO	\dot{Q} (kW)	\dot{W} (kW)
Válvula	0	0
Caldera	13356,25	0
Turbina	-5	1820,65
Intercambiador	-6906	0
Separador	0	0
Bomba	0	-3,75

6.- Se tiene un dispositivo como el mostrado en la figura. El compartimiento A contiene 1 kg de aire a 455 K y 150 kPa. El compartimiento B contiene 0,7 kg de neón a 200 K. El compartimiento B está conectado mediante una válvula a una línea que transporta neón a 800 K y 800 kPa. Se abre la válvula lentamente y se permite el paso de neón al compartimiento B hasta que la presión en A sea de 400 kPa, en este momento se cierra la válvula. El pistón que separa los compartimientos es adiabático y se puede considerar tanto al neón como al aire gases ideales con C_p^0 constante.

Determine la temperatura final en ambos compartimientos, la masa que entra y el cambio de entropía del universo.

Utilice para sus cálculos el siguiente estado de referencia tanto para el aire como para el neón: $P_{ref} = 80$ kPa, $T_{ref} = 150$ K; $h_{ref} = 820$ kJ/kg; $s_{ref} = 5,8$ kJ/(kg K).



Para determinar la temperatura final del compartimiento A, se puede considerar que el proceso es adiabático-reversible, es decir, isentrópico por lo que a partir de la ecuación (5.45) se obtiene $T_{A2} = 602,15$ K.

La temperatura final en el compartimiento B se puede obtener a partir de la primera ley de la termodinámica aplicada al sistema A+B

$$m_e h_e = m_{B2} u_{B2} - m_{B1} u_{B1} + m_A (u_{A2} - u_{A1}) = m_{B2} u_{B2} - m_{B1} u_{B1} + m_A C_v^0 (T_{A2} - T_{A1})$$

Las variables de la ecuación anterior se obtienen de la siguiente forma

$$h_e = h_{ref} + C_p^0 (T_e - T_{ref}) = 1489,5 \text{ kJ / kg}$$

$$u_{B1} = u_{ref} + C_v^0 (T_{B1} - T_{ref}) = h_{ref} - R_{Ne} T_{ref} + C_v^0 (T_{B1} - T_{ref}) = 789,10 \text{ kJ / kg}$$

$$u_{B2} = u_{ref} + C_v^0 (T_{B2} - T_{ref}) = h_{ref} - R_{Ne} T_{ref} + C_v^0 (T_{B2} - T_{ref}) = 665,5 + 0,618 T_{B2}$$

y para el cálculo de m_{B2} se emplea la ecuación de gas ideal

$$m_{B2} = \frac{P_{B2} V_{B2}}{R_{Ne} T_{B2}} = \frac{799,02}{T_{B2}}$$

donde $V_{B2} = V_T - V_{A2} = 0,823 \text{ m}^3$ y del balance de masa m_e se puede expresar como

$$m_e = m_{B2} - m_{B1} = \frac{799,02}{T_{B2}} - 0,7$$

Al sustituir las ecuaciones anteriores en la expresión de la primera ley se obtiene $T_{B2} = 603,07 \text{ K}$, y con este valor se puede calcular m_e , resultando una masa de entrada de $0,627 \text{ kg}$.

El cambio de entropía del universo viene dado por

$$\Delta S_{\text{universo}} = \Delta S_{\text{sistema}} + \Delta S_{\text{alrededores}}$$

donde

$$\Delta S_{\text{sistema}} = S_f - S_i = m_{B2} s_{B2} - m_{B1} s_{B1} + m_A (s_{A2} - s_{A1}) = m_{B2} s_{B2} - m_{B1} s_{B1} + 0$$

$$\Delta S_{\text{alrededores}} = -m_s s_s + \oint \frac{\partial Q}{T} = -(m_{B2} - m_{B1}) s_e$$

Para calcular los términos de entropía en las expresiones anteriores se puede emplear la ecuación (5.43) donde el subíndice f corresponde a los estados B2, B1 y la entrada y el subíndice i corresponde al estado de referencia. Una forma alterna sería calcular el ΔS del universo tomando factor común las masas de forma de obtener directamente diferencias de entropía y aplicar la ecuación (5.43) sin la necesidad del uso del estado de referencia. Indistintamente del procedimiento utilizado se obtiene $\Delta S_{\text{universo}} = 0,5094 \text{ kJ/K} \Rightarrow$ el proceso es posible.

Problemas propuestos

1.- Indique si las siguientes aseveraciones son verdaderas (V) o falsas (F):

- () Para un gas ideal que sufre un proceso isobárico el cambio de entropía depende sólo de la variación de la temperatura.
- () Entre dos estados dados el cambio de entropía depende de la trayectoria seguida.
- () Entre dos estados dados, los procesos reversibles son siempre más eficientes que los irreversibles.
- () La entropía es una propiedad conservativa.
- () Los procesos irreversibles violan la segunda ley de la termodinámica.
- () Los procesos reversibles son siempre isentrópicos.
- () En un diagrama T-s, el área bajo la curva permite calcular el trabajo.

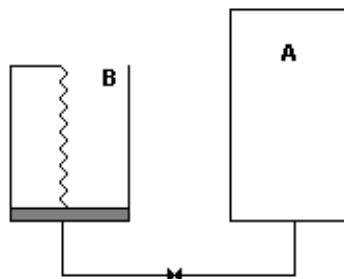
- () Una máquina térmica que opera en un ciclo y cuyo único efecto es el producir trabajo e intercambiar calor con una sola fuente viola el postulado de Clausius.
- () La eficiencia de una máquina térmica reversible es sólo función de la diferencia de temperatura entre los reservorios.
- () El coeficiente de funcionamiento de los refrigeradores siempre es menor a la unidad.
- () En la relación $\eta = 1 - T_L/T_H$, T_L puede ser igual a cero.
- () Las características de las máquinas térmicas son absorber calor de una fuente caliente, recibir trabajo y ceder calor a una fuente fría.
- () En un sistema aislado reversible el cambio de entropía es mayor que cero.
- () La entropía es una forma de energía.

2.- El primer postulado de Carnot dice: Ninguna máquina térmica que opere entre dos reservorios uno de baja y otro de alta temperatura puede tener un rendimiento térmico superior al de una máquina térmica reversible que opere entre los dos mismos reservorios. Utilizando el método de reducción al absurdo, demuestre el postulado.

3.- Se desea enfriar un cuarto a $-30\text{ }^\circ\text{C}$. Se dispone de un reservorio a $200\text{ }^\circ\text{C}$ y del medio ambiente a $30\text{ }^\circ\text{C}$ para hacer funcionar una máquina térmica que a su vez hace funcionar un sistema de refrigeración. Determine la relación de calor transferido entre la fuente de mayor y la de menor temperatura, suponiendo que se utilizan máquinas reversibles en cada proceso.

4.- Para un sistema cerrado que contiene un gas ideal que sufre un proceso isentrópico, deducir la expresión analítica que permite calcular la relación de temperaturas en función de la relación de compresión.

5.- Un tanque A tiene un volumen de 300 litros e inicialmente contiene aire a 700 kPa y $40\text{ }^\circ\text{C}$. El cilindro B tiene un pistón que toca el fondo del recipiente, unido a un resorte en reposo en esta posición. El pistón tiene un área de $0,065\text{ m}^2$ y una masa de 4 kg, mientras que la constante de elasticidad del resorte es de 178,5 N/m. La presión atmosférica es de 100 kPa. La válvula se abre y el aire fluye de A (en forma reversible) hacia B. Determine la temperatura final de B si el proceso es totalmente adiabático.



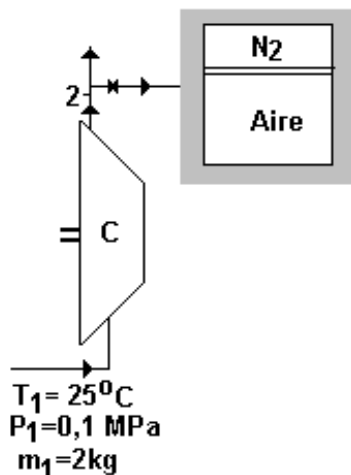
6.- Un sistema cilindro-pistón tiene freón-12 a $-20\text{ }^\circ\text{C}$, 70 % de calidad y un volumen de 50

litros. Se hace pasar una corriente eléctrica de 10 A a través de un resistor que está dentro del cilindro. La caída de voltaje es de 12 V. En 30 minutos la temperatura alcanza 40 °C. Se supondrá que los alrededores están a 20 °C y que la resistencia eléctrica tiene una temperatura constante de 100 °C. ¿Es este proceso posible?. Recuerde que la potencia eléctrica es el producto de la diferencia de potencial por la intensidad. Utilice el webbook para obtener las propiedades termodinámicas del R-12.

7.- Un tanque cilíndrico de paredes adiabáticas (ver figura) colocado verticalmente, posee dos compartimientos separados por un pistón sin rozamiento de 51 kg (área = 0,1 m²) inicialmente de 0,04 m³ cada uno. El compartimiento superior (A) contiene nitrógeno a una presión de 0,2 MPa y una temperatura igual a 100 K. El compartimiento inferior (B) contiene aire a una temperatura de 200 °C y está conectado a una línea de aire (conexión inicialmente cerrada) con una presión de 2,05 MPa, resultado de un compresor adiabático de eficiencia isentrópica 0,8; el cual se alimenta de un flujo másico de aire de 2 kg a condiciones ambientales (25 °C y 0,1 MPa). Se abre la válvula permitiendo la entrada de aire al compartimiento B hasta que su presión se equilibre con la de la línea, en ese momento se cierra la válvula. Calcule:

- Temperatura del aire a la salida del compresor.
- Temperatura del nitrógeno en el estado final.
- Temperatura y masa del aire en el compartimiento B en su estado final.
- El cambio de entropía del universo.

NOTA: El aire se puede considerar gas ideal con C_p° y C_v° constantes. La aceleración de la gravedad es 9,8 m/s².



8.- Hallar el cambio de entropía del universo a 25 °C al llenar un tanque de buceo (12 litros) de 0,1 MPa y 25 °C a 30 MPa y 35 °C. Para ello se dispone de una línea de aire a 25 °C y 32 MPa. Considere el aire gas ideal con C_p° constante.

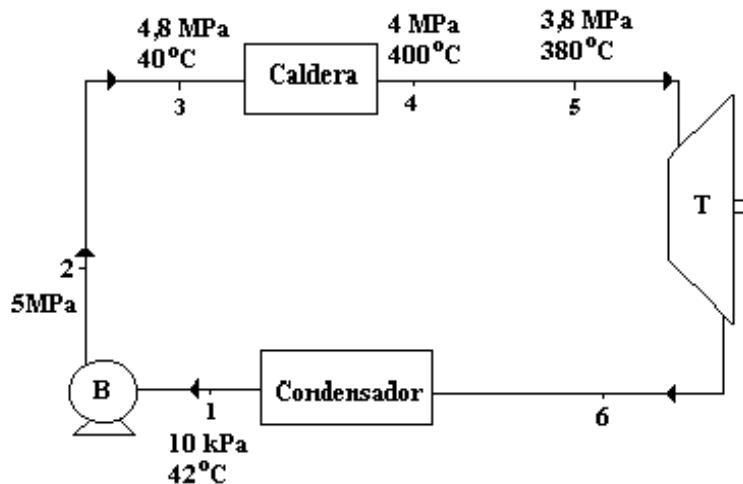
9.- Un pequeño ciclo consta de una bomba de 1 kW que emplea agua a 100 kPa y 25 °C. Esta corriente pasa luego por una caldera, llegando a 400 kPa y 400 °C. El vapor obtenido es

expandido en una turbina, hasta alcanzar de nuevo la presión de 100 kPa y una temperatura de 252,4 °C. Esta corriente se enfría antes de regresar a la bomba. Se pide calcular el flujo másico del ciclo, el calor en la caldera, la potencia de la turbina, y el flujo del agua de enfriamiento si ésta se calentó en 15 °F en el proceso. Se pide calcular además el trabajo isentrópico en la turbina y el rendimiento isentrópico.

10.- Un ciclo de refrigeración (con freón-12) consta de dos etapas de compresión. En la salida del condensador, se tiene líquido saturado a 40 °C, el cual es expandido en una válvula a -20 °C. La mezcla líquido-vapor obtenida es separada, siendo el vapor dirigido a una cámara de mezclado, mientras el líquido pasa por una segunda válvula antes de llegar al evaporador de donde sale vapor saturado a -70 °C. De allí, la corriente es comprimida y entra a la cámara de mezclado. La corriente de salida de este equipo entra a la segunda etapa de compresión antes de llegar al condensador. Cada una de las etapas tiene una eficiencia isentrópica del 75 %. Calcular el rendimiento de este ciclo y compararlo con el obtenido con una máquina de refrigeración reversible operando entre las temperaturas extremas. Utilice el webbok para determinar las propiedades termodinámicas del refrigerante.

11.- Una planta de vapor de agua opera en un ciclo con las presiones y temperaturas indicadas en la figura. La eficiencia de la turbina es del 86% y la eficiencia de la bomba es del 80%. Determine:

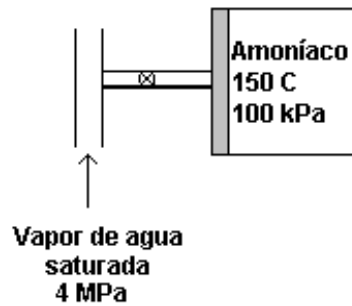
- La eficiencia térmica del ciclo.
- Muestre el proceso en un diagrama T-s.



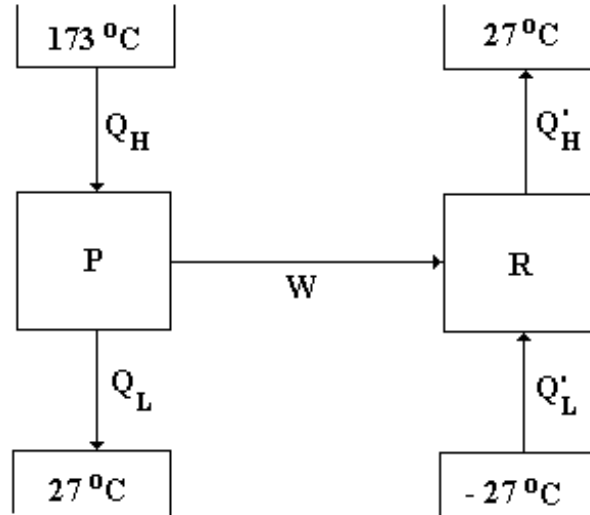
12.- Por una tubería circula vapor de agua saturada a 4 MPa. Conectado a esta tubería por medio de una válvula (inicialmente cerrada), se tiene un tanque rígido de 1 m³ con amoníaco a 150 °C y 100 kPa y un pistón aislante, sin fricción y de espesor despreciable como se indica en la figura. Se abre la válvula lentamente hasta que el agua deja de fluir al tanque y simultáneamente el amoníaco intercambia calor con el ambiente, de manera que su

temperatura permanece constante. Determine

- El calor intercambiado con el ambiente.
- El estado final del agua (P , T , v , u , s).
- La masa final de agua en el tanque.
- Si el proceso es posible.

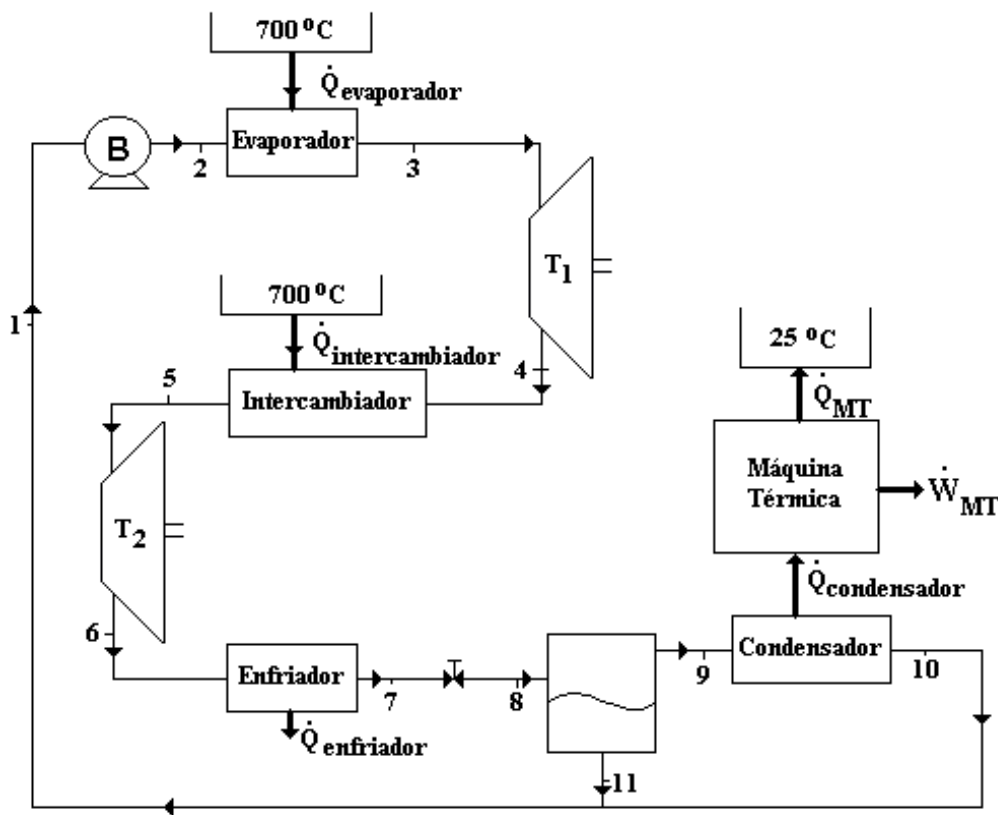


13.- Considere dos máquinas térmicas reversibles acopladas, tal como se muestra en la figura. Si $Q_H = 300$ kJ, determine Q_L , Q_H' y Q_L' .



14.- Determine para el proceso mostrado en la figura, que utiliza agua como fluido de trabajo, la eficiencia del **proceso** y el cambio de entropía del universo por unidad de masa, si la $\eta_{T1} = \eta_{T2} = 0,8$; $\eta_B = 0,6$; $\eta_{MT} = 0,9$ η_{rev} y adicionalmente

Corriente	Propiedad termodinámica
1	$P = 0,2 \text{ MPa}$
3	$P = 5 \text{ MPa} ; T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$
4	$P = 1 \text{ MPa}$
5	$T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$
6	$P = 0,3 \text{ MPa}$
7	$x = 0,5$
10	$x = 0$



Respuestas a los problemas propuestos

1.- V, F, V, F, F, F, F, F, V, F, F, F, F, F

2.- Supongamos que existe una máquina térmica M cuyo rendimiento sea mayor que el de una máquina térmica reversible R. Como R es reversible puede operar como una bomba de calor donde se cumpla que $W_M = W_R$, por lo que el sistema combinado resultante (máquina térmica + bomba calorífica) cede una cantidad de calor igual a $Q_{\text{HR}} - Q_{\text{HM}}$, al reservorio de alta temperatura y retira del reservorio de baja temperatura una cantidad de calor equivalente a $Q_{\text{LR}} - Q_{\text{LM}}$, sin realizar trabajo. El sistema combinado contradice el postulado de Carnot, por lo tanto la suposición realizada es incorrecta.

3.- $Q_H/Q_L = 0,6867$

4.- $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$

5.- $T = 353,87 \text{ K}$

6.- $\Delta S_{\text{univ}} = 0,178057 \text{ kJ/K}$. El proceso si es posible.

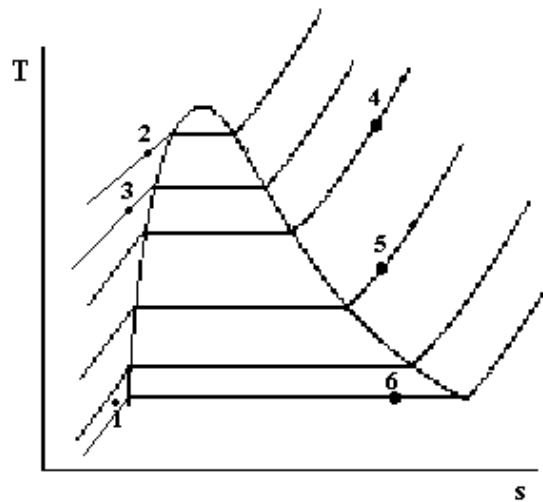
7.- a) $536,42 \text{ }^\circ\text{C}$; b) $196,35 \text{ K}$; c) $T = 1005,59 \text{ K}$; $m = 0,51277 \text{ kg}$; $0,3727 \text{ kJ/K}$

8.- $\Delta S_{\text{univ}} = 1,2534 \text{ kJ/K}$.

9.- $\dot{m} = 3,32 \text{ kg/s}$; $\dot{Q}_{\text{caldera}} = 10,5 \text{ MW}$; $\dot{W}_T = 977,07 \text{ kW}$; $\dot{m}_{\text{agua}} = 273,68 \text{ kg/s}$; $\dot{W}_s = 1215,6578 \text{ kW}$; $\eta_T = 0,8037$.

10.- $\beta = 1,03472$; $\beta_{\text{rev}} = 1,847$.

11.- $\eta = 29\%$



Nota: los estados deben unirse con líneas punteadas ya que no se conoce la trayectoria.

12.- a) $Q = -368,85 \text{ kJ}$; b) $P = 4 \text{ MPa}$, $T = 327,33 \text{ K}$, $v = 0,062999 \text{ m}^3/\text{kg}$, $u = 2780,72 \text{ kJ/kg}$, $s = 6,4821 \text{ kJ}/(\text{kg K})$; c) $m_{\text{H}_2\text{O}} = 15,48 \text{ kg}$; d) el proceso si es posible ya que $\Delta S_{\text{universo}} = 3,57 \text{ kJ/K}$.

13.- $Q_L = -201,82 \text{ kJ}$; $Q_H' = -545,69 \text{ kJ}$; $Q_L' = 447,51 \text{ kJ}$.

14.- $\eta = 0,34$; $\Delta S_{\text{universo}} = 7,8 \text{ kJ}/(\text{kg K})$.

ANEXOS

En esta sección se presentan una serie de exámenes que pretenden ofrecerle al estudiante una guía para evaluar los conocimientos adquiridos.

Los exámenes tienen un valor de 20 puntos cada uno y el tiempo estimado para su resolución es de dos horas para el primer parcial, dos horas y media para el segundo parcial y tres horas para el último.

PRIMER PARCIAL A

1.- (2 puntos c/u) Complete la siguiente tabla de propiedades

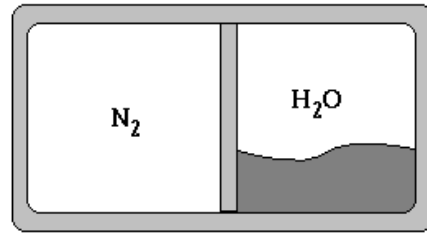
Sustancia	Temperatura (°C)	Presión (kPa)	Volumen (m ³ /kg)	Calidad	Estado
Agua		100	1,8		
Neón		750	0,2		
Amoníaco	20		0,1		
Metano			0,2	0,75	
Agua	-10		200		

2.- (2 puntos) En una planta criogénica se tiene un tanque de 10 m³. El tanque está cargado con 621 kg de etano puro que se mantiene a una temperatura de -13,56 °C. ¿Cuál es la presión dentro del tanque?

3.- (8 puntos). Un cilindro cerrado con un volumen de 250 litros contiene un pistón móvil (sin fricción) que inicialmente separa el cilindro en dos partes iguales. En la parte izquierda hay nitrógeno y en la otra 25 kg de una mezcla de dos fases de agua líquida + vapor. Las paredes del cilindro y el pistón son excelentes conductores de calor, lo que garantiza que la temperatura en todo el cilindro es uniforme e igual a 100 °C.

Toda la unidad se calienta hasta la temperatura de 120 °C.

- ¿Cuánto se habrá movido el pistón y en que dirección? Puede expresar el desplazamiento como un porcentaje del total de la longitud del cilindro.
- Determine los estados (P, T, v, x) inicial y final del agua en el compartimiento de la derecha.
- Determine el trabajo realizado por el agua.



PRIMER PARCIAL B

1.- (3 puntos) Seleccione la respuesta correcta

La aceleración de la gravedad es una propiedad intensiva ()

Un proceso es una sucesión de estados termodinámicos donde el estado inicial y final son los mismos ()

El sistema de unidades técnico o ingenieril es un sistema incoherente ()

La presión absoluta es la suma de la presión atmosférica más la presión de vacío ()

Un delta de grado Fahrenheit equivale a 1,8 delta de grados Celsius ()

En un diagrama T-v el equilibrio sólido-vapor se encuentra sobre la línea triple ()

2.- (5 puntos) Complete la siguiente tabla de propiedades usando el procedimiento que considere más exacto

Sustancia	Presión (MPa)	Temperatura (°C)	Volumen específico (m^3/kg)	Calidad	Estado
Metano	4	-78,15			
Agua	2	120			
Amoníaco	0,17	25			
Oxígeno		-210,15		0,25	

3.- (12 puntos) Se tiene un tanque de volumen $1,1 m^3$, dentro del cual hay una esfera de paredes diatérmicas cuyo volumen es $0,1 m^3$. La esfera contiene propano y posee un volumen específico de $0,05615 kg/m^3$. El tanque contiene $4,3 kg$ de agua con una calidad del 30%. Se le transmite calor al sistema hasta que la presión del agua sea de $1,8 MPa$, en este momento el propano se comporta como gas ideal. Determine:

- Temperatura y presión inicial del agua y del propano.
- Masa, temperatura y presión del propano en el estado final.
- Represente, para el agua, el proceso en los diagrama T-v y P-v.

SEGUNDO PARCIAL A

1.- (10 puntos) En el esquema mostrado en la figura calcular la potencia suministrada al compresor 2, el flujo de calor desprendido en el mezclador, la potencia de la turbina y el flujo másico \dot{m}_1 .

Se conocen los siguientes datos:

$$x_1 = 0.$$

$$P_2 = 232,2 \text{ kPa}; x_2 = 0,8.$$

$$T_3 = 700 \text{ °C}; P_3 = 20 \text{ MPa}.$$

$$T_6 = 160 \text{ °C}.$$

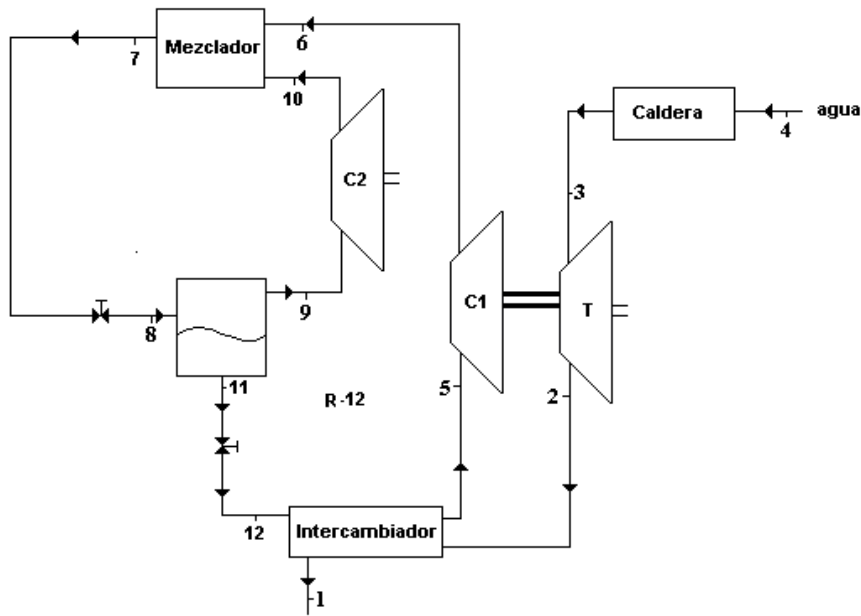
$$x_8 = 0,248.$$

$$\dot{m}_9 = 4,518 \text{ kg/m}^3.$$

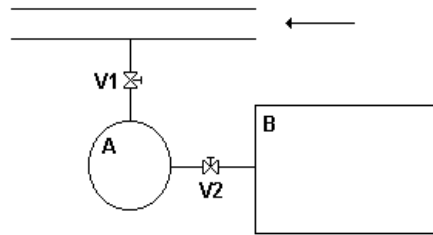
$$P_{10} = 1,4 \text{ MPa}; T_{10} = 130 \text{ °C}.$$

$$P_{11} = 0,6 \text{ MPa}.$$

La turbina pierde un flujo de calor de 35 kW, no hay caída de presión en el mezclador y los compresores son adiabáticos.



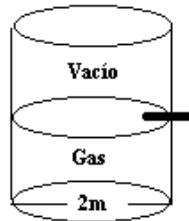
2.- (10 puntos) Se tiene una línea de vapor de agua sobrecalentado a una temperatura de $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una presión de $1,6\text{ MPa}$, la cual se emplea para llenar un globo (A) que contiene inicialmente $0,12\text{ kg}$ de agua a $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ (la válvula V2 se encuentra inicialmente cerrada). El volumen inicial del globo es de $0,03095\text{ m}^3$ (estado 1). El proceso de llenado, el cual produce un trabajo de $808,8\text{ kJ}$ se detiene cuando se alcanzan $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, siendo el volumen del globo de $0,1089\text{ m}^3$ (estado 2). Al llegar a esta temperatura se cierra la válvula V1 y se abre la válvula V2 que conecta el globo con un tanque (B) de $0,3\text{ m}^3$ que contiene vapor saturado de agua $0,45\text{ MPa}$. En este proceso el alrededor realiza un trabajo sobre el globo de $454,64\text{ kJ}$, calcular el estado final (P, T, v, x) si se llega a un equilibrio termodinámico cuando la presión es de $0,8\text{ MPa}$. Suponga que todo el proceso es adiabático.



SEGUNDO PARCIAL B

1.- (10 puntos). En un arreglo cilindro-pistón como el que se muestra en la figura, se tiene 1 kmol de un gas ideal ($C_p=25$ kJ/kmol K) en la parte inferior del recipiente a 100°C y 5 MPa. Si el pistón tiene una masa de 20 kg y se libera el pasador permitiendo al gas expandirse politrópicamente, calcular:

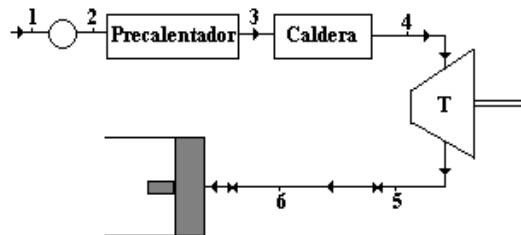
- La velocidad del pistón cuando la presión disminuye hasta 100 kPa.
- El trabajo realizado por el gas.



2.- (10 puntos). En el siguiente proceso se emplea agua como fluido de trabajo. Con los datos suministrados y considerando que no hay caída de presión en las líneas de flujo, determine:

- Flujo másico.
- Flujo de calor suministrado por el conjunto caldera-compresor.
- Potencia de la turbina.
- ¿Cuánto tiempo tardará el pistón en desplazarse 2 m?

Corriente	P(kPa)	T($^\circ\text{C}$)	h (kJ/kg)	Estado
1	100	25		
4	400	400		
6	300	300		



TERCER PARCIAL A

1.- (4 puntos) Estime cuánto cuesta operar un aire acondicionado de 15000 BTU/h durante un día completo, si el equipo opera entre 4 °C y 42 °C a nivel del evaporador y del condensador, respectivamente, si 1 kW-h de electricidad cuesta Bs.F. 1.885.

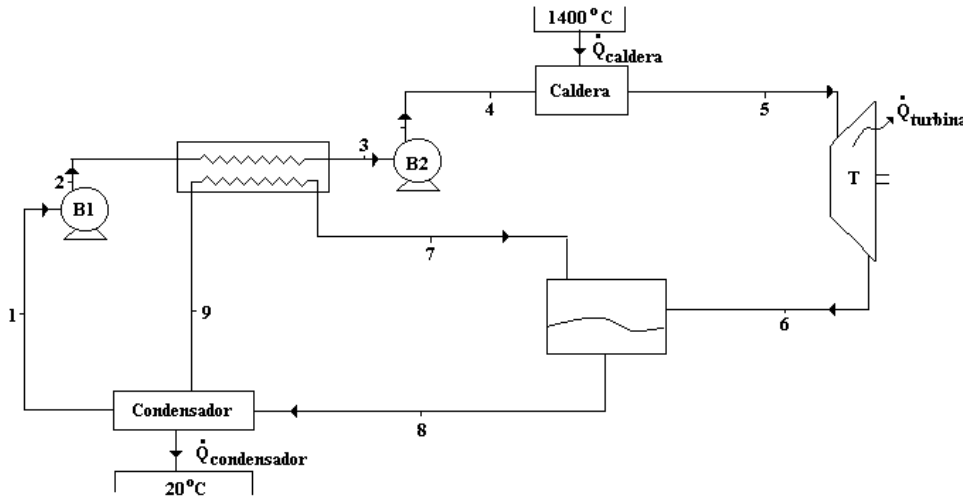
2.- (8 puntos) Dos kilogramos de vapor de agua a 0,4 MPa y 200 °C están contenidos en un sistema cilindro-pistón. El vapor sufre un proceso de expansión, en forma irreversible, hasta alcanzar una presión final de 0,1 MPa. La entropía inicial y final son iguales.

- (a) Calcular el calor transferido sabiendo que el trabajo realizado es igual al 75 % del trabajo máximo posible.
- (b) Considerando el mismo estado inicial y la misma presión final, determine el aumento de entropía, si el proceso de expansión es adiabático y el trabajo realizado es el mismo que en la parte (a).

3.- (8 puntos) Para el proceso mostrado en la figura

- (a) Complete la tabla anexa.
- (b) Calcule el cambio de entropía neto (kJ/K s)

Corriente	P (MPa)	T (°C)	x	h (kJ/kg)	\dot{m} (kg/s)
1	0,1	25			
2					
3		90			
4					
5	6	1100			
6			0,95		
7					
8					
9					



TERCER PARCIAL B

1.- (10 puntos). La mayoría de los refrigeradores comerciales actuales funcionan en base a energía eléctrica. Sin embargo, un inventor propuso un refrigerador que operaba en base a calor suministrado por la combustión del gas natural. El esquema de la máquina es el siguiente:

La potencia calorífica producida por la combustión del gas natural se utiliza en el ciclo de potencia de la izquierda, el cual utiliza agua como fluido de trabajo, para producir potencia mecánica, la cual es consumida en su totalidad por el compresor del ciclo de refrigeración de la derecha, que emplea como fluido de trabajo R-12.

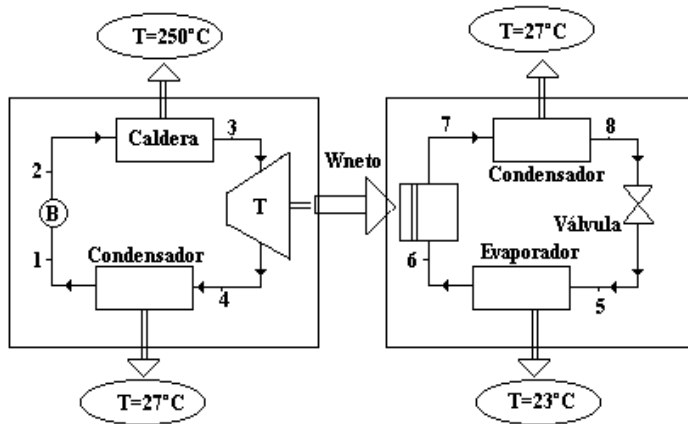
Determine:

- Calor que se requiere en la caldera por unidad de calor retirado del evaporador.
- Eficiencia térmica del ciclo de potencia y coeficiente de operación del ciclo de refrigeración.
- Cambio de entropía del universo por unidad de tiempo y por unidad de masa que circula por el ciclo de potencia.

Se disponen de los siguientes datos:

Ciclo de potencia
 Presión en el condensador: 10 kPa
 Presión en la caldera: 500 kPa
 Corriente 1: líquido saturado
 Temperatura de la corriente 3: 233,5 °C
 Eficiencia isentrópica de la bomba: 97%
 Eficiencia isentrópica de la turbina: 90%

Ciclo de refrigeración
 Presión en el evaporador: 70 kPa
 Presión en el condensador: 1000 kPa
 Corriente 8: líquido saturado
 Corriente 6: vapor saturado
 Eficiencia isentrópica del compresor: 90%



2.- (10 puntos). Se tienen dos tanques conectados mediante una válvula. El tanque A está aislado, tiene un volumen de $0,6 \text{ m}^3$ y está inicialmente lleno de vapor a $1,4 \text{ MPa}$ y $^{\circ}\text{C}$. El tanque B no está aislado, tiene un volumen de $0,3 \text{ m}^3$ y se llena inicialmente con vapor a $0,2 \text{ MPa}$ y $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$. La válvula que conecta a los dos tanques se abre hasta que la temperatura en A es de $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Durante el proceso se transfiere calor de B hacia el medio ambiente que se encuentra a $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, tal que la temperatura en B permanezca constante. Se puede suponer que el valor restante en A experimentó un proceso reversible adiabático. Determine:

- la presión final en cada uno de los tanques.
- La masa final en B.
- El cambio neto de entropía del universo.

Comment [CMC1]: Falta dato

Respuestas a los anexos

Primer parcial A

1.-

Sustancia	Temperatura (°C)	Presión (kPa)	Volumen (m ³ /kg)	Calidad	Estado
Agua	121,65 °C	100	1,8	N.E.D.	VS
Neón	364 K	750	0,2	N.E.D.	VS
Amoníaco	20 °C	857,22	0,1	0,666	MLV
Metano	122,4 K	229,3	0,2	0,75	MLV
Agua	263,15 K	0,2601	200	0,428	MSV

2.- P = 1561 kPa.

3.- a) $\% d = \frac{\Delta d}{d} * 100 = \frac{\Delta V}{V} * 100 = 23\%$. El pistón se desplazó hacia la izquierda.

b) Estado inicial del agua: $v = 0,005 \text{ m}^3/\text{kg}$; $x = 0,002366$; $T = 100 \text{ °C}$; $P = 0,10135 \text{ MPa}$

Estado final del agua: $v_{\text{agua}} = 0,007312 \text{ m}^3/\text{kg}$; $x = 0,007018$; $T_{\text{agua}} = 120 \text{ °C}$; $P_{\text{agua}} = 0,1985 \text{ MPa}$.

c) No se puede determinar ya que no se conoce la relación entre P y v en ninguno de los compartimientos

Primer parcial B

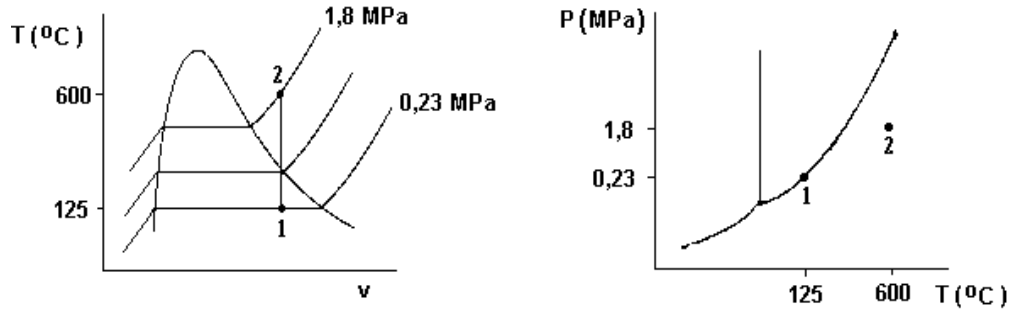
1.- V, F, V, F, F, F

2.-

Sustancia	Presión (MPa)	Temperatura (°C)	Volumen específico (m ³ /kg)	Calidad	Estado
Metano	4	-78,15	0,01342	N.E.D.	V.S.
Agua	2	120	0,001060	N.E.D.	L.C.
Amoníaco	0,17	25	0,85875	N.E.D.	V.S.
Oxígeno	0,00238	-210,15	3,9545	0,25	M.L.V.

3.- a) $T_{\text{agua}} = 125 \text{ °C}$, $P_{\text{agua}} = 0,2367 \text{ MPa}$; $T_{\text{propano}} = 125 \text{ °C}$, $P_{\text{propano}} = 1,22 \text{ Mpa}$.

b) $m_{\text{propano}} = 1,78 \text{ kg}$; $T_{\text{propano}} = 913,45 \text{ K}$; $P_{\text{propano}} = 3,067 \text{ Mpa}$.



Segundo parcial A

- 1.- $\dot{W} = -315,984 \text{ kJ/s}$; $\dot{Q} = -3497,752 \text{ kW}$; $\dot{W} = 1467,179 \text{ kJ/s}$; $\dot{m}_1 = 0,98 \text{ kg/s}$
- 2.- $P = 0,8 \text{ MPa}$; $m = 1,232 \text{ kg}$; $T = 477,853 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 0,43023 \text{ m}^3/\text{kg}$; $x = \text{NED}$

Segundo parcial B

- 1.- a) $\langle v_p \rangle = 21,3 \text{ m/s}$; b) $W = 4531,08 \text{ kJ}$.
- 2.- a) $\dot{m} = 0,30 \text{ kJ/kg}$; b) $\dot{Q} = 10,5 \text{ MW}$; c) $\dot{W} = 677,61 \text{ kW}$; d) $t = 2,16 \text{ s}$

Tercer parcial A

- 1.- Bs.F. 27,27067
- 2.- a) $Q = -102,93 \text{ kJ}$; b) $\Delta S = 0,2976 \text{ kJ/K}$
- 3.-

Corriente	P (MPa)	T (°C)	x	H (kJ/kg)	\dot{m} (kg/s)
1	0,1	25	N.E.D.	104,89	10
2	4,1	26,2	N.E.D.	109,89	10
3	4,1	90	N.E.D.	376,92	10
4	6	90,6	N.E.D.	379,4	10
5	6	1100	N.E.D.	4875,4	10
6	0,1	99,63	0,95	2562,6	10
7	0,1	99,63	1	2675,5	9,5
8	0,1	99,63	0	417,46	0,5
9	0,1	99,63	0,88	2394,42	9,5

Tercer parcial B

- 1.- a) $\frac{Q_{caldera}}{Q_{evaporador}} = 2,654$; b) $\eta = 0,2118$ $\beta = 1,77$; c) $\left(\frac{dS}{dt}\right)\frac{1}{\dot{m}_1} = 3,2$.
- 2.- a) $P_{A2} = 0,9495 \text{ MPa}$, $P_{B2} = 0,8 \text{ MPa}$; b) $m_{B2} = 1,15 \text{ kg}$, c) $\Delta S_{neto} = 0,69 \text{ kJ/K}$