1 – Conceptos Fundamentales y Unidades

Ejercicio 1.1

Expresar el valor de la presión atmosférica normal en las siguientes: at, bar, kg_f/cm^2, psi, kPa, mm de Hg, y mm de ca (columna de agua) , unidades, redondeando a no más de tres dígitos significativos

---

Ejercicio 1.2

Determine la equivalencia entre las siguientes unidades:

a) Energía por unidad de masa: $\frac{kJ}{kg}$ $\frac{kWh}{kg}$ $\frac{kcal}{kg}$ $\frac{BTU}{lb}$

b) Calor específico: $\frac{kJ}{kg\ K}$ $\frac{kJ}{kg\ °C}$ $\frac{kcal}{kg\ K}$ $\frac{kgf.m}{kg\ K}$ $\frac{BTU}{lb\ °F}$

c) Potencia: kW $\frac{kcal}{h}$ CV $\frac{kg_f.m}{s}$

Respuesta:

a) Energía por unidad de masa: $1\ \frac{kJ}{kg} = \frac{1}{3600}\ \frac{kWh}{kg} = 0{,}239\ \frac{kcal}{kg} = 0{,}43\ \frac{BTU}{lb}$

b) Calor específico: $1\ \frac{kJ}{kg\ K} = 1\ \frac{kJ}{kg\ °C} = 0{,}239\ \frac{kcal}{kg\ K} = 102\ \frac{kg_f.m}{kg\ K} = 0{,}239\ \frac{BTU}{lb\ °F}$

c) Potencia: $1\ kW = 860\ \frac{kcal}{h} = 1{,}36\ CV = 102\ \frac{kg_f.m}{s}$

Ejercicio 1.3

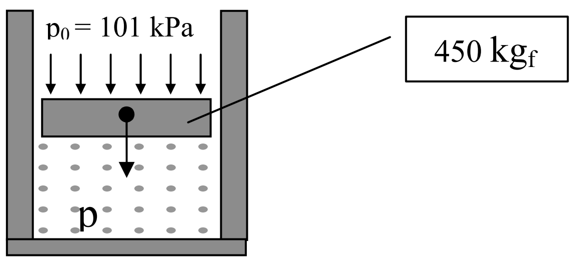
Calcular la presión ejercida en el interior del dispositivo cilindro pistón conteniendo aire en su interior, despreciando el peso del gas , si el peso del pistón es de 450 kg_f, su diámetro de 300 mm, y sobre el mismo se ejerce la presión atmosférica de p_0 = 101 kPa. El volumen es de 500 litros y la temperatura de 300 K. Se pide:

a) Expresar el resultado de la presión en kPa, en bar, en kg_f/cm^2 , en psi y en m de ca.

b) Calcular la presión relativa (o manométrica) del aire en el interior del cilindro en kPa .

c) Expresar el volumen en m^3 y ft^3.

d) Expresar la temperatura en grados Celsius, grados Fahrenheit y Rankine.



e) La presión calculada, ¿depende de qué gas se halla en el interior?

f) Si se calienta el aire, ¿cambia la presión?

Respuesta:

a) $p = 163{,}4$ kPa = 1,63 bar = 1,67 kg_f / cm^2 = 23,70 psi = 16,67 m ca

b) $p_{REL} = 62{,}4$ kPa

c) $V = 0{,}5\ m^3 = 17{,}16\ ft^3$

d) T = 540 R ; t = 26,85 °C = 80,3 °F

e) No. La presión es independiente de la naturaleza del gas encerrado

f) No. La presión está autorregulada por el dispositivo y no depende de los cambios producidos en el fluido contenido.

Ejercicio 1.4

Calcular la energía potencial gravitatoria de 1000 litros de agua líquida a temperatura y presión ambiente, a 35 m de altura respecto del nivel de referencia . Expresar el resultado en unidades del SI, kcal, kWh y kg_f m.

Respuesta:

a) $E_P = 343{,}2$ kJ

b) $E_P = 82{,}0$ kcal

c) $E_p = 0{,}0953$ kWh

d) $E_P = 35000\ kg_f\ m$

Ejercicio 1.5

Calcular la energía cinética de un chorro de agua líquida a temperatura y presión ambiente, de 680 litros por minuto a la velocidad de 5,5 m/s . Expresar el resultado en unidades SI, kcal/h, kW y CV.

Respuesta:

a) $\dot{e}_C = 171{,}4\ \frac{J}{s}$

b) $\dot{e}_C = 147{,}5\ \frac{kcal}{h}$

c) $\dot{e}_C = 0{,}1714$ kW

d) $\dot{e}_C = 0{,}2331$ CV

Ejercicio 1.6

Calcular la potencia y la energía eléctrica transmitida a una resistencia eléctrica, a la que se aplica una tensión continua de 200 voltios circulando 25 amperes, durante 30 minutos. Expresar el resultado en unidades del SI, en kcal/h y kcal.

Respuestas:

a) $\dot{W}_{ELEC} = 5\ kW = 4302\ \frac{kcal}{h}$

b) $W_{ELEC} = 2{,}5\ kWh = 2151\ kcal$

Ejercicio 1.7

Calcular la potencia mecánica transmitida por un arbol (eje) que gira a razón de 2500 vueltas por minuto con un torque de 25 kg_f.m. Expresar el resultado en unidades SI, en kcal/h, kgf.m/s y CV.

Respuestas:

b) $\dot{W}_{MEC} = 64{,}2\ \text{kW}$

c) $\dot{W}_{MEC} = 55200\ \dfrac{\text{kcal}}{\text{h}}$

d) $\dot{W}_{MEC} = 6550\ \dfrac{\text{kg}_f\ \text{m}}{\text{s}}$

e) $\dot{W}_{MEC} = 87{,}3\ \text{CV}$

Ejercicio 1.8

Indicar en cada caso cuáles símbolos de las correspondientes unidades están escritos correctamente. Utilizar el criterio establecido en las tablas de unidades del SI del apéndice.

a) Kilogramo fuerza: Kg kg. KG. kgf kg_f kgr

b) Newton (fuerza): N Nw N. Nn

c) Kilogramo masa: kg kg. kgm kg_m

d) Potencia y energía: KWH kwh W kWh kW. kCAL/H kcal/hkj kJ

e) Temperatura: °C C °K K k

f) Volumen y presión: pa Pa HPA hPa kPa M^3 cc cm^3 m^3 lt Lt l

Respuestas: las correctas están en negrita

a) Kilogramo fuerza: Kg kg. KG. kgf **kg_f** **kgr**

b) Newton (fuerza): **N** Nw N. Nn

c) Kilogramo masa: **kg** kg. kgm **kg_m**

d) Potencia y energía: KWH kwh **W** **kWh** kW. kCAL/H **kcal/h** kj **kJ**

e) Temperatura: **°C** C °K **K** k

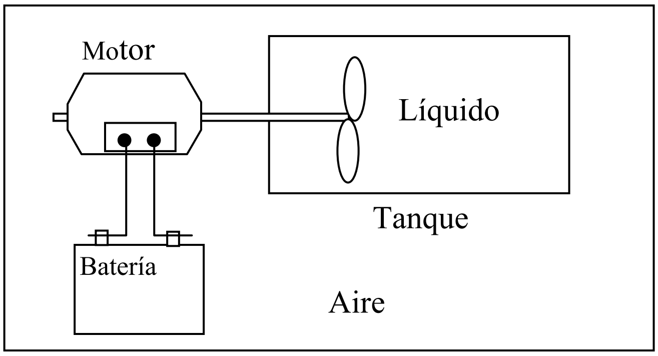
f) Volumen y presión: pa **Pa** HPA **hPa** **kPa** M^3 cc **cm^3** **m^3** lt Lt **l**

2 - Sistemas Termodinámicos

Ejercicio 2.1

El siguiente aparato se coloca en una habitación cerrada a 20 °C. Una batería de paredes metálicas está conectada a un motor que acciona un agitador sumergido en un líquido contenido en un tanque de paredes rígidas. El motor tiene un rendimiento del 80%, es decir, que el 80 % del trabajo eléctrico aparece como trabajo en el eje.
El proceso se considera estacionario para todos los elementos componentes. El líquido permanece a una temperatura de 50°C y la batería a 35°C.
Establecer los signos de trabajo W y el calor Q para los siguientes sistemas:

a) Batería
b) Motor
c) Agitador y Líquido
d) Aire
e) Batería y aire
f) Motor, agitador
g) Líquido, tanque y aire
h) Tanque



Ejercicio 2.2

Se tiene un recipiente rígido dentro del cual se encuentra una masa de aire y una resistencia eléctrica alimentada desde el exterior.
1) Dibuje el esquema correspondiente al ejemplo.
2) Determine las energías transferidas tomando como sistemas:
   a) El gas.
   b) La resistencia.
   c) La resistencia y el gas.

En cada ejemplo, analice y exprese los signos correspondientes

Respuestas:

a) Recibe calor ($+Q_{RESIS}$) y cede calor ($-Q_{PAREDES}$)
b) Recibe trabajo eléctrico($- W_{ELECTRICO}$) y cede calor (-Q)
c) Recibe trabajo eléctrico($- W_{ELECTRICO}$) y cede calor (-Q)

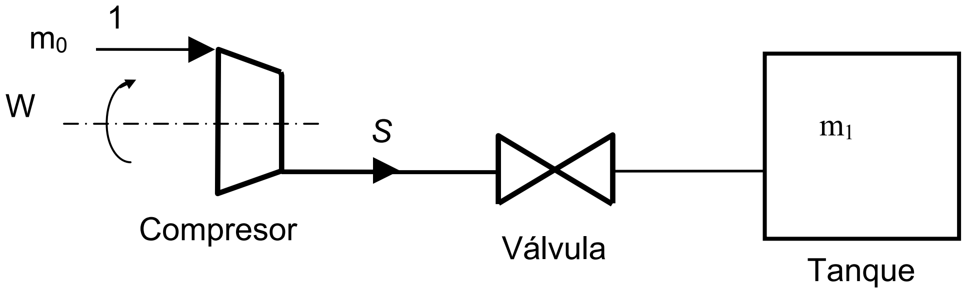
Ejercicio 2.3

Se tiene un compresor que aspira una masa m_0 de aire atmosférico y la envía a un tanque adiabático en donde se encuentra inicialmente una masa m_1. Entre el compresor y el tanque hay una válvula reguladora de presión que mantiene la presión constante a la salida del compresor. Expresar qué tipo de sistema es, tomando como sistema:

a) El compresor
b) El tanque
c) Las masas de aire m_1 y m_o

Respuestas:

a) Sistema abierto en régimen y estado permanente o estacionario
b) Sistema abierto en régimen variable o transitorio
c) Sistema cerrado



3 - Estados Termodinámicos de las Substancias Puras, gases ideales, mezclas, y gases reales

Ejercicio 3.1

Usando la Ecuación de Estado de los gases ideales en sus dos formas:

a) $pV = GRT$ siendo G la masa

b) $pV = nR_M T$ siendo n el número de moles

aplíquela a una masa de oxígeno de 20 kg a −25°C y 5 bar para determinar su volumen en m^3. Utilice la constante universal de los gases R_M , y el R_{O2} particular del oxígeno; R_M= 8,3143 kJ/kmol K ; masa molar del oxígeno M_{O2} = 32 ; R_{O2}= 0,25957 kJ/kg K

Respuesta: a) y b) V = 2,58 m^3

Ejercicio 3.2

Calcular el volumen específico de una masa de oxígeno que se encuentra a 47°C y 50 MPa mediante la ecuación de estado de los gases ideales, y compararlo con el valor dado por tablas de gases reales (ver apéndice).

Respuesta: v_{EC}= 0,001661 m^3/kg; v_{TAB}=0,001918 m^3/kg

Ejercicio 3.3

Representar en un diagrama presión-temperatura del agua, a mano alzada:

a) la curva de equilibrio líquido vapor,
b) la curva de equilibrio sólido vapor,
c) la curva de equilibrio sólido líquido,
d) el punto crítico
e) el punto triple
f) el estado de vapor húmedo p = 1 bar y x = 0,5
g) el estado t = 40°C y p = 20 bar

Ejercicio 3.4

En el cuadro siguiente se definen 11 estados distintos (1 a 10) más el de referencia (0) para el agua (H_2O). Debe completarse el cuadro con los parámetros faltantes de cada estado, mediante el uso de las tablas de vapor.

	presión p	v. espec. v	temp. t	e. interna u	entalpía h	título x	estado
	bar	m^3 / kg	°C	kJ / kg	kJ / kg	–	
0					0		Líquido saturado
1		0,120	30				
2	75	0,035					

	presión p	v. espec. v	temp. t	e. interna u	entalpía h	título x	estado
3	1					0,5	V.húmedo
4			100			1	V. sat. seco
5	12				2800		
6			320	2700			
7	20		40				
8							pto.crítico
9		s l v		s l v	s l v		línea triple
10	1,0133		100			1	V. sat. seco

Respuestas

	presión p	v. espec. v	temp. t	e. interna u	entalpía h	titulo x	estado
	bar	m^3 / kg	°C	kJ / kg	kJ / kg	–	
0	0,006111	0,0010002	0,01	–0,00061 ≈ 0	0	–	Líq. saturado
1	0,04241	0,120	30	133,9	134,44	0,00361	V. húmedo
2	75	0,035	376,6	2818,3	3079,5	–	Sobrecalentado
3	1	0,8475	99,63	1461,7	1546,48	0,5	Vapor húmedo
4	1,0133	1,673	100	2506,49	2676,01	1	V. sat. seco
5	12	0,166287	193,94	2600,7	2800	–	Sobrecalentado
6	68,05	0,03315	320	2700	2925,57	–	Sobrecalentado
7	20	0,0010069	40	167,1	169,2	–	líq.subenfriado
8	221,2	0,00317	374,15	2037,25	2107,37	–	punto crítico
9	0,006112	**s** 0,00109 **l** 0,00100 **v** 206,2	– 0,1	**s** -333,5 **l** -0,0006 **v** 2375	**s** -333,5 **l** 0 **v** 2501,	–	línea triple
10	1,0133	1,673	100	2506,49	2676,01	1	Vap.s.seco

Ejercicio 3.5

Se desean conocer los parámetros de estado **p, h', h", v'** y **v"** de un vapor húmedo de H_2O, a la temperatura de **107°C** . Luego de consultar la tabla, se obtienen los siguientes valores:

t	p	v'	v"	h'	h"
°C	bar	m^3/kg	m^3/kg	kJ/kg	kJ/kg
100	1,0133	0,0010437	1,67300	419,06	2676,01
120	1,9854	0,0010606	0,89152	503,72	2705,96

a) Calcular los parámetros correspondientes a **107°C**, haciendo una interpolación lineal entre 100 y 120°C.

b) Para un estado de vapor húmedo a **107°C** y **x = 0,5** , calcular sus parámetros **p, h, s, v** y **u .**

c) Comparar los resultados obtenidos en (a) con los leídos a 107°C de la siguiente tabla (dada en grado por grado), y determinar el error porcentual cometido con la interpolación:

t	p	v’	v”	h’	h”
°C	bar	m^3/kg	m^3/kg	kJ/kg	kJ/kg
107	1,2941	0,0010494	1,33075	448,63	2686,78

Respuestas

	p	v’	v”	h’	h”	u
	bar	m^3/kg	m^3/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg
a) 107	1,35354	0,00105	1,39948	448,691	2686,49	
b) x=0,5	1,35354	0,700266		1567,59		1481,45
c) error	4,59 %	0,02 %	5,16 %	0,01 %	-0,01 %	

Ejercicio 3.6 - Explicado en página 14

Para determinar los parámetros de estado del vapor de agua a 333°C y 31 bar, se dispone de las siguientes tablas de vapor sobrecalentado:

	20 bar				50 bar		
t	v	h	s		v	h	s
°C	m^3/kg	kJ/kg	kJ/kg K		m^3/kg	kJ/kg	kJ/kg K
300	0,1255010	3025,04	6,76955		0,0453009	2925,51	6,21050
350	0,1385583	3138,64	6,95964		0,0519415	3071,18	6,4545

a) determinar el valor de las funciones de estado (a 333°C y 31 bar) mediante interpolación lineal

b) Comparar los resultados con los siguientes valores reales y determinar el error cometido con la interpolación:

	31 bar		
t	v	h	s
°C	m^3/kg	kJ/kg	kJ/kg K
333	0,0844055	3074,65	6,66313

Nota: Tómese a la variable “s” (entropía) como otra propiedad específica del vapor, tratándola como a la entalpía o a la energía interna. Más adelante se comprenderá su utilidad.

Respuestas:

	v	h	s
a) calculado	0,1032	3071,3	6,703
b) errores	22,2 %	-0,0906 %	0,599 %

Ejercicio 3.7

Utilizando los datos dados por la tabla de vapor sobrecalentado, para el estado de presión de $p_1 = 5$ kPa y energía interna $u_1 = 2588{,}23$ kJ/kg ,

a) Aproximando el vapor sobrecalentado a un gas ideal, determinar el valor de su constante $R = p_1\, v_1 / T_1$, válido como constante del vapor de agua alrededor de ese estado.

b) Calcular el volumen específico de un estado de vapor sobrecalentado a 20 kPa y 200°C, como gas ideal con el R antes calculado, y compararlo con el valor dado por la tabla de vapor

c) Idem para un estado a p = 10000 kPa y T = 350°C

Respuestas:

a) R = 0,4613 kJ / K kg

b) $v_{G.IDEAL}$ = 10,914 m^3 / kg v_{TABLA} = 10,907 m^3 / kg (Error = 0,061%)

c) $v_{G.IDEAL}$ = 0,02875 m^3 / kg v_{TABLA} = 0,02242 m^3/ kg (Error = 28,2%)

Ejercicio 3.8

En un tanque se encuentra una mezcla en equilibrio de gases, compuesta por 21 % de oxígeno y 79% de nitrógeno, en volumen. La temperatura es 20°C, el volumen total es de 50 m^3 y la presión total es de 89 kPa.

Determinar considerando a ambos gases como ideales:

1. La presión parcial de cada uno de los gases
2. La masa de cada uno
3. El **R** de la mezcla
4. Si esa misma mezcla de gases se expandiera hasta ocupar el doble del volumen original, y lo hiciera a la misma temperatura, calcular la presión total utilizando la ecuación de estado de los gases ideales con el **R** de la mezcla

Respuestas:

1. p_{O2} = 18,69 kPa p_{N2} = 70,3 kPa
2. m_{O2} = 12,28 kg m_{N2} = 40,5 kg
3. R_M = 0,2879 kJ/kg K
4. p_T = 44,5 kPa

Ejercicio 3.9

El tanque de gas combustible de un automóvil equipado con GNC es de 60 litros. Asumiendo que el gas es 100% metano, determinar la masa en kg de combustible que se puede almacenar a la presión de 200 bar y a 45°C, como

1. gas ideal
2. gas real
3. ¿cuál es la densidad del gas en esas condiciones?
4. En ese estado, ¿el metano es líquido?
5. ¿Qué fuerza se ejerce sobre una superficie circular de 30 cm de diámetro bajo esa presión?

Respuestas:

1. $m_{G.IDEAL} = 7,28$ kg
2. $m_{G.REAL} = 8,44$ kg
3. $\delta_{G.IDEAL} = 121,3$ kg/m^3 $\delta_{G.REAL} = 140,7$ kg/m^3
4. No
5. F =1414 kN = 144200 kg$_f$

Ejercicio 3.10

Un automóvil experimental utiliza hidrógeno como combustible. Si se desea almacenar en su tanque de reserva 0,3 kg a 50 K y 10 bar, ¿Qué volumen deberá tener el tanque?, calculado como:

1. Gas ideal
2. Gas real

Respuestas:

1. $V_{G.IDEAL} = 0,0618$ m^3
2. $V_{G.Real} = 0,0568$ m^3

Ejercicio 3.11

El calor específico a presión constante de un gas es considerado generalmente como constante. En algunos casos, donde se necesita conocer su verdadero valor, se especifica como una función de temperatura.

Para el aire, el calor específico se puede calcular como (en kJ/kmol K, T en K):

$$c_{pA} = -1,966 \times 10^{-9}\ \mathbf{T}^3 + 0,4802 \times 10^{-5}\ \mathbf{T}^2 + 0,1967 \times 10^{-2}\ \mathbf{T} + 28.11$$

(entre 273 K y 1800 K el error máximo es de 0,72 kJ/kmol K)

Calcular el valor medio del c_{pA} entre 100 y 800°C

Respuesta:

$c_{pA} = 32,86$ kJ/kmol K

$c_{pA} = 1,134$ kJ/kg K

Ejercicio 3.12

Al cerrar la puerta de un frezzer, se observa, que si se desea abrirla inmediatamente, hay que hacer una fuerza adicional. El aire del medio ambiente a 25°C (supuesto seco) entra al frezzer y al cerrar la puerta se enfría hasta -22°C. Si la puerta tuviera un sellado perfecto, el aire evolucionaría a volumen constante. Calcular la fuerza adicional, producida por el cambio de presión, siendo el área de la puerta de 0,25 $\mathbf{m^2}$ y el volumen del freezer de 0,016 $\mathbf{m^3}$. Presión atmosférica $\mathbf{p_0}$ = 1,01 **bar**

Respuesta: **f** =3982 **N**

Ejercicio 3.13

Un recipiente cerrado de 2 m3 de capacidad, está dividido en dos partes iguales por una membrana semipermeable, que permite el paso del gas A e impide el del gas B. Inicialmente en el recipiente se ha hecho vacío. De el lado "1" se inyecta 1 kg de gas A y del "2"1 kg de gas B. Luego de un tiempo se establece el equilibrio y la temperatura del conjunto resulta t = 30°C.

Calcular la presión total a ambos lados del recinto.

Constantes de los gases (ideales) R_A = 0,300 kJ/kg K ; R_B = 0,400 kJ/kg K

Respuesta:

p_1 (gas A) = 45,5 kPa

p_2 (gas B + gas A) = 166,7 kPa

Ejercicio 3.14

Determinar el volumen específico de una muestra de gas argón utilizando el diagrama de compresibilidad y compararlo con el valor dado por la ecuación de estado de los gases ideales. La presión es de 1269 kPa y la temperatura es de 36,5°C.

Respuestas:

a) Como gas real z =0,99 ; v = 0,0529 m^3 / kg
b) Como gas ideal v = 0,0535 m^3 / kg

Ejercicio 3.15

Determinar el volumen específico de una muestra de gas helio utilizando el diagrama de compresibilidad y compararlo con el valor dado por la ecuación de estado de los gases ideales. La presión es de 7,744 kPa y la temperatura es de 322°C.

Respuestas:

a) Como gas real z ≈ 1 ; v = 157,4 m^3 / kg
b) Como gas ideal v = 157,4 m^3 / kg

Ejercicio 3.16

Determinar la temperatura de una masa de Nitrógeno con el diagrama de compresibilidad y compararlo con el valor dado por la ecuación de estado de los gases ideales. La presión es de 3100 kPa y el volumen específico es de 0,02 m^3/kg.

Respuestas:

a) Como gas real z =0,96 ; T = 225,5 K
b) Como gas ideal T = 218,7 K

Ejercicio 3.17

Con ayuda del diagrama de compresibilidad, determinar la densidad en kg/dm^3 de una masa de metano que se encuentra a 200 bar de presión y 27°C.

Respuestas: Como gas real z = 0,83 ; $\delta = \frac{1}{v} = 0{,}158$ kg / dm^3

Ejercicios resueltos

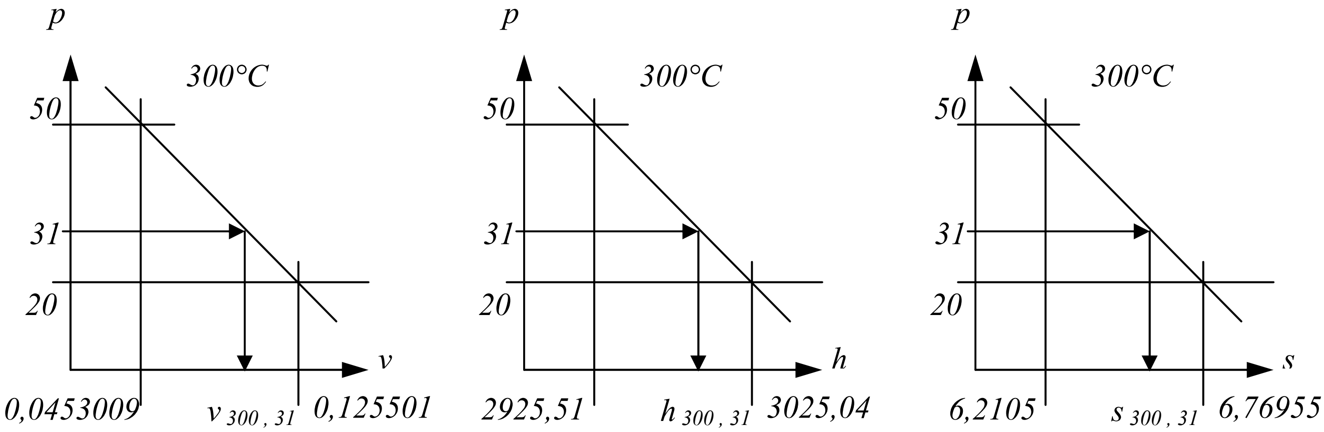
Ejercicio 3.6 (interpolación en tabla de vapor)

Debemos realizar una interpolación doble, formando primero una tabla a 31 bar con las temperaturas de 300° y 350°C y luego interpolar entre 300° y 350°C para obtener los valores a 31 bar y 333°C. También se puede empezar interpolando las temperaturas de ambas presiones y luego interpolar entre éstas últimas.

Vamos a realizar una interpolación lineal, es decir que asumimos que los valores del volumen, la entalpía y la entropía varían linealmente con la presión. Luego haremos la misma consideración respecto de la dependencia con la temperatura.

La exactitud del los resultados en estos casos dependen del tamaño del intervalo disponible de los datos. Como ejemplo diremos que para calcular valores a 31 bar, con un intervalo de 30 a 35 el error será menor que si se dispone de datos a 20 y 50 bar.

Para formar la tabla a 31 bar, interpolamos a 300° y 350°C el volumen específico, la entalpía y la entropía, entre 20 y 50 bar. Son seis interpolaciones:



$$v_{300,31} = \frac{0{,}125501 - 0{,}0453009}{50 - 20}(50 - 31) + 0{,}0453009 = 0{,}0960943 \approx 0{,}0961$$

$$h_{300,31} = \frac{3025{,}04 - 2925{,}51}{50 - 20}(50 - 31) + 2925{,}51 = 2988{,}5457 \approx 2988{,}6$$

$$v_{300,31} = \frac{6{,}76955 - 6{,}21050}{50 - 20}(50 - 31) + 6{,}21050 = 6{,}56457 \approx 6{,}565$$

Realizando el mismo procedimiento a 350°C :

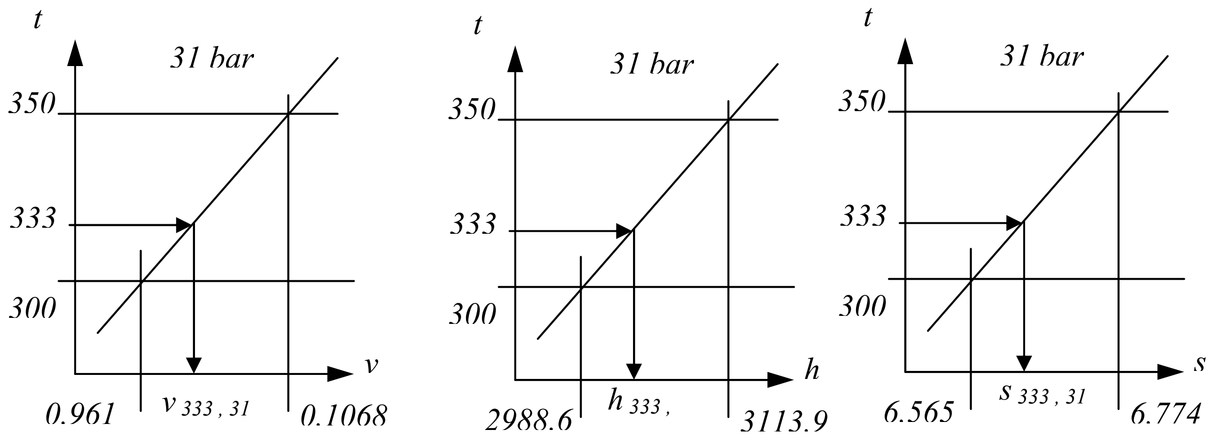
$$v_{350,31} = \frac{0{,}1385583 - 0{,}0519415}{50 - 20}(50 - 31) + 0{,}0519415 = 0{,}1067988 \approx 0{,}1068$$

$$h_{350,31} = \frac{3138{,}64 - 3071{,}18}{50 - 20}(50 - 31) + 3071{,}18 = 3113{,}9047 \approx 3113{,}9$$

$$v_{350,31} = \frac{6{,}95964 - 6{,}4545}{50 - 20}(50 - 31) + 6{,}4545 = 6{,}774422 \approx 6{,}774$$

	31 bar		
t	v	h	s
°C	m^3/kg	kJ/kg	kJ/kg K
300	0,0961	2988,6	6,565
350	0,1068	3113.9	6.774

A continuación hacemos la interpolación lineal entre 300° y 350°C



$$v_{333,31} = \frac{0,1068 - 0,0961}{350 - 300}(333 - 300) + 0,0961 = 0,103159 \approx 0,1032$$

$$h_{333,31} = \frac{3113,9 - 2988,6}{350 - 300}(333 - 300) + 2988,6 = 3071,2826 \approx 3071,3$$

$$v_{333,31} = \frac{6,774 - 6,565}{350 - 300}(333 - 300) + 6,565 = 6,7030706 \approx 6,703$$

	31 bar, 333°C		
	v	h	s
	m^3/kg	kJ/kg	kJ/kg K
calculado	0,1032	3071,3	6,703
valor exacto tabulado	0.0844055	3074.065	6.66313
error porcentual	22.2%	-0.0906%	0.599%

Obsérvese cómo por consecuencia de la interpolación, los resultados carecen de exactitud. Por lo tanto, es aconsejable redondear las cifras así obtenidas.

4 - Primer Principio de la Termodinámica

Ejercicio 4.1

Escribir las expresiones generales del primer principio aplicado a:

a) Un sistema cerrado que cambia su temperatura, su velocidad y su altura.

b) Un sistema abierto en régimen estacionario con una corriente de entrada y otra de salida, cuyas temperaturas, presiones, velocidades y alturas son distintas.

c) Un sistema abierto en régimen transitorio, con dos masas de entrada en los estados 1 y 2, y una masa de salida en el estado 3. Recibe el calor Q_1, entrega el calor Q_2 y recibe los trabajos W_1 y W_2

d) Un sistema abierto en régimen estacionario con una entrada y una salida, cuyo flujo es isotérmico, adiabático, sin trabajo de circulación (o trabajo de flecha), incompresible, y sin fricción (cuasiestático). Tener en cuenta velocidades alturas y presiones. Comience el desarrollo partiendo de la expresión obtenida en (b).

Respuestas:

a) $Q - W = \Delta U + \Delta Ec + \Delta Ep$

b) $\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}_S \; (h + \frac{1}{2}\omega^2 + g\,z)_S - \dot{m}_E \; (h + \frac{1}{2}\omega^2 + g\,z)_E$

c) $(Q_1 - Q_2) - (-W_1 - W_2) = \Delta U_{VC} + m_3\,(h + e_c + e_p)_3 - m_1\,(h + e_c + e_p)_1 + m_2\,(h + e_c + e_p)_2$

d) $0 = (p\,v + e_c + e_p)_S - (p\,v + e_c + e_p)_E$ (ecuación de Bernoulli)

Ejercicio 4.2

Escribir la expresión del trabajo realizado por:

a) un sistema cerrado de masa m que evoluciona cuasiestáticamente al aumentar su volumen de V_1 hasta V_2.

b) un sistema cerrado de masa m, sometido a presión constante p_1, al aumentar su volumen de V_1 hasta V_2.

c) un sistema abierto en régimen estacionario, con masa $\dot{m}$, de entrada E y salida S que evoluciona cuasiestáticamente al aumentar su volumen específico de v_E hasta v_S, su presión de p_E a p_S, su velocidad de ω_E a ω_S, y su altura de z_E a z_S.

d) un sistema abierto en régimen estacionario, con masa $\dot{m}$, que evoluciona cuasiestáticamente al aumentar su volumen específico de v_1 hasta v_2 a presión constante. sin cambios de energía cinética ni potencial gravitatoria.

e) un sistema abierto en régimen estacionario, con masa $\dot{m}$, que evoluciona cuasiestáticamente al aumentar su presión de p_1 hasta p_2, a volumen específico constante, sin cambios de energía cinética ni potencial gravitatoria.

f) un sistema abierto en régimen estacionario, con masa $\dot{m}$, no cuasiestático al aumentar su volumen específico de v_1 hasta v_2 a presión constante.

g) un sistema abierto en régimen transitorio, que evoluciona cuasiestáticamente, sin cambios de energía cinética ni potencial gravitatoria

Respuestas:

a) $W = m \int_1^2 p\, dv$

b) $W = m \int_1^2 p\, dv = m\, p_1\, \Delta v = p_1\, \Delta V$

c) $\dot{W} = - \dot{m} \int_E^S v\, dp - \dot{m}\ \Delta e_C - \dot{m}\, \Delta e_P$

d) $\dot{W} = - \int_E^S \dot{V}\ dp = 0$

e) $\dot{W} = - m \int_1^2 \dot{v}\ dp = -\ m\, \dot{v}\ \Delta p = -\ \dot{V}\ \Delta p$

f) $\dot{W} = \dot{Q} - \Delta \dot{H}$

g) $W = \int_{INICIAL}^{FINAL} p\, dV - \int_{ENTADA}^{SALIDA} V\, dp$

Ejercicio 4.3

A un tanque rígido y adiabático formado por una mezcla de substancias desconocidas, se lo agita mediante paletas, movidas por un motor eléctrico, y simultáneamente, se lo calienta con una resistencia eléctrica inmersa en la misma. El proceso dura 20 minutos. El motor consume 1.5 kW (supuesto sin pérdidas, o sea que produce 1,5 kW de energía mecánica); la resistencia es de 3,3 kW. Aplicando el primer principio de la termodinámica determine la variación de energía interna del sistema formado por el contenido del tanque adiabático .

Respuesta: $\Delta U = 5760$ kJ

Ejercicio 4.4

Escriba la expresión correspondiente al cálculo de la variación de energía interna de

a) una masa m de gas ideal que evoluciona desde T_1 hasta T_2 a volumen constante,

b) igual al anterior, pero a presión constante,

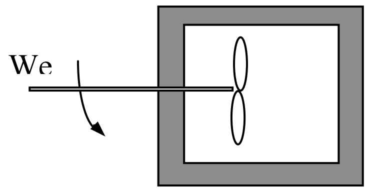
c) igual a (a), pero adiabáticamente.

Respuestas: a), b) y c) $\Delta U = m\, c_V\, (T_2 - T_1)$

Ejercicio 4.5 - Explicado en página 34

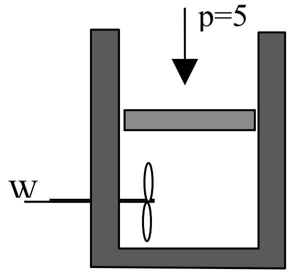
Se tiene un sistema rígido y adiabático. Dentro del mismo hay una masa de m = 10 kg de aire a una presión absoluta de p =5 bar y T =300 K de temperatura. Por medio de un eje se acciona una hélice y se entrega trabajo al aire hasta que su temperatura final es de 600 K.

a) Calcular el trabajo en el eje, W_e.
b) ¿La transformación del aire es cuasiestática?
c) Representar en un diagrama p-v



Respuestas: W_e= -516 kCal = -2157 kJ

Ejercicio 4.6 - Explicado en página 35



Un cilindro rígido y adiabático contiene un pistón deslizante también adiabático. En el recinto cerrado se encuentran 10 kg de aire a 5 bar y 27 °C.

Un eje que acciona una hélice dentro del recinto aporta trabajo al aire produciéndose un ascenso del pistón.

Calcular el trabajo en el eje, W_e, para elevar la temperatura hasta 600 K. ¿La transformación del aire es cuasiestática?. Compare los resultados de este Ejercicio con el anterior. Representar en un diagrama p-v

Respuesta: W_e= -721.3 KCal = -3018 kJ

Ejercicio 4.7

Dos flujos, uno de aire atmosférico y el otro de agua, ambos en régimen estacionario, intercambian calor a través de una superficie. El aire entra a 32°C y sale a 50°C, mientras que el agua (líquida) se enfría desde 88°C hasta 60°C y su caudal es de 2100 litros / hora .

Determinar el caudal de aire necesario en m^3/minuto y el calor intercambiado entre ambas masas en circulación.

Respuestas: $\dot{m}_{Aire}$= 3,78 kg/s

$\dot{V}_{Aire}$= 196 m^3/min

$\dot{Q}$= 68.4 kW

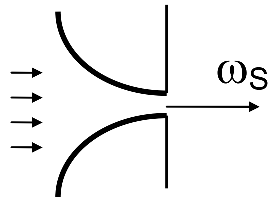
Ejercicio 4.8

Una caldera calienta 4000 litros / hora de agua líquida, desde 5°C hasta 55°C . ¿Qué cantidad de calor deben suministrarle los gases quemados del combustible? .

Respuesta: $\dot{Q}$ = 200000 kCal/h = 233 kW

Ejercicio 4.9

Una tobera adiabática, convergente, acelera aire que entra a baja velocidad, 120 kPa y 25°C. En la tobera se expande, bajando su temperatura hasta 18°C y su presión hasta 100 kPa . Calcular la velocidad de salida del aire. Representar en un p-v



Respuesta: ω_s = 118,6 m/s

Ejercicio 4.10 - Explicado en página 36

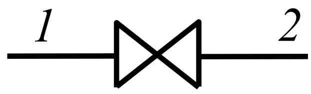
Una corriente de oxígeno gaseoso, en régimen estacionario, pasa a través de una válvula adiabática, reduciendo su presión desde 2 MPa hasta 0.1013 MPa, y siendo la temperatura de entrada de 300°K.

Calcular la temperatura de salida, considerándolo como:

a) gas ideal
b) gas real (ver tabla)
c) Representar en un p-v

Respuestas:

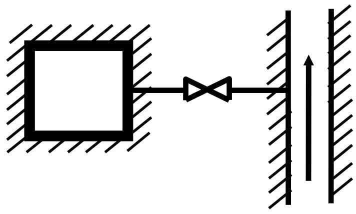
a) Gas ideal: T = 300 K
b) Gas real: T = 295°C



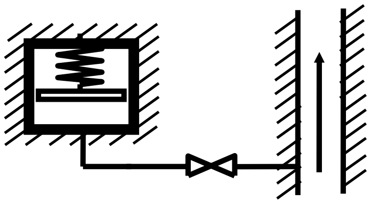
Ejercicio 4. 11 - Explicado en página 37

En este problema se comparan tres diferentes sistemas de ingreso de vapor a un recipiente. En todos los casos el recipiente es adiabático. En los tres casos, el vapor que fluye por la cañería está a una presión de 1000 kPa y una temperatura de 270 °C , y el recipiente está inicialmente vacío. Determinar la temperatura final del vapor en cada uno de los siguientes casos:

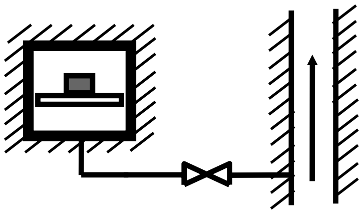
a) Se abre la válvula hasta que la presión llega a 10 bar.



b) El pistón está retenido por un resorte que ejerce una presión proporcional al desplazamiento del pistón. La presión final llega a 10 bar



c) El pistón tiene una carga que provoca una presión constante de 10 bar.



Respuestas:

a) T_F = 418 °C b) T_F = 334,0 °C c) T_F = 270 °C

Ejercicio 4.12

Se desea instalar en una plaza, una fuente de agua compuesta por un chorro ascendente. La altura del agua deberá ser de 10 metros, a contar desde el pico de salida vertical, que está al mismo nivel que el espejo de agua. El diámetro del pico se determinó en d = 30 mm . En todo momento se considerará al flujo como incompresible, isotérmico y adiabático. En cambio, debe tenerse en cuenta las energías cinéticas, potenciales (gravitatorias) , y de flujo (presión).

Determinar:

a) Velocidad necesaria de salida del agua (despreciando rozamientos).
b) Caudal de agua en kg/s.
c) Potencia mínima necesaria de la bomba que toma agua a velocidad despreciable, al nivel del espejo de agua, y a la presión atmosférica de 1 bar, y que la descarga a la misma altura y presión.

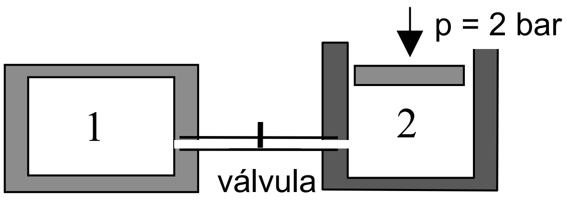
Respuestas: ω_S = 14 m/s $\dot{m}_{AGUA}$= 9,9 kg/s $\dot{W}_{BOMBA}$= 971 W

Ejercicio 4.13 Ver orientación en página 40

Un tanque rígido y adiabático (1) contiene inicialmente 100 kg de aire, supuesto gas perfecto, a una presión de 10 bar , y a una temperatura de 60 °C. Se lo comunica con un cilindro también adiabático (2) que inicialmente contiene 10 kg de aire, a una temperatura de 20 °C y está cerrado por un pistón sin rozamiento y adiabático que mantiene una presión de equilibrio de 2 bar. Luego de abrir la válvula se llega al equilibrio termodinámico.

Calcular:

a) Volúmenes iniciales V_1 y V_2.
b) Temperatura final T_F.
c) Volumen final V_F .
d) Trabajo entregado por el pistón, W.
e) Variaciones de energía interna de ambas masas de aire, ΔU_{S1} y ΔU_{S2}.
f) representar en un diagrama p-v



Respuestas:

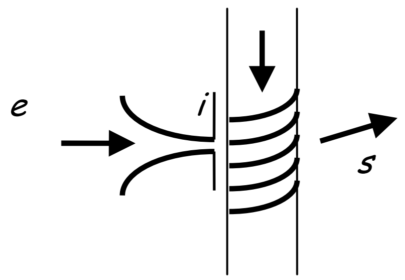
a) V_1 = 9,74 m^3; V_2 = 4,28 m^3;
b) t_F = -13,2 °C ;
c) V_F = 41,8 m^3;
d) W = 5439 kJ ;
e) ΔU_{S1} =-1245 kCal = -5209 kJ y ΔU_{S2} = -56,5 kCal = -236 kJ

Ejercicio 4.14

Una turbina adiabática elemental, se compone básicamente de una tobera adiabática y una corona de álabes o paletas dentro de una cámara también adiabática. Siendo el estado intermedio "i" (salida de la tobera y entrada a álabes) construir una tabla indicando los valores de presiones, temperaturas, velocidades, energías cinéticas, entalpías, y energías del flujo másico (entalpía + e. cinética), en los tres estados: de entrada, intermedio, y de salida.

Calcular la potencia producida.

Representar en un diagrama p-v



Datos: aire (gas ideal):

entrada : t_e = 450 °C, ω_e= 0 m/s , p_e = 150 kPa,

estado intermedio: t_i = 400 °C, y p_i= 101,3 kPa ,

salida: t_s = 400 °C, p_s= 101,3 kPa y ω_s= 0 m/s

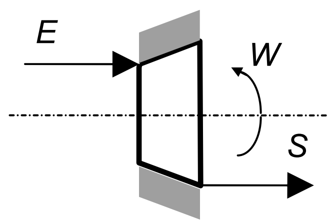
Flujo másico $\dot{m}_{Aire}$= 1,5 kg/s

Respuestas:

		Entrada	Intermedio	Salida
Temperatura	°C	450	400	400
presión	kPa	150	101.3	101.3
Velocidad	m/s	0	326	0
E. Cinética	kJ/kg	0	53	0
Entalpía	kJ/kg	738	685	685
Energía	kJ/kg	738	738	685

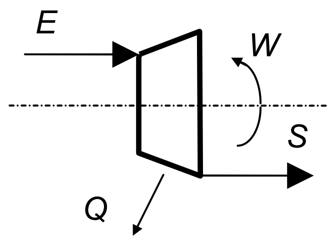
potencia producida: $\dot{W}_{Aire}$= 80 kW w = 53,3 kJ/kg

Ejercicio 4.15



Turbina adiabática

Una turbina adiabática, produce 100 kW de trabajo en el eje. Descarga 12 kg / min de aire (como gas ideal) a 60°C.



Turbina no adiabática

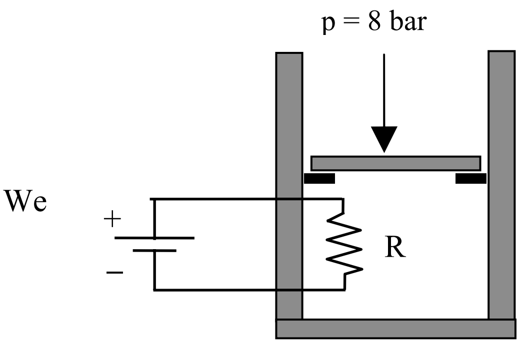
Determinar:

a) la temperatura del aire a la entrada, y
b) la potencia (trabajo mecánico) producida, si con las mismas condiciones de entrada e igual presión de salida, y siendo la turbina no adiabática, pierde 30 kW de calor al medio ambiente.
c) Representar en un p-v

Respuestas: a) $T_E = 557°C$ b) $\dot{W} = 70$ kW

Ejercicio 4.16 - Ver orientación en página 40

Un recipiente rígido y adiabático, posee un pistón también adiabático que inicialmente está apoyado simplemente sobre unas clavijas. El pistón, puede deslizarse hacia arriba sin rozamiento. El peso del pistón , produce sobre el área de éste, una presión de 8 bar. Inicialmente tenemos dentro del recipiente, aire a una presión de 3 bar y 300 K ocupando un volumen de 200 litros (volumen mínimo del recipiente, pues el pistón no puede descender más por la acción de las clavijas). Si calentamos el aire para que llegue a 1000 K , determínese:

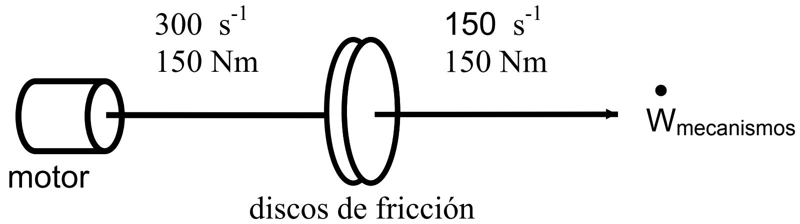


a) ¿Se mueve el pistón?
b) ¿A qué temperatura se mueve?
c) ¿Qué cantidad de calor se transmite al aire?
d) Indique las irreversibilidades presentes.
e) representar en un diagr. P-v

Respuestas:
a) Si
b) T = 800 K
c) Q = 90,7 kCal = 380 kJ
d) Proceso de transformación de energía eléctrica en energía térmica en la resistencia, y transmisión del calor desde la resistencia al aire.

Ejercicio 4.17

Un motor eléctrico gira a velocidad constante de $\omega = 300\ s^{-1}$. A través de dos discos de fricción se transmite el movimiento a otro eje que gira a la mitad de velocidad. De modo que hay deslizamiento entre ambos discos, y se transmite un par constante de $\tau = 150$ Nm . El sistema se encuentra en régimen estacionario.



Establecer las energías entrantes y salientes del conjunto de discos de fricción.

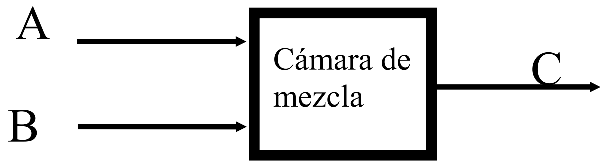
Respuesta: $\dot{W}_{motor}$=45 kW $\dot{Q}_{discos}$= 22,5 kW $\dot{W}_{mecanismos}$= 22,5 kW!

Ejercicio 4.18

Dos corrientes de aire, “A” y “B”, se unen en una cámara de mezcla adiabática, entrando y saliendo ambas a 0.1013 MPa. La “A” es de 200 m^3/h y está a 25°C y la “B”es de 45 m^3/h a 75°C.

Determinar:

a) El caudal de salida en m^3/h .
b) La temperatura de salida .
c) Representar en un p-v

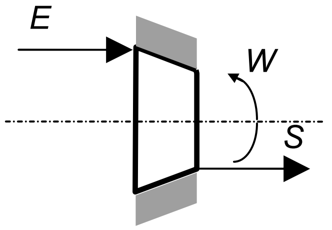


Respuestas :

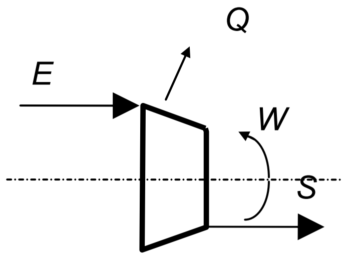
a) Caudal de salida $\dot{V}_{Salida}$= 245 m^3/h
b) temperatura de salida*:* T = 34,2°C

Ejercicio 4.19

Dos compresores trabajan en régimen estacionario, uno adiabáticamente y el otro isotérmicamente, comprimiendo aire (supuesto gas ideal) a razón de 15 kg/hora cada uno. Ambos aspiran aire atmosférico a 300 K y 101,3 kPa y lo entregan 700 kPa. La temperatura de salida del adiabático es de 270°C y el calor cedido en el isotérmico es de 693 vatios.



Compresor adiabático



Compresor isotérmico

Calcular para cada uno de los compresores, la potencia necesaria para su accionamiento. Representar en un p-v.

Respuestas: $\dot{W}_{ADI}$= 1037 W $\dot{W}_{ISOT}$= 693 W

Ejercicio 4.20 - Explicado en página 40

El motor de un automóvil, entrega una potencia máxima que es proporcional a la masa de aire que aspira. Para aumentarla se recurre a comprimir el aire de entrada hasta 0,22 MPa , para que ocupe menos volumen. Durante la compresión la temperatura aumenta hasta 140°C. Luego se lo enfría hasta 60°C, con la misma finalidad, y perdiendo 0,01 MPa por fricción en este último proceso.

Calcular el aumento de potencia máxima del motor con a) compresor solamente, y b) con compresor y enfriador, respecto del de aspiración natural. Las condiciones atmosféricas del aire de aspiración son: 0,1013 MPa y 30°C.

Representar en un p-v.

Respuestas: a) $\dfrac{\dot{W}_{COMP}}{\dot{W}_{NATURAL}} = 1,6$ b) $\dfrac{\dot{W}_{COMP + ENF}}{\dot{W}_{NATURAL}} = 1,89$

Ejercicio 4.21

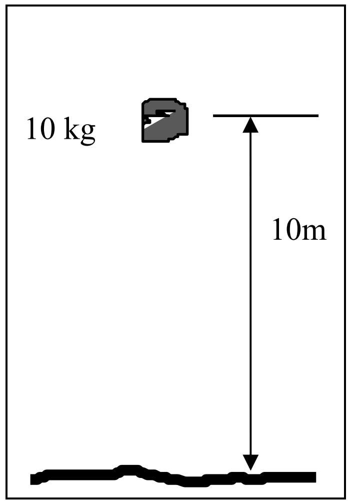
Una piedra de 10 kg cae desde una altura de 10 m sobre el piso, quedando inmóvil. Despreciando el rozamiento con el aire, determine el valor de la energía potencial y cinética, y el cambio de energía interna del sistema compuesto por la piedra, el suelo y su entorno:

a) antes de comenzar la caída,

b) un instante antes de tocar el suelo, y

c) luego de quedar en reposo.

Aplicar el primer principio de la termodinámica.



Respuestas:

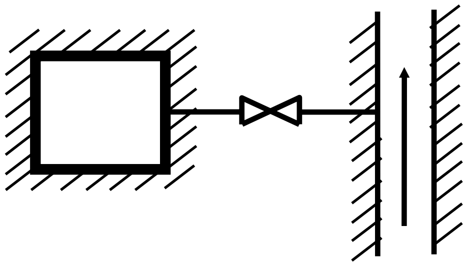
a)	Ep = 981 J	Ec = 0	
b)	Ep = 0	Ec = 981 J	$\Delta U = 0$
c)	Ep = 0	Ec= 0	$\Delta U = 981$ J

Ejercicio 4.22 – Explicado en página 41

En una cañería circula aire a una presión de 20 kg_f/cm^2 y a una temperatura de 57 °C, parámetros que se mantienen constantes. Se comunica a la cañería con un tanque rígido y adiabático de 10 m^3 de capacidad que inicialmente contiene aire a una presión p_1=1 bar y una temperatura t_1=27 °C.

Calcular para el equilibrio mecánico:

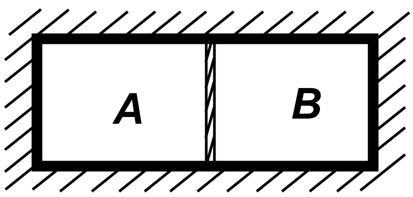
a) Masa de aire que ingresa al tanque;
b) Temperatura final del aire en el tanque.



Respuestas: a) m = 144 kg ; b) t_F = 166 °C

Ejercicio 4.23 – Explicado en página 43

Un tanque de 10 m^3 de capacidad, con paredes adiabáticas, está dividido por un tabique en dos partes "A" y "B". En la primera hay 4 m^3 de vapor de agua a p_A = 10,5 bar y t_A = 190°C; en la otra hay 6 m^3 vapor a p_B = 48 bar y t_B = 330°C. Se quita la división y los vapores se mezclan completamente.



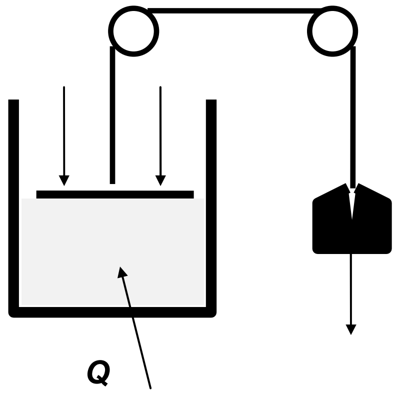
Determinar el estado final de equilibrio.

Respuesta: Estado de mezcla: p_M = 3300 kPa t_M = 300 °C

Ejercicio 4.24

Un cilindro cerrado por un émbolo móvil, sin rozamiento, vinculado a una pesa a través de un cable, como se indica en el esquema, contiene un gas que se expande debido al calentamiento externo . El ascenso del pistón (igual al descenso de la pesa) es de 0,5 m. la pesa es de 100 kg y el área del pistón es de 0,1 m^2 .Para una presión ambiente de 100 kPa , Determinar :

1. la variación de energía potencial de la pesa,
2. el trabajo producido por el descenso de la pesa sobre el pistón, a través del cable,
3. el trabajo producido por el gas interior del cilindro, y
4. el trabajo realizado por el medio ambiente



Respuestas:

1) Ep = -490 Nm

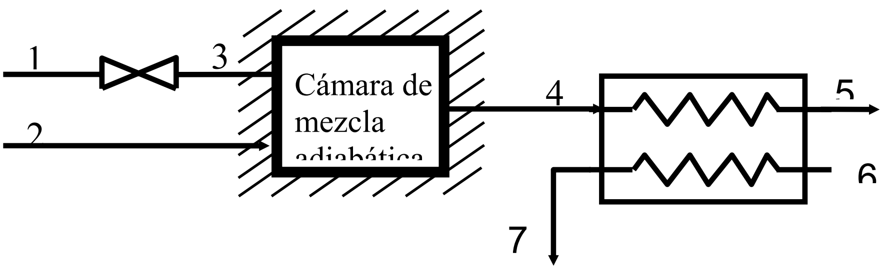
2) W_{pesa}= 490 Nm

3) W_{GAS} = 4510 Nm

4) W_{MEDIO} = -5000 N

Ejercicio 4.25

Para la siguiente instalación, se pide hallar el caudal másico de agua que se calienta entre los estados "6" y "7". Representar en un p-v



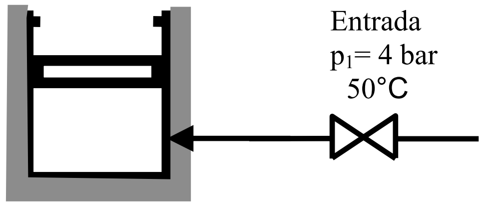
Datos:

p_1 = 10 bar	T_1 = 500 °C	$\dot{m}_1$ = 2000 kg / h de aire
p_2 = 6 bar	T_2 = 100 °C	$\dot{m}_2$ = 1000 kg / h de aire
p_6 = 1 bar	T_5 = 20 °C	
p_7 = 1 bar	T_6 = 10 °C	
	T_7 = 30 °C	

Respuestas: $\dot{m}_6$ = 12490 kg / h de agua.

Ejercicio 4.26 - Explicado en página 44

Dentro de un cilindro adiabático, cerrado por un pistón adiabático, se encuentra una masa de aire a una presión de 1 bar y a una temperatura de 27 °C, ocupando un volumen de 10 m^3 .



Se abre una válvula y se introduce una masa m de aire a una presión p_I=4 bar y una temperatura de 50°C.

Al introducir esta masa, se eleva el pistón, y éste choca con unos topes siendo el volumen final . Al instante de suceder esto, se cierra la válvula. Se pide calcular la temperatura final T_F y la masa m que ingresa. Representar en un p-v. Estado final: V_F = 20 m^3 y p_F = 3 bar

Respuestas: masa que ingresa = 41,6 kg ; T_F = 393 K

Ejercicio 4.27

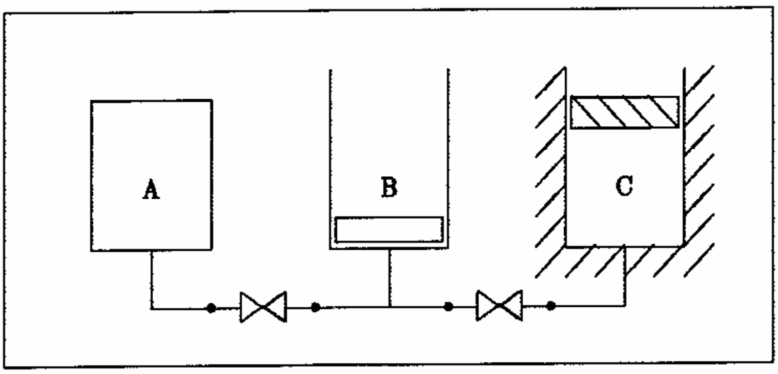
En una instalación como la de la figura, la sustancia reinante es aire, el que se encuentra en las siguientes condiciones:

- En el recipiente A (diatermo), rígido y de 10 m^3 de volumen a una temperatura de 15 °C y una presión de 20 kgr/cm^2;
- En el recipiente C , que está térmicamente aislado, hay 100 kg de aire a 80 *°C y* 10 kgr/cm^2 de presión.
- En el cilindro *B* (diatermo), hay un pistón cargado que puede mantener bajo él una presión de 5 kgr/cm^2 . No hay aire inicialmente en él.

Se abren las dos válvulas. Determinar.

a) El estado final (único).
b) La cantidad de calor intercambiada.
c) El trabajo efectuado en *B* y en *C.*

La temperatura final es de 15 *° C.*



Respuestas:
a) Estado final único: 5 bar ; 56,8 m^3 ; 15 °C .
b)
c) W_A =0 ; W_B =5481 kcal = 22930 kJ ; W_C =-2419 kcal = 10120 kJ;

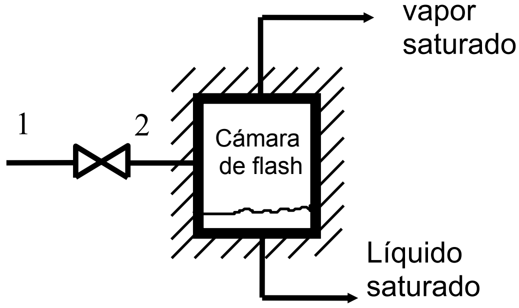
Ejercicio 4.28 - Explicado en página 46

Agua en estado "1" de líquido comprimido, pasa por una válvula y luego entra a una cámara adiabática en donde se separa el líquido del vapor (denominada cámara de "flash").

Calcular la cantidad necesaria de agua en el estado "1" para obtener una producción de vapor de 1000 kg / h

Datos: $p_1 = 16$ MPa , $t_1 = 310$ °C , $p_{CF} = 24$bar

Respuesta: $\dot{m}_L = 4190 \frac{kg}{h}$

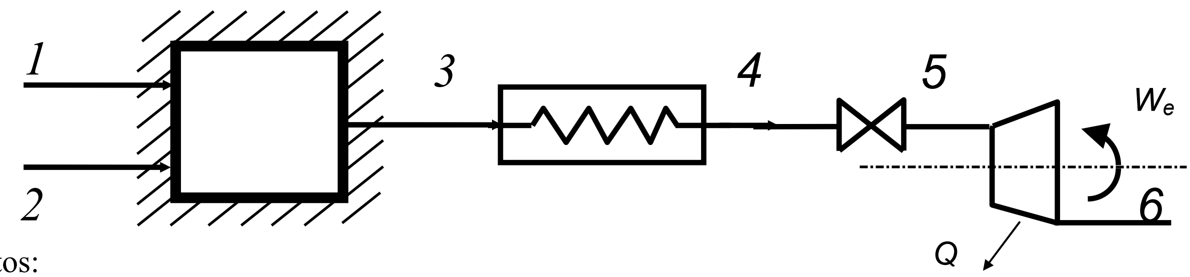


Ejercicio 4.29 - Explicado en página 47

100 kg / h de aire circulan en la instalación siguiente: el aire ingresa a una cámara de mezcla adiabática, en la cual se mezcla con otra corriente de 150 kg / h de aire ,a igual presión y a 227 °C ; la masa total sale de la cámara de mezcla e ingresa a un intercambiador, en el que recibe calor a presión constante, saliendo a 627 °C. Luego se expande, en una válvula hasta una presión de 10 bar y finalmente circula por una turbina en la que pierde 100 kCal / h , descargando a 1 bar y 127 °C. Estado inicial de los 100 kg / h de aire: 15 bar y 27 °C.

Calcular:

a) Temperatura a la salida de la cámara de mezcla t_3.
b) Temperatura a la salida de la válvula t_5.
c) Calor recibido en el intercambiador $Q_{(3-4)}$
d) Trabajo entregado en la turbina $W_{(5-6)}$
e) Representar en un diagrama p-v.



Datos:

$\dot{m}_1 = 100$ kg / h	$\dot{m}_2 = 150$ kg / h
$t_1 = 27$ °C	$p_1 = 15$ bar
$t_2 = 227$ °C	$p_5 = 10$ bar
$t_4 = 627$ °C	$p_6 = 1$ bar
$t_6 = 127$ °C	

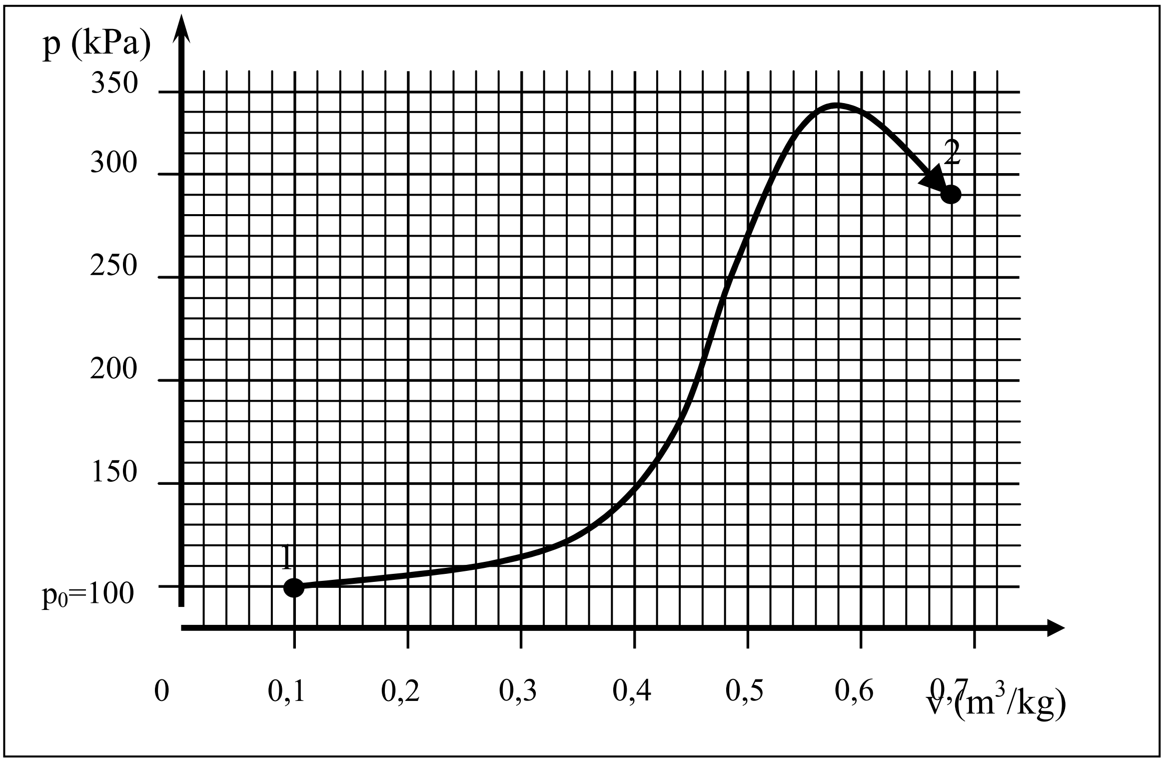
Respuestas:

$t_3 = 147$ °C $\dot{Q}_{\{3-4\}} = 28800$ kCal / h

$t_5 = 627$ °C $\dot{W}_{\{5-6\}} = 29940$ kCal/h = 34,88 kW .

Ejercicio 4.30

En un ensayo de laboratorio se ha realizado una transformación cuasiestática 1 a 2 de una masa hidrógeno (supuesto gas ideal) como sistema cerrado, y la misma se representó en el siguiente diagrama. Estado de referencia, p0 =100 kPa y v0 = 0,05 m3/kg



Determinar para la transformación 1 a 2:

1. El trabajo realizado, gráficamente.
2. El calor.
3. Si la transformación del gas se hubiera dado en un sistema abierto en régimen permanente, ¿cuál sería el trabajo por cada kg de gas, w_f y cuánto el calor ?

Respuestas:

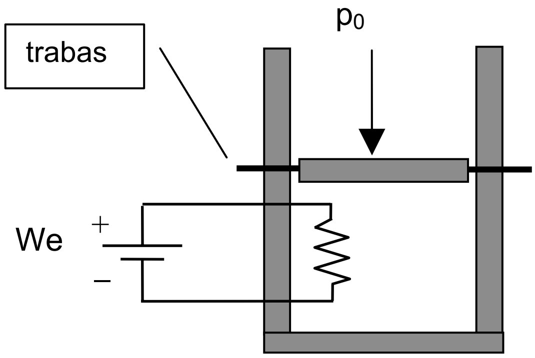
1. W = 94,7 kJ
2. Q = 567,7 kJ
3. w_f = -92,5 kJ/kg; q = 567,7 kJ/kg

Ejercicio 4.31

Un cilindro cerrado por un pistón móvil, ambos adiabáticos, contienen 100 kg de H2O en estado de líquido saturado a p1 = 2000 kPa de presión. Inicialmente el pistón está trabado. Se sueltan las trabas y el vapor se expande hasta llegar a p2 = 500 kPa; esta presión es provocada por el peso del pistón más la presión atmosférica p0 = 101,33 kPa. Durante la expansión se entrega energía al vapor mediante una resistencia eléctrica, cuya temperatura se mantiene constante (la resistencia está en estado de régimen). El vapor en el estado final es "vapor húmedo" con título x = 0,5. La presión del medio ambiente es p_0 = 101,3 kPa

Calcular

1. Trabajo realizado por el vapor, ***W***
2. Trabajo realizado por el vapor y la resistencia eléctrica , $\boldsymbol{W_{VyR}}$
3. Diagrama p v



Respuestas:

W = 7440 kJ

Ejercicio 4.32

Una masa de agua se encuentra dentro de un cilindro cerrado por un pistón que puede deslizarse sin rozamiento, con dos topes, uno de máxima y otro de mínima. El volumen máximo es de $V_{MAX} = 20\ m^3$ y el mínimo es de $V_{MIN} = 1\ m^3$. El pistón tiene un peso $G = 5000\ kg_f$ y su área es de $A = 0,5\ m^2$. La presión del medio es $p_0 = 101,3$ kPa.

Inicialmente el agua está a $t_1 = 20°C$, el líquido ocupa un volumen de $V_L = 0,01\ m^3$ y el vapor $V_V = 0,99\ m^3$.

Desde una fuente externa, se entrega calor al agua hasta que la misma alcanza 473 K. El único intercambio de calor es el de la fuente con el agua.

Se pide:

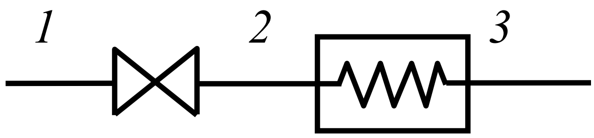
4. Hacer un esquema del dispositivo.
5. Estado inicial del agua: masa, título y presión.
6. El estado final de agua: volumen, presión, temperatura, coeficiente de compresibilidad, y exergía.
7. Dibujar un diagrama p v, indicando los estados del agua y su evolución.
8. El calor y el trabajo transferidos por el agua.

Respuestas

m = 10 kg	Vf = 10,8 m^3	Q = 27627 kJ
x = 0,00171	t_f = 200°C	W = 196
p_1 = 2,337 kPa	p_f = 200 kPa	

Ejercicio 4.33

Un flujo de 50 kg/hora de líquido saturado de refrigerante R134a a 1032 kPa (estado 1) es expandido en una válvula adiabática hasta 101,3 kPa (estado 2). Luego es calentado hasta convertirlo en vapor saturado, a la misma última presión (estado 3).



Determinar:

Temperatura inicial (estado 1)

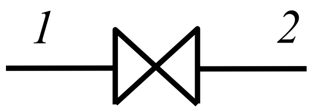
Temperatura a la salida de la válvula (estado 2)

Temperatura a la salida del intercambiador (estado 3)

Cantidad de calor entregada al refrigerante.

Ejercicio 4.34

Una corriente en régimen permanente de vapor saturado de H_2O a 300°C entra a una válvula adiabática, expandiéndose hasta la mitad de la presión absoluta inicial.
Determinar:

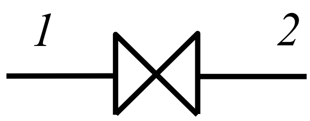


1. Presión, volumen específico y entalpía específica iniciales.
2. Presión, temperatura, volumen específico y entalpía específica finales.

Ejercicio 4.35

Una corriente en régimen permanente de líquido saturado de agua a 300°C entra a una válvula adiabática, expandiéndose hasta la mitad de la presión absoluta inicial.

Determinar:

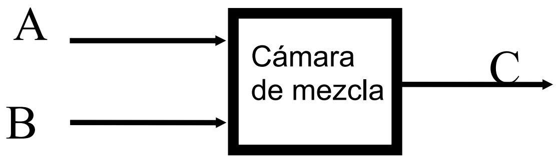


1. Presión, volumen específico y entalpía específica iniciales.
2. Presión, temperatura, volumen específico y entalpía específica finales.

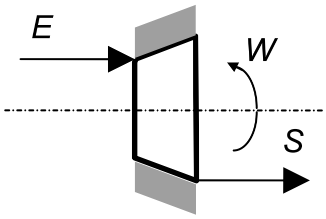
Ejercicio 4.36

A una cámara de mezclas adiabática ingresa una corriente (A) de 25 kg/minuto de vapor saturado a 350 kPa y otra corriente de líquido saturado en estado (B) a determinar. A la salida se obtiene vapor húmedo a la misma temperatura con un título de 0,25 (C)

Determinar la temperatura y presión del líquido entrante.



Ejercicio 4.37



Turbina adiabática

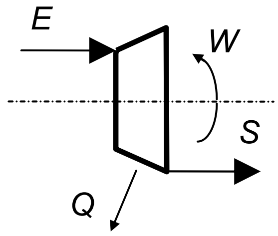
Una turbina adiabática, produce 3000 kW de trabajo en el eje y descarga 11,566 kg/s de vapor saturado a 160°C .

Determinar:

d) El estado del H_2O a la entrada de la turbina, y

e) La potencia producida por la turbina, si con las mismas condiciones de entrada y salida, la misma deja de ser adiabática y pierde 300 kW de calor al medio ambiente.

f) Representar ambas en un p-v



Turbina no adiabática

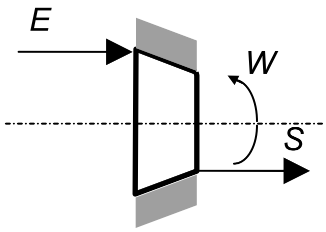
Respuestas

a) t_1 = 330°C p_1 = 5000 kPa

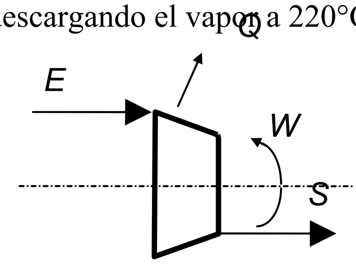
b) $\dot{W}_{NO\ ADI}$ = 270 kW

Ejercicio 4.38

Dos compresores trabajan en régimen estacionario, uno adiabáticamente y el otro isotérmicamente, comprimiendo vapor a razón de 15 kg/minuto cada uno. Ambos aspiran vapor saturado a 100 °C y lo entregan 500 kPa. La temperatura de salida del adiabático es de 320°C y el calor cedido por el compresor es de 33 kW, descargando el vapor a 220°C.



Compresor adiabático



Compresor no adiabático

Calcular para cada uno de los compresores, la potencia necesaria para su accionamiento. Representar en un p-v.

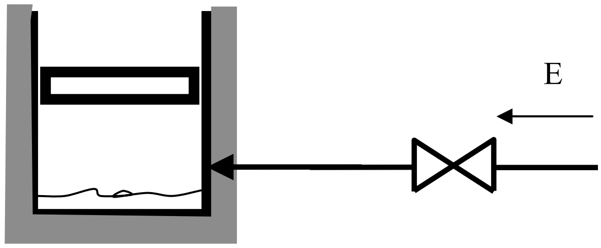
Respuestas

C.adiabático: $\dot{W}_{ADI}$ = -102,4 kW   C. no adiabático: $\dot{W}_{NO\ ADI}$ = -88,5 kW

Ejercicio 4.39

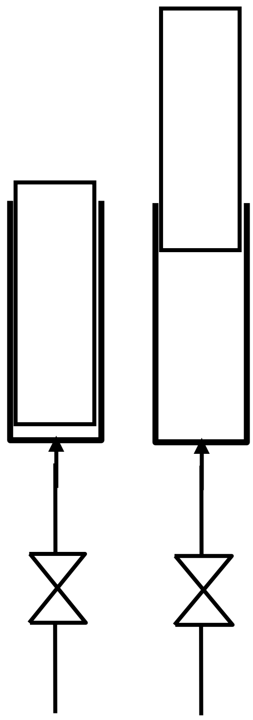
Un cilindro adiabático cerrado por un pistón móvil, adiabático y sin rozamiento, contiene 1 m3 de vapor húmedo a t_I = 121°C; el 3% del volumen está ocupado por líquido saturado. Se inyecta vapor a t_E = 330°C y p_E = 360 kPa hasta obtener dentro del cilindro, vapor saturado.

Determinar la masa de vapor necesaria de inyección (m_E), el volumen final del vapor dentro del cilindro y el trabajo de expansión realizado.



Ejercicio 4.40

Un sistema elevador de automóviles consiste en un cilindro con un pistón que se carga con aire comprimido. El diámetro del cilindro es de 200 mm y su recorrido es de 1700 mm. Desde una línea de aire comprimido cuya presión es de 600 kPa (p. absoluta) y 40 °C se inyecta aire en el cilindro desde su posición inferior (vacío) hasta la superior, levantando el peso de un vehículo de 2000 kg. Luego de la expansión del aire dentro del cilindro, el aire queda a 10°C.



Determinar:

1. La presión absoluta final del aire dentro del cilindro
2. El trabajo realizado por el aire
3. El calor transferido entre al aire y el medio

Ejercicios Resueltos y Explicados

Orientación general para resolver problemas:

1. **Leer el enunciado** y releerlo, interpretando correctamente lo que allí se describe. Gran parte de los errores en la resolución provienen de la mala interpretación del enunciado, incluso ignorar frases con datos, aclaraciones y preguntas.
2. **Elegir un sistema**, al que luego se le aplicará el 1° Principio. Cuál es y qué tipo de sistema es. La fórmula de aplicación del Primer Principio debe estar de acuerdo con el sistema elegido.
3. Si el sistema es cerrado, definir el **estado inicial**, parámetros conocidos y planteo de ecuación de estado cuando se pueda, o búsqueda de datos en tablas o diagramas. Aunque no se puedan determinar a esta altura todos los parámetros del estado, conviene dejar planteado ecuaciones e incógnitas. Lo mismo para el estado final.
4. Si el sistema es abierto en régimen estacionario, conviene construir **una tabla con los parámetros de estado**, a un estado por fila. En este caso, generalmente no es necesario aplicar la ecuación de estado en gases, pues a menos que se lo pida especialmente, el volumen específico deja de ser una variable de interés. Gasto másico , presión, temperatura y entalpía son las variables generalmente involucradas. Consideraciones sencillas que surgen de la observación de la instalación y de indicaciones del enunciado del problema, Completan parte de la tabla. Sin esto no hay camino a la solución.
5. Si el sistema es abierto en régimen transitorio, deben tratarse los estados iniciales (justo antes del comienzo del proceso) y **finales** (estados finales, luego de realizado el proceso), por un lado , y los **estados de entrada y de salida** del sistema, determinando todos los parámetros y relaciones como sea posible hacerlo.
6. **Aplicar el 1° Principio**. Según cómo se haya definido el sistema, se utilizará una u otra fórmula. Es importante respetar los signos de calores y trabajos, y no confundir entalpía con energía interna (son errores comunes). El establecimiento de las expresiones del trabajo merecen una atención particular.
7. **Resolución.** Con lo anterior y relaciones particulares del problema concreto, generalmente se obtiene la solución, resolviendo algún sistema (sencillo) de ecuaciones.

Ejercicios Resueltos

Ejercicio 4.5

Se tiene un sistema rígido y adiabático. Dentro del mismo hay una masa de m =10 kg de aire a una presión absoluta de p =5 bar y T=300 K de temperatura. Por medio de un eje se acciona una hélice y se entrega trabajo al aire, hasta que su temperatura final es de 600 K. Calcular :

1- El trabajo en el eje, W_e . 2- ¿La transformación del aire es cuasiestática?

Solución

Sistema elegido: aire encerrado y el agitador (se desprecia la masa del agitador de modo que se puede despreciar su variación de energía interna)

Estado inicial

p_1 = 5 bar = 500 000 Pa = 500 kPa

m = 10 kg

$T_1 = 300$ K
$R_{aire} = 286{,}84$ J / kg K
$p\,V = m\,R\,T \quad \rightarrow \quad V_1 = 10 \text{ x } 286{,}84 \text{ x } 300 / 500000 \text{ m}^3 = 1{,}72 \text{ m}^3$
Estado final
$V_2 = V_1 = 1.72 \text{ m}^3$
m = 10 kg
$T_2 = 600$ K
$R_{aire} = 286{,}84$ J / kg K = 0,28684 kJ / kg K
$p\,V = m\,R\,T \quad \rightarrow \quad p_2 = 10 \text{ x } 286{,}84 \text{ x } 600 / 1.72 = 1\,000\,000 \text{ Pa} = 1 \text{ MPa}$
Primer Principio
$Q = \Delta E + W$
$\Delta Ep = \Delta Ec = 0 \Rightarrow \Delta E = \Delta U$
$Q = \Delta U + W$
Q = 0 por ser adiabático
$\Delta U = m\,c_V\,\Delta T = 10\ .\ 0{,}719\ .\ (600 - 300) = 2157$ kJ
$W = -\Delta U = -2157$ kJ
Nota: sobre el proceso de agitación, véanse los comentarios hechos en el Ejercicio 4.siguiente, N°10.

Ejercicio 4.6

Un cilindro rígido y adiabático, contiene un pistón deslizante también adiabático. En el recinto cerrado se encuentran 10 kg de aire a 5 bar y 27 °C.
Un eje ,que acciona una hélice dentro del recinto, aporta trabajo al aire produciéndose un ascenso del pistón.
Calcular el trabajo en el eje, W_e , para elevar la temperatura hasta 600 K. ¿La transformación del aire es cuasiestática? Compare los resultados de este Ejercicio 4.y el anterior.
Solución.

Vamos a tomar al aire como sistema, y vamos a incluir también dentro del mismo, a la hélice. De este modo, podremos ver con facilidad, cuáles son las energías que intercambian el medio y el sistema: entra trabajo a través del eje, y sale trabajo debido a la expansión del pistón.

No hay calor ya que las paredes son adiabáticas. El sistema es cerrado.

Despreciamos la masa de la hélice, para no tener en cuenta la capacidad calorífica de la misma, y así no interviene en los cálculos de variaciones de energía del sistema.
Para calcular el trabajo en el eje, se aplicará al sistema:

- la ecuación de estado en el estado inicial,
- la ecuación de estado en el estado final, y
- el primer principio de la termodinámica

1. **La ecuación de estado en el estado inicial:**
   $T_i = 27$ °C = 300 K $\quad p_i = 5$ bar = 500 000 Pa $\quad$ m= 10 kg
   Ec de estado: $pV = mRT \ \therefore\ V_i = \dfrac{m\,R\,T_i}{p_i} = \dfrac{10\ \ 287\ \ 300}{500000} = 1{,}72 \text{ m}^3$
2. **La ecuación de estado en el estado final:**
   $T_f = 600$ K $\quad p_f = 5$ bar = 500 000 Pa $\quad$ m= 10 kg
   Ec de estado: $pV=mRT \ \therefore\ V_f = \dfrac{m\,R\,T_f}{p_f} = \dfrac{10\ \ 287\ \ 600}{50000} = 3{,}44 \text{ m}^3$

El primer principio de la termodinámica para un sistema cerrado:
$Q = \Delta E + W$
$Q = 0$ por ser adiabático.
$\Delta E = \Delta U + \Delta E_C + \Delta E_P = \Delta U + 0 + 0$ pues no hay cambios de altura ni velocidad entre estados inicial y final del sistema.
$\Delta U = m\ c_v\ (T_f - T_i) = 2157$ kJ, por ser un gas ideal (no importa que la transformación no haya sido hecha a volumen constante).
El trabajo total del sistema es:

$W = W_{eje} + W_{exp} = W_{eje} + p\ (V_f - V_i)$,
donde $p = p_f = p_i = 5$ bar
El trabajo del pistón es el mismo visto desde el sistema o desde el medio.
$W_{exp} = p\ (V_f - V_i) = 500000\ (3{,}44 - 1{,}72) = 861$ kJ
$\mathbf{W_{eje} = W - W_{exp} = -\Delta U - W_{exp} = -2157 - 861 = -3018}$ **kJ**

Durante la transformación del aire, por acción de las paletas, no se puede decir que en todo punto (o todas las moléculas) y para cada instante, hubo la misma presión y temperatura, ni que durante la misma, se cumplió la ecuación de estado (de equilibrio) en todo punto o molécula. La evolución del aire, no fue cuasiestática.

La transformación no es cuasiestática, pues la agitación producida por la hélice, implica la existencia de fuerzas viscosas y éstas hacen, que punto a punto, no se verifique el equilibrio, durante cada instante de la transformación. Si no hubiera viscosidad, el trabajo no se transformaría en energía interna; habría una energía cinética del fluido que no cesaría. Si no hubiera ni viscosidad ni energía cinética en el fluido, aunque girara la hélice, no habría trabajo.

La agitación como forma de entregar trabajo, produce el mismo efecto final en el gas, que si se le hubiera entregado la misma cantidad de energía pero en forma de calor.

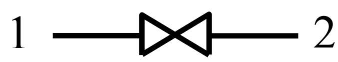
En el problema anterior, el trabajo en el eje , fue menor, porque no hubo trabajo de expansión.

Ejercicio 4.10

Una corriente de oxígeno gaseoso, en régimen estacionario, pasa a través de una válvula adiabática, reduciendo su presión desde 2 MPa hasta 0.1013 MPa, y siendo la temperatura de entrada de 300 K.

Calcular la temperatura de salida, considerando al oxígeno como:

a) gas ideal
b) gas real (ver tablas)



Solución:

Elegimos como sistema (o volumen de control) a la corriente de oxígeno, que entra en 1 y sale en 2. Es régimen estacionario, es decir que nada varía a lo largo del tiempo, manteniéndose todos los parámetros del gas, en los mismos valores. La masa de gas, que circula por unidad de tiempo, es constante. En virtud de esto podemos aplicar la ecuación del Primer Principio de la Termodinámica para sistemas abiertos (pues entra y sale masa) en régimen estacionario:

$$\dot{Q} = \dot{W}_{VC} + \dot{m}_{sal}\left(h + \frac{\overline{V}^2}{2} + g\,z\right)_{sal} - \dot{m}_{ent}\left(h + \frac{\overline{V}^2}{2} + g\,z\right)_{ent}$$

Todas las válvulas con las que trabajemos serán adiabáticas (salvo indicación en contrario) y entonces $Q = 0$. No hay trabajo entre medio y sistema, $W = 0$. Las masas de entrada y salida (caudales másicos) son iguales y constantes. No tenemos en cuenta variaciones de energía potencial. Despreciamos las variaciones de energía cinética, pues las cañerías se dimensionan suficientemente grandes, para que las velocidades sean bajas y con bajas pérdidas por fricción. Con todo esto resulta:

$$0 = \dot{m}\ (h_2 - h_1)$$

o sea: $\boxed{h_2 = h_1}$

En una válvula adiabática resultará siempre así. No importa que sepamos que en una válvula, en la que se reduce la presión, haya en su interior, altas velocidades, torbellinos, fricción etc..

a) Cuando se trata de un gas ideal, dado que $h = c_p\, t$ concluimos que:

$\boxed{t_2 = t_1}$ gas ideal

$t_2 = 300\ °C$

Cuando el gas es real, la temperatura podrá aumentar, disminuir o mantenerse igual. Cuanto más se asemeje a un gas ideal en los estados considerados,, mayor será la igualdad entre las temperaturas. Para resolver este caso deberemos recurrir a las tablas de propiedades termodinámicas del oxígeno .Siendo las entalpías de entrada y salida iguales, para conocer la de salida, debo

b) buscar el valor de la de entrada con los parámetros de entrada conocidos: T = 300 °C y p = 2 MPa

$T_1 = 300\ °C$ y $p_1 = 2\ MPa \rightarrow h_1 = 268{,}15\ kJ / kg$

por lo tanto: $h_2 = h_1 = 268{,}15\ kJ / kg$

con este valor de entalpía h_2 busco en la tabla a la presión de **101,3 kPa** qué temperatura le corresponde. No hay un valor exacto, entonces se anotan los dos entre los que se encuentra:

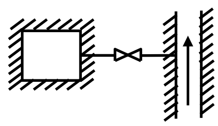
$p_2 = 101{,}3\ kPa$	$T = 280\ °C$	$\rightarrow$	$h = 254{,}391\ kJ / kg$
	$T = 300\ °C$	$\rightarrow$	$h = 272{,}763\ kJ / kg$

siendo la entalpía de salida $h_2 = 268{,}15\ kJ / kg$, interpolando, resulta $T_2 = 295\ °C$

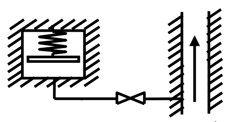
Ejercicio 4. 11

En este problema se comparan tres diferentes sistemas de ingreso de vapor a un recipiente. En todos los casos el recipiente es adiabático. En los tres casos, el vapor que fluye por la cañería está a una presión de 1000 kPa y una temperatura de 270 °C , y el recipiente está inicialmente vacío. Determinar la temperatura final del vapor en cada uno de los siguientes casos:

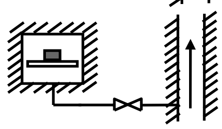
a) Se abre la válvula hasta que la presión llega a 10 bar.



b) El pistón está retenido por un resorte que ejerce una presión proporcional al desplazamiento del pistón. La presión final llega a 10 bar



c) El pistón tiene una carga que provoca una presión constante de 10 bar.

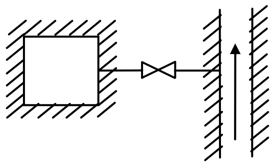


Solución:
El estado del vapor de la cañería es sobrecalentado, y esto se determina comparando la presión de saturación a 270°C (que es de 55,058 bar) con los 10 bar.

De tablas de sobrecalentado, se lee:

$v_1 = 0,24297\ m^3 / kg$
$h_1 = 2987,22\ kJ / kg$
$s_1 = 7,00879\ kJ / kg\ K$

CASO A



Para aplicar el primer principio, se toma como sistema al recipiente, que inicialmente está vacío, y que en el estado final contiene vapor a la presión de la cañería 1000 kPa $p_{FINAL} = P_{CAÑERÍA}$ . . Las temperaturas no son iguales porque no se ha llegado al equilibrio térmico.

Primer principio (sistema abierto en régimen transitorio):

$Q = U_F - U_I + H_S - H_E + W$; sólo hay energía interna en el recipiente en el estado final, y entalpía en la entrada; el resto es cero:

$0 = U_F - 0 + 0 - H_E + 0 = U_F - H_E$

$0 = u_F - h_E = u_F - h_1 \rightarrow u_F = h_1 = 2987.22\ kJ/ kg$

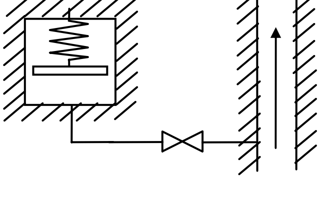
O sea que para determinar el estado final debemos encontrar los valores de los parámetros (por ejemplo la temperatura), que satisfagan: $p_F = 1000\ kPa$ y $u_F = 2987.22\ kJ / kg$. Buscando en las tablas encontramos valores cercanos entre 410 y 420°C, e interpolando obtenemos:

p (kPa)	t (°C)	u (kJ/kg)
1000	410	2974.35
1000	417.8	2987.22
1000	420	2990.82

$t_F = 418°C$

Si no disponemos de tablas con energía interna, debemos cambiar la condición, en vez de $u_F = 2987.22\ kJ / kg$, debemos buscar qué estado cumple la condición $h_F - p_F . v_F = 2987,22$ kJ/kg, y debe resolverse por tanteos, usando datos de la columna de 1000 kPa. Se prueba a una temperatura cualquiera, por ejemplo a 20°C, se calcula la u correspondiente y se compara el valor calculado con 2987,22 . Como a presión constante la u crece con la temperatura, se aumenta la temperatura de prueba para hacer aumentar u y viceversa.

CASO B



El resorte está relajado antes de entrar el vapor, y se deforma al entrar, adquiriendo una energía potencial elástica. Tomamos al resorte como parte del sistema. entonces:
fuerza en el resorte: $F = k . x$
energía almacenada en el resorte: $E_{RES} = ½\ k . x^2$
Volumen = Área . recorrido = A . x

$p = F / A = k . x / A$
$p . V = k .x^2$

$E_{RES} = ½\ k\ .\ x = ½\ p_F\ V$

y para la unidad de masa queda: $e_{RES} = ½\ p_F\ v$

aplicando el primer principio:

$$Q = U_F - U_I + H_S - H_E + W + \Delta E_{RES}$$

$$0 = U_F - 0 + 0 - H_E + 0 + \Delta E_{RES} = U_F - H_E + E_{RES}$$

para la unidad de masa:

$$0 = u_F - h_E + e_{RES} = u_F - h_E + ½\ p_F\ v_F$$

$$0 = u_F - h_E + ½\ p_F\ v_F$$

reemplazando con la relación entre u y h : h = u+ p v en el estado final:

$$0 = h_F - ½\ p_F\ v_F - h_E$$

Si dispusiéramos de relaciones algebraicas sencillas entre las variables h_F y v_F , sustituiríamos en la anterior expresión y obtendríamos la solución. El problema es que estas relaciones están dadas numéricamente en las tablas de vapor. Debemos buscar un modo de encontrar el estado del vapor que cumpla la anterior expresión algebraica. Una manera de hacerlo es por tanteo: tomar un estado cualquiera de la tabla (h_F ,p_F y v_F) y probar si cumple $0 = h_F - ½\ p_F\ v_F - h_E$, si no verifica, probar con otro, y así hasta que verifique.

Formamos la función error $\theta = h_F - ½\ p_F\ v_F - h_E$ que debe hacerse cero en el estado buscado.

$$\theta = h_F - ½\ 1000\ v_F - 2987.22$$

tanteando y con ayuda de tablas:

para 400°C : $\theta = 3264{,}40 - \frac{1}{2}1000\ \ 0{,}30649 - 2987{,}22 = 123 \neq 0$

para 350°C : $\theta = 3158{,}54 - \frac{1}{2}1000\ \ 0{,}28243 - 2987{,}22 = 30{,}1 \neq 0$

para 330°C : $\theta = 3116{,}13 - \frac{1}{2}1000\ \ 0{,}27271 - 2987{,}22 = -7{,}445 \neq 0$

cambió el signo de θ

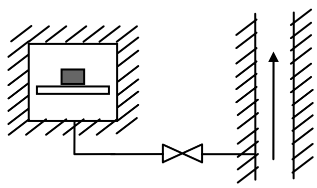
para 340°C : $\theta = 3137{,}35 - \frac{1}{2}1000\ \ 0{,}27258 - 2987{,}22 = 11{,}34 \neq 0$

interpolando con los últimos dos valores:

$t_F = 334°C \quad \theta = 3124{,}62 - \frac{1}{2}1000\ \ 0{,}27466 - 2987{,}22 = 0$

CASO C

La energía potencial gravitatoria de la pesa es: Ep = F . x (peso por altura), sabiendo que el peso es igual a la presión por el área del pistón y que el recorrido por el área es el volumen: Ep = p V ; por el primer principio:



$$Q = U_F - U_I + H_S - H_E + W + \Delta E_P$$

$$0 = U_F - 0 + 0 - H_E + 0 + \Delta E_P$$

$$0 = u_F - h_E + p_F\ v_F$$

$$u = h - p\ v$$

$$0 = h_F - h_E$$

o sea que el estado del vapor de la cañería, no cambia al entrar de esta manera el recinto.

Ejercicio 4.13

Orientación: Conviene tomar como sistema a las masas de aire encerradas en ambos recintos, en conjunto. El estado inicial, está constituido por los parámetros de dos masas. El estado final de ambas masas es único por ser equilibrio termodinámico. En el planteo del primer principio, el calor es cero por ser adiabático, y el trabajo será el dado por el pistón: $W_{pistón} = p\,(V_{final\ total} - V_{inicial\ total})$ que es el trabajo de barrido

---

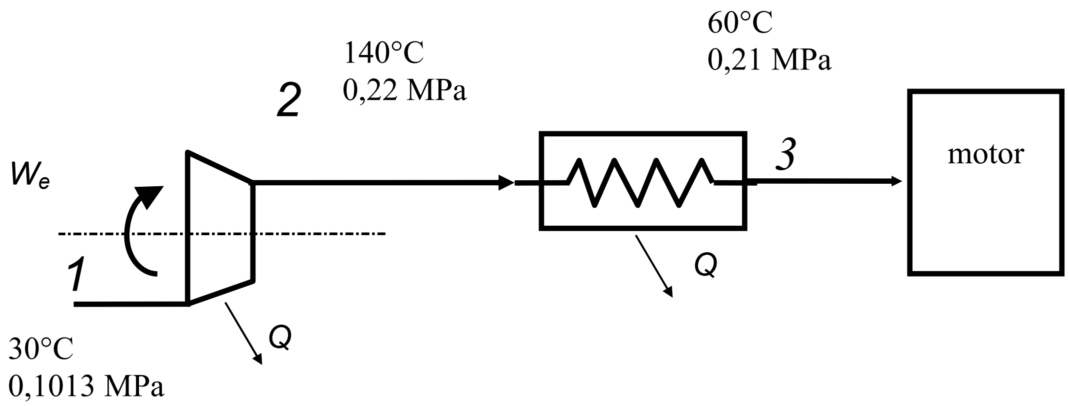
Ejercicio 4.16

Un recipiente rígido, posee un pistón , que inicialmente está apoyado simplemente sobre unas clavijas...

Orientación: En la resistencia eléctrica, se recibe energía en forma de trabajo eléctrico y entrega la misma energía en forma de calor, sin acumulación de energía .
En la resistencia eléctrica, normalmente se desprecia su masa, y por lo tanto también su variación de energía interna. Otra manera de decir que la resistencia no interviene en los cálculos de variación de energía interna, es diciendo que su temperatura se mantiene constante, y es equivalente a decir que su masa es despreciable.

Ejercicio 4.20

El motor de un automóvil, entrega una potencia máxima que es proporcional a la masa de aire que aspira. Para aumentarla, se recurre a comprimir el aire de entrada hasta 0,22 MPa , para que ocupe menos volumen. Durante la compresión la temperatura aumenta hasta 140°C. Luego se lo enfría hasta 60°C, con la misma finalidad, y perdiendo 0,01 MPa por fricción en este último proceso.
Calcular el aumento de potencia máxima del motor con a) compresor solamente, y b) con compresor y enfriador, respecto del de aspiración natural. Las condiciones atmosféricas del aire de aspiración son: 0,1013 MPa y 30°C.



Solución:

El motor de un automóvil, aspira aire debido al desplazamiento de sus pistones, o sea que para una determinada velocidad de giro, aspira un volumen por unidad de tiempo constante. Así, a masa de aire que ingresa, es proporcional a la densidad del aire. La relación que buscamos es un cociente de densidades (δ) de aire.

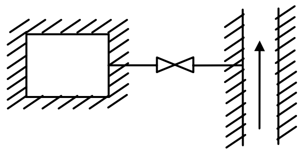
ecuación de estado de los gases ideales $p\,v = R\,T$

volumen específico $v = \dfrac{R\,T}{p}$

Ejercicio 4.22

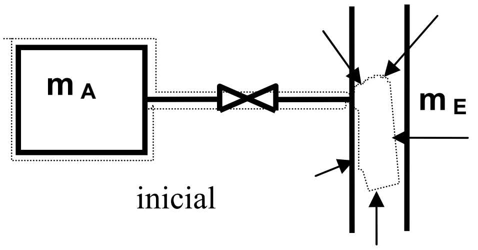
En una cañería circula aire, a una presión de 20 kg_f/cm^2 y a una temperatura de 57 °C, parámetros que se mantienen constantes. Se comunica la cañería con un tanque rígido y adiabático de 10 m^3 de capacidad que inicialmente contiene aire a una presión p_1=1 bar y una temperatura t_1=27 °C. Calcular para el equilibrio mecánico:

a) Masa de aire que ingresa al tanque;
b) Temperatura final del aire en el tanque.

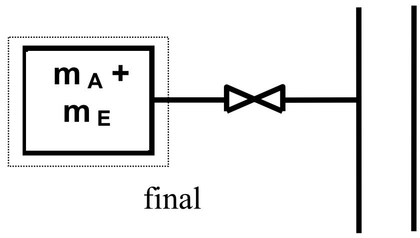


Solución:

Puede ser resuelto de dos modos distintos:
Considerando como sistema **cerrado** a la masa de aire que inicialmente se encuentra dentro del tanque más la masa de aire que entra durante el proceso y que finalmente quedará adentro.

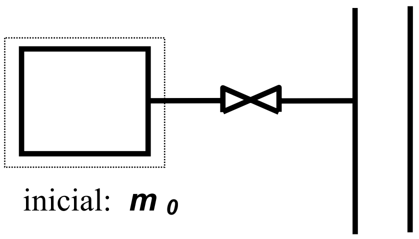


inicial

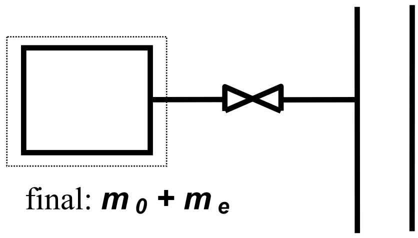


final

Como **sistema abierto**, tomando la zona, región o volumen de control, en donde se encuentra la masa de aire (variable) que está dentro del tanque. Inicialmente es $\mathbf{m_0}$ y finalmente en el tanque la masa es $\mathbf{m_0 + m_e}$



inicial: m_0



final: $m_0 + m_e$

I . Como sistema cerrado

- **Estado inicial del sistema:**

p_E = 20 kg / cm^2 $\approx$ 20 bar = 2 MPa
m_E = ?
T_E = 57 + 273 = 330 K
V_E = ?
ec. de estado: $p_E\ \mathbf{V_E} = \mathbf{m_E}\ R\ T_E$ **(1)**
se desconoce la masa de entrada y el volumen que esa masa ocupa en la cañería antes de entrar.

p_A = 1 kg / cm^2 $\approx$ 1 bar = 0,1 MPa
T_A = 27 + 273 = 300 K
V_A = 10 m^3

ec. de estado: $p_A \ V_A = m_A R T_A$
$m_A = p_A \ V_A / R T_A = 11{,}4$ kg

- **Estado final del sistema**

  $p_F = 20$ kg / cm$^2 \approx 20$ bar = 2 MPa
  $\mathbf{m_F} = m_A + \mathbf{m_B}$
  $\mathbf{T_F = \ ?}$
  $V_F = 10$ m^3

  ec. de estado: $p_F \ V_F = \mathbf{m_F} R \mathbf{T_F}$
  (2)

- **Primer principio de la termodinámica**
  sistema cerrado despreciando energías cinéticas y potenciales:

$$Q = W + \Delta U$$

por ser adiabático: $Q = 0 \ \rightarrow$ $\mathbf{0 = W + \Delta U}$
(3)
el trabajo necesario para introducir la masa $\mathbf{m_A}$ es $\mathbf{W} = -p_E \ \mathbf{V_E}$
(4)
$\Delta U = U_F - U_I = m_F \ c_V \ T_F - m_A \ c_V \ T_A - m_E \ c_V \ T_E$
$\mathbf{\Delta U} = U_F - U_I = c_V \ (m_A (\mathbf{T_F} - T_A) + \mathbf{m_E} (T_F - T_E))$
(5)
Es un sistema de 5 ecuaciones (1 a 5) con cinco incógnitas: $\mathbf{m_E}$, $\mathbf{T_F}$, $\mathbf{V_E}$, $\mathbf{\Delta U}$ y $\mathbf{W}$
$\mathbf{m_E = 144}$ **kg** $\mathbf{T_F = 439}$ **K = 166°C**

II Como sistema abierto. Es un sistema abierto en régimen transitorio
Estado inicial:
$p_I = 1$ kg / cm$^2 \approx 1$ bar = 0,1 MPa
$T_I = 27 + 273 = 300$ K
$V_I = 10$ m^3
ec. de estado: $p_I V_I = m_I R T_I$
$m_I = p_I \ V_I / R T_I = 11{,}4$ kg

Estado final del sistema

$p_F = 20$ kg / cm$^2 \approx 20$ bar = 2 MPa
$\mathbf{m_F} = m_I + \mathbf{m_E}$ **(1)**
$\mathbf{T_F = \ ?}$
$V_F = 10$ m^3
ec. de estado: $p_F \ V_F = \mathbf{m_F} R \mathbf{T_F}$ **(2)**
Primer Principio

$$\mathbf{Q = \Delta E_{VC} + W + m_{sal} \left(h + \frac{\overline{V}^2}{2} + g\,z \right)_{sal} - m_{ent} \left(h + \frac{\overline{V}^2}{2} + g\,z \right)_{ent}}$$

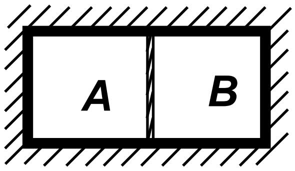
El sistema es adiabático, no hay trabajo entre medio y sistema (el trabajo antes considerado **p∆v** es el trabajo necesario para introducir la masa al sistema, y ya está tenido en cuenta dentro de la entalpía), no hay masa de salida y se desprecian las energías cinéticas y potenciales. La variación de energía del volumen de control está dado por la variación de energía interna:

$$0 = \Delta U_{VC} \ - m_E \ h_E$$
$$0 = m_F \, u_F - m_I \ u_I - m_E \, h_E$$

por ser gases ideales: $0 = \mathbf{m_F}\, c_V\, \mathbf{T_F} - m_I\, c_V\, T_I - \mathbf{m_E}\, c_P\, T_E$ **(3)**

Es un sistema de 3 ecuaciones con 3 incógnitas: $\mathbf{m_F}$, $\mathbf{T_F}$ y $\mathbf{m_E}$ que resolviendo, da el mismo resultado que en el caso anterior.

Ejercicio 4.23



Un tanque de 10 m^3 de capacidad, con paredes adiabáticas, está dividido por un tabique en dos partes "A" y "B". En la primera hay 4 m^3 de vapor de agua a $p_A = 10{,}5$ bar y $t_A = 190°C$; en la otra hay 6 m^3 vapor a $p_B = 48$ bar y $t_B = 330°C$. Se quita la división y los vapores se mezclan completamente.Determinar el estado final de equilibrio.

Solución:

Se mezclan adiabáticamente dos masas de vapor, conservando el volumen total. Como no hay trabajo ni calor, el primer principio determina:

$\Delta U = 0$

$U_M - (U_A + U_B) = 0$

Para resolverlo, determinaremos mediante tablas (o diagramas) los parámetros de los estados iniciales, y sus masas. En el estado final obtendremos una masa única igual a la suma de las dos masas, un volumen conocido y la energía interna U_M que resulte de la anterior expresión. El volumen específico final se obtiene del cociente entre el volumen total y la masa total.

	V	m = V/v	v	p	t	u	U
	m^3	kg	m^3/kg	kPa	°C	kJ/kg	kJ
A	dato 4	V_A/v_A = 21.058	de tabla 0.18995	dato 1050	dato 190	de tabla 2599.2	$u_A . m_A$ = 54734
B	dato 6	V_B/v_B = 115.9	de tabla 0.0518	dato 4800	dato 330	de tabla 2773.3	$u_B . m_B$ = 321422

M	$V_A + V_B$ = 10	$m_A + m_B$ = 136.96	V_M / m_M = 0.07302			U_M / m_M = 2746.6	$U_A + U_B$ = 376156

Del estado de mezcla se ha determinado su volumen específico y su energía interna específica. Con estos parámetros debemos buscar en la tabla de vapor un estado que satisfaga ambas condiciones simultáneamente**.**

Tenemos dos elementos adicionales para facilitar la búsqueda:

a) Sólo si se conoce la variable entropía: La mezcla es una transformación irreversible, por lo que aumentará la entropía y deberá cumplirse: $s_F > (s_A\, m_A + s_B\, m_B)/(m_A + m_B) = 6{,}42$, que puede calcularse rápidamente.

b) El estado final de mezcla debe encontrarse en el diagrama T-s, en una zona intermedia entre los estados iniciales, más cerca del estado de mayor masa. Este concepto sirve para orientar, pero no para definir exactamente la ubicación del punto.

Se encuentra el siguiente estado:

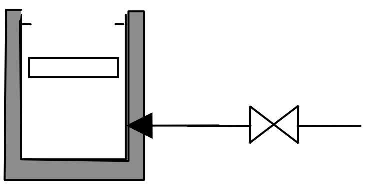
	v	p	t	u
	m^3/kg	kPa	°C	kJ/kg
M	0,07306	3300	300	2744,4

El estado hallado difiere muy poco respecto al calculado: 0,06% en el volumen específico y 0,08% en la energía interna específica, y se toma como estado final de mezcla.

Ejercicio 4.26

Dentro de un cilindro adiabático cerrado por un pistón adiabático se encuentra una masa de aire a una presión de 1 bar y a una temperatura de 27°C, ocupando un volumen de 10 m^3.

Se abre una válvula y se introduce una masa m de aire a una presión p_1=4 bar y una temperatura de 50 °C . Al introducir esta masa ,se eleva el pistón, y éste choca con unos topes, siendo el volumen final $V_F = 20\ m^3$ y $p_F = 3$ bar. Al instante que esto sucede, se cierra la válvula.



Solución:

Se pide calcular la temperatura final T_F y la masa **m** que ingresa.

Luego de la lectura del enunciado del problema, sabremos que al cilindro ingresa una masa m_e desconocida, a través de una cañería y una válvula, que mezclándose con el aire contenido inicialmente, hace subir el pistón, produciendo un trabajo, hasta que se llega a los topes.

El trabajo de ascenso del pistón, se realiza a presión constante de 1 bar ya que esta es la presión que impone este dispositivo, mientras no llegue a los topes. Luego de alcanzar el punto superior, la presión aumenta hasta 3 bar, pero no se realiza trabajo adicional ,porque no hay desplazamiento del émbolo durante esta etapa.

Entre la cañería y el cilindro hay una válvula, que además de abrirse al inicio y cerrarse al final del proceso, establece la necesaria caída de presión entre los 4 y los 3 bar, durante la entrada de masa. Si esta caída de presión no se diera en la válvula, la misma se daría en la zona de entrada al cilindro, y no cambia nada en el planteo del problema.

Se seguirán para la resolución, los siguientes pasos:

- Elección del sistema
- Planteo del estado inicial
- Planteo del estado final
- Aplicación del primer principio
- Solución numérica

1. Elección del sistema: Se elige la zona, región o volumen de control: sección de entrada a la válvula, válvula y cilindro . Inicialmente la masa de control son 10 kg de aire y finalmente 10 kg + m_e. Es un sistema abierto que evoluciona en "régimen no permanente" o "régimen transitorio".
2. Planteo del estado inicial del sistema
   $p_i = 1 \text{ bar} \cong 0{,}1 \text{ MPa}$
   $t_i = 27\ °C \quad T_i = 300\ K$
   $V_i = 10\ m^3$
   Ec. de estado del gas ideal aire: $m_i = \dfrac{p_i\, V_i}{R_{aire}\, T_i} = \dfrac{100000\ \ 10}{287\ \ 300} = 11{,}6\ kg$
3. Planteo del estado final del sistema
   $p_f = 3 \text{ bar} \cong 0{,}3 \text{ MPa}$
   $T_f = ?$
   $V_f = 20\ m^3$
   masa final = $m_i + m_e = ?$
   Ec. de estado del gas ideal aire: $p_f\, V_f = (m_i + m_e)\, R_{aire}\, T_f$

Aplicación del primer principio. Usamos la expresión general para un sistema abierto:

$$Q_{VC} = \Delta E_{VC} + W_{VC} + m_{sal}\left(h + \frac{\overline{V}^2}{2} + g\,z\right)_{sal} - m_{ent}\left(h + \frac{\overline{V}^2}{2} + g\,z\right)_{ent}$$

En este caso el calor es cero por ser adiabático: $Q_{VC} = 0$; al no haber masa de salida: $m_s = 0$; también son nulas las energías cinéticas y potenciales de la masa de entrada. Al no haber cambios de energía potencial ni cinética del volumen de control, resulta $\Delta E_{VC} = \Delta U_{VC}$ Con todo esto, la expresión del primer principio queda:

$$0 = \Delta U_{VC} + W_{VC} - m_{ent}\, h_{ent}$$

la variación de energía interna del sistema:

$$\Delta U_{VC} = U_f - U_i = m_f\ c_v\, T_f - m_i\ c_v\, T_i = (m_e + m_i)\, c_v\, T_f - m_i\ c_v\, T_i$$

la entalpía de entrada (por gas ideal):

$$m_e\, h_e = m_e\, c_p\, T_e$$

y el trabajo:

$$W_{VC} = p_i\,(V_f - V_i)$$

Con todo esto queda:

$$0 = (m_e + m_i)\ c_v\, T_f - m_i\ c_v\, T_i + p_i\,(V_f - V_i) - m_e\, c_p\, T_e$$

y reemplazando con la ecuación de estado en el estado final: $T_f = \dfrac{p_f\, V_f}{(m_i + m_e)\, R_{aire}}$

4. finalmente:

$$0 = (m_e + m_i)\ c_v\ \frac{p_f\, V_f}{(m_i + m_e)\, R_{aire}} - m_i\ c_v\, T_i + p_i\,(V_f - V_i) - m_e\, c_p\, T_e$$

$$0 = c_v\ \frac{p_f\, V_f}{R_{aire}} - m_i\ c_v\, T_i + p_i\,(V_f - V_i) - m_e\, c_v\, T_e$$

y despejando m_e: $$m_e = \frac{c_v\ \dfrac{p_f\, V_f}{R_{aire}} - m_i\ c_v\, T_i + p_i\,(V_f - V_i)}{c_p\, T_e}$$

5. **Resolución numérica**:

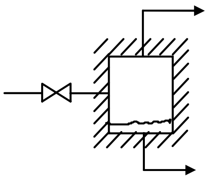
$$m_e = \frac{719 \ x \dfrac{300000 \ x \ 20}{287} - 10 \ x \ 719 \ x \ 300 + 100000 \ x \ (20 - 10)}{1006 \ x \ 323} = 41{,}6 \text{ kg}$$

$$T_f = \frac{p_f \, V_f}{(m_i + m_e) \, R_{aire}} = \frac{300000 \ x \ 20}{(11{,}6 + 41{,}6) \ 287} = 393 \text{ K} = 119°\text{C}$$

Ejercicio 4.28

Agua en estado "1" de líquido comprimido, pasa por una válvula y luego entra a una cámara adiabática en donde se separa el líquido del vapor (denominada cámara de "flash").
Calcular la cantidad necesaria de agua en el estado "1" para obtener una producción de vapor de 1000 kg / h .
Datos:

$p_1 = 16$ MPa
$t_1 = 310$ °C
$p_{CF} = 24$ bar



Solución:

El líquido subenfriado(o comprimido), al pasar por la válvula disminuye su presión y de modo que se conserva la entalpía a la salida, pues consideramos a la válvula adiabática. Resulta un estado de vapor húmedo, que entrando a una cámara de dimensiones suficientemente grandes, por acción de la gravedad, el líquido se colecta en la parte inferior y el vapor sale por la superior. Los cambios de energía potencial que esto provoca son despreciables, y siendo la cámara adiabática, no hay ningún intercambio de energía. Sólo se separa el líquido del vapor saturado (estados 2' y 2'') .
estado de entrada (1).
Mediante tablas:

$p_1 = 16000$ kPa (le corresponde una temperatura de saturación de 347,3°C)

$t_1 = 310$°C ($310 < 347{,}3 \Rightarrow$ líquido subenfriado)

$v_1 = 0{,}001417 \ m^3 / kg$

$h_1 = 1393{,}2$ kJ / kg

$s_1 = 3{,}32038$ kJ / kg K

Del primer principio para sistemas abiertos en régimen estacionario, despreciando energías cinéticas y potenciales:

$$Q = \Delta H + W$$

$$0 = \Delta H + 0 = m\,(h_2 - h_1) \Rightarrow h_2 = h_1 = 1393{,}2 \text{ kJ /kg}$$

De tablas, para 2400 kPa:

temperatura de saturación: $t_2 = 221.78°C \approx 222°C$

líquido saturado $h_{2'} = 951{,}93$ kJ/kg

vapor saturado $h_{2''} = 2800{,}41$ kJ/kg

resulta: $h_2 = x_2 \ h_{2''} + (1 - x_2)\, h_{2'}$
y despejando el título x se obtiene:

$$x_2 = \frac{(h_2 - h_{2'})}{(h_{2''} - h_{2'})} = \frac{(1393{,}2 - 951{,}93)}{(2800{,}41 - 951{,}93)} = 0{,}2387$$

$$m_T = \frac{m_V}{x_2} = \frac{1000}{0{,}2387} = 4190\,\frac{kg}{h} \qquad m_L = m_T - m_V = 3190\,\frac{kg}{h}$$

Ejercicio 4.29

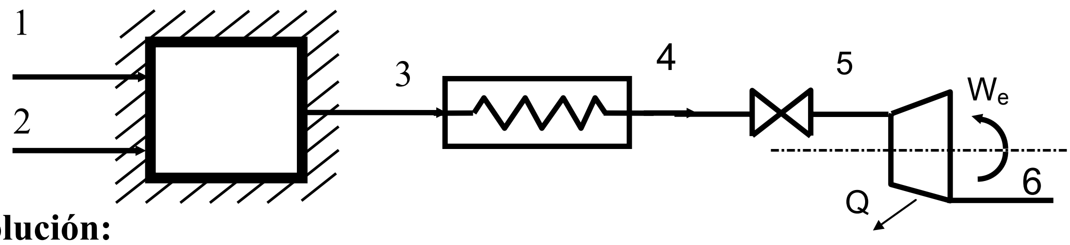
100 kg / h de aire circulan en la instalación siguiente: el aire ingresa a una cámara de mezcla adiabática en la cual se mezcla con otra corriente de 150 kg / h de aire a igual presión y a 227 °C ; la masa total sale de la cámara de mezcla e ingresa a un intercambiador, en el que recibe calor a presión constante, saliendo a 627 °C. Luego se expande en una válvula , hasta una presión de 10 bar y finalmente circula por una turbina en la que pierde 100 kCal / h, descargando a 1 bar y 127 °C. Estado inicial de los 100 kg / h de aire: 15 bar y 27 °C.

Calcular:

a) Temperatura de salida de la c. de mezcla t_3.
b) Temperatura de salida de la válvula t_5.
c) Calor recibido en el intercambiador $Q_{(3-4)}$
d) Trabajo entregado en la turbina $W_{(5-6)}$

DATOS:

$\dot{m}_1$ = 100 kg / h	$\dot{m}_2$ = 150 kg / h
t_1 = 27 °C	p_1 = 15 bar
t_2 = 227 °C	p_5 = 10 bar
t_4 = 627 °C	
t_6 = 127 °C	p_6 = 1 bar



Solución:

Para resolver este problema, seguiremos los siguientes pasos:

- Resumiremos en una tabla los datos dados en el enunciado de los parámetros ($\dot{m}$, p y T) de cada estado.
- Agregaremos a la tabla los valores de los parámetros que surjan de consideraciones básicas. Aplicaremos para cada elemento de la instalación (sistema abierto o volumen de control) el primer principio de la termodinámica.

1. Tabla de datos de estados

		1	2	3	4	5	6
$\dot{m}$	$\frac{kg}{h}$	100	150				
P	bar	15				10	1
T	K	300	500		900		400

2. Consideraciones básicas.

En primer lugar, en la cámara de mezcla, sabemos que para que se verifique el régimen permanente y admitiendo que las velocidades de entrada y salida son suficientemente bajas, y por lo tanto no consideramos las energías cinéticas ni cambios en las presiones. A menos que se diga lo contrario, siempre en una cámara de mezcla, las presiones de entrada y salida son iguales entre sí. O sea que

$$p_1 = p_2 = p_3.$$

P	*bar*	*15*	*15*	*15*	*15*	*10*	*1*
T	*K*	*300*	*500*		*900*		*400*

3. Aplicación del primer principio.

Tenemos cuatro elementos: la cámara de mezcla ad: $\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3$

Por consideraciones semejantes a las expuestas para la cámara de mezcla, las presiones de entrada y salida del intercambiador de calor serán iguales, $p_4 = p_3$. Esto significa que no hay rozamiento del fluido dentro del mismo. A menos que digamos lo contrario así será en los ejercicios.

Por ser flujo permanente sabemos que el gasto o caudal másico (masa por unidad de tiempo) es constante en la válvula y la turbina: $\dot{m}4 = \dot{m}_5 = \dot{m}_6$.

Nótese que no hemos incluido en la tabla al parámetro v (volumen específico). Podríamos haberlo hecho y plantear la ecuación de estado correspondiente (en este caso la del aire, como gas ideal): $p \cdot v = \dot{m} \cdot R_a \cdot T$. Pero hacer esto, no hubiera aportado nada en favor de la solución de este problema. En general, en este tipo de ejercicios, no es necesario calcular el volumen específico de los estados de entrada y salida .

Con todo esto la tabla queda:

		1	2	3	4	5	6
$\dot{m}$	$\frac{kg}{h}$	100	150	100+150=250	250	250	250

iabática, el intercambiador de calor, la válvula, y la turbina. A cada uno, por separado, aplicaremos el principio de conservación de la energía o Primer Principio de la termodinámica. En todos los caso, el volumen de control (o sistema abierto) es a régimen permanente:

$$\dot{Q}_{TUR} = \dot{W}_{VC} + \dot{m}_{sal}\left(h + \frac{\overline{V}^2}{2} + g\,z\right)_{sal} - \dot{m}_{ent}\left(h + \frac{\overline{V}^2}{2} + g\,z\right)_{ent}$$

Tanto las energías cinéticas como la potenciales se desprecian, ya que no se consideran variaciones importantes de altura, ni velocidades altas. Con esto queda:

$$\boxed{\dot{Q}_{VC} = \dot{W}_{VC} + \dot{m}_{sal} \cdot h_{sal} - \dot{m}_{ent} \cdot h_{ent}}$$

Para la cámara de mezcla:

resulta $$0 = \dot{m}_3 \cdot h_3 - \dot{m}_1 \cdot h_1 - \dot{m}_2 \cdot h_2$$

ya que es adiabático, y no hay trabajo .

Y por ser un gas ideal, la entalpía del mismo - que sólo depende de la temperatura - se calcula como $h = c_p \cdot T$; donde c_p es el calor específico a presión constante del aire

$c_p = 1006 \frac{KJ}{kg}$. Este modo de calcular la entalpía de un estado (de entrada o salida), no es porque el proceso antes o después del mismo sea a presión constante (aunque en este caso lo sea).El cálculo de la entalpía de un estado, sólo depende de los parámetros de ese estado, y al ser un gas ideal, el parámetro es la temperatura, y c_p es una constante de proporcionalidad. Entonces:

$$0 = \dot{m}_3 \cdot c_p \cdot T_3 - \dot{m}_1 \cdot c_p \cdot T_1 - \dot{m}_2 \cdot c_p \cdot T_2$$

Despejando T_3:

$$T_3 = \frac{\dot{m}_1 \cdot c_p \cdot T_1 + \dot{m}_2 \cdot c_p \cdot T_2}{\dot{m}_3 \cdot c_p} = \frac{100 \times 1006 \times 300 + 150 \times 1006 \times 500}{250 \times 1006} = 420 \text{ K} = 147 \text{ °C}$$

Para el intercambiador: .

$$\dot{Q}_{3\text{-}4} = \dot{m}_4 \cdot c_p \cdot T_4 - \dot{m}_3 \cdot c_p \cdot T_3 = 250 \times 1006 \times (900 - 420) = 120.72 \frac{MJ}{h}$$

$$\dot{Q}_{3\text{-}4} = 120{,}72 \frac{MJ}{h} = 33{,}5 \text{ kW} = 28800 \frac{kCal}{h}$$

pues no hay trabajo.

Para la válvula:

Aunque no se lo diga expresamente, la válvula se considera adiabática. Además no produce trabajo. Sólo produce una caída de presión con circulación de masa, y resulta:

$$0 = \dot{m}_5 \cdot c_p \cdot T_5 - \dot{m}_4 \cdot c_p \cdot T_4$$

$$0 = c_p \cdot T_5 - c_p \cdot T_4$$

$$T_5 = T_4 = 900 \text{ K} = 627 \text{°C}$$

Para una válvula (adiabática), por donde fluye un gas ideal, siempre las temperaturas son iguales. Si no hubiera sido un gas ideal, como por ejemplo un gas real o un vapor, lo que se hubiera mantenido invariable es la entalpía: $h_5 = h_4$.

Para la turbina (no adiabática)

$$\dot{Q}_{TUR} = \dot{W}_{TUR} + \dot{m}_6 \cdot h_6 - \dot{m}_5 \cdot h_5$$

con $\dot{Q}_{TUR} = -100 \frac{kCal}{h}$, con signo negativo porque es calor perdido por la turbina. Reemplazando:

$$\dot{Q}_{TUR} = \dot{W}_{EJE} + \dot{m}_6 \cdot c_p \cdot T_6 - \dot{m}_5 \cdot c_p \cdot T_5$$

$$\dot{W}_{EJE} = \frac{-100 \frac{kCal}{h}}{860 \frac{kCal}{kWh}} - \frac{250 \times 1006 \times (400 - 900)}{3600 \times 1000} \text{ kW} = 34{,}8 \text{ kW} = 29940 \frac{kCal}{h}$$

Resumen de las respuestas

Parámetros de estado

		1	2	3	4	5	6
$\dot{m}$	$\frac{kg}{h}$	100	150	250	250	250	250
p	bar	15	15	15	15	10	1
T	K	300	500	420	900	900	400

(a)Temperatura a la salida de la cámara de mezcla $t_3 = 147°C$

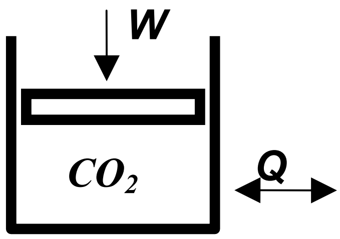
(b) Temperatura a la salida de la válvula $t_5 = 627°C$

(c) Calor en el intercambiador $\dot{Q}_{3\text{-}4} = 33{,}5 \text{ kW} = 28800 \frac{kCal}{h}$

(d) Trabajo entregado en la turbina $\dot{W}_{EJE} = 34{,}8 \text{ kW} = 29940 \frac{kCal}{h}$

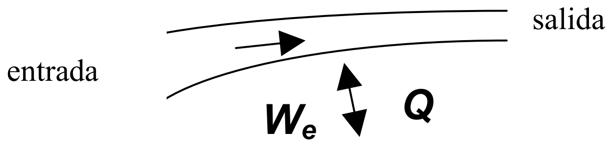
5 - Transformaciones Politrópicas

Ejercicio 5.1



Se comprimen politrópicamente 8 kg de CO_2 (n =1,2) desde $p_1 = 1{,}05$ kg_f/cm^2 y $t_1 = 60$ °C hasta $t_2 = 227$ °C.
Calcular:

a) p_2 , W , y Q , suponiendo que el dióxido de carbono, se comporta como un gas ideal . Representar en un diagrama p-v.
b) Para los mismos datos de entrada y salida, y suponiendo que el proceso es abierto y en régimen estacionario, calcular: W_e y Q, para un flujo estacionario de 8 kg / s . Representar en un diagrama p-v.



Respuestas:

a) p_2 = 12 kg_f/cm^2 ; W = -301 kCal = -1259 kJ; Q = -92 kCal = -385 kJ

b) $\dot{W}_e$= -361 kCal / s = 1510 KW ; $\dot{Q}$ = -92 kCal / s = -385 KW .

Ejercicio 5.2

El trabajo que se necesita para comprimir un gas, en forma reversible, según $pv^{1,3}$ = cte, es de 6900 kg_f.m. Determinar la variación de energía interna ΔU y el calor Q, si el gas es : (a) aire, (b) metano.

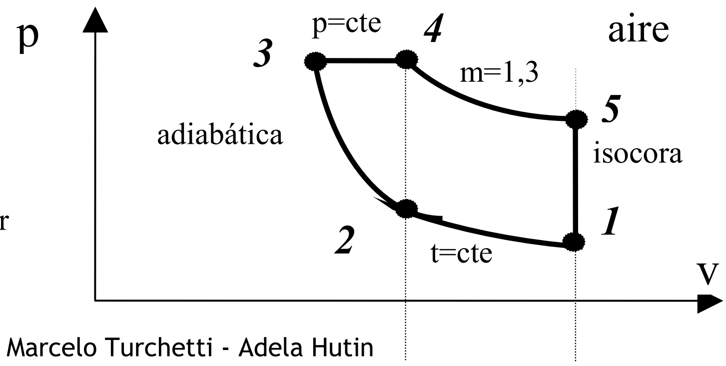
Respuestas: Aire: Q = - 4,02 kCal ; $\Delta U_{S\{1\text{-}2\}}$ = 12,14 kCal
Metano: Q = - 0,2 kCal ≅ 0 ; $\Delta U_{S\{1\text{-}2\}}$ = 16,14 kCal

Observar que aunque el exponente m es el mismo, el aire se comprime exotérmicamente y con aumento de la temperatura, mientras que el metano lo hace casi adiabáticamente.

Ejercicio 5.3

Una masa de aire describe un ciclo termodinámico, constituido por las siguientes transformaciones cuasiestáticas:

masa$_1$ = 1 kg de aire , p_1 = 0,9 bar



$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{V_2}{V_3} = \frac{V_4}{V_3} = 5 \qquad t_1 = 27\ °C$$

Calcular:

a) Parámetros de cada vértice. Diagrama p-v.
b) Intercambios de energía entre medio y sistema.
c) Variaciones de energía en cada uno de los procesos.

Respuestas:

	presión	Volumen específico	temperatura
Estado	kg_f/cm^2	m^3/kg	K
1	0,9	0,976	300
2	4,5	0,1952	300
3	42,83	0,03903	571
4	42,83	0,1952	2856
5	5,28	0,976	1762

	ΔU		W		Q	
Transformación	kCal	kJ	kCal	KJ	kCal	kJ
1-2 isotérmica	0	0	-33,1	-138	-33,1	-138
2-3 adiabática	46,07	193	46,07	193	0	0
3-4 isobara	388,5	1625	156,6	665	545,1	2281
4-5 m=1,3	-186	-778	255,3	1068	69,3	290
5-1 isocora	-248	-1038	0	0	-248	-1048
1-1 CICLO	0	0	332,73	1402	333,3	1385

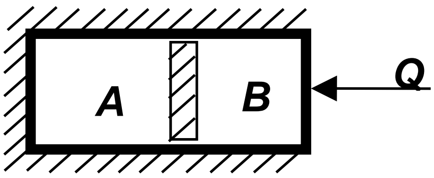
NOTA: Las altas temperaturas alcanzadas, hacen que el tratamiento del aire como gas ideal, introduzca errores importantes.

Ejercicio 5.4 – Explicado en página 49

Un sistema termodinámico, consiste en un recipiente aislado, no conductor, cerrado, indeformable y horizontal, el cual contiene un émbolo P, no conductor, sin peso ni rozamiento, de área 0,05 m^2, como se muestra en la figura. A cada lado del émbolo hay 2,5 m^3 de aire, inicialmente a p_1=1,033 kg_f/cm^2 de presión absoluta y t_1=15,5, °C. Lentamente se suministra calor al aire en el extremo B de la derecha del cilindro, hasta que el aire del lado izquierdo A, se haya comprimido hasta 1,5 kg_f/cm^2 de presión absoluta.

Determinar:

a) El trabajo hecho sobre el aire del lado izquierdo.
b) El calor absorbido por el aire del lado derecho
c) Los estados finales de ambas masas de aire.



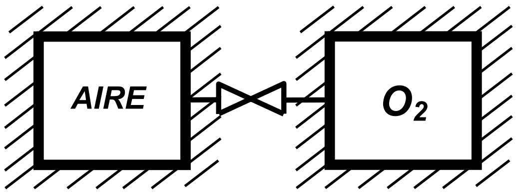
Respuestas: $W_A = -77{,}82$ kJ $Q_B = 534{,}8$ kJ

Estado	p_f		V_f	T
	ata	kPa	m^3	K
(a)	1,5	151,95	1,871	323,9
(b)	1,5	151,95	3,129	541,6

Ejercicio 5.5 - Explicado en página 51

Se tienen dos tanques rígidos y adiabáticos que contienen respectivamente oxígeno y aire, según la disposición de la figura. Se abre la válvula y se establece el equilibrio termodinámico.

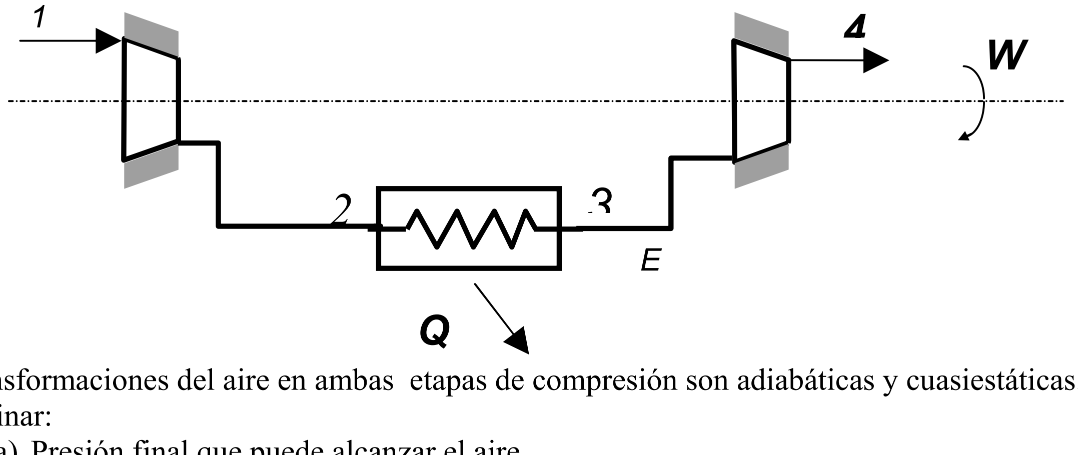
Determinar: la presión y la temperatura final de la mezcla. El estado inicial está compuesto por 10 kg de oxígeno a 5 bar y 300 K, y 2,5 kg de aire a 10 bar y 350 K.



Respuestas: $T_F = 310$ K ; $p_F = 4{,}02$ kg_f/cm^2

Ejercicio 5.6

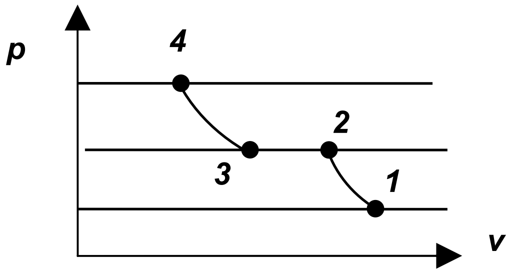
Se comprimen 60 kg / h de aire en dos etapas. El aire ingresa a la primera etapa a 1 kg_f/cm^2 y 20 °C y sale a 4 kg_f/cm^2. Se enfría a presión constante hasta 40 °C antes de ingresar a la segunda etapa. Para la compresión se dispone de una potencia máxima de 5,5 CV .



Las transformaciones del aire en ambas etapas de compresión son adiabáticas y cuasiestáticas.

Determinar:

a) Presión final que puede alcanzar el aire.
b) Representar en un diagrama p - v.



Respuestas:

a) $p_4 = 10{,}5$ bar
b) Diagrama p-v

Ejercicio 5.7

Una corriente de 1 kg /min de hidrógeno (H_2) experimenta un proceso politrópico en un flujo estacionario desde **p_1**=3,52 **kg_f /cm^2**, v_1=5,6 **m^3/kg** y ω_1 = 91,5 **m/s** , hasta que se duplica la presión, el volumen y la velocidad.

Calcular:

a) Exponente "m" de la politrópica

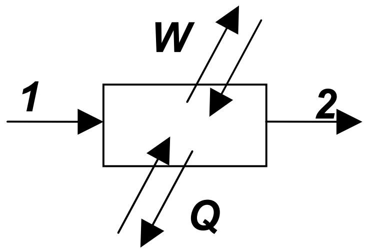
b) T_1 y T_2

c) Variaciones de entalpía Δh y de energía interna Δu

d) La integral $\int_1^2 p.dv$

e) La integral $-\int_1^2 v.dp$

f) $\dot{W}$ y $\dot{Q}$



Respuestas:

a) m = -1

b) T_1 = 475,6 K ; T_2 = 1902,5 K

c) $\Delta u_{\{1-2\}}$ = 14514 kJ/kg ; $\Delta h_{\{1-2\}}$ = 20395 kJ/kg

d) $\int_1^2 p\,dv$ = 2940 kJ/kg

e) $-\int_1^2 v\,dp$ = – 2940 kJ/kg

f) $\dot{W}$ = - 2954 kJ / min ; $\dot{Q}$ = 17455 kJ / min

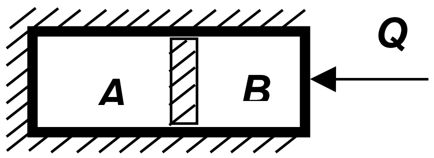
Ejercicios resueltos

Ejercicio 5.4

Un sistema termodinámico consiste en un recipiente aislado, no conductor, cerrado, indeformable y horizontal, el cual contiene un émbolo P, no conductor, sin peso ni rozamiento, de área 0,05 m^2, como se muestra en la figura. A cada lado del émbolo hay 2,5 m^3 de aire inicialmente a p_1=1 ata de presión absoluta y t_1=15,5, °C. Lentamente se suministra calor al aire en el extremo B de la derecha del cilindro, hasta que el aire del lado izquierdo A, se haya comprimido hasta 1,5 ata de presión absoluta.

Determinar:

a) El trabajo hecho sobre el aire del lado izquierdo.
b) El calor absorbido por el aire del lado derecho
c) Los estados finales de ambas masas de aire.



Solución:

Tanto en A como en B, las transformaciones son cuasiestáticas, debido a que el enunciado del problema así lo indica al referirse a la lentitud del proceso, que implica que existe equilibrio termodinámico instante a instante.

Las presiones a cada lado del pistón son iguales entre sí y varían cuasiestáticamente desde *1* a *1,5 ata* ; a esta presión la llamamos $p = p_A = p_B$.

Los estados iniciales en A y B son iguales:

$V_i = V_{Bi} = V_{Ai} = 2{,}5\ m^3$

$T_{Bi} = T_{Ai} = 300\ K$

$$M = M_A = M_B = \frac{p_i\ V_i}{R\ T_i} = \frac{100\ \ 2{,}5}{0{,}287\ \ 300} = 3{,}06\ kg$$

Transformación de A

La transformación del gas ideal es adiabática, y además es cuasiestática, por lo tanto es una evolución politrópica:

$p\ V^{\chi} = \text{constante} \qquad \text{con } \chi = c_P / c_V$

$p\ V_A^{\chi} = p_i\ V_i^{\chi} = p_f\ V_f^{\chi}$

resulta:

$V_{Af} = 1{,}87\ m3$

$T_{Af} = 323{,}9\ K$

$Q = \Delta U + W \quad \text{con } Q = 0$

$0 = \Delta U_A + W_A$

$W_A = -\Delta U_A = M\ c_V\ (T_{Af} - T_{Ai}) = -3{,}06\ (323{,}9 - 300) = -77{,}82\ kJ$

Transformación en B

Aunque sabemos que en B la transformación del gas ideal es cuasiestática, no podemos asegurar que sea politrópica ya que no es adiabática, ni isócora, ni isobara, ni isoterma.

Podemos calcular el estado final y el calor sin recurrir a la politrópica (al final de esta explicación analizaremos si esta transformación es politrópica o no.

El trabajo WA es el que recibe A desde el pistón intermedio, y es igual y de signo contrario al que B ejerce sobre el pistón:

$$W_B = -W_A = +77{,}82 \text{ kJ}$$

El volumen de B es igual al volumen total menos el volumen de A:

$$V_B = (V_{Ai} + V_{Bi}) - V_A = 5 \text{ m3} - V_A$$

$$T_{Bf} = \frac{p_f V_{Bf}}{M R} = \frac{p_f (5 - V_{Af})}{M R} = \frac{150 \ (5 - 1{,}87)}{3{,}06 \ 0{,}287} = 541{,}6 \text{ K}$$

Por primer principio:

$$Q_B = \Delta U_B + W_B$$

$$\Delta U_B = M c_V (T_{Bf} - T_{Bi}) = 3{,}06 \ 0{,}719 (541{,}6 - 300) = 557 \text{ kJ}$$

$$\mathbf{Q_B} = 557 \text{ kJ} + 77{,}8 \text{ kJ} = \mathbf{634{,}8 \text{ kJ}}$$

Transformación de B, ¿politrópica o no?

Para averiguar si es politrópica debe cumplirse (además de ser gas ideal y de ser cuasiestática):

1) $p \, v^{\mathbf{m}} = \text{cte}$

2) $Q_B = M_B \ \mathbf{c} \ (T_B - T_{Bi})$

Si se cumple una de las anteriores, se cumplirá la otra, ya que son equivalentes. No es necesario verificar ambas expresiones, basta con hacerlo con una.
El exponente **m** de la politrópica debe ser constante durante toda la evolución, al igual que el calor específico de la transformación **c.** Como se sabe, ambos están relacionados por:

$$m = \frac{c_P - c}{c_V - c}$$

Trabajando con la primer expresión:

$$p \, v^{\mathbf{m}} = \text{cte} \quad \rightarrow \quad p_i \, . v_{Bi}^{\ m} = p \, . v_B^{\ m} = p_f \, . v_{Bf}^{\ m}$$

p varía desde p_i hasta p_f y el volumen V_B lo hace desde V_i hasta V_{Bf}

$$V_B = V_T - V_A = 2 V_i - V_A = 2 V_{Ai} - V_{Ai} \left(\frac{p_i}{p}\right)^{\frac{1}{\chi}}$$

$$p_i \, . v_{Bi}^{\ m} = p \, . \left(2 V_{Ai} - V_{Ai} \left(\frac{p_i}{p}\right)^{\frac{1}{\chi}} \right)^m = p \, . V_{Ai} \left(2 - \left(\frac{p_i}{p}\right)^{\frac{1}{\chi}} \right)^m$$

y siendo $V_{Bi} = V_{Ai} = V_i$

$$p_i \, . v_{Bi}^{\ m} = p \, . \left(2 V_{Ai} - V_{Ai} \left(\frac{p_i}{p}\right)^{\frac{1}{\chi}} \right)^m = p \, . V_{Ai}^{\ m} \left(2 - \left(\frac{p_i}{p}\right)^{\frac{1}{\chi}} \right)^m$$

$$p_i . = p . \left(2 - \left(\frac{p_i}{p}\right)^{\frac{1}{\chi}} \right)^{m}$$

$$\left(\frac{p_i}{p}\right)^{\frac{1}{m}} = 2 - \left(\frac{p_i}{p}\right)^{\frac{1}{\chi}}$$

$$m = \frac{\ln\left(\frac{p_i}{p}\right)}{\ln\left(2 - \left(\frac{p_i}{p}\right)^{\frac{1}{\chi}}\right)}$$

Para que sea politrópica debe ser m constante para todo valor de p, y esto no se cumple. Por ejemplo, podemos calcular el valor de m correspondiente a $p = 1{,}25$ ata, y a $p = 1{,}5$ ata con la última fórmula:

$$m = \frac{\ln\left(\frac{1}{1{,}25}\right)}{\ln\left(2 - \left(\frac{1}{1{,}25}\right)^{\frac{1}{\chi}}\right)} = -1{,}6226$$

$$m = \frac{\ln\left(\frac{1}{1{,}5}\right)}{\ln\left(2 - \left(\frac{1}{1{,}5}\right)^{\frac{1}{\chi}}\right)} = -1{,}8067$$

También se podría haber calculado el calor específico de la transformación para la evolución completa y para un estado intermedio (algebraicamente o numéricamente):

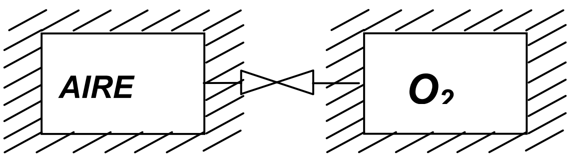
$$\mathbf{c} = \frac{Q_B}{M_B \ (T_B - T_{Bi})}$$

y resultarían dos valores distintos, llegando a la misma conclusión.

Ejercicio 5.5

Se tienen dos tanques rígidos y adiabáticos, que contienen respectivamente, oxígeno y aire , según la disposición de la figura. Se abre la válvula y se establece el equilibrio termodinámico.

Determinar: la presión y la temperatura final de la mezcla. El estado inicial está compuesto por 10 kg de oxígeno a 5 bar y 300 K, y 2,5 kg de aire a 10 bar y 350**K.**



Solución:

Se elegirá el **sistema cerrado compuesto por ambas masas de gases**. La válvula sólo cumple una función accesoria, es una válvula de paso, estando totalmente cerrada en el estado inicial, y abriéndose completamente en el estado final de equilibrio.

El equilibrio final termodinámico, significa ,que en el estado final, habrá parámetros (temperatura, presión, volumen específico, etc.,) únicos y uniformes.

Al ser gases de distinta naturaleza habrá que hacer consideraciones particulares. El aire puede ser considerado como un gas único o como una mezcla de gases: 21% de moléculas de oxígeno y el resto de nitrógeno. Es indistinto tomarlo como una u otra cosa. La condición de equilibrio final exige que las presiones parciales de cada gas sumadas sean iguales a la presión total. Además, cada gas ocupará el mismo volumen y se puede aplicar la ecuación de estado de los gases perfectos para cada gas por separado, con su presión parcial, y el volumen total. (Ver Ley de Dalton)

Estado Inicial

Aire

p_A=10 bar

T_A=350 K

m_A=25 kg

ec. de estado: p V = m R T

$V_A = m_A\ R_A\ T_A\ /\ p_A$

$V_A = 25\ \ 287\ \ 350 / 10^6 = 2{,}51\ m^3$

Oxígeno

p_O=5 bar

T_O=300 K

m_O=10 kg

ec. de estado: p V = m R T

$V_O = m_o\ R_O\ T_O\ /\ p_O$

$V_O = 10\ \ 259{,}6\ \ 300 / 5\ 10^5 = 1{,}56$

Estado final

$V_F = V_O + V_A = 2{,}51 + 1.56 = 4{,}13\ m^3$

final del aire: $\mathbf{p_A}\ V_F = m_A\ R_A\ \mathbf{T_F}$ **(1)** con p_A presión parcial del aire

final del oxígeno: $\mathbf{p_O}\ V_F = m_O\ R_O\ \mathbf{T_F}$ **(2)** con p_O presión parcial del oxígeno

Primer principio de la termodinámica

Es un sistema cerrado, adiabático y sin trabajo, o sea aislado. Tampoco interesan cambios de las energías cinéticas no potenciales gravitatoria:

$$Q = W + \Delta U \ \rightarrow \qquad \mathbf{\Delta U = 0}$$

desarrollando para cada uno de los gases:

$$\mathbf{0 = \Delta U_A + \Delta U_O = m_A\ c_{V\,A}\ (T_F - T_A) + m_O\ c_{V\,O}\ (T_F - T_O)} \qquad \textit{(3)}$$

De esta última la única incógnita es la temperatura final, y se obtiene: $\boldsymbol{T_F} = 336{,}6\ \boldsymbol{K}$ luego, de (1) y (2) se obtienen las presiones parciales: $\mathbf{p_A = 5{,}935\ bar}$ y $\mathbf{p_O = 2{,}148\ bar}$ y la presión total: $\mathbf{p_F = p_A + p_O = 8{,}083\ bar}$