El estudio ordenado del Balance de Materia y Energía, permite al estudiante irse inmiscuyendo en el tema de Balance de Materia y luego de Energía en forma paulatina, de tal manera que no se le haga dificultoso ni confuso, el proceso de estudio aprendizaje.

En este texto se evalúa diversas formas de poder razonar el enfoque de un problema de Balance de Materia y Energía, con la finalidad de satisfacer las diversas formas de aprendizaje que tienen los alumnos, luego ellos eligen la forma mas acertada a su forma de aprendizaje, no sintiendose presionados en un canon rígido de resolución, sino facilitándose ellos mismos su proceso de aprendizaje.

Dr. Rolando Basurco.

UNSA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

UNSA investiga
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

ISBN: 978-612-5035-01-1

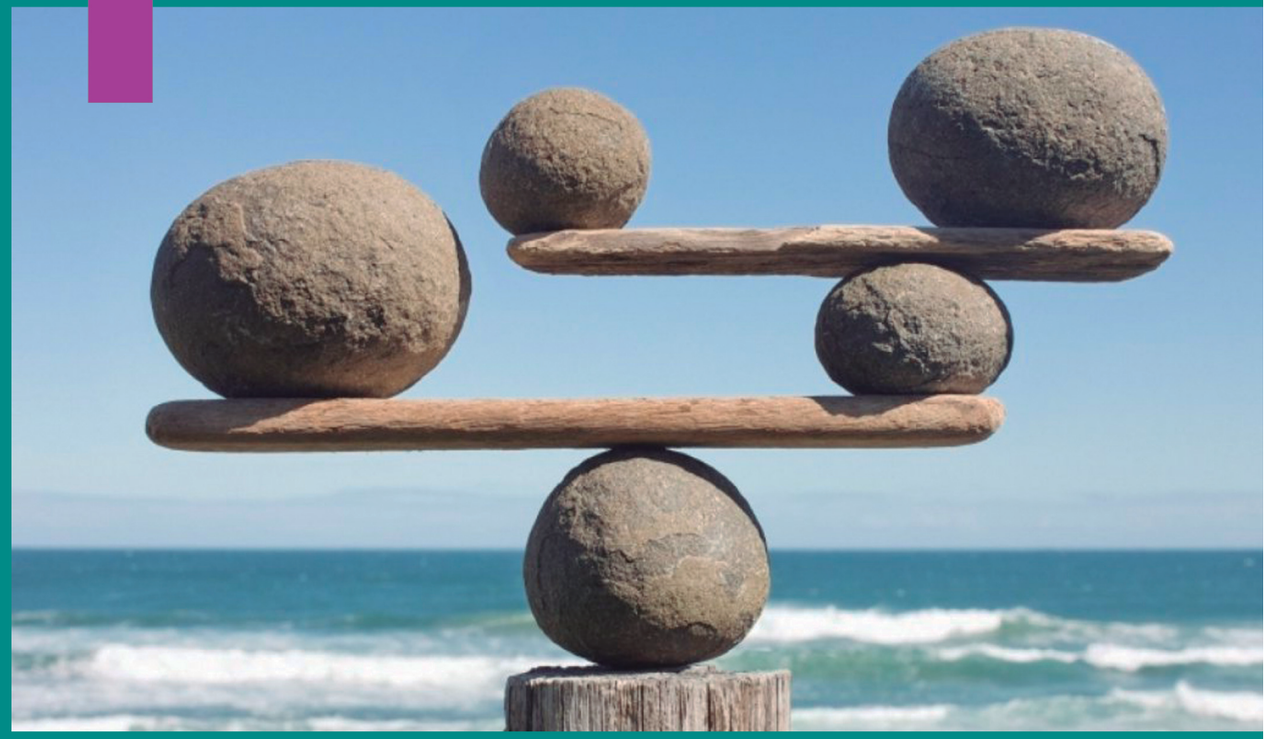
Dr. Rolando Sixto Basurco Carpio

Balance de Materia y Energía

Balance de Materia y Energía

Dr. Rolando Sixto Basurco Carpio

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA



EDITORIAL UNSA

BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA

DR. ROLANDO BASURCO CARPIO

EDITORIAL
UNSA

BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA

© Dr. Rolando Basurco Carpio

Editado e Impreso en:
© Editorial UNSA
Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa
Calle Paucarpata, Puerta 5, Área de ingenierías
Teléfono: 215558
E-mail: editorial@unsa.edu.pe
Arequipa-Perú

Primera edición, — del —
Tiraje: — ejemplares

Hecho en el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N°: —- ——
ISBN:

Son propiedad del autor ninguna parte de esta obra puede ser reproducida
o transmitida, mediante ningún sistema o método, electrónico ó mecánico,
incluyendo el fotocopiado, la grabación o cualquier sistema de
recuperación sin permiso escrito del Autor.

IMPRESO EN PERÚ

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa por la subvención brindada para la publicación del texto académico “Balance de materia y energía”, seleccionado en el Concurso 2019-I: Publicación de Libros y Textos Académicos, con contrato –.

INTRODUCCIÓN

El presente manual tiene la finalidad de poder contribuir con la fonación del estudiante de la Escuela Profesional de Ingeniería Química.

El estudio ordenado del Balance de Materia y Energía, permite al estudiante irse inmiscuyendo en el tema de Balance de Materia y luego de Energía en forma paulatina, de tal manera que no se le hago dificultoso ni confuso el proceso de estudio aprendizaje.

Se evalúa diversas formas de poder razonar el enfoque de un problema de Balance de Materia y Energía, con la finalidad de satisfacer las diversas formas de aprendizaje que tienen los alumnos, luego ellos eligen la forma más acertada a su forma de aprendizaje, no sintiéndose presionados en un canon rígido de resolución, sino facilitándose ellos mismos su proceso de aprendizaje.

Los temas tratados en el presente manual son:

- Utilización adecuada de los factores de conversión y de repaso de algunos conocimientos en los cursos previos de química general, fisicoquímica y termodinámica, necesarios para ejecutar un Balance de materia y Energía.
- Balance de Materia sin reacción Química en procesos estacionarios y trascientes en sistemas simples y múltiples.
- Balance de Materia con reacción Química en procesos simples y múltiples.
- Balance de Materia en sistemas de varias fases.
- Balance de Energía en sistemas sin reacción química.

- Balance de Energía en sistemas con reacción química simple y múltiple
- Balance de Energía en procesos de combustión, para la determinación de la Temperatura de Flama Adiabática.
- Aplicación de la computación a la realización de Balances en General.

La resolución de problemas tipo contribuye a un mejor aprendizaje del estudiante.

Deseoso que esta contribución sea un aporte beneficioso al estudiante, se puso a su disposición. Esperando sus aportes en caso de algunos errores involuntarios producto de la edición, se suscribe el autor.

Índice general

Agradecimientos III

Introducción V

1 INTRODUCCIÓN A LOS CÁLCULOS DE INGENIERÍA 1

1.1. INTRODUCCIÓN 1
1.2. SISTEMAS DE UNIDADES 1
1.2.1. UNIDADES Y SISTEMAS DE UNIDADES 1
1.2.2. SISTEMAS DE UNIDADES 2
1.2.3. FACTORES DE CONVERSIÓN 2
1.2.4. UNIDADES DE TEMPERATURA 5
1.2.5. GASES IDEALES 6
1.2.6. UNIDADES DE PRESIÓN 8
1.2.7. UNIDADES DE DENSIDAD 10
1.2.8. CONCENTRACIONES MÁSICAS 12
1.3. ANÁLISIS DIMENSIONAL 15
1.4. TEOREMA PI DE BUCKINGHAM 15
1.5. SISTEMA Y VOLUMEN DE CONTROL 17
1.6. DIAGRAMA DE FLUJO 19
1.6.1. TIPOS DE DIAGRAMAS DE FLUJO 20
1.7. PROBLEMAS DE APLICACIÓN 21

2 BALANCE DE MATERIA EN SISTEMAS ESTACIONARIO Y TRANSITORIO SIN REACCIÓN 23

2.1. LEY DE CONSERVACIÓN 23
2.2. ECUACIONES GENERALES DE BALANCES: DIFERENCIAL E INTEGRAL DE MATERIA. 23
2.2.1. ECUACIÓN GENERAL DE BALANCE 24
2.2.2. BALANCES EN PROCESOS CONTINUOS EN RÉGIMEN PERMANENTE 24
2.2.3. BALANCES INTEGRALES EN PROCESOS INTERMITENTES 25
2.2.4. BALANCES INTEGRALES SOBRE PROCESOS SEMI INTERMITENTES Y CONTINUOS 26
2.3. APLICACIÓN DE BALANCES DE MATERIALES EN UNIDADES SIMPLES 27
2.3.1. METODOLOGÍA PARA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS EN BALANCES DE MATERIA 27
2.3.2. FORMAS MATEMÁTICAS PARA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS EN BALANCES DE MATERIA 29
2.3.3. PROBLEMAS DE APLICACIÓN 29
2.4. EJERCICIO PARA RESOLVER 32
2.5. ANÁLISIS DE GRADOS DE LIBERTAD 33
2.5.1. GRADOS DE LIBERTAD EN BALANCES SIN REACCION QUIMICA 33
2.5.2. GRADOS DE LIBERTAD EN BALANCES CON REACCIÓN QUÍMICA 35
2.6. APLICACIÓN DE BALANCES DE MATERIALES EN UNIDADES MÚLTIPLES 36
2.7. DISEÑO DE TANQUES 42
2.7.1. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO 43
2.7.2. ALTURA DEL TANQUE 44
2.8. BALANCE TRANSITORIO DE TANQUES 47
2.9. PROBLEMAS DE APLICACIÓN 49
2.10. PROBLEMAS APLICATIVOS 51

3 BALANCE DE MATERIA EN SISTEMAS ESTACIONARIO Y TRANSITORIO CON REACCIÓN QUÍMICA 55

3.1. BALANCE DE MATERIA POR COMPONENTE EN SISTEMAS REACCIONANTES SIMPLES 55
3.2. DEFINICIONES IMPORTANTES DE UNA REACCIÓN 55
3.2.1. ESTEQUIOMETRIA 55
3.2.2. VELOCIDAD DE REACCIÓN 56

3.2.3. REACTIVO LIMITANTE 57
3.2.4. PORCENTAJE DE EXCESO DE REACTIVO 58
3.2.5. PORCENTAJE DE CONVERSIÓN O RENDIMIENTO 59
3.2.6. SELECTIVIDAD 60
3.2.7. ANÁLISIS DE LOS GRADOS DE LIBERTAD EN SISTEMAS REACCIONANTES SIMPLES 62
3.3. ECUACIONES DE BALANCES ELEMENTALES Y ANÁLISIS DE LOS GRADOS DE LIBERTAD. 65
3.4. BALANCE POR COMPONENTES EN UNIDADES MÚLTIPLES CON REACCIÓN - RENDIMIENTO - SELECTIVIDAD Y ANÁLISIS DE LOS GRADOS DE LIBERTAD EN UNIDADES MÚLTIPLES 72
3.5. SUSTANCIA DE REFERENCIA - SUSTANCIAS INERTES 76
3.6. REACCIONES DE COMBUSTIÓN 76
3.6.1. PROCESOS DE COMBUSTIÓN TEÓRICO Y REAL 79
3.6.2. PORCENTAJE DE EXCESO DE AIRE 79
3.6.3. ANÁLISIS DE GASES EN BASE SECA Y EN BASE HÚMEDA 79
3.6.4. APLICACIONES DE BALANCE DE MATERIA EN REACTORES DE COMBUSTIÓN 80
3.6.5. PROBLEMAS DE APLICACIÓN 84

4 BALANCE DE MATERIA QUE INVOLUCRA CORRIENTES DE RECIRCULACIÓN Y DE DERIVACIÓN Y SISTEMAS DE VARIAS FASES 87

4.1. RECIRCULACIÓN, DERIVACIÓN O BY PASS Y PURGA 87
4.2. BALANCE DE MATERIA CON RECIRCULACIÓN EN OPERACIONES Y PROCESOS EN ESTADO ESTACIONARIO 88
4.3. BALANCE EN OPERACIONES Y PROCESOS CON CORRIENTE DE DERIVACIÓN O BY PASS EN ESTADO ESTACIONARIO 93
4.4. ANALISIS DE LOS GRADOS DE LIBERTAD EN SISTEMAS CON RECIRCULACIÓN 100
4.5. BALANCE DE MASA EN SISTEMA DE VARIAS FASES 103
4.5.1. DIAGRAMA DE FASES 103
4.5.2. REGLA DE FASES 104
4.5.3. PROPIEDADES FÍSICAS QUE SE BASAN LAS SEPARACIONES DE EQUILIBRIO ENTRE FASES 106
4.6. FASE LÍQUIDO - VAPOR 107
4.6.1. GRÁFICA DE COX 107
4.6.2. ECUACIÓN DE CLAUSIUS - CLAPEYRON 108
4.6.3. ECUACIÓN DE ANTOINE 108
4.7. HUMIDIFICACION Y SECADO 109
4.7.1. SATURACIÓN TOTAL O MOLAR 109

4.7.2. SATURACIÓN PARCIAL O RELATIVA 110
4.7.3. HUMEDAD ABSOLUTA 110
4.7.4. HUMEDAD RELATIVA 110
4.7.5. PORCENTAJE DE SATURACIÓN 110
4.7.6. CARTA PSICROMÉTRICA 111
4.8. BALANCES DE HUMIDIFICACION Y SECADO 120
4.9. PROBLEMAS DE APLICACIÓN 124

5 BALANCE DE MATERIA SISTEMA SÓLIDO - LÍQUIDO 129

5.1. LEY DE RAOULT 129
5.2. LEY DE HENRY 131
5.3. USOS DEL COEFICIENTE DE EQUILIBRIO DE HENRY O RAOULT 132
5.4. SOLUBILIDAD Y SATURACIÓN Y DATOS DE SOLUBILIDAD 140
5.5. BALANCE DE MATERIA EN CRISTALIZACIÓN Y FILTRACIÓN 144
5.5.1. CRISTALIZACIÓN 144
5.5.2. FILTRACIÓN 145
5.5.3. BALANCES DE MATERIA EN CRISTALIZACIÓN Y FILTRACIÓN 147
5.6. BALANCE DE MATERIA EN EXTRACCIÓN POR SOLVENTES 156
5.6.1. EXTRACCIÓN POR SOLVENTES 156
5.6.2. COEFICIENTE DE EXTRACCIÓN 156
5.6.3. PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN 156
5.6.4. SELECTIVIDAD 157
5.6.5. BALANCE DE MATERIA 157
5.7. BALANCE DE MATERIA EN SECADO 160
5.8. BALANCE DE MATERIA EN FLOTACIÓN 165
5.9. PROBLEMAS DE APLICACIÓN 170

6 BALANCE DE ENERGÍA 175

6.1. DEFINICIÓN 175
6.2. UNIDADES 175
6.3. FORMAS DE ENERGÍA 176
6.4. CAPACIDAD TÉRMICA DE SÓLIDOS, LÍQUIDOS Y GASES 177
6.5. ENTALPÍA EN TABLA DE VAPOR DE AGUA Y CALORES DE TRANSFORMACIÓN 178
6.6. ECUACIÓN GENERAL DE BALANCE DE ENERGÍA 183
6.7. BALANCE DE ENERGÍA EN SISTEMAS ESTACIONARIOS 184
6.7.1. BALANCE DE ENERGÍA EN SISTEMAS CERRADOS A VOLUMEN CONSTANTE SIN REACCIÓN QUÍMICA 184
6.7.2. BALANCE DE ENERGÍA EN SISTEMAS ABIERTOS SIN REACCIÓN QUÍMICA 185

6.8. BALANCE DE ENERGÍA MECÁNICO - ECUACIÓN DE BERNOULLI 188
6.9. COMO SE REALIZA UN BALANCE DE ENERGÍA 189
6.10. APLICACIONES 189
6.11. GRÁFICA DE HUMEDAD Y SU USO 201
6.11.1. DEFINICIÓN 201
6.11.2. DIAGRAMA DE HUMEDAD Y DE ENTALPÍA PARA VAPOR DE AGUA Y AIRE 202
6.11.3. ACONDICIONAMIENTO DE AIRE 202
6.11.4. MÉTODOS DE HUMIDIFICACIÓN 204
6.12. PROBLEMAS DE APLICACIÓN 213

7 BALANCE DE ENERGÍA EN SISTEMAS REACCIONANTES 215

7.1. DEFINICIÓN 215
7.2. PROPIEDADES DE LA ENTALPÍA 215
7.3. ENTALPÍA DE REACCIÓN, DE FORMACIÓN ESTÁNDAR, DE COMBUSTIÓN ESTÁNDAR 216
7.4. ENTALPÍA DE REACCIÓN BAJO CONDICIONES ESTÁNDAR Y NO ESTÁNDAR 219
7.5. BALANCE DE ENERGÍA CON REACCIÓN QUÍMICA ÚNICA - FORMA ALTERNATIVA DE LA ECUACIÓN DE BALANCE 222
7.6. BALANCE DE ENERGÍA CON ECUACIONES MÚLTIPLES 225
7.7. REACTOR ISOTÉRMICO - REACTOR ADIABÁTICO APLICACIONES 228
7.8. USO SIMULTÁNEO DE LOS BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA EN CONDICIONES ESTACIONARIAS 230
7.9. PROBLEMAS DE APLICACIÓN 232

8 OTROS TIPOS DE BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA 235

8.1. BALANCE DE ENERGIA DE SOLUCIONES 235
8.2. BALANCE DE ENERGÍA EN PROCESOS DE COMBUSTIÓN 238
8.3. TEMPERATURA ADIABÁTICA DE FLAMA 242
8.4. USO DEL COMPUTADOR EN LA RESOLUCIÓN DE BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA 247
8.5. OBTENCION DE FORMULAS DE LOS PROCESOS U OPERACIONES UNITARIAS PARTIENDO DEL BALANCE 249
8.6. PROBLEMAS DE APLICACIÓN 250
8.7. ALGUNAS TABLAS 253

Bibliografía 257

Anexo: Definiciones modernas de tiempo, masa y longitud 259

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN A LOS CÁLCULOS DE INGENIERÍA

OBJETIVOS

- Repasar los Sistemas de Unidades Utilizados en Ingenieria
- Diferenciar un sistema termodinamico y Volumen de Control
- Aplicar calculos y conversiones diversos
- Conocer y Aplicar el Analisis Dimensional
- Preparar diagramas de de flujo

1.1. INTRODUCCIÓN

Una de las tareas en las que utiliza más tiempo el ingeniero consiste en la acumulación de datos de las propiedades físicas, que son necesarias para estimar la velocidad de los procesos de transportes de cantidad de movimiento, transmisión de calor, transferencia de materia, cinética de las reacciones químicas, así como equilibrios físicos y químicos.

La cantidad de datos necesarios para el estudio de los procesos varía según la exactitud de los resultados que se desee y el tiempo disponible por el ingeniero. En ocasiones vasta conocer su presión de vapor, temperatura normal de ebullición, calor específico, etc. Para facilitar esto existen en un gran número de fuentes donde se pueden obtener "Equivalencias de la Conductividad Calorífica", por dar un ejemplo.

1.2. SISTEMAS DE UNIDADES

Antes de enfrentar el Balance de Materia Y Energía, es conveniente repasar algunos conceptos básicos ya conocidos por algunos, desconocidos para otros o confusos para el resto.

1.2.1. UNIDADES Y SISTEMAS DE UNIDADES

Las unidades son "entidades" o "nombres" que se usan para medir ciertas magnitudes:

Tiempo	s, min, h, día, año, siglo
Masa	g, kg, ton., onza, lb.
Longitud	mm, cm, m, km, pulgada, pie
Intensidad de corriente eléctrica	A, mA
Temperatura	K, ^{o}C, ^{o}F, ^{o}R

Cantidad de sustancia	mol
Intensidad luminosa	cd (candela)

Para realizar cálculos que involucran diversas variables, las relaciones o ecuaciones de cálculo deben ser "dimensionalmente" correctas y las distintas variables deben ser expresadas en unidades "consistentes".

Las diferentes unidades que se usan para expresar el "tamaño" de una magnitud conforman un "sistema de unidades". Usaremos principalmente el sistema métrico, aunque en algunas situaciones se usan unidades en diversos sistemas.

Así, vamos a la ferretería y pedimos 1 kilo de clavos de 1/2 pulgada o escuchamos que Perú produce tantas toneladas (de 1000 kg) de cobre y se vende a 70 centavos de dólar la libra, o tantos kilos de oro que se venden a 300 dólares la onza.

Es importante que como futuros ingenieros no caigamos en errores comunes al momento de asignar unidades a una determinada variable o propiedad. Por ejemplo, es común escuchar en las noticias de radio y televisión, e incluso se lee en los diarios, que en un determinado lugar hubo "30 grados de calor". Analicemos este comentario: Los grados se refieren obviamente a "grados Celsius" que es la unidad que usamos domésticamente en Perú para la temperatura. Calor es una forma de energía que no se mide en grados ni en ninguna unidad de temperatura. La energía se mide en cal, BTU, Joule u otras. Decir que hubo "30 grados de calor" es similar a decir que una persona tiene "42 años de estatura" o tiene "15 metros de edad".

1.2.2. SISTEMAS DE UNIDADES

Existen diversos sistemas de medidas:

- **Sistema Internacional de Unidades o SI:** es el sistema más usado. Sus unidades básicas son: el metro, el kilogramo, el segundo, el ampere, el kelvin, la candela y el mol. Las demás unidades son derivadas del Sistema Internacional.
- **Sistema métrico decimal:** primer sistema unificado de medidas.
- **Sistema cegesimal o CGS:** denominado así porque sus unidades básicas son el centímetro, el gramo y el segundo.
- **Sistema Natural:** en el cual las unidades se escogen de forma que ciertas constantes físicas valgan exactamente 1.
- **Sistema técnico de unidades:** derivado del sistema métrico con unidades anteriores. Este sistema está en desuso.
- **Sistema anglosajón de unidades:** aún utilizado en algunos países anglosajones. Muchos de ellos lo están reemplazando por el Sistema Internacional de Unidades.

1.2.3. FACTORES DE CONVERSIÓN

Para combinar las diversas variables en problemas en ingeniería, dichas variables deben ser expresadas en unidades consistentes usando para ello "factores de conversión de unidades".

LONGITUD

	cm	metro	km	in	ft	ml
1 centímetro	1	10^{-2}	10^{-5}	0.3937	3.281×10^{-2}	6.214×10^{-6}
1 metro	100	1	10^{-3}	39.37	3.281	6.214×10^{-4}
1 kilómetro	10^{5}	1000	1	3.937×10^{4}	3281	0.6214
1 pulgada	2.540	2.540×10^{-2}	2.540×10^{-5}	1	8.333×10^{-2}	1.578×10^{-5}
1 pie	30.48	0.3048	3.048×10^{-4}	12	1	1.894×10^{-4}
1 milla	1.609×10^{5}	1609	1.609	6.336×10^{4}	5280	1

ÁREA

	metro^2	cm^2	ft^2	in^2
1 metro cuadrado	1	10^{4}	10.76	1550
1 centímetro cuadrado	10^{-4}	1	1.076×10^{-3}	0.1550
1 pie cuadrado	9.290×10^{-4}	929.0	1	144
1 pulgada cuadrada	6.452×10^{-4}	6.452	6.994×10^{-3}	1

VOLUMEN

	metro^3	cm^3	L	ft^3	in^3
1 metro cúbico	1	10^{6}	1000	35.31	6.102×10^{4}
1 centímetro cúbico	10^{-6}	1	1.000×10^{-3}	3.351×10^{-5}	6.102×10^{-2}
1 litro	1.000×10^{-3}	1000	1	3.351×10^{-2}	61.02
1 pie cúbico	2.832×10^{-2}	2.832×10^{-4}	28.32	1	1728
1 pulgada cúbica	1.639×10^{-5}	16.39	1.639×10^{-2}	5.787×10^{-4}	1

MASA

	g	kilogramo	slug	u	oz	lb	ton
1 gramo	1	0.001	6.852×10^{-5}	6.022×10^{23}	3.527×10^{-2}	2.205×10^{-3}	1.102×10^{-6}
1 kilogramo	1000	1	6.852×10^{-2}	6.022×10^{26}	35.27	2.205	1.1022×10^{-3}
1 slug	1.459×10^{4}	14.59	1	8.786×10^{27}	514.8	32.07	1.609×10^{-2}
1 u	1.661×10^{-24}	1.661×10^{-27}	1.138×10^{-28}	1	5.857×10^{-26}	3.662×10^{-27}	1.830×10^{-30}
1 onza	28.35	2.835×10^{-2}	1.943×10^{-3}	1.718×10^{25}	1	6.250×10^{-2}	3.125×10^{-5}
1 libra	453.6	0.4536	3.108×10^{-2}	2.732×10^{26}	16	1	0.0005
1 ton	9.072×10^{5}	907.2	62.16	5.463×10^{29}	3.2×10^{4}	2000	1

Las cantidades sombreadas no son unidades de masa pero a menudo se usan como tales. Por ejemplo, cuando escribimos 1kg = 2.205lb significa que un kilogramo es una masa que pesa 2.205 libras en condiciones de gravedad estándar (g = 9.80665m/s^2).

DENSIDAD

	slug/ft^3	**kilogramo/metro^3**	**g/cm^3**	**lb/ft^3**	**lb/in^3**
1 slug por pie cúbico	1	515.4	0.5154	32.17	1.862×10^{-2}
1 kilogramo por metro cúbico	1.940×10^{-3}	1	0.001	6.243×10^{-2}	3.613×10^{-5}
1 gramo por centímetro cúbico	1.940	1000	1	62.43	3.613×10^{-2}
1 libra por pie cúbico	3.108×10^{-2}	16.02	1.602×10^{-2}	1	5.787×10^{-4}
1 libra por pulgada cúbica	53.71	2.768×10^{4}	27.68	1728	1

Las unidades de densidad que contienen unidades de peso son dimensionalmente diferentes a las de masa. Véase la nota de tablas de masa.

TIEMPO

	y	**d**	**h**	**min**	**segundo**
1 año	1	365.25	8.766×10^{3}	5.259×10^{5}	3.156×10^{7}
1 día	2.738×10^{-3}	1	24	1440	8.640×10^{4}
1 hora	1.141×10^{-4}	4.167×10^{-2}	1	60	3600
1 minuto	1.901×10^{-6}	6.944×10^{-4}	1.667×10^{-2}	1	60
1 segundo	3.169×10^{-8}	1.157×10^{-5}	2.778×10^{-4}	1.667×10^{-2}	1

Las siguientes relaciones constituyen “factores de conversión de unidades”:

1 hr = 60 min	1 Kg = 1000 gr	1 m = 100 cm	1cal = 252 BTU	1atm = 0.103 MPa
f = 60 (min/hr)	f = 1000 (gr/Kg)	f = 100 (cm/m)	f = 252 (BTU/cal)	f = 0.103 (MPa/atm)
1 min = 60 seg	1 lb = 454 gr	1 pie = 12 pulg	1 cal = 40 atm L	1 bar = 100 kPa
f = 60 (seg/min)	f = 0.454 (Kg/lb)	f = 12 (pulg/pie)	f = 40 (atm L/cal)	f = 100 (kPa/bar)

PROBLEMAS RESUELTOS

- **Problema 1:** Convertir 1000 (cal/min) en (BTU/seg)
  x = 1000 (cal/min) factores: 252 cal/BTU y 60 seg/min
  x = 1000 (cal/min) * 1/ (252 (cal/BTU) * 60 (seg/min)) = 0.0661BTU/seg
- **Problema 2:** Convertir 8 (atm L) en (cal)
  Factores de conversión 41.3 atm.cm^3/cal y 1000 cm^3/L
  x = 8 (atm L) * 1000 (cm^3/L) * 1/(41.3 (atm * cm^3)/cal) = 8000/41.3= 193.7 (cal)
- **Problema 3:** Convertir 1518 (psia m^3/mol ^{o}C) en (cal/ mol K)
  $1,518\frac{psia.m^3}{mol.gr.^\circ C}.\frac{1}{14,696}\frac{atm}{psia}.1*10^6\frac{cm^3}{m^3}.\frac{1}{41,3}\frac{cal}{atm.cm^3} = 2501,05\frac{cal}{mol.gr.^\circ K}$
  (Note que $\Delta^\circ C = \Delta K$)
- **Problema 4:** Convertir 132 (BTU/mol lb ^{o}F) en (cal/ mol K)
  $132\frac{BTU}{mol-lb.^\circ F}.252,16\frac{cal}{BTU}.\frac{1}{453,59}\frac{lb}{gr}.1,8\frac{^\circ F}{^\circ K} = 132,09\frac{cal}{molgr.^\circ K}$

1.2.4. UNIDADES DE TEMPERATURA

La temperatura es la propiedad que nos indica si dos sistemas están en equilibrio térmico o no. La temperatura es una función de estado, es decir, no depende del camino seguido en un proceso. La temperatura es una propiedad intensiva, es decir, no depende del tamaño del sistema.

Existen diversas escalas de temperatura: **Celsius** (^{o}C), **Kelvin** (K), **Fahrenheit** (^{o}F) y **Rankine** (R) y están relacionadas por las expresiones siguientes:

Para convertir de Celsius a Fahrenheit:	^{o}F = 1.8 ^{o}C + 32
Para convertir de Celsius a Kelvin, sume 273.15:	K = ^{o}C + 273.15
Para convertir de Fahrenheit a Rankine, sume 460:	R = ^{o}F + 460

Note sin embargo que: $\Delta(1K) = \Delta(1^oC)$ y $\Delta(1R) = \Delta(1^oF)$

Termómetro y escala de temperatura

Un termómetro es un instrumento que mide la temperatura de un sistema en forma cuantitativa. Una forma fácil de hacerlo es encontrando una sustancia que tenga una propiedad que cambie de manera regular con la temperatura. Por ejemplo, el mercurio es líquido dentro del rango de temperaturas de -38.9^{o}C a 356.7^{o}C (la escala Celsius se discute más adelante). Como un líquido, el mercurio se expande cuando se calienta. La manera más "regular" para relacionar, la temperatura con una propiedad del líquido es de forma lineal: t(x)=ax + b. En esta ecuación, t es la temperatura y cambia con la propiedad x de la sustancia. Las constantes a y b dependen de la sustancia usada, y se evalúa a partir de puntos arbitrariamente definidos.

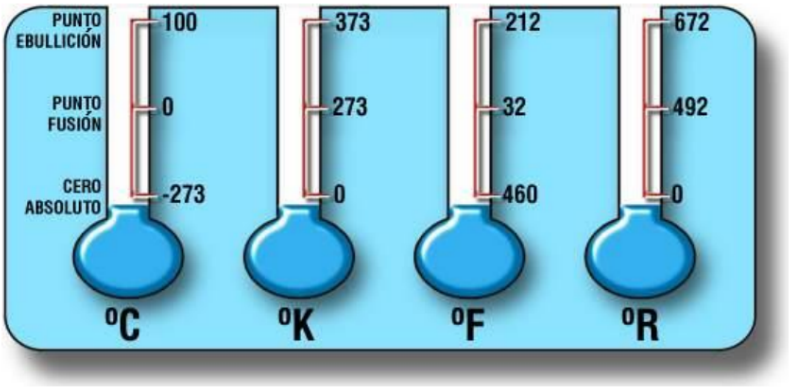


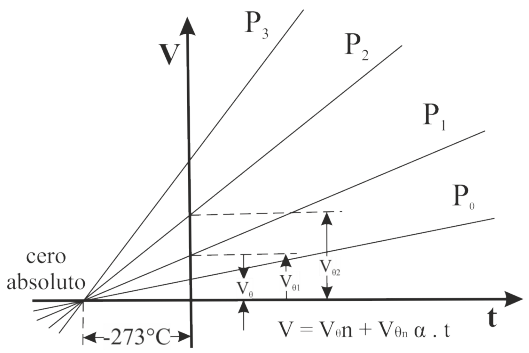
Figura 1.1: Escalas Termométricas

Por ejemplo, si se asigna al 32° el punto congelamiento del agua y 212° al punto de ebullición, aparece una escala ya conocida denominada Fahrenheit (^{o}F). (Gabriel Fahrenheit, físico alemán 1686-1736). Si se asigna al 0 (cero) al punto congelamiento del agua y 100 al punto de ebullición, aparece una escala ya conocida denominada Celsius (^{o}C) (Anders Celsius , físico y astrónomo sueco,1730-1744).

El punto fijo que se toma no es el punto de fusión del agua, sino el punto triple del agua (0,01 ^{o}C y 0,611 kPa), en el que coexisten en equilibrio hielo, agua líquida y vapor.

Temperatura absoluta

Si se grafica V vs t o bien P vs t, para distintos gases se observa que, la temperatura más baja posible es -273.15 en la escala Celsius y -460 en la escala Fahrenheit.



Si se asigna "0" a estos puntos surge la escala absoluta.
-273.15°C = 0 K
Si el mismo experimento se hace con la temperatura en Farenheit, el punto es -460 °F, y Rankine le asignó el valor "cero" (William John Macquorn Rankine, ingeniero y físico británico 1820-1872).
-460 °F = 0 R
0 K = 0 R
Δ (1 K) = Δ (1.8 R)

1.2.5. GASES IDEALES

Ley de Boyle: A masa (m) y temperatura constantes, el volumen (V) de un gas es inversamente proporcional a su presión. $P_1V_1 = P_2V_2$

Ley de Charles: A masa y presión constantes, el volumen de un gas es directamente proporcional a su temperatura: $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$

Ley de Gay Lussac: A masa y volumen constantes, la presión de un gas es directamente proporcional a su temperatura. $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$

La **ecuación general de los gases** ideales combina las leyes anteriores y se expresa como: PV = nRT, o bien como P$\bar{V}$ = RT donde $\bar{V} = \frac{V}{n}$ y se denomina volumen molar.

En estas expresiones, n es el número de moles y se puede obtener como $n = \frac{m}{M} = \frac{N}{N_a}$

Donde M es la masa molar, N es el número de partículas y N_A es el número de Avogadro 6.02214×10^{23} partículas/mol.

R = 8.31451 J K^{-1} mol^{-1}

R = 8.2 $\times$ 10^{-2} L atm $K^{-1}mol^{-1}$

R = 8.31451 $\times$ 10^{-2}L bar K^{-1} mol^{-1}

R = 8.314 Pa m^3 $K^{-1}mol^{-1}$

R = 62.364 L Torr $K^{-1}mol^{-1}$

R = 1.98722 cal $K^{-1}mol^{-1}$

MEZCLAS DE GASES IDEALES

Ley de Dalton: A temperatura constante la presión total de una mezcla de gases es igual a la suma de las presiones parciales de los gases que la constituyen:

$$P_{total} = P_1 + P_2 + ... = \frac{n_1RT}{V_{total}} + \frac{n_2RT}{V_{total}} + ... = \frac{(n_1 + n_2 + ...)RT}{V_{total}} = \frac{n_{total}RT}{V_{total}}$$

$$\text{Donde: } n_{total} = \frac{m_{total}}{m_{mezcla}} = \frac{(m_1 + m_2 + ...)}{m_{mezcla}}$$

y de aquí se puede deducir que la masa molar de una mezcla de gases se puede obtener con la ecuación:

$$M_{mezcla} = x_1M_1 + x_2M_2 + ... = \sum x_im_i$$

Por lo cual vemos que la masa molar de una mezcla de gases depende de la composición de la misma. **Ley de difusión de Graham**. A temperatura constante, la velocidad de difusión de un gas es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su masa molar.

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{\sqrt{M_2}}{\sqrt{M_1}}$$

PROBLEMAS RESUELTOS

- **Problema 1:** Un termómetro Celsius marca 50 ^{o}C ¿cuánto marcaría un termómetro Farenheit?

  Solución

  (^{o}F) = 1.8 (^{o}C) + 32 $\Rightarrow$ (^{o}F) = 1.8*50 + 32 = 122 $\Rightarrow$ T = 122 ^{o}F

- **Problema 2:** ¿A qué temperatura dan la misma lectura un termómetro en escala Celsius y un termómetro en escala Fahrenheit?

  Solución:

  t/^{o}F = 32 + (9/5)t/^{o}C

  t/^{o}F = t/^{o}C

  t/^{o}C = 32 + (9/5)t/^{o}C

  t/^{o}C - (9/5)t/^{o}C = 32

  -(4/5)t/^{o}C = 32

  t/^{o}C = -40

  t= -40°C

- **Problema 3:** Se tienen 2 moles de hidrógeno a 520°C y 2 atm. ¿A qué temperatura deberá enfriarse este sistema para que ejerza una presión de 0.5 atm manteniendo el volumen constante?

  Solución:

  $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$

  $T_2 = \frac{P_2 T_1}{P_1} = \frac{0.5\ atm\ 325.15K}{2\ atm} = 81.29K$

- **Problema 4:** Una muestra de gas ideal se encuentra originalmente a 100 K. ¿Cuál será la temperatura final de este gas si su volumen se triplica y su presión se duplica?

  Solución:

  $V_2 = 3V_1$

  $P_2 = 2P_1$

  $\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$

  $T_2 = \frac{P_2 V_2 T_2}{P_1 V_1} = \frac{2P_1 3V_1 T_1}{P_1 V_1} = 6T_1$

  $T_2 = 600K$

- **Problema 5:** Cierto tanque de gas estacionario tiene una capacidad de 500 L. considerando que el gas es solamente butano, C_4H_{10}, calcular la masa de gas que contiene este tanque si a 250°C el gas ejerce una presión de 20 atm.

Solución:

$$PV = nRT = \frac{m}{M}RT$$

$$m = \frac{PVM}{RT} = \frac{20\ atm\ 500\ L\ 58 g/mol}{298.15\ k\ 0.082\ \frac{atmL}{Kmol}} = 23,723.5g = 23.7235kg$$

1.2.6. UNIDADES DE PRESIÓN

La presión se define como la fuerza por unidad de superficie ejercida por un fluido sobre una superficie real o imaginaria, en dirección normal a la superficie. En unidades SI la presión se mide en newton por metro cuadrado (N/m^2), unidad denominada Pascal (Pa).

P = F/A

En relación con la presión atmosférica, que es una referencia habitual, el N/m^2 resulta una unidad demasiado pequeña, por lo que se suele utilizar el bar, donde:

1 bar = 10^5N/m^2 = 0,1 MPa = 100 kPa

1 atm = 101 325 N/m^2 = 1,01325 bar = 101,325 kPa

Presión en gases

En el caso de un gas, la presión es el resultado de los impactos de las moléculas del gas contra la pared (Figura 1.2). Como las moléculas se mueven en todas las direcciones, la presión es la misma con independencia de la orientación de la pared donde se mide: la presión es una magnitud escalar.

Para gases formados por mezcla de varias sustancias, la presión parcial es la contribución de cada gas a la presión total de la mezcla. Puede considerarse que la presión parcial de un gas es el resultado de las colisiones de las moléculas de ese gas contra la pared del recipiente.

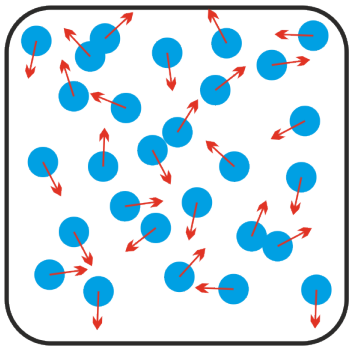


Figura 1.2: La presión de los gases es el resultado de las colisiones de las moléculas con la pared: depende del número de colisiones y de la componente normal de la fuerza de cada colisión, por unidad de superficie. En ausencia de efectos gravitatorios, la presión es la misma en todas las superficies, con independencia de su orientación.

Presión en líquidos

En el caso de líquidos, la presión se debe a la fuerza de la gravedad (peso) del líquido: se denomina presión hidrostática. Atendiendo a la Figura 1.3, la presión en el punto 2 será la presión atmosférica P_0 más la fuerza ejercida por el peso de la columna de líquido, por unidad de área:

$$P_2 = P_0 + \frac{F}{A} = P_0 + \frac{mg}{A} = P_0 + \frac{\rho V g}{A} = P_0 + \rho g L$$

El término ρgL es el valor de la presión hidrostática del líquido.

Presión manométrica o relativa

Conviene distinguir entre presión absoluta y presión manométrica. En la Figura 1.3 se representa un manómetro para la medida de presiones. La medida de la presión se basa en la igualdad de presión para puntos situados a la misma altura (P_1 = P_2, vasos comunicantes).

La presión manométrica del gas es ρgL, siendo ρ la densidad del líquido del manómetro, g la aceleración de la gravedad y L la altura manométrica. L puede ser negativo, luego la presión manométrica puede ser negativa o de Vacío. La presión absoluta del gas es la manométrica más la atmosférica:

$$P_{man} = \rho g L$$
$$P = P_0 + P_{man} > 0$$

Note que la presión que se usa en la mayoría de los cálculos en ingeniería y ciencias es la **presión absoluta** y como la que usualmente se mide es la **manométrica**, *¡no olvide sumarle la presión atmosférica!*

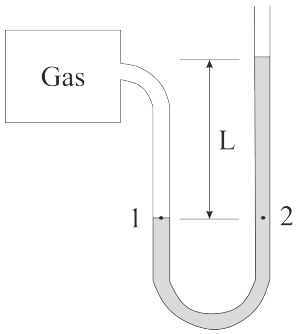


Figura 1.3: Manómetro para la medida de presiones. La medida se basa en que los puntos 1 y 2 están a la misma presión: $P_{gas} = P_1 = P_2 = P_{atm} + \rho g L$.

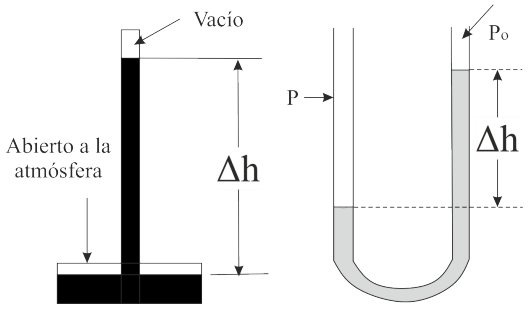
DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN DE PRESIÓN.

Hay medidores de presión cuya medida es la presión manométrica (presión relativa), y otros miden la presión absoluta.

Presión Barométrica: Presión de la atmósfera se mide con un instrumento llamado barómetro.

Presión Relativa: Diferencia entre la presión absoluta y la presión barométrica. Se conoce también como presión manométrica, se mide con un manómetro.

P (Relativa) = P (abs) - P(barom)



H[m]	P[mm]	T[°C]
8000	266.9	-37.0
6000	353.8	-24.0
5000	405.1	-17.5
4000	462.3	-11.0
3000	525.8	-4.5
2000	596.2	2.0
1500	634.2	5.2
1000	674.1	8.5
500	716.0	11.8
0	760.0	15.0

PROBLEMAS RESUELTOS

- **Problema 1:** Un estanque de 0.82 m^3 está diseñado para resistir una presión de 10 atm. El estanque contiene 4.2 kg de nitrógeno, está inicialmente a una temperatura de 22°C y es calentado lentamente. ¿A qué temperatura se romperá el estanque?

  Solución

  $PV = nRT$

$$T = \frac{PV}{nR}$$

$$n = \frac{m}{M} = \frac{4200gr}{28g/mol} = 150mol()$$

$$V = 0.82m^3.10^6cm^3/m^3 = 0.82 \times 10^6 cm^3$$

Considerando el valor de la constante R=82.057 (cm^3*atm/mol*K), se obtiene:

$$T = \frac{10\ atm.0.82 \times 10^6\ cm^3}{150\ mol.82.057\ cm^3 * \frac{atm}{mol} * K} = 666.203K = 393.054^oC$$

T=393 ^{o}C $\Rightarrow$ El estanque se romperá cuando la temperatura sobrepase los 393 ^{o}C.

- **Problema 2:** Expresar la presión atmosférica estándar en unidades imperiales (psi, pounds per square inch, libras por pulgada cuadrada).

  Solución

  Sabemos que 1 atm = 101 325 N/m^2; 1 in = 2,54 cm; 1 lb = 0,4536 kg; 1 kg-f = 9,806 N:

$$1\ atm = 101325N/m^2.\frac{1\ Kg-f}{9.806N}.\frac{1\ lb}{0.4536\ Kg}.\left(\frac{0.0254\ m}{1\ inch}\right)^2 = 14.69\ lb - \frac{f}{in^2} = 14.69\ PSI$$

- **Problema 3:** Un recipiente con gas tiene un manómetro como el de la Figura 1.3, con mercurio. La lectura del manómetro es L=23 cm. Calcular la presión del gas. ¿Cuál sería la altura manométrica si el líquido fuera agua?

  Dato: densidad del mercurio, ρ=13600 kg/m^3. Presión atmosférica, $P_0 = 1$ atm.

  Solución

  Según la ecuación [1.11], $P = P_0 + \rho gL = 101325\ [N/m^2] + 13600\ [kg/m^3].\ 9,806\ [m/s^2].0,23\ [m] = 131998\ [N/m^2].(1\ [kPa]/10^3\ [N/m^2]) = 132,00\ kPa$

  Si el líquido manométrico es agua, la altura manométrica será:

  $L = (P - P_0)/(\rho g) = (131998 - 101325)/(1000 \cdot 9,806) = 3,13\ m$

  Si se ponen todas las magnitudes de la expresión en unidades SI, el resultado es en unidades SI. Nótese que la densidad del agua es 1000 kg/m^3 (¡no 1 g/cm^3!).

1.2.7. UNIDADES DE DENSIDAD

La densidad, es una de las propiedades más características de cada sustancia.

Es la masa de la unidad de volumen.

Se obtiene dividiendo una masa conocida de la sustancia entre el volumen que ocupa.

Llamando m a la masa, y v al volumen, la densidad, d, vale:

$$d = m/v$$

En el Sistema Internacional la unidad de densidad es el kg (Unidad de masa) entre el m^3 (unidad de volumen). Es decir, el kg/m^3.

Sin embargo es muy frecuente expresar la densidad en g/cm^3 (Unidad cegesimal).

PESO ESPECÍFICO

El peso específico de una sustancia es el peso de la unidad de volumen.

Se obtiene dividiendo un peso conocido de la sustancia entre el volumen que ocupa.

Llamando p al peso y v al volumen, el peso específico, P_c, vale:

$$P_e = p/v$$

Unidades

Sistema Internacional.

La unidad de peso específico es el N/m^3; es decir, el newton (Unidad de fuerza y, por tanto, de peso) entre el m^3 (Unidad de volumen).

Sistema Técnico.

Se emplean el kp/m^3 y el kp/dm^3.

Sistema Cegesimal. Se utilizaría la dina/cm^3, que corresponde a la unidad del sistema internacional.

RELACIÓN ENTRE EL PESO ESPECÍFICO Y LA DENSIDAD

El peso específico y la densidad son evidentemente magnitudes distintas como se ha podido comparar a través de las definiciones que se dieron en la parte de arriba, pero entre ellas hay una íntima relación, que se va a describir a continuación.

Se recordará que el peso de un cuerpo es igual a su masa por la aceleración de la gravedad:

$$P = m.g$$

Pues bien, sustituyendo esta expresión en la definición del peso específico y recordando que la densidad es la razón m/V, queda:

$$P_e = p/v = m.g/V = m/V.g = d.g$$

El peso específico de una sustancia es igual a su densidad por la aceleración de la gravedad.

Como hemos mencionado las unidades, la unidad clásica de densidad (g/cm^3) tiene la ventaja de ser un número pequeño y fácil de utilizar.

Lo mismo puede decirse del kp/cm^3 como unidad de peso específico, con la ventaja de que numéricamente, coincide la densidad expresada en g/cm^3 con el peso específico expresado en kp/dm^3.

En la industria petrolera el peso específico de los derivados del petróleo se reportan generalmente en términos de la escala hidrómetro graduado en ^{o}API. La ecuación para los ^{o}API son las siguientes:

$$^oAPI = \frac{141.5}{p.e.60^o/60^o} - 131.5$$

La escala Baumé es una escala usada en la medida de las concentraciones de ciertas soluciones (jarabes, ácidos). Fue creada por el químico y farmacéutico francés Antoine Baumé (1728-1804) en 1768 cuando construyó su aerómetro. Cada elemento de la división de la escalera Baumé se denomina grado Baumé y se simboliza por ^{o}B o ^{o}Bé.

Para líquidos más densos que el agua ($\rho > 1$ g/cm^3):

$$^{o}Bé = 145 - 145/\rho$$
$$\rho = 145/(145 - {}^{o}Bé)$$

Para líquidos menos densos que el agua ($\rho < 1$ g/cm^3):

$$^{o}Bé = 140/\rho - 130$$
$$\rho = 140/(130 - {}^{o}Bé)$$

1.2.8. CONCENTRACIONES MÁSICAS

Existen modos muy diversos de expresar la concentración de las disoluciones. Uno de ellos es la denominada concentración másica (C), que se define como la masa de soluto presente por unidad de volumen de disolución (cociente entre masa de soluto y volumen de disolución).

Para una mezcla de varias sustancias: A, B, C,... n_A : moles de A, n_B : moles de B, n_C: moles de C... o m_A : masa de A, m_B : masa de B, m_C: masa de C...

La cantidad de moles de A se obtiene:

$$n_A(moles) = \frac{masa\ de\ sustancias\ A\ (g)}{peso\ molecular\ de\ sustancias\ A\left(\frac{g}{mol}\right)}$$
$$n_A = \frac{m_A}{PM_A}$$

FRACCIÓN MOLAR: $Y_A = \dfrac{n_A}{n_A + n_B + n_C + ...}$

FRACCIÓN EN PESO: $X_A = \dfrac{m_A}{m_A + m_B + m_C + ...}$

FRACCIÓN EN VOLUMEN

Consideremos una mezcla de varios gases: A, B, C, ... En el caso de gases ideales, la fracción en volumen es igual al a fracción molar.

VA: volumen del componente A puro, en las condiciones de la mezcla.

VT: volumen total de la mezcla

$$v_A = \frac{V_A}{V_t}$$

COMPOSICIÓN EN BASE LIBRE DE UN COMPONENTE

Es la razón de masa de un componente respecto a la masa de los componentes restantes.

Por ejemplo, el contenido de humedad del aire se expresa en base libre de agua o “base seca”.

$$Humedad\ Absoluta = \frac{masa\ de\ agua}{masa\ de\ aire\ seco}$$

Ventaja: en operaciones de secado o humidificación de aire, la cantidad de agua en el aire (humedad) varía, pero la cantidad de aire seco no varía.

OTRAS FORMAS DE CUANTIFICAR LA COMPOSICIÓN

MOLARIDAD $C_A = \dfrac{moles\ de\ A}{litro\ de\ solución} = \dfrac{n_A}{V\ (litros)}$

MOLARIDAD $N_A = \dfrac{moles\ de\ A}{1000g\ de\ solvente}$

PROBLEMAS RESUELTOS

El gas natural de un pozo tiene la siguiente composición molar: 60 % de metano (CH_4), 16 % de etano (C_2H_6), 10 % de propano (C_3H_8) y 14 % de butano (C_4H_{10}). Calcule:

a) Composición en fracción molar.

b) Composición en porcentaje en peso.

c) Volumen que ocupan 100 kilogramos de gas a 21 ºC y 0,97 atmósferas de presión.

d) Densidad del gas a 21 ºC y 0,97 atmósferas, en gramos/litro.

Solución:

En 100 moles de gas hay:

60 moles de metano

16 moles de etano

10 moles de propano

14 moles de butano

a) **Fracciones molares:**

$$Y_{metano} = \frac{600\ moles\ metano}{100\ moles\ totales} = 0.6$$

$$Y_{etano} = \frac{16\ moles\ etano}{100\ moles\ totales} = 0.16$$

$$Y_{propano} = \frac{10\ moles\ propano}{100\ moles\ totales} = 0.10$$

$$Y_{butano} = \frac{14\ moles\ butano}{100\ moles\ totales} = 0.14$$

SUMA = 1.00

b) **Composición en Peso**

- P.M. Metano (CH4) = P.A.(C) + 4 P.A.(H) = 12 + 4 = 16 g/mol
- P.M. etano (C2H6) = 2 P.A.(C) + 6 P.A.(H) = 2x12 +6 = 30 g/mol
- P.M. propano (C3H8) = 3 P.A.(C) +8 P.A.(H) = 3x12 +8 = 44 g/mol
- P.M. butano (C4H10) = 4 P.A.(C) + 10 P.A.(H) = 4x12 +10 = 58 g/mol

Multiplicando por los pesos moleculares, se obtiene las cantidades en masa:

$$60\ (moles) x 16 \frac{g}{mol} = 960\ gramos\ de\ metano$$

$$16\ (moles) x 30 \frac{g}{mol} = 480\ gramos\ de\ etano$$
$$10\ (moles) x 44 \frac{g}{mol} = 440\ gramos\ de\ propano$$
$$14\ (moles) x 48 \frac{g}{mol} = 812\ gramos\ de\ butano$$

Masa Total = 2692 GRAMOS

$$\%\ en\ peso\ de\ cada\ componente\ =\ \frac{masa\ componente}{masa\ total} \times 100$$

$\frac{960(g)}{2692(g)} \times 100 = 35.66\,\%Metano$ Fracción en peso 0.36

$\frac{480(g)}{2692(g)} \times 100 = 17.83\,\%Metano$ Fracción en peso 0.18

$\frac{440(g)}{2692(g)} \times 100 = 16.34\,\%Metano$ Fracción en peso 0.16

$\frac{812(g)}{2692(g)} \times 100 = 30.16\,\%Metano$ Fracción en peso 0.30

Suma = 100 % Suma = 1.00

c) Para calcular el volumen se necesita una ecuación de estado. Como la presión es cercana a la presión atmosférica, y la temperatura es baja, usaremos la ecuación de gas ideal:

P V = n R T

P = presión P = 0,97 atmósferas

R = constante universal de los gases R = 0,082 litros atmósfera/mol K

T = temperatura absoluta T = 21 + 273,15 = 294,15 K (grados Kelvin)

V = volumen

n = número de moles n = 100 kg/P.M. medio = 100.000 g/P.M. medio

Peso Molecular medio de una mezcla de m gases = $\sum_{i=1}^{m} P.M._i \times$ fracción molar$_i$

Peso Molecular medio de una mezcla de m gases = 16 x 0.6 + 30 x 0.16 + 44 x 0.10 + 58 x 0.14 = 26.92 *g/mol*

$$n = \frac{100000\ (g)}{26.92\ (\frac{g}{mol})} = 3714.7\ moles$$

El volumen es:

$$V = \frac{nRT}{P} = \frac{3714.7\ (moles) 0.082 \left(litro \frac{atm}{mol} K \right) 294.15 (K)}{0.97 (atm)} = 92370.8\ litros$$

d) Densidad de gas (ρ)

$$\rho = \frac{masa}{volumen}$$
$$\rho = \frac{100\ kilogramos}{92370.8\ litros} = \frac{100000\ gramos}{92370.8\ litros} = 1.08\ gramos/litro$$

1.3. ANÁLISIS DIMENSIONAL

El análisis dimensional es un método para verificar ecuaciones y planificar experimentos sistemáticos. A partir del análisis dimensional se obtienen una serie de grupos a dimensionales, que van a permitir utilizar los resultados experimentales obtenidos en condiciones limitadas, a situaciones en que se tengan diferentes dimensiones geométricas, cinemáticas y dinámicas; y muchas veces en casos en que las propiedades del fluido y del flujo son distintas de las que se tuvieron durante los experimentos.

MAGNITUD	DIMENSIONES
Longitud (l)	[l]=L
Superficie (A)	[A] = L2
Volumen (V)	[V]= L3
Momento de inercia (I)	[I]=L4
Velocidad (v)	[v]=LT-1
Aceleración (a)	[a] = LT-2
Velocidad angular (ω)	[ω]=T-1
Aceleración angular (α)	[α]=T-2
Densidad (ρ)	[ρ]=ML-3
Caudal volumétrico (Q)	[Q]=L3T-1
Caudal másico ($\dot{m}$)	[$\dot{m}$] = MT-1

La importancia del análisis dimensional viene dada por la dificultad del establecimiento de ecuaciones en determinados flujos, además de la dificultad de su resolución, siendo imposible obtener relaciones empíricas...

Es importante considerar que si en un experimento, en un modelo (a escala geométrica del prototipo), se pueden obtener las escalas cinemáticas (relaciones de velocidades) y las escalas dinámicas (relaciones de fuerzas), los resultados a dimensionales que se obtienen para el modelo son también válidos para el prototipo.

En toda ecuación física, cada término deberá tener las mismas dimensiones: la ecuación debe ser dimensionalmente homogénea; además la división de todos los términos por uno cualquiera de ellos, haría la ecuación a dimensional, y cada cociente sería un grupo a dimensional.

Las dimensiones de las magnitudes empleadas normalmente en Mecánica de Fluidos, incluyen sólo una o más de las siguientes 4 dimensiones: M (masa), L (longitud), T(tiempo) y θ (temperatura):

A continuación mostramos unas tablas con algunas magnitudes y sus ecuaciones dimensionales.

1.4. TEOREMA PI DE BUCKINGHAM

El teorema $\prod$ de BUCKINGHAM establece que en un problema físico en que se tengan "n" variables que incluyan "m" dimensiones distintas; las variables se pueden agrupar en "n-m" grupos a dimensionales independientes.

MAGNITUD	DIMENSIONES
Gravedad (g)	[g]= LT^{-2}
Fuerza (F)	[F] = MLT^{-2}
Presión (p). tensión (τ)	[p] [τ]=$ML^{-1}T^{-2}$
Energía (E). Entalpia(H)	[E] = ML^2T^{-2}
Entropía (S)	[S] = $ML^2T^{-2}\theta^{-1}$
Calor específico (c)	[c] = $L^2T^{-2}\theta^{-1}$
Conductividad térmica (κ)	[κ] = $MLT^{-3}\theta^{-1}$
Viscosidad absoluta (μ)	[μ] = $ML^{-1}T^{-1}$
Viscosidad dinámica(υ)	[υ]=L^2T^{-1}
Tensión superficial(σ)	[σ]=MT^{-2}
Compresibilidad (K)	[K] = $ML^{-1}T^{-2}$

Siendo $V_1, V_2, ..., V_n$ las variables que intervienen en el problema, se debe tener una función que las relacione: f($V_1, V_2, ..., V_n$) = 0; si $G_1, G_2, ..., G_{n-m}$, representan los grupos a dimensionales que representan a las variables $V_1, V_2, ..., V_n$; el teorema de BUCKINGHAM también establece que existe una función de la forma: $g(G_1, G_2, ..., G_{n-m}) = 0$.

El método para determinar, los grupos a dimensionales $(G_i, i = 1, ..., n - m)$; consiste en la selección de "m" de las "n" variables, con diferen-

tes dimensiones, de manera que contengan entre todas las "m" dimensiones, y emplearlas como variables repetitivas, formando cada uno de los "n-m" grupos a dimensionales a partir de la siguiente expresión genérica:

$$G_i = v_i . \prod_{j=m-n+1}^{j=n} v_j^{a_{ij}} \qquad i = 1, ..., m-n$$

A los grupos a dimensionales, se les suele denominar parámetros a dimensionales Pi de BUCKINGHAM, al ser su expresión un producto a dimensional (símbolo de producto = $\prod$). Los exponentes "a_{ij}" se determinan por la condición de que cada grupo resulte a dimensional; se sustituyen las dimensiones de las variables por ellas mismas y los exponentes de M,L,T,ϑ, ..., se igualan a cero (adimensionalidad del parámetro).

Consideremos como ejemplo, la fuerza de arrastre en flujo externo, de un fluido sobre un determinado objeto. Se tiene que la fuerza de arrastre (F_D) depende de la viscosidad absoluta del fluido (μ), la densidad del fluido (ρ), la velocidad relativa entre fluido y objeto (v) y de una longitud característica del objeto (L): $F_D = F_D(\mu, \rho, v, L)$

Las cinco variables: F_D, μ, ρ, v, y L, aportan 3 dimensiones distintas: M, L y T; con lo que por el teorema de BUCKINGAM se tendrán 5-3=2 grupos a dimensionales. Siguiendo las siguientes reglas:

-) Las variables repetitivas (exponentes iníciales distintos de 1) deben aportar todas las dimensiones.

-) Las variables no repetitivas (exponentes iguales a 1), son las inherentes al problema1.

Las variables inherentes son la fuerza de arrastre (F_D) y la viscosidad (μ), y el resto (longitud, velocidad y densidad) son las repetitivas. Con lo que se tienen los siguientes grupos a dimensionales:

$G_1 = F_D L^a v^b \rho^c$

$G_2 = \mu L^d v^e \rho^f$

Los exponentes de cada grupo se determinan a partir de sus ecuaciones dimensiónales:

$[G_1] = [F_D][L^a][V^b][\rho^c] \qquad M^0L^0T^0 = (MLT^{-2})(L)^a(LT^{-1})^b(ML^{-3})^c = M^{1+c}L^{1+a+b-3c}T^{-2-b}$

Exponentes de masa (M): 0 = 1 + c

Exponentes de longitud (L): 0 = 1+a+b-3c

Exponentes de tiempo (T): 0 = -2-b

Resultados: a = -2; b = -2; c = -1

Con lo que el grupo a dimensional G_1 es: $G_1 = F_D L^{-2} v^{-2} \rho^{-1} = F_D / L^2 V^2 \rho$; que da lugar al denominado coeficiente de arrastre C_D ; en donde se introduce el factor (1/2) para tener la presión dinámica, y en vez del término L^2, se tiene una superficie característica (A).

$$C_D = \frac{F_D}{1/2 \rho v^2 A}$$

De forma análoga se obtiene el segundo parámetro a dimensional: $G_2 = \mu L^{-1} v^{-1} \rho^{-1}$; que da lugar al número de REYNOLDS Re:

$$Re = \frac{vL\rho}{\mu}$$

Con lo que se puede pasar de la ecuación dimensional de la fuerza de arrastre dependiendo de 4 variables: $F_D = F_D(\mu, \rho, \upsilon, L)$ a la ecuación a dimensional del coeficiente de arrastre dependiente, dependiendo de una sola variable a dimensional: $C_D = C_D(Re)$.

1.5. SISTEMA Y VOLUMEN DE CONTROL

Sistema es una porción del universo objeto de estudio. Un sistema es una región restringida, no necesariamente de volumen constante, ni fija en el espacio, en donde se puede estudiar la transferencia y transmisión de masa y energía. Se debe definir cuidadosamente.

Todo sistema queda limitado por un contorno, paredes, fronteras o límites del sistema, que pueden ser reales o imaginarios. También se llaman superficie de control. La frontera separa el sistema del resto del universo; esta frontera puede ser material o no. A través de la frontera suceden los intercambios de trabajo, calor o materia entre el sistema y su entorno.

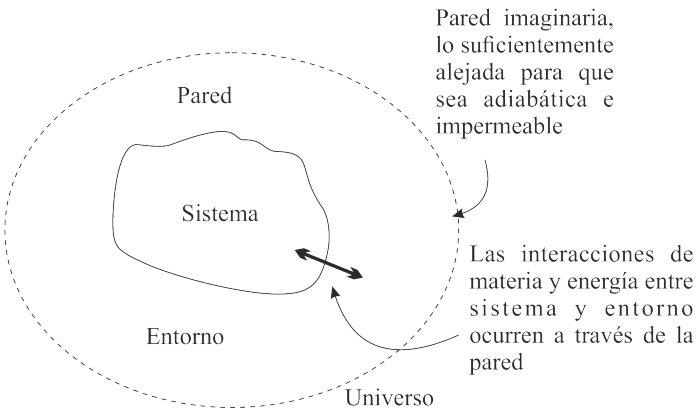


Figura 1.4: Conceptos de sistema, entorno, pared y universo.

El medio rodeante o entorno es la parte del universo próxima al sistema y que se ve afectada en alguna medida por los procesos que ocurren en el sistema. El universo es todo lo accesible a nuestro experimento. Para el termodinámico, el universo está formado por el sistema examinado y su entorno con el que es capaz de interaccionar en su evolución:

$$Universo = sistema \ + \ entorno \tag{1.1}$$

Por convenio, el universo es un sistema aislado.

El Universo de la cosmología (con U mayúscula) no tiene por qué coincidir con el universo de la Termodinámica.

Tipos de sistemas

Los sistemas se clasifican según cómo sea la pared que los separa del entorno. En función de sus paredes o límites, un sistema puede ser:

- **Cerrado:** es una región de masa constante; se denomina masa de control. A través de sus límites sólo se permite la transferencia de energía, pero no de materia. La pared que rodea al sistema es impermeable.
- **Abierto:** en un sistema abierto es posible la transferencia de masa y de energía a través de sus límites; la masa contenida en él no es necesariamente constante. Se denomina volumen de control; la superficie limitante, que por lo menos en parte debe ser permeable o imaginaria, se llama superficie de control. Una pared también puede ser semipermeable, si permite el paso sólo de algunas sustancias.
- **Rígido:** no permiten el cambio de volumen.
- **Adiabático:** una pared adiabática es aquella que sólo permite interacciones en forma de trabajo entre el sistema y su entorno. Una pared diatérmica permite interacciones de energía de otras formas que no son trabajo.

- **Aislado:** un sistema aislado no puede transferir materia ni energía con su entorno. El universo en su totalidad se puede considerar como un sistema aislado.

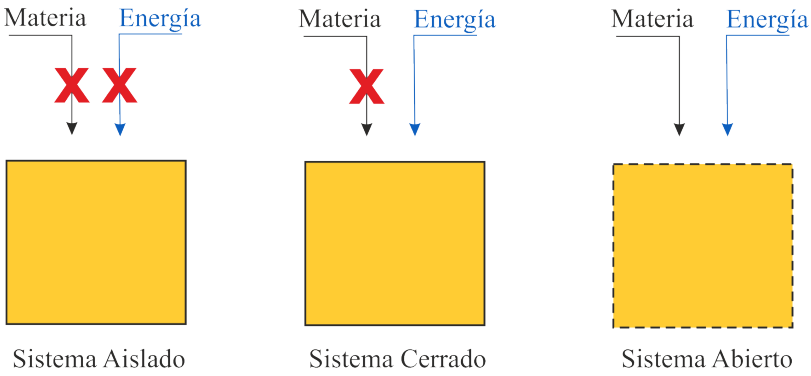


Figura 1.5: Tipos de sistemas.

En la Fig. 1.6 se muestran algunos ejemplos de diferentes ST: a) el gas contenido dentro de un pistón tiene límites reales y móviles. b) un fluido dentro de un recipiente cerrado tiene límites reales y fijos. c) en los casos que no exista flujo de materia entre el ST y el exterior tenemos un "sistema cerrado" d) en un sistema puede haber flujo de materia desde o hacia el sistema (o en ambos sentidos)... tenemos entonces un "sistema abierto".

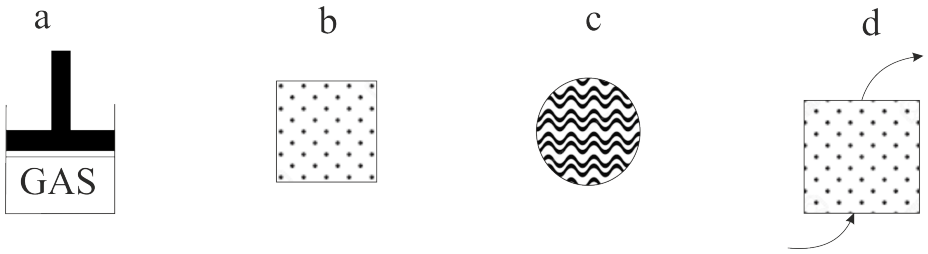


Figura 1.6: Ejemplos de diferentes ST.

Cómo definir el tipo de sistema

Puesto que la diferencia fundamental entre los sistemas cerrados y abiertos es que los cerrados funcionan a masa constante, sin flujo de masa, mientras los abiertos funcionan a volumen constante, con flujo de masa, la mejor manera de definir al sistema como perteneciente a una u otra clase es con la frontera. Supongamos que hay que analizar un caso en el que solo hay un flujo de masa desde un recipiente a otro, y un flujo de energía desde o hacia el fluido que se mueve. Realmente no importa qué tipo de recipiente tenemos en la práctica. Para nuestros fines, un recipiente es una superficie total o parcialmente cerrada sobre sí misma de tal modo que contiene un fluido. Desde esta definición una taza, un tanque y un sifón de soda son recipientes. Ahora tengo que analizar el fenómeno que se produce como consecuencia de ese flujo de masa y de energía que experimenta el fluido, y de cualquier transformación que sufre el fluido eventualmente, si se produjera.

La pregunta más importante es la siguiente. ¿Cómo me conviene definir al sistema? Tengo dos opciones. O bien considero el conjunto de ambos recipientes, con lo que resulta un sistema cerrado, o bien analizo uno de ellos, con lo que resulta abierto. En el primer caso el sistema es cerrado porque si bien hay un flujo de masa entre los recipientes, como la frontera que encierra al sistema pasa por fuera de ambos y los contiene, no

resulta atravesada por ninguna corriente de fluido, y por lo tanto no hay flujo de masa a través de la frontera. En el segundo caso, como la frontera encierra uno solo de los recipientes, el fluido atraviesa la frontera y el sistema es abierto.

Queda por decidir la respuesta a nuestra pregunta. Esta depende de la situación. Con respecto al flujo de masa, ya sabemos que existe entre ambos recipientes. Con respecto al flujo de energía solo cabe imaginar dos condiciones posibles: que haya o que no haya flujo de energía entre el fluido y el medio ambiente. Si hay flujo de energía lo más probable es que convenga definir al sistema como cerrado, porque de esa manera el modelo matemático que lo describe resulta más sencillo. En efecto, si el sistema se define como abierto se necesita un modelo integrado por dos ecuaciones de balance: una de balance de masa y otra de balance de energía. En cambio si el sistema se define como cerrado descubrimos que la ecuación de balance de masa desaparece y sólo queda la ecuación de balance de energía. Ahora, esto no significa que en todos los problemas que involucran sistemas abiertos se necesiten ambas ecuaciones. Puede haber casos en los que se use solo una. Pero igualmente la ecuación de balance de energía de un sistema abierto es más complicada. Por eso en general conviene definir el sistema como cerrado. Esta regla tiene pocas excepciones.

En el caso de que no haya flujo de energía entre el fluido y el medio ambiente la elección entre sistema cerrado o abierto no es tan clara. Habrá que analizar detenidamente el problema para determinar cuál es la mejor elección. La única manera segura de hacer una elección claramente superior es plantear el modelo en cada opción (abierto y cerrado) y tratar de analizar el sistema mediante ambos modelos. En la mayoría de los casos se obtiene una estructura más fácil de manejar con uno de los dos. Si uno se quiere evitar el trabajo de plantear los dos modelos no queda otro camino que confiar en la experiencia y la intuición para tomar una decisión.

1.6. DIAGRAMA DE FLUJO

El diagrama de flujo es una herramienta fundamental para la elaboración de un procedimiento, ya que a través de ellos podemos ver gráficamente y en forma consecutiva el desarrollo de una actividad determinada. Los diagramas de flujo representan en forma gráfica la secuencia que siguen las operaciones de un determinado procedimiento y/o el recorrido de las formas o los materiales. Muestran las unidades administrativas (procedimiento general) o los puestos que intervienen (procedimiento detallado) para cada operación descrita, y puede indicar además, el equipo que se utilice en cada caso.

El Diagrama de Flujo de Proceso es una representación esquemática del proceso, sus condiciones de operación normal y su control básico. Este también indica los efluentes (líquidos, gases o sólidos) emanados del proceso y su disposición. El diagrama incluye el balance de masa e información para el diseño y especificación de equipos, además sirve de guía para desarrollar el Diagrama de Tubería e Instrumentación.

No existe una simbología convencional totalmente aceptada que satisfaga todas las necesidades, sin embargo hay dos grupos de símbolos comúnmente aceptados dentro de las organizaciones que son los que describiremos a continuación.

- American Society of Mechanical Enginners (ASME)
- American National Standard Institute (ANSI)
- International Organization for Standarization (ISO)
- Deutches Institut fur Normung e.V (DIN)
- Símbolos del flujograma de ingeniería de operaciones y de administración y mejora de la calidad del proceso (DO)
- Diagramas integrados de flujo (DIF) en las versiones de Yourdon-De Marco y Gane & Sarson

En función de los lineamentos con que cuente cada organización, ésta deberá definir los símbolos que va a utilizar para el desarrollo de sus métodos y procedimientos, lo importante es que cada organización estandarice sus propios criterios. Por ejemplo en un diagrama de flujo, los símbolos adoptados para representar las diferentes operaciones/equipos industriales son establecidos por normas internacionales, como son la ISO 10628 y la British Standard BS 153.

1.6.1. TIPOS DE DIAGRAMAS DE FLUJO

DIAGRAMA DE BLOQUES

Representa un proceso o una planta de proceso de una manera simple.

Se REPRESENTAN mediante: Recuadros rectangulares, Líneas con indicación del sentido, Flechas para Ingresos y salidas.

Pueden representarse:

1. Procesos
2. Etapas de un proceso
3. Operaciones básicas
4. Plantas o grupos de Plantas de proceso
5. Secciones, unidades, partes de las instalaciones/ talleres
6. Equipamientos

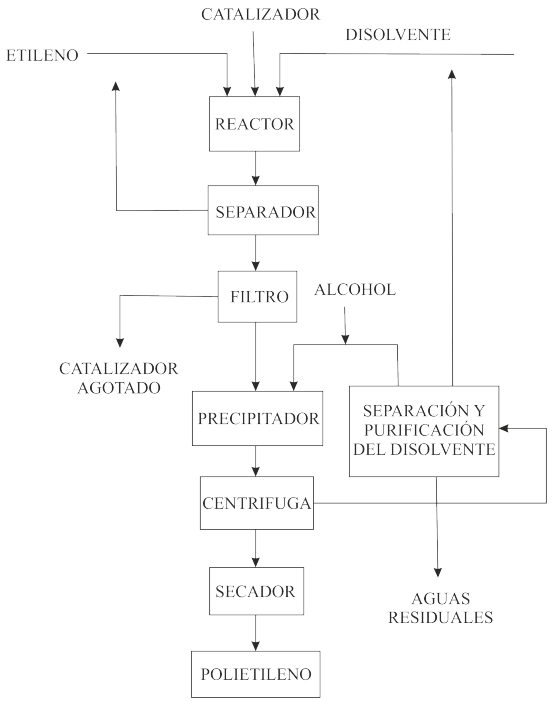


DIAGRAMA DE TUBERÍAS E INSTRUMENTACIÓN

Basado en el DF de Proceso, representa la realización técnica de un proceso con la ayuda de símbolos gráficos para los equipos y las tuberías junto con los símbolos gráficos que representan las funciones de medición y control del los procesos - (ISO 10628: 97).

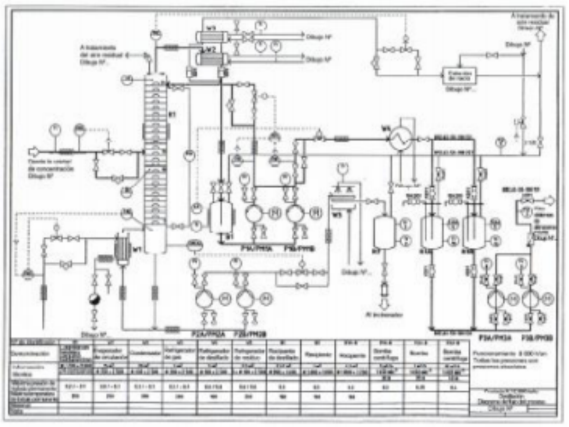
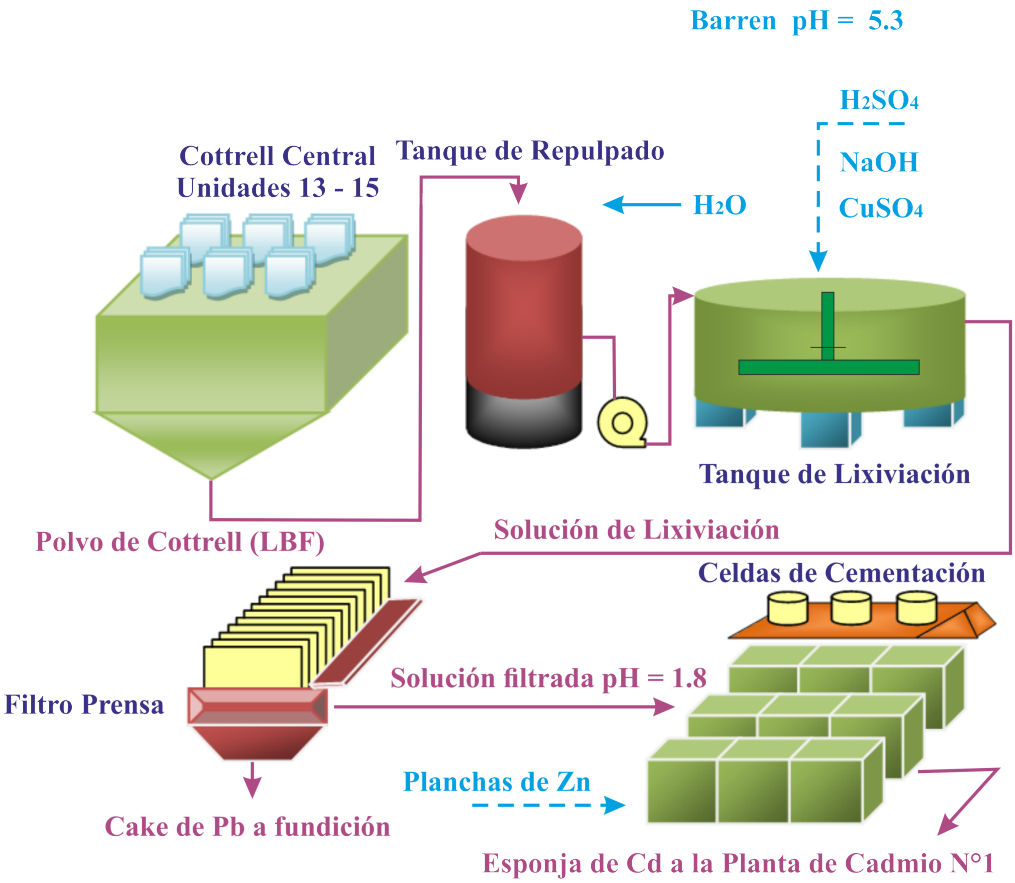


DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO

Representa un proceso o una planta de procesos por medio de símbolos gráficos unidos mediante líneas.

Donde se muestra el caudal de los flujos de entrada y salida, equipos y recipientes (mediante Símbolos), recorrido y sentido de los flujos de materiales y energía, válvulas, medidores, aislaciones, reducciones etc.



1.7. PROBLEMAS DE APLICACIÓN

- **Problema 1:** Convertir 0.01 (bar lt/s) a watt
- **Problema 2:** Convertir 0.5 hp a cal/s
- **Problema 3:** Muestre que el factor de conversión de (cal / mol K) a (Btu / mol lb F) es 1.0.
- **Problema 4:** Una solución tiene la siguiente composición molar: 32 % de pentano (C_5H_{12}), 43 % de hexano (C_6H_{14}) y 25 % de heptano (C_7H_{16}). Calcule le porcentaje en peso de cada componente.

  (Rpta.: pentano = 27,1; hexano = 43,5; heptano = 29,4 %)
- **Problema 5:** 15 kg de dimetilcetona (P.M. = 58,08, ρ = 0,792 g/cm^3) se mezclan con 30 kg de agua (ρ = 0,98 g/cm^3) a 20 °C. Calcule la composición de la mezcla, expresada en:

  a) Fracción molar (Rpta.: 0,134 dimetilcetona)

  b) Porcentaje en volumen (Rpta.: 38,2 % dimetilcetona)

c) Molaridad (Rpta.: 5,21 mol/litro)

d) Molalidad (Rpta.: 8,61 mol soluto/kg solvente)

- **Problema 6:** Un gas contiene 30 % de CH_4, 60 % de C_2H_6 y 10 % de C_3H_8, en volumen, a 60 °C y 1 atmósfera. Calcule el peso molecular medio y la densidad de la mezcla.

  (Rpta.: 27,2 g/mol; 0,992 g/litro).

- **Problema 7:** En un tanque se encuentran 130 kg de gas con la siguiente composición: 40 % N, 30 % CO, y 30 % CH_4. ¿Cuál es el peso molecular medio del gas?

- **Problema 8:** Tiene 25 Ib de un gas con la siguiente composición: CH_4=80 %, C_2H_4=10 %, C_2H_6=10 %. Cuál es el peso molecular medio de la mezcla? Cuál es la fracción en peso (masa) de cada uno de los componentes de la mezcla?.

- **Problema 9:** Un manómetro de Bourdon se conecta a un tanque grande y marca 440 kPa cuando el barómetro indica 750 mm Hg. ¿Qué lectura dará el manómetro si la presión atmosférica aumenta a 765 mm Hg?.

- **Problema 10:** Un medidor de vacío conectado a un tanque marca 3,15 kPa. ¿Cuál es la presión absoluta correspondiente si el barómetro indica 98.2 kPa?

- **Problema 11:** Preparar un diagrama de flujo de bloques y de Proceso para producir etilenglicol. Sabiendo que se mezcla agua y óxido de etileno en un reactor para generar el etilenglicol, esta mezcla luego se separa en primer lugar óxido de etileno no reaccionante y se recircula para reusarse como materia prima, en segundo lugar se separa el agua, que también es recirculada como parte de materia prima. La solución separada se destila, obteniéndose como parte liviana el etilenglicol y como parte pesada di y tri glicoles.

CAPÍTULO 2

BALANCE DE MATERIA EN SISTEMAS ESTACIONARIO Y TRANSITORIO SIN REACCIÓN

OBJETIVOS

- Aplicar la ley de consevación de Materia.
- Diferenciar entre los diversos Balances de Materia.
- Establecer un criterio para resolución de problemas de Balance de materia.
- Aplicar Balance de Materiales sin reacción a unidades simples y Multiples.

2.1. LEY DE CONSERVACIÓN

La masa es una variable dependiente fundamental de interés, y sus variables características se determinan fácilmente, ya que es común y evidente, como se de, la masa total o la masa de un componente en particular. Por lo que no se hablara mucho de ella. En los problemas en que la energía es la variable dependiente fundamental, la selección de las variables características no se hace tan rápidamente, por lo tanto, es necesario que primero se haya estudiado las diversas clases de energía.

Y considerar las variables características que se emplean para medir la energía de un sistema.

Una de las leyes básicas de la física es la ley de la conservación de la masa. Esta expresa en forma simple que la masa no puede crearse ni destruirse solo transformarse, por consiguiente la masa total de todos los materiales que entran en un proceso debe ser igual a la masa total de todos los materiales que salen del mismo, más la masa de los materiales que se acumulan o permanecen en el proceso.

Entradas = Salidas + Acumulación

Expresado en otras palabras, “lo que entra debe de salir”. A este tipo de sistema se le llama proceso de estado estable.

En otras palabras la materia no se crea ni se destruye solo se transforma.

2.2. ECUACIONES GENERALES DE BALANCES: DIFERENCIAL E INTEGRAL DE MATERIA.

Los balances de masa son utilizados en el diseño de un nuevo proceso o en el análisis de uno ya existente.

Los procesos químicos pueden clasificarse en intermitentes (batch), continuos o semi intermitentes y como estacionarios (en régimen permanente) o transitorios.

Proceso intermitente: La alimentación se introduce al sistema al principio del proceso, y todos los productos se extraen juntos tiempo después.

Proceso continuo: Las entradas y salidas fluyen continuamente durante el proceso.

Proceso semi intermitente: Cualquier proceso que no es intermitente ni es continuo.

Proceso en régimen permanente o estacionario: Todas las variables del proceso (temperaturas, presiones, volúmenes, velocidades de flujo) no cambian con el tiempo, excepto, por fluctuaciones pequeñas alrededor de los valores promedio constantes.

Proceso transitorio: Cualquiera de las variables del proceso cambia con el tiempo.

Los procesos intermitentes y semi intermitentes son operaciones en régimen no permanente y los procesos continuos pueden ser transitorios o estacionarios.

El proceso intermitente se usa cuando se producen cantidades pequeñas de producto en una única ocasión, mientras que para producciones grandes se usan procesos continuos en régimen permanente. Las condiciones de un régimen transitorio existen durante el arranque de un proceso y en los cambios subsecuentes en las condiciones de operación del proceso.

2.2.1. ECUACIÓN GENERAL DE BALANCE

Un balance o inventario sobre una sustancia en un sistema (una unidad del proceso, varias unidades o el proceso completo) puede escribirse de la siguiente forma general:

Entrada (entra a través de las fronteras del sistema) + Producción (producida dentro del sistema) - Salida (sale a través de las fronteras del sistema) - Consumo (consumida dentro del sistema) = Acumulación (acumulada dentro del sistema).

Esta ecuación general de balance puede escribirse para cualquier sustancia que entre o salga de cualquier proceso, para cualquier especie atómica (balance parcial de masa) o para las masas totales de los flujos de entrada y salida (balance total de masa).

Se pueden escribir dos tipos de balances: diferenciales e integrales.

Balances diferenciales: Indican lo que está sucediendo en un sistema en un instante de tiempo. Cada término de la ecuación de balance es una velocidad (velocidad de entrada, velocidad de producción) y se da en las unidades de la cantidad balanceada dividida entre una unidad de tiempo (g/s, barriles/día). Este tipo de balance se aplica generalmente a procesos continuos.

Balances integrales: Describen lo que ocurre entre dos instantes de tiempo determinado. Es una porción de la cantidad que se balancea y tiene la unidad correspondiente (g, barriles). Este tipo de balance se aplica generalmente a procesos intermitentes siendo ambos instantes de tiempo el momento en que se efectúa la entrada y el momento previo a la extracción del producto.

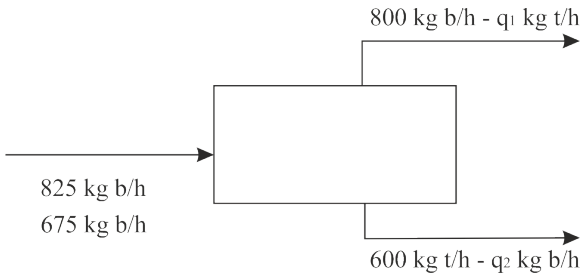
2.2.2. BALANCES EN PROCESOS CONTINUOS EN RÉGIMEN PERMANENTE

Para cualquier sustancia involucrada en el proceso el término de acumulación en la ecuación de balance debe ser igual a cero, de lo contrario, la cantidad de la sustancia en el sistema debe necesariamente cambiar con el tiempo y, por definición, el proceso no se llevaría a cabo en régimen permanente. Así pues, para los procesos continuos en régimen permanente, la ecuación general de balance se simplifica en:

Entrada + producción = salida + consumo

EJERCICIO:

Mil quinientos kilogramos por hora de una mezcla de benceno y tolueno que contiene 55 % en masa de benceno se separan, por destilación, en dos fracciones. La velocidad de flujo másico del benceno en la parte superior del flujo es de 800 kg/h y la del tolueno en la parte inferior del flujo es de 600 kg/h. La operación se lleva a cabo en régimen permanente. Escriba los balances del benceno y del tolueno para calcular las velocidades de flujo no conocidas de los componentes en los flujos de salida.



El proceso se efectúa en régimen permanente y por eso el término acumulación de los balances de masa es cero. Como no ocurren reacciones químicas, los términos de producción y consumo son iguales a cero. Por lo tanto, la ecuación de balance de masa toma la forma:

Entrada = Salida

Balance parcial de masa de benceno: 825 kg b/h = 800 kg b/h + $q_2 \rightarrow q_2$ = 25 kg b/h

Balance parcial de masa de tolueno: 675 kg t/h = q_1 + 600 kg t/h $\rightarrow q_1$ = 75 kg t/h

Comprobación:

Balance total de masa: 1500 kg/h = 800 kg/h + q_1 + q_2 + 600 kg/h $\rightarrow$ 1500 kg/h = 800 kg/h + 75 kg/h + 25 kg/h + 600 kg/h $\rightarrow$ 1500 kg/h = 1500 kg/h

Respuestas: 25 kg b/h y 75 kg t/h.

2.2.3. BALANCES INTEGRALES EN PROCESOS INTERMITENTES

Cuando ocurren reacciones químicas en procesos intermitentes, como las fronteras del sistema no son atravesadas ni por reactivos ni por productos entre el momento inicial y el momento en el cual termina la reacción, la ecuación de balance se reduce a:

Acumulación = Producción - Consumo

Además, la cantidad de cada sustancia en el reactor entre ambos momentos, es simplemente la cantidad final menos la cantidad inicial:

Acumulación = Salida final - Entrada inicial

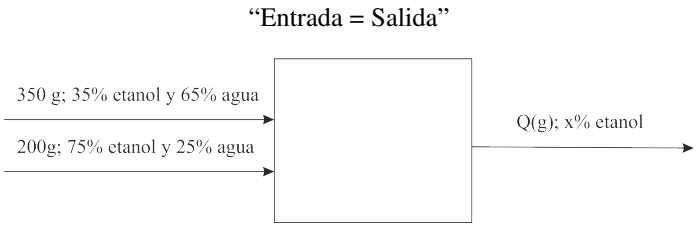
Si se igualan estas dos expresiones para la acumulación, se tiene

Entrada inicial + Producción = Salida final + Consumo

Esta ecuación es idéntica a la ecuación para procesos continuos, excepto que en este caso los términos de entrada y salida denotan las cantidades inicial y final de la sustancia balanceada en vez de las velocidades de flujo de la misma en los flujos de alimentación y producción continuos.

EJERCICIO:

Dos mezclas etanol - agua se encuentran en dos matraces separados. La primera mezcla contiene 35 % en peso de etanol, y la segunda contiene 75 % en peso del mismo. Si se combinan 350 g de la primera mezcla con 200 g de la segunda, ¿cuál es la masa y la composición del producto?



Como no hay reacciones químicas involucradas, los términos de producción y consumo de la ecuación de balance valen cero y la ecuación toma la forma

Balance total de masa: 350 g + 200 g = Q → Q = 550 g.

Balance parcial de masa para el etanol: 350 g * 0,35 + 200 g * 0,75 = 550 g * x et → x et = 0,4955.

El cálculo se puede comprobar mediante el balance parcial de masa para el agua:

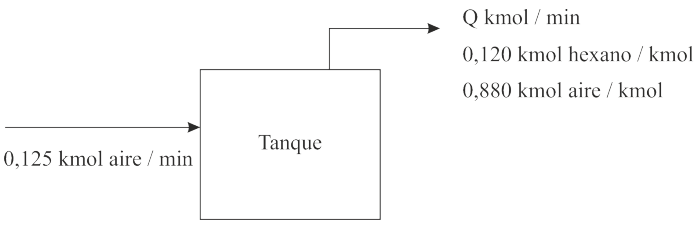
350 g * 0,65 + 200 g * 0,25 = Q * r ag. → 277,5 g = 550 g * (1 - 0,4955) → 277,5 g = 277,5 g.

2.2.4. BALANCES INTEGRALES SOBRE PROCESOS SEMI INTERMITENTES Y CONTINUOS

Los balances integrales también pueden escribirse para procesos semiintermitentes y continuos. El procedimiento consiste en escribir un balance diferencial del sistema y después integrarlo entre dos instantes de tiempo.

EJERCICIO:

Se hace burbujear aire a un tanque de hexano líquido a una velocidad de 0,125 kmol / min. El gas que sale del tanque contiene 12,0 % en mol de vapor de hexano. Se puede considerar que el aire es insoluble en el hexano líquido. Utilice un balance integral para estimar el tiempo requerido para vaporizar 15,0 m^3 de hexano.



Balance de masa diferencial para el aire (entrada = salida):

0,125 kmol aire / min = 0,880 kmol aire / kmol * Q → Q = 0,142 kmol / min

Un balance del hexano toma la forma acumulación = - salida.

Acumulación = - 15 m^3* 659 kg / m^3 * 1 kmol / 86,0 kg = - 114,9 kmol.

El término de salida en el balance se obtiene integrando la velocidad de salida diferencial desde el tiempo inicial del proceso (t = 0) hasta el tiempo final que es la cantidad a calcular:

-114,9 kmol = - $\int_0^t$ (0,120 * Q * dt) = - 0,120 * Q * t → t = 6742,96 min.

2.3. APLICACIÓN DE BALANCES DE MATERIALES EN UNIDADES SIMPLES

2.3.1. METODOLOGÍA PARA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS EN BALANCES DE MATERIA

La resolución de los problemas de balances de masa requiere del desarrollo y la solución de ecuaciones para las incógnitas de los flujos, siendo esto último, generalmente, un asunto de aritmética o álgebra simple, pero la descripción del proceso y la colección de datos del mismo puede presentar dificultades considerables.

Un método posible para realizar cálculos de balances de materia puede ser el siguiente:

1. **EVALUAR INFORMACIÓN:**

   Leer y entender el enunciado del problema, a fin de determinar qué información es suministrada explícitamente, qué información es suministrada de manera indirecta o implícitamente, qué variable(s) debe(n) ser calculada(s).

2. **DATOS ADICIONALES:**

   Determinar o encontrar los datos adicionales faltantes. En bibliografía o tablas especializadas.

3. **DIBUJAR UN DIAGRAMA DE FLUJO, ORGANIZAR LA INFORMACIÓN:**

   La mejor forma de hacerlo es dibujar un diagrama de flujo del proceso, usando cajas u otros símbolos para representar las unidades del proceso (reactores, destiladores, extractores, etc.) y líneas con flechas para representar las entradas y las salidas.

   El diagrama debe etiquetarse, escribiendo los valores de las variables conocidas y los símbolos de las incógnitas para cada flujo de entrada y de salida: Se escriben los valores y las unidades de todas las variables conocidas de los flujos en las posiciones de éstos sobre el diagrama. Se asignan símbolos algebraicos a las incógnitas de los flujos y se pueden escribir sus unidades asociadas (Q kg/h; n kmol

   Es necesario desarrollar y resolver una ecuación para cada incógnita, por lo cual es conveniente reducir al mínimo el número de incógnitas etiquetadas. Por ejemplo, cuando se etiquetan las fracciones másicas de los componentes de un flujo, se asignan nombres a todos menos a uno ya que éste se calcula como 1 menos la suma de los demás.

   Un proceso representado por un diagrama de flujo está balanceado cuando se satisfacen los balances de materia para los componentes del sistema. Las masas pero no las fracciones másicas de todos los flujos pueden multiplicarse por un factor común y el proceso sigue balanceado; además las masas de los flujos pueden transformarse en velocidades de flujo másico y las unidades de masa de todas las variables de flujo y de las fracciones másicas pueden cambiarse (por ejemplo, de kg a lbm) continuando balanceado el proceso. Este procedimiento se llama cambio de escala del diagrama de flujo y puede ser aumento de escala cuando las cantidades finales del flujo son mayores que las originales o una disminución de escala cuando son menores.

4. **ESCOGER UNA BASE DE CÁLCULO:**

   Como siempre se puede cambiar la escala de un proceso balanceado, los cálculos de balance de materia pueden efectuarse sobre la base de cualquier conjunto conveniente de cantidades de los flujos o de las velocidades de flujo, y después se puede cambiar de escala el resultado, tanto como se quiera. Al balancear un proceso se escoge una cantidad (masa o moles) o una velocidad de flujo másico o molar de un flujo o de un componente del flujo, como base de cálculo; todas las incógnitas se determinan, entonces, de manera que sean consistentes con esta base.

Si una cantidad de un flujo o una velocidad de flujo es un dato del enunciado, suele ser conveniente usar esta cantidad como base de cálculo. Si no se conocen las cantidades de los flujos o las velocidades de flujo, hay que suponer una; en éste caso, se escoge un flujo con una composición conocida y si ésta última es fracción másica, la base será una masa pero si es fracción molar la base será número de moles.

5. **REACCIONES QUÍMICAS:**

   En el caso que el proceso se realice con reacciones químicas están deberán de escribirse completamente balanceadas.

6. **REALIZAR LA CONTABILIDAD DEL PROBLEMA O ANÁLISIS DE GRADOS DE LIBERTAD:** Se cuentan las incógnitas y las relaciones entre ellas. Si estos números son iguales, se puede adelantar la solución del problema. Si hay más incógnitas que ecuaciones, entonces el problema no está especificado por completo o se han olvidado algunas relaciones. Entre las relaciones que pueden utilizarse para relacionar las variables de los flujos de los procesos están las siguientes: Balances de materia teniendo en cuenta que para procesos no reactivos pueden escribirse hasta N balances de materia donde N es el número de componentes y para procesos reactivos el número máximo de balances de materia se reduce en el número de reacciones químicas entre los componentes.

   Especificaciones del proceso o relaciones entre las variables dadas en el enunciado; Leyes y propiedades físicas como por ejemplo las leyes de los gases y las densidades que proporcionan relaciones entre las variables; Restricciones físicas como por ejemplo, si las fracciones molares se etiquetan como x, y, z se sabe que una relación entre ellas es que su suma es igual a 1 y, por tanto, en lugar de etiquetar z se etiqueta 1- x- y.

7. **CONVERTIR LOS DATOS VOLUMÉTRICOS EN MÁSICOS O MOLARES:**

   Los volúmenes conocidos de los flujos o las velocidades de flujo volumétrico conocidas se convierten en cantidades másicas o molares usando las densidades tabuladas o las leyes de los gases.

8. **CONVERTIR LOS DATOS DE UN MISMO FLUJO A LAS MISMAS UNIDADES:**

   Si por ejemplo, en un flujo se conoce la velocidad de flujo másico total y las fracciones molares de los componentes, se convierten todos los datos en una cualquiera de las unidades (másica o molar).

9. **ESCRIBIR LAS ECUACIONES DE BALANCE DE MATERIA:**

   Si no ocurren reacciones químicas y hay N especies presentes, se pueden escribir máximo N balances, ya sea para cada especie o bien para la masa o moles totales y para todas las especies menos una. Los balances deben escribirse de manera que los primeros sean aquellos que involucren el menor número de incógnitas.

10. **RESOLVER LAS ECUACIONES DE BALANCE DE MATERIA:**

    Con ello se resuelven las incógnitas que es necesario determinar. Cuando se calcula el valor de una de las incógnitas, se puede escribir en el diagrama de flujo lo cual proporciona un seguimiento continuo del estado de la resolución del problema.

11. **ESCALAR EL PROCESO BALANCEADO:**

    Esto se hace cuando en el enunciado del problema se proporciona una cantidad o una velocidad de flujo determinada y se tomó como base de cálculo otro valor.

12. **COMPROBAR QUE LA SOLUCIÓN ES LÓGICA Y NO HAY ERRORES:**

    Mediante la realización de un balance global de materia se puede comprobar que las masas totales entrante y saliente son iguales. Esta condición es redundante y combinación lineal de la suma de todos los balances elementales pero puede servir de prueba de que no hay errores.

Asimismo conviene desconfiar de los resultados obtenidos muy pequeños o muy grandes.

Es necesario aclarar que éste no es el único método posible para resolver los problemas de balance de materia; es posible desarrollar métodos propios cuando se tenga algo de experiencia.

2.3.2. FORMAS MATEMÁTICAS PARA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS EN BALANCES DE MATERIA

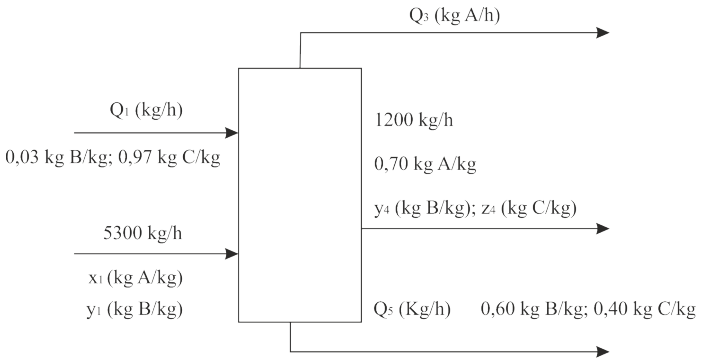
Para resolver las relaciones o ecuaciones que se generan para la resolución de Balances de Materia o Energía se pueden llevar a cabo mediante dos técnicas matemáticas diferentes:

- Técnicas Aritméticas
- Técnicas Algebraicas

2.3.3. PROBLEMAS DE APLICACIÓN

- **EJERCICIO 1:**

Supóngase una columna de destilación que opera como se muestra en el siguiente diagrama de flujo.



(a) ¿Cuántos balances independientes se pueden escribir para este sistema?

(b) ¿Cuántas incógnitas de las velocidades de flujo y/o de las fracciones molares deben especificarse antes de calcular las demás?

(c) Supóngase que se proporcionan los valores de Q1 y x1. Establezca una serie de ecuaciones, cada una con una incógnita, para las variables restantes. (Una vez que se ha calculado una variable en una de estas ecuaciones, debe aparecer en las demás ecuaciones sin que se le cuente como una incógnita).

Solución

(a) Tres balances independientes, porque se tienen tres componentes (A, B y C).

(b) Deben especificarse y_1 y z_4 , así: $y_1 = 1 - x_1$; $z_4 = 1- (0{,}70 + y_4)$.

(c) Se conocen todos los datos de entrada al conocerse x_1 y Q_1.

Incógnitas: Q_3; y_4; Q_5.

Balance parcial de masa para A: $5300 * x_1 = Q_3 + 1200 * 0{,}70$. Incógnita: Q_3.

Balance total de masa: $Q_1 + 5300 = Q_3 + 1200 + Q_5$. Incógnita: Q_5.

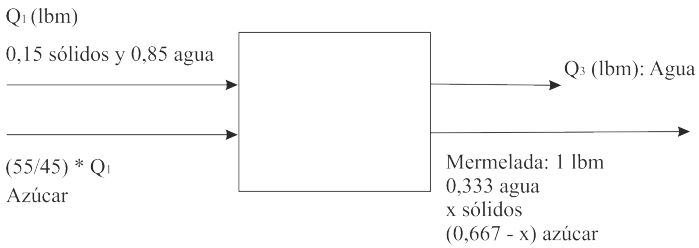
Balance parcial de masa para C: $0{,}97 * Q_1 = 1200 * (1 - 0{,}70 - y\ 4) + 0{,}40 * Q_5$.

Incógnita: y_4.

Respuestas: (a) Tres; (b) Dos.

- **EJERCICIO 2:**

Las fresas contienen alrededor de 15 % de sólidos y 85 % de agua. Para preparar mermelada de fresa, se mezclan las fresas trituradas con azúcar en una relación de 45:55, y la mezcla se calienta para evaporar el agua hasta que el residuo contiene una tercera parte de agua en masa. Dibuje y etiquete el diagrama de flujo de este proceso y utilícelo para calcular cuántas libras de fresa se necesitan para producir una libra de mermelada.



Solución

Balance parcial de masa para sólidos: $0{,}15 * Q_1 = x * 1$ lbm

Balance parcial de masa para azúcar: $(55/45) * Q_1 = (0{,}667 - x) * 1$ lbm $\rightarrow x = (0{,}15 * Q_1)$/lbm $\rightarrow$ $(55/45) * Q_1 = (0{,}667 - (0{,}15 * Q_1/\text{lbm}))$ lbm $\rightarrow Q_1 = 0{,}486$ lbm.

Respuesta: 0,486 lbm.

- **EJERCICIO 3:**

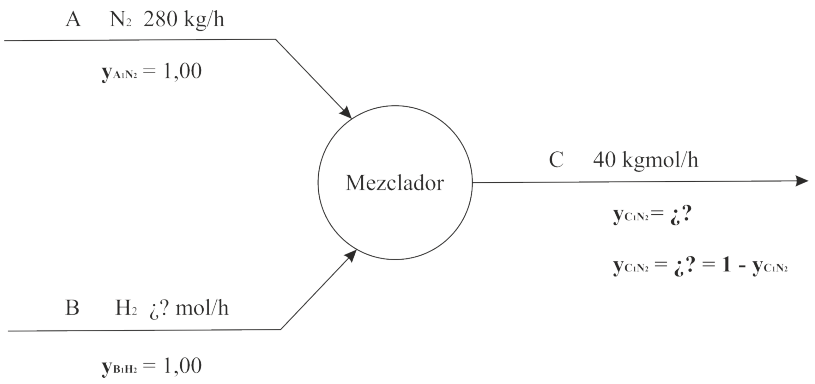
Una corriente de nitrógeno gaseoso, N_2, de 280 kg/h se mezcla con una corriente de hidrógeno gaseoso, H_2, en una unidad mezcladora. A la salida del mezclador, se obtiene una corriente total de 40 kgmol de nitrógeno e hidrógeno por hora. Determinar los moles de hidrógeno que deben suministrarse por hora y el fraccionamiento de la corriente de mezcla.

Solución Se trata de la mezcla de dos sustancias en estado gaseoso, N_2 y H_2. Nos piden determinar una corriente de entrada que es desconocida (moles de H_2). Nos dan los flujos de una corriente de entrada (280 kg/h) y de la corriente de salida (40 kgmol/h).

Se conoce la composición o el fraccionamiento de las corrientes de entrada, pero no de la corriente de salida.

Tómese como base de tiempo, para el cálculo de todas las corrientes presentes en este problema, la hora. De ahora en adelante, no será necesario especificar esta información con cada valor de corriente utilizado o calculado.

El diagrama de flujo correspondiente es:



La composición de la corriente de entrada A es 100 % nitrógeno (y_{AN2} = 1,00) y la composición de la corriente de entrada B es 100 % hidrógeno (y_{BH2}= 1,00).

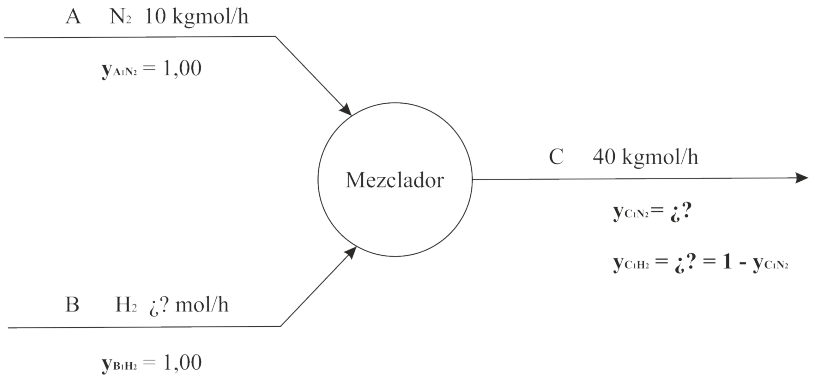
La corriente de salida es una mezcla de ambos gases, pero no se conoce el fraccionamiento. Recuérdese que la suma de las fracciones molares (o másicas) es igual a la unidad. Esto es:

$$y_{C,H_2} + y_{C,N_2} = 1,00$$

Al conocer una de estas variables, se puede calcular directamente la otra. En este problema hay dos incógnitas: la corriente B y una fracción molar de la corriente de salida, $y_{C,H2}$ o $y_{C,N2}$. Se pueden formular dos balances por componente, uno por N_2 y otro por H_2, y un balance global. De las tres ecuaciones, solo dos serán independientes. Por lo tanto, se necesitarán solo dos de ellas para resolver el problema. La tercera se utilizará para chequear los resultados. El número de incógnitas (2) menos el número de ecuaciones independientes (2) indica que el problema planteado tiene cero (0) grados de libertad y puede ser resuelto de manera exacta.

Falta decidir si las corrientes se trabajarán en kilogramos o en moles. En vista de que piden el resultado final en moles, pareciera más conveniente utilizar como unidad de masa el mol. Entonces:

$$\text{Moles } N_2 \text{ en } A = 280\ Kg\ \frac{1\ Kmol\ N_2}{28\ Kg\ N_2} = 10\ kmol$$



La ecuación de balance global (BG) es:

$$A + B = C$$

$$10 \text{ kgmol} + \text{B} = 40 \text{ kgmol} \rightarrow \text{B} = 30 \text{ kgmol}$$

Las ecuaciones de balance por componentes (BC) son:

$Ay_{A,N2} + By_{B,N2} = Cy_{C,N2} \rightarrow 10(1,00) + 30(0) = 40y_{C,N2}[kgmol]$

$Ay_{A,H2} + By_{B,H2} = Cy_{C,H2} \rightarrow 10(0) + 30(1,00) = 40y_{C,H2}[kgmol]$

Obsérvese que las ecuaciones expresan la igualdad entre la cantidad de masa que entra (en cada corriente) y la cantidad de masa que sale del mezclador.

Cualquiera de las ecuaciones por componente permite calcular el valor de la fracción molar en C:

$$y_{C,H_2} = \frac{30\ kmol}{40\ kmol} = 0.75\ [kgmol/kgmol]$$

Despejando de la 1ra ecuación, se tiene que:

$y_{C,N_2} = 1,00 - y_{C,H_2} = 1,00 - 0,75 = 0,25\ [kgmol/kgmol]$

Este último resultado se puede chequear con la otra ecuación. Se deja al lector verificarlo.

2.4. EJERCICIO PARA RESOLVER

1. Una columna de destilación es alimentada por dos corrientes. Por la corriente de tope sale un 100 % de compuesto A. Los componentes se separan tal y como se muestra en el diagrama de la figura 2.1. Calcular las corrientes desconocidas y la composición de la corriente M.

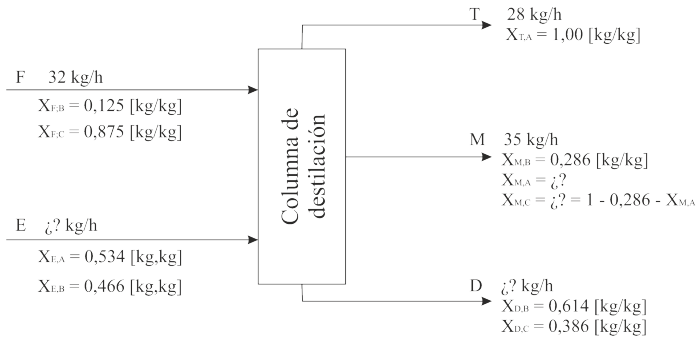
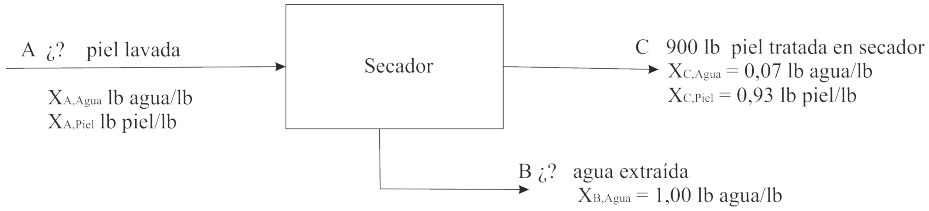


Figura 2.1: Diagrama

2. En una operación de secado de pieles, se determinó que un lote de piel previamente pasado por el secador pesaba 900 Ib y que contenía 7 % de su peso en humedad. Se sabe que durante el secado la piel lavada perdió 59,1 % de su peso inicial cuando se encontraba húmeda. Determinar: (a) el peso de la piel totalmente seca o exenta de humedad, en la carga de alimentación inicial; (b) las libras de agua eliminadas durante el proceso de secado por libra de piel totalmente seca; (c) el porcentaje de agua eliminada respecto de la cantidad de agua presente inicialmente en el lote de piel.



3. Una corriente A (en kg/min) que contiene 30 %m de etanol y 70 %m de agua se mezcla con otra corriente B (en kg/min) que contiene 60 %m de etanol y el resto de agua. La corriente de mezcla C (a la salida de la unidad mezcladora) contiene 35 %m de etanol. Calcular: (a) la proporción entre las corrientes A y B, esto es (A/B); (b) Si la corriente de salida C es 4500 kg/h, ¿Cuál es la relación entre las corrientes A y B? ¿Esta relación ha cambiado o no?

   Respuestas: (a) A/B = 5,00

   (b) La proporción es la misma, cambian los valores de las corrientes pero la relación A/B es igual

2.5. ANÁLISIS DE GRADOS DE LIBERTAD

La diferencia entre el número de variables involucradas en un diseño y el número de relaciones de diseño, se denomina grados de libertad. Si Nv, representa el número de variables en un problema de diseño, Nr el número de relaciones de diseño, entonces los grados de libertad Nd están dados por:

Nd = Nv-Nr

Si Nv = Nr, Nd = 0 ; el problema tiene solución única.

Si Nv $<$ Nr, Nd $<$ 0 ; el problema es sobre definido, únicamente es posible un solución trivial.

Si Nv $>$ Nr, Nd $>$ 0; hay un número infinito de posibles soluciones.

2.5.1. GRADOS DE LIBERTAD EN BALANCES SIN REACCION QUIMICA

En los procesos que involucran modelos algebraicos, [Ecuaciones], es necesario saber si existe la información suficiente para resolver las incógnitas. Un método usado es el de analizar los grados de libertad del sistema. El análisis consiste en determinar el número de variables correspondientes a las corrientes del sistema [número de especies multiplicado por el número de corrientes] y a este valor restamos el número de ecuaciones independientes del sistema [El número de ecuaciones independientes es igual al número de especies presentes en el sistema], las corrientes especificadas 1. Composiciones [Para determinar las composiciones, no se toma en cuenta la composición que se obtiene por diferencia a partir del concepto de que $\sum$Ci = 1] y 2. Flujos [Corrientes del proceso], y las relaciones adicionales; estos elementos nos proporcionara los grados de libertad del sistema. Por supuesto, pueden existir errores de inconsistencia ya que las soluciones dependen de las N ecuaciones o balances elegidos; debe estar seguro de que el número de variables seleccionadas y ecuaciones sean planteadas adecuadamente. Los grados de libertad son un mecanismo sistemático e índice de medida que indica si es viable la solución.

Si los grados de libertad son positivos, indica que el caso esta sub especificado y no es posible resolverlo para todas las variables desconocidas. Puede ser que se hayan pasado por alto algunas relaciones o posea una cantidad infinita de soluciones y el cálculo será una pérdida de tiempo.

Si los grados de libertad son negativos, indica que el problema posee mayor información de la necesaria [es redundante y posiblemente inconsistente], en este caso no tiene sentido resolverlo hasta balancear las ecuaciones y definir las incógnitas.

Si los grados de libertad son igual a cero, indica que el problema está correctamente definido, o sea que el número de las variables desconocidas en las corrientes es igual al número de ecuaciones independientes disponibles, o sea:

GL = Ecuaciones independientes + Corrientes específicas

[Composiciones y flujos] + relaciones adicionales - Variables de corrientes

El análisis de grados de libertad se realizan de acuerdo al sistema elegido: o sea que de acuerdo a los sistemas elegidos; así será el número de análisis efectuados.

Análisis de grados de libertad

Sistema: Total

Descripción del razonamiento del sistema seleccionado

El número total de variables en las corrientes es 12 y se obtienen adicionando todas las especies o sustancias presentes en cada corriente. El número total de ecuaciones independientes de balances es igual al número de las distintas especies o sustancias presentes en el sistema, en este caso son 4. El número de composiciones especificadas son 6 y adicionalmente se proporciona la alimentación a la columna de destilación. Finalmente, se indica una condición de recuperación en el sistema, obteniéndose de esta manera 1 relación adicional [subsidiaria], de aquí obtenemos la siguiente información para obtener el análisis de los grados de libertad de acuerdo al sistema en estudio:

CASO [DESTILACIÓN MULTICOMPONENTE]

Se alimenta una columna de destilación con una corriente conteniendo metanol, etanol, propanol y butanol. El destilado contiene todo el metanol y 80 % del propanol alimentado, equivalente al 40 % de etanol. Los fondos contienen todo el butanol alimentado. Determinar los grados de libertad.

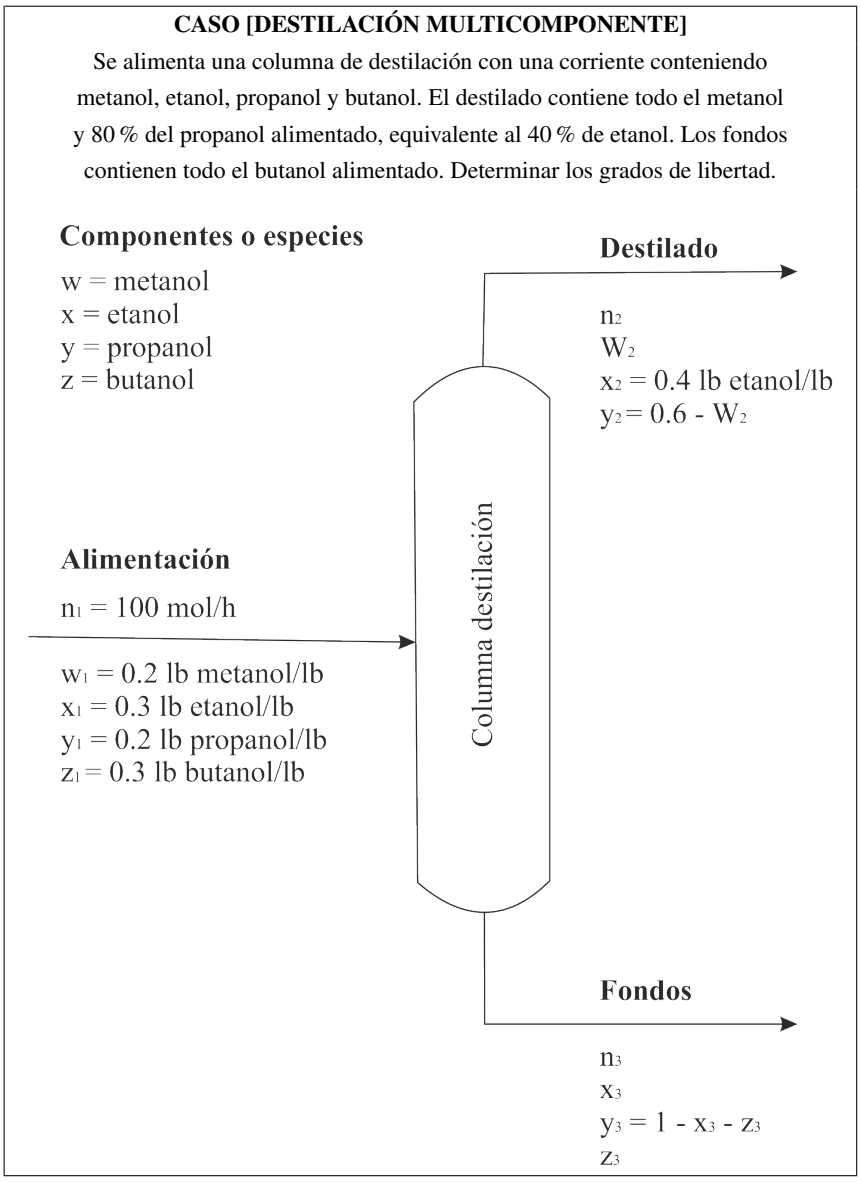


Tabla de grados de libertad para el sistema total: Columna de destilación

Análisis de Grados de Libertad		
Elementos	**Adición**	**Sustracción**
Variables de corrientes		12
Ecuaciones independientes	4	
Corrientes especificadas:		
Composiciones	6	
Flujos	1	
Relaciones adicionales	1	
Total		-12
Grados de libertad	**0**	

O sea que el caso está correctamente especificado y conduce a una única solución.

[Para aplicar el análisis de los Grados de Libertad, deben describir el razonamiento y luego elaborar la tabla].

Es necesario notar que arbitrariamente en el conteo de las variables y especificaciones de especies involucradas no están presentes en algunas corrientes. Por ejemplo, la ausencia de z_2 en el destilado y w_3 en los fondos; por simple conteo, solamente hay 3 variables en las corrientes en cada una de esas corrientes. Así, el caso puede tener solamente 10 variables en las corrientes. Sin embargo, en este caso el número de composiciones especificadas puede reducirse en dos ya que z_2 en el destilado es 0 y w_3 es 0 y puede ser redundante. Los grados de libertad resultantes pueden expresarse de la siguiente manera:

Tabla de grados de libertad para el sistema total: Columna de destilación

Análisis de Grados de Libertad		
Elementos	**Adición**	**Sustracción**
Variables de corrientes		10
Ecuaciones independientes	4	
Corrientes especificadas:		
Composiciones	4	
Flujos	1	
Relaciones adicionales	1	
Total		-10
Grados de libertad	**0**	

2.5.2. GRADOS DE LIBERTAD EN BALANCES CON REACCIÓN QUÍMICA

En balances que no implican reacciones químicas, el número máximo de balances de masa es igual al número de especies independientes. En el caso de reacciones independientes hay que hacer una analogía con una ecuación algebraica, son independientes cuando no se puede obtener ninguna de ellas sumando o restando múltiplos de cualquiera de las otras, en las siguientes ecuaciones.

Ec. 1) $2x + 8z = 16$

Ec. 2) $6x + 24y = 48$

No son independientes ya que la ecuación 2 es la misma ecuación 1, pero multiplicada por 3. [Ec. 2 = 3 (Ec. 1)].

Ec. 1) $2x + 4y = 4$

Ec. 2) $4x - 2z = 4$

Ec. 3) $8y + 2z = 4$

No son independientes ya que la ecuación 3 es la misma que la ecuación 1 y 2, [Ec. 3 = (2) (Ec. 1) - (Ec. 2)], o sea:

$(4x + 8y = 8) - (4x - 2z = 4) = 8y + 2z = 4$

Haciendo una analogía entre una ecuación y una reacción química, se concluye que cuando dos especies moleculares (o especies atómicas) se relacionan a través de una misma relación o proporción y esta relación o proporción se incluye en el diagrama de flujo, los balances correspondientes a estas especies (o átomos) no serán ecuaciones independientes. De acuerdo a la estrategia utilizada en el análisis de grados de libertad en balances sin reacción químicas, se calculan los grados de libertad en balances con reacción química, de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla de grados de libertad para el sistema:

Análisis de Grados de Libertad		
Elementos	**Adición**	**Sustracción**
Variables de corrientes		
Ecuaciones independientes		
Otras ecuaciones que relacionan las variables		
*Número de relaciones		
Total		
Grados de libertad	0	

* Exceso de aire, conversión, relación mx/my, etc.

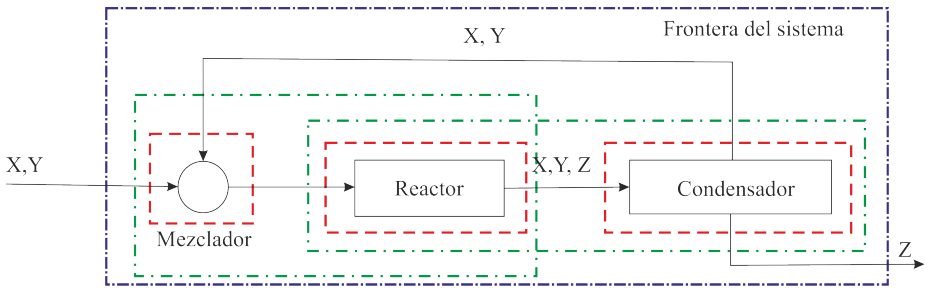
2.6. APLICACIÓN DE BALANCES DE MATERIALES EN UNIDADES MÚLTIPLES

No es frecuente que los procesos químicos industriales se lleven a cabo en una sola unidad. En general, están presentes dos o más unidades (reactores, mezcladores, enfriadores, equipos de separación, etc.).

Cuando el proceso consta de una unidad, esa unidad es el sistema. Cuando el proceso consta de varias unidades, el sistema puede definirse como cualquier porción del proceso que se escoge para estudiar: el proceso completo, una combinación de unidades del proceso; una sola unidad; un punto donde dos o más flujos se unen o donde un flujo se ramifica.

Para cada uno de los subsistemas se pueden escribir balances de masa. Los balances para el proceso completo se conocen como balances globales.

El procedimiento para resolver problemas de balance de materia es esencialmente el mismo, excepto que para el caso de varias unidades se pueden aislar y escribir los balances de varios subsistemas, de manera que se obtengan suficientes ecuaciones para determinar todas las incógnitas de los flujos. Generalmente se usan los balances globales para resolver las incógnitas de los flujos de alimentación y de productos y luego se usan los balances de los distintos subsistemas para determinar las variables de los flujos interiores.



Al escoger los subsistemas para los que se escriben los balances, es conveniente escoger las fronteras que intersecan los flujos que tienen el menor número de incógnitas posible.

En los procesos de unidades múltiples es imprescindible trazar las fronteras parciales alrededor de las cuales se analiza una parte del sistema. En la figura anterior se ilustra bien esta idea. Se puede hacer el análisis solamente en el mezclador, en el reactor o en el condensador. Se puede analizar el proceso alrededor del conjunto mezclador-reactor, por ejemplo, o alrededor del conjunto reactor-condensador. Por último, también es posible llevar a cabo el análisis alrededor de todo el sistema (en la frontera del sistema).

En sistemas de múltiples unidades se puede formular un conjunto más amplio de ecuaciones de balance. Por cada unidad del proceso es posible plantear tantas ecuaciones de balance por componentes como componentes hay (una ecuación por cada componente) más una ecuación de balance global (por unidad). Por cada frontera que agrupe dos o más unidades también se puede hacer lo mismo, así como para el sistema total.

Es importante determinar cuántas incógnitas hay en el problema y cuáles ecuaciones son independientes. Hay que verificar que el subsistema (o sistema total) analizado tiene cero grados de libertad, antes de escribir las ecuaciones. La idea sigue siendo comenzar a resolver el problema formulando las ecuaciones de balance que involucren el menor número de incógnitas. Véanse los ejemplos siguientes.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

EJERCICIO 1:

Los granos de café contienen sustancias solubles en agua y otras que no lo son. Para producir café instantáneo, se disuelve la porción soluble en agua hirviendo (es decir, preparando café) en percoladores grandes, y se alimenta después con el café un secador en el que se evapora el agua, dejando el café soluble como un polvo seco. La porción insoluble de los granos de café (el sedimento) pasa a través de varias operaciones (diferentes secados) y los sedimentos secos pueden usarse para rehabilitación de tierras. La disolución extraída de los sedimentos en la primera etapa de secado (separador de ciclos) se junta con el flujo de salida de los percoladores y esa es la alimentación del secador. Aquí se muestra el diagrama de flujo de este proceso, en el cual S e I representan los componentes solubles e insolubles de los granos de café, A es el agua y C la disolución que contiene 35 % en masa de S y 65 % en masa de A.

(a) Calcule las velocidades de flujo (kg/h) e los flujos 1 a 8.

(b) Si el líquido de salida de la prensa puede alimentar el secador por dispersión sin afectar el sabor del producto, ¿en qué porcentaje se puede aumentar la velocidad de producción del café instantáneo?

SOLUCIÓN

Balances de masa en el secador:

Balance parcial de masa para I: $0{,}50*Q_7 = 0{,}70*1400\text{kg/h} \rightarrow Q_7 = 1960$ kg/h.

Balance total de masa: $Q_7 = Q_8 + 1400$ kg/h $\rightarrow Q_8 = 560$ kg/h.

Balances de masa en la prensa:

Balance parcial de masa para I: $0{,}20*Q3 = 0{,}50*Q7 \rightarrow Q_3 = 4900$ kg/h.

Balance total de masa: $Q_3 = Q_5 + Q_7 \rightarrow Q_5 = 2940$ kg/h.

Balances de masa en el secador por dispersión:

Balance parcial de masa para S: 500 kg /h $= 0{,}35*Q_4 \rightarrow Q_4 = 1428{,}6$ kg/h.

Balance total de masa: $Q_4 = Q6 + 500$ kg/h $\quad Q_6 = 928{,}6$ kg/h.

Balance de masa en el secador:

Balance parcial de masa para A: $0{,}50*Q_7*0{,}65 = Q_8 + 1400$ kg/h$*x \rightarrow x = 0{,}055$

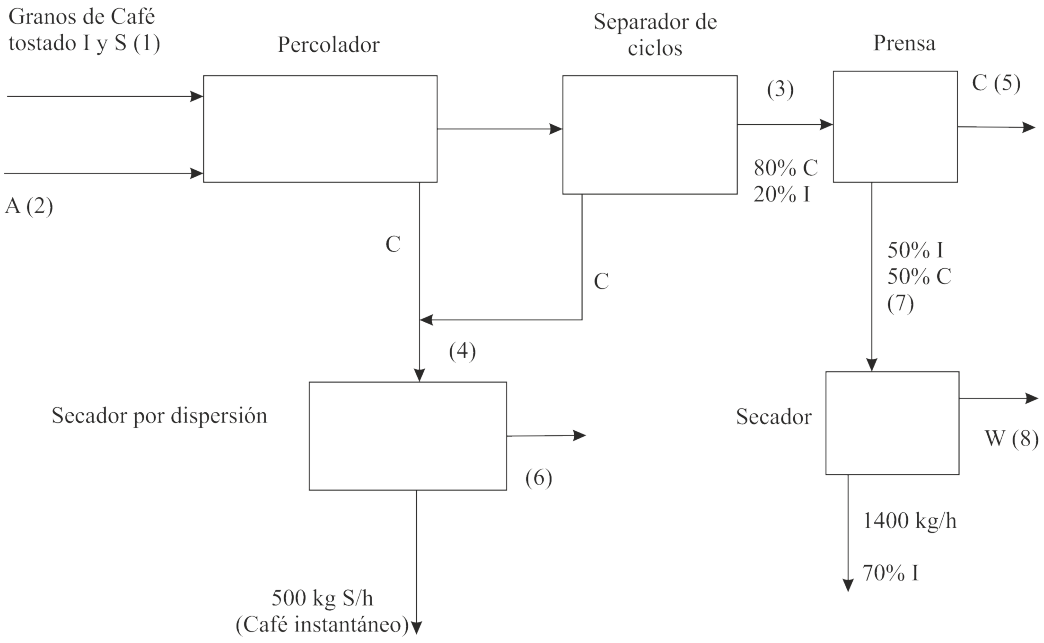
Balances globales (para todo el proceso):

Balance parcial de masa para A: $Q_2 = Q_5*0{,}65 + Q_8 + 1400$ kg/h$*0{,}055 + Q_6$

$\rightarrow Q_2 = 3476{,}6$ kg/h.

Balance total de masa: $Q_1 + Q_2 = Q_5 + Q_8 + 1400$ kg/h $+ 500$ kg/h $+ Q_6$.

$\rightarrow Q_1 = 2852$ kg/h.



(b) Balances de masa en el secador por dispersión:

Balance parcial de masa para A: 2940 kg/h$*0{,}65 + 1428{,}6$ kg/h$*0{,}65 = Q_6 \rightarrow Q_6 = 2839{,}6$ kg/h.

Balance total de masa: 2940 kg/h $+ 1428{,}6$ kg/h $= Q_6 +$ Café instantáneo.

→ Café instantáneo = 1528,4 kg/h.

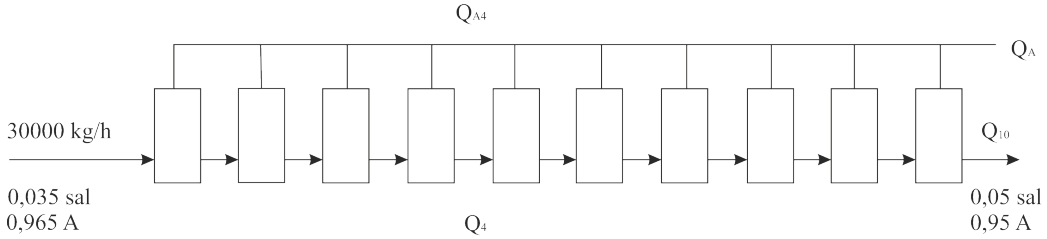
Porcentaje de aumento = {(1528,4 kg/h - 500 kg/h)/500}*100 = 205,68 %.

Respuestas: (a) 2852; 3746,6; 4900; 1428,6; 2940; 928,6; 1960; 560 kg/h; (b) 205,68 %

EJERCICIO 2

Agua de mar, que contiene 3,50 % en masa de sal, pasa a través de una serie de 10 evaporadores. En cada una de las 10 unidades se evapora aproximadamente la misma cantidad de agua, que después se condensa y se combina para obtener un flujo de productos que es agua pura. La salmuera a la salida del último evaporador contiene 5,00 % en masa de sal. Si el proceso se alimenta con 30000 kg/h de agua de mar, calcule el rendimiento fraccionario de agua pura y el porcentaje en peso de sal en la disolución que sale del cuarto evaporador.

SOLUCIÓN



Base de cálculo: 1 hora de operación.

Balance global de masa para la sal: 30000 kg*0,035 = Q10*0,05 → Q10 = 21000 kg.

Balance global de masa: 30000 kg = QA + Q10 → QA = 9000 kg.

Cada evaporador elimina 900 kg de agua.

Balance global total entre el 1º y el 4º evaporador: 30000 = 3600 + Q4 → Q4 = 26400 kg.

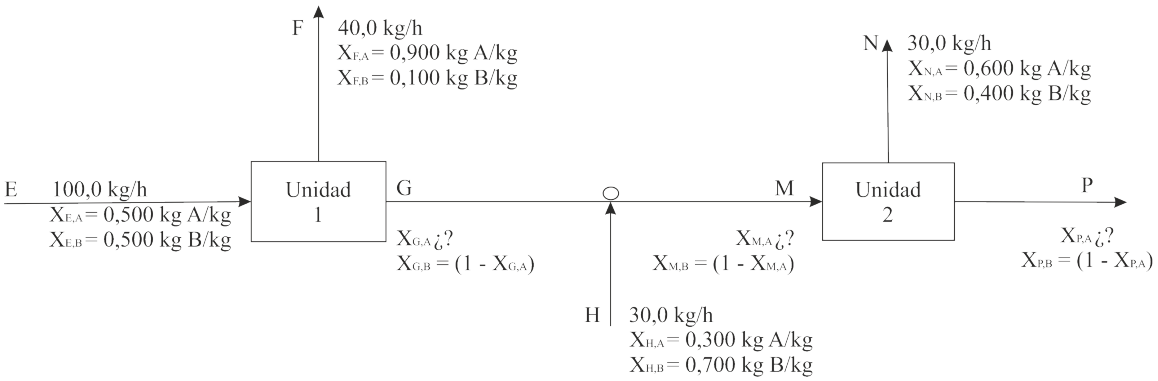
Balance de masa parcial para la sal entre el 1º y el 4º evaporador: 30000*0,35 = Q_4*x

x = 0,0398.

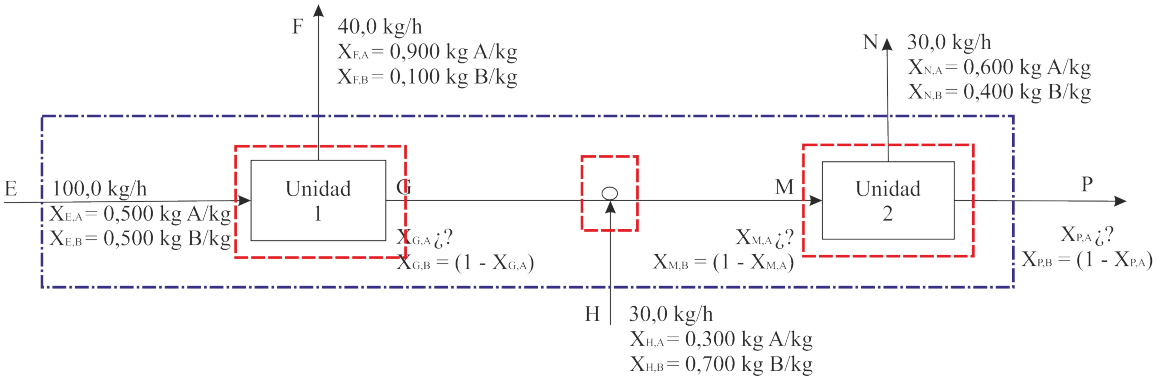
Respuestas: 900 kg de agua; 3,98 %.

EJERCICIO 3

En la figura se muestra el diagrama de flujo de un proceso continuo y en estado estacionario, que consta de dos unidades de separación.



Cada corriente contiene dos componentes, A y B. en diferentes proporciones. Las corrientes desconocidas están marcadas como G, M y P. Calcular las velocidades de flujo desconocidas así como las composiciones de las corrientes G, M y P.



SOLUCIÓN:

En este problema hay tres subsistemas para los cuales pueden escribirse balances, delimitados por las fronteras en línea a trazos (de color rojo): la unidad 1, el punto de unión de corrientes y la unidad 2. El sistema total está delimitado por la frontera en línea punteada (de color azul).

Como incógnitas hay tres componentes desconocidas. G. M. P. y tres fracciones másicas desconocidas ($x_{G,A}$, $x_{M,A}$, $x_{P,A}$), para un total de 6 incógnitas.

Grados de libertad en la unidad 1: hay dos incógnitas (G. $x_{G,A}$) y se pueden formular dos ecuaciones independientes $\rightarrow$ 0 grados de libertad.

Grados de libertad en la unidad 2: hay cuatro incógnitas (M, $x_{M,A}$, P, $x_{P,A}$) y se pueden formular dos ecuaciones independientes = 2 grados de libertad.

Grados de libertad del sistema total: hay dos incógnitas (P, $x_{P,A}$) y se pueden formular dos ecuaciones independientes $\rightarrow$ 0 grados de libertad.

En el punto de unión de corrientes también hay 2 grados de libertad.

No es necesario seguir analizando, pues ya se puede resolver el problema efectuando los balances en la unidad 1 y seguidamente en el sistema total.

Base de tiempo: 1 hora.

Unidad 1

BC en A:
$$E\,x_{E,A} = F\,x_{F,A} + G\,x_{G,A}$$

$$100.0(0.500) = 40.0(0.900) + Gx_{G,A} \tag{2.1}$$

BG:
$$E \;=\; F + G$$

$$100.0 = 40.0 + G[kg] \;\rightarrow\; G = 60.0kg.$$

Sustituyendo este valor en la ecuación 2.1 se obtiene que:

$$X_{G,A} = \frac{100,0(0,500) - 40.0(0.900)}{60,0}\frac{kg}{kg} = 0,233Kg\ A/Kg$$

Además:

$x_{G,A} + x_{G,B} = 1,00 \rightarrow x_{G,B} = 1,00 - 0,233 = 0,767 kgB/kg.$

Sistema total

BG: $$E + H = F + N + P$$

$$100,0 + 30,0 = 40,0 + 30,0 + P \rightarrow P = 60,0 kg.$$

BC en A: $$E\ x_{E,A} + H\ x_{H,A} = F\ x_{F,A} + N\ x_{N,A} + P\ x_{P,A}$$

$$100,0(0,500) + 30,0(0,300) = 40,0(0,900) + 30,0(0,600) + 60,0 x_{P,A} \rightarrow x_{P,A} = 0,0833 kg\ A/kg$$
$$x_{P,A} + X_{P,B} = 1,00 \rightarrow x_{P,B} = 1,00 - 0,0833 = 0,917 kgB/kg.$$

Unidad 2 (aunque también pudo haber sido en el punto de unión de corrientes)

BG: $$M = N + P$$

$$M = 30,0 + 60,0[kg] = 90,0 kg$$

BC en A: $$M\ x_{M,A} = N\ x_{N,A} + P\ x_{P,A}$$

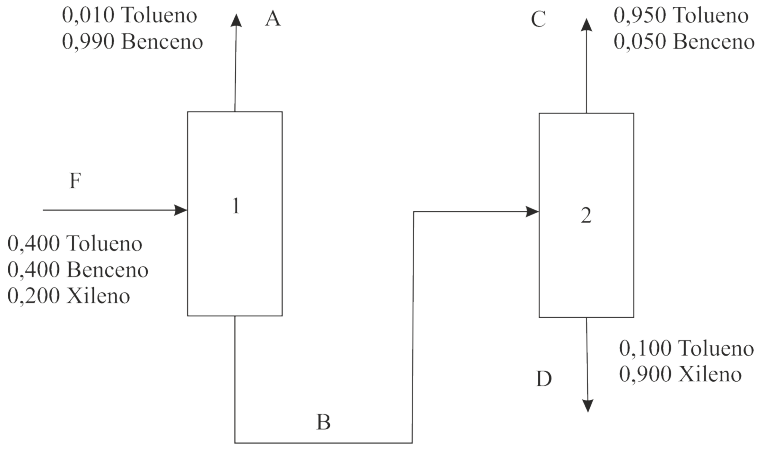
$$X_{M,A} = \frac{30,0(0,600) + 60,0(0,0833)}{90,0} \frac{kg}{kg} = 0,255\ ka\ A/ka$$

Finalmente:

$x_{M,A} - x_{M,B} = 1,00 \rightarrow x_{M,B} = 1,00 - 0,255 = 0,745 kgB/kg$

EJERCICIO 4

En la figura siguiente se muestra una unidad de separación de compuestos en dos etapas. Dado el flujo de entrada F de 855 kg/h. calcular todas las corrientes desconocidas y la composición de la corriente B.



Solución:

Es un problema donde intervienen dos unidades. Tómese como base de tiempo una hora. Los fraccionamientos de todas las corrientes han sido dados a excepción del fraccionamiento de la corriente intermedia B.

Hay seis incógnitas: las corrientes A, B, C, D. y dos fracciones másicas. $x_{B,X}$ y $x_{B,B}$ (suponiendo que $x_{B,T}$ = 1 - $x_{B,X}$ - $x_{B,B}$).

En la unidad 1 se presentan cuatro incógnitas (A, B, $x_{B,X}$, $x_{B,S}$) y se pueden formular tres balances independientes: 1 grado de libertad. Tomando en consideración el sistema global se tienen tres incógnitas (A, C, D) y se pueden escribir tres balances: 0 grados de libertad. Comenzaremos a resolver por esta vía: BG:

$$F = A + C + D$$

$$855 = A + C + D \tag{2.2}$$

BC en Xileno: $$F\ x_{F,X} = D\ x_{D,X}$$

$$855(0,200) = D(0,900) \rightarrow D = \frac{855(0.20)}{0,900}[kg] = 190kg \tag{2.3}$$

BC en Benceno: $$F\ x_{F,B} = A\ x_{A,B} + C\ x_{C,B}$$

$$855(0,400) = A(0,990) + C(0,050) \tag{2.4}$$

Utilizando el resultado de 2.3 en la ecuación 2.2 junto con la ecuación se tiene que:

C = 337 kg

A = 328 kg

En la unidad 1:

BG: $F = A + B \rightarrow B = F - A = 855 - 328[kg] = 527kg$

BC en Xileno: $F\ x_{F,x} = B\ x_{B,x} \rightarrow x_{B,x} = \frac{855(0,200)kg}{527kg} = 0,324\ kg\ X/kg$

BC en Benceno: $F\ x_{F,B} = A\ x_{A,B} + B\ x_{B,B}A$

$x_{B,B} = \frac{855(0,400) - 328(0,990)kg}{527kg} = 0,0328kg\ B/kg$

BC en Tolueno: $F\ x_{F,T} = A\ x_{A,B} + B\ x_{B,B}$

$x_{B,T} = \frac{855(0,400) - 328(0,100)kg}{527kg} = 0,0643kg\ T/kg$

Para chequear se puede utilizar la siguiente expresión:

$x_{B,X} + x_{B,B} + x_{B,T} = 1.00 \rightarrow 0.324 + 0.0328 + 0.643[kg/kg] = 1.00$

2.7. DISEÑO DE TANQUES

En los Estados Unidos de Norteamérica y en muchos otros países del mundo, incluyendo el nuestro, el diseño y cálculo de tanques de almacenamiento, se basa en la publicación que realiza el "Instituto Americano del Petróleo", al que esta institución designa como "STANDAR A.P.I. 650", para tanques de almacenamiento a presión atmosférica y "STANDAR A.P.I. 620", para tanques de almacenamiento sometidos a presiones internas cercanas a 1 Kg /cm^2 (14 lb/ pulg^2). El estándar A.P.I. 650 sólo cubre aquellos tanques en los cuales se almacenan fluídos líquidos y están construidos de acero con el fondo uniformemente soportado por una cama de arena, grava, concreto, asfalto, etc, diseñados para soportar una presión de operación atmosférica o

presiones internas que no excedan el peso del techo por unidad de área y una temperatura de operación no mayor de 93 ^{o}C (200 ^{o}F), y que no se usen para servicios de refrigeración. Este estándar cubre el diseño y cálculo de los elementos constitutivos del tanque. En lista de los materiales de fabricación, se sugieren secuencias en la erección del tanque, recomendación de procedimientos de soldaduras, pruebas e inspecciones, así como lineamientos para su operación.

A continuación, mostramos la tabla 2.1 con los diferentes requerimientos de diversos estándares para la fabricación de tanques de almacenamiento.

Tabla 2.1: Requerimientos de diversos estándares para tanques de fondo plano

Tabla 1.1	A.P.I. 650			A.P.I. 620			A.N.S.I	AWWA
	Básico	Apéndice A	Apéndice F	Básico	Apéndice R	Apéndice Q	B96.1	
Presión Interna Máxima	Atm.	Atm.	0.17 kg/cm^2	1 kg/cm^2	1 kg/cm^2	1 kg/cm^2	Atm.	Atm.
Temperatura Mínima	NS	(-)28.8^{o}C	NS	(-)45.5^{o}C	(-)54.4^{o}C	(-)167°C	(-)28.8^{o}C	(-)48.3^{o}C
Temperatura Máxima	93.3^{o}C	93.3^{o}C	93.3^{o}C	93.3^{o}C	(-)40°C	93.3^{o}C	204°C	RT
Espesor Máximo del Cuerpo	44.4 cm	12.7 cm	44.4 cm	NS	NS	NS	NS	50.8 mm.
Espesor Mínimo del Cuerpo								
D $<$ 15.2 m.	4.76 mm.			4.76 mm.			4.76 mm.	
15.2 m. $<$ D $<$ 36.5 m.	6.35 mm.			6.35 mm.			6.36 mm.	
36.5 m. $<$ D $>$ 60.9 m.	7.93 mm.			7.93 mm.			7.93 mm.	
D $>$ 60.9 m.	9.52 mm.			9.52 mm.				9.52 mm.
Espesor Mínimo del Techo	4.76 mm.			NS			4.76 mm.	4.76 mm.
Espesor Máximo del Techo	6.35 mm. + CA			NS			6.35 mm.	NS
Ángulo Mínimo de Coronamiento								
D $<$ 10.6 m.	50.8 mm. x 50.8 mm. x 4.76 mm.			NS	63.5 mm. x 63.5 mm. x 6.35 mm.		NS	
10.6 m. $<$ D $>$ 18.2 m.	50.8 mm. x 50.8 mm. x 6.35 mm.			NS	63.5 mm. x 63.5 mm. x 7.93 mm.		NS	
D $>$ 18.2 m.	76.2 mm. x 76.2 mm. x 9.52 mm.			NS	76.2 mm. x 76.2 mm. x 9.52 mm.		NS	

NS = Sin Especificación CA = Corrosión Permisible RT = Temperatura Ambiente.

a) La temperatura puede ser elevada hasta 260° C cuando se cumplen ciertas especificaciones del material y requerimientos de diseño adicionales.

b) Este espesor aplica para tanques con diámetros menores a 6.096 m.

c) Este espesor aplica para tanques con diámetros entre 6.096 m. y 36.57 m.

d) El espesor mínimo de cualquier placa es 4.76 mm. + corrrosión.

e) Para espesores mayores de 50.8 mm. se deben cumplir algunos requerimientos especiales

f) Para techos cónicos, el espesor de placa puede ser calibre No. 7.

2.7.1. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

Los tanques de almacenamiento de materias primas y productos de la planta se diseñan según el código API ASME, para el diseño de tanques que trabajan a presión atmosférica y contienen productos (líquidos o sólidos) en su interior.

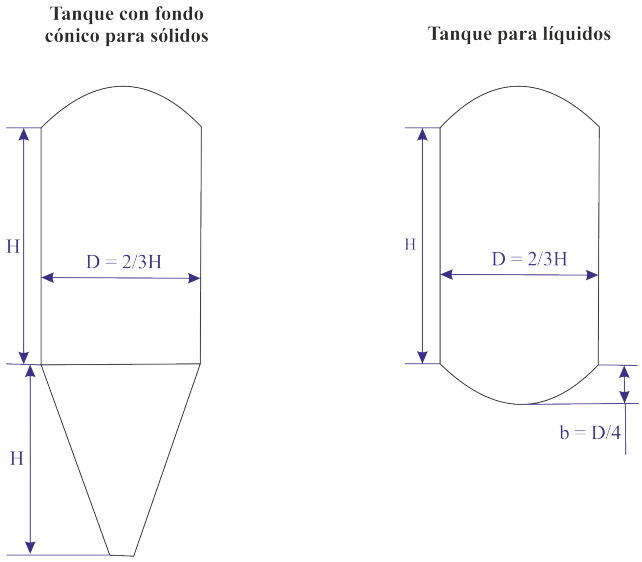
2.7.1.1. Geometría de los recipientes

- Recipientes para sólidos:
  - Cabeza: elipsoidal 2:1

- Fondo: cónico
- Carcasa: cilíndrica

- Recipientes para líquidos:
  - Cabeza y Fondo: elipsoidal 2:1
  - Carcasa: cilíndrica

Las dimensiones para cada una de las partes vendrán determinadas en función de la altura de la carcasa cilíndrica H con las siguientes proporciones:



2.7.1.2. Volumen de los recipientes

$V_{cilindro} = \pi * R^2 * H$

$V_{cono} = 1/3 * \pi * R^2 * h_{cono}$

$V_{cabeza} = (\pi * D^2 * h_{cab})/6$

$V_{Tanque\ Sólidos} = V_{cilindro} + V_{cono} + V_{cabeza}$

$V_{Tanque\ Líquidos} = V_{cono} + 2 * V_{cabeza}$

Se ha de tener en cuenta que los recipientes por seguridad estarán llenos como máximo al 80 %, por lo que habrá que tenerlo en cuenta a la hora de establecer sus dimensiones.

En función del volumen necesario de almacenamiento se establece el valor de H, y en función de éste el resto de dimensiones del tanque.

2.7.2. ALTURA DEL TANQUE

La altura del tanque será la suma de las longitudes de las tres partes que lo forman, carcasa, cabeza y fondo.

Recipientes para sólidos:

$H_t = H + h_{cono} + h_{cab}$

Recipientes para líquidos:

$H_t = H + 2 * h_{cab}$

2.7.2.1. Presión de proyecto

La presión de proyecto para el diseño de los recipientes debe ser mayor que la máxima de:

$P >$ 1.1 * Presión máxima de operación

$P >$ Presión máxima de operación + 1 kg/cm^2

2.7.2.2. Espesor de los recipientes

El espesor (t) de cada una de las partes de los recipientes viene dado por las siguientes expresiones:

t cilindro = $(\gamma * d * r)\sigma_t * E_s$

t cono = $(\gamma d^2 * tg\ \alpha)/4 * \sigma_t * E_s * Cos\ \alpha$

t cabeza = $(P * D_e)/2 * \sigma_t * E_s + 1,8 * P$

Dónde:

γ = peso específico del producto almacenado, kg/cm^3.

d = nivel máximo de producto almacenado, cm.

r = radio del cilindro, cono y cabeza elipsoidal, cm.

σ_t = tensión máxima admisible del material, kg/cm^2.

E_s = eficiencia de soldadura según tipo de soldadura. Para junta soldada a tope en doble V y no examinada, toma valor de 0.6.

P = presión externa, kg/cm^2.

De = Diámetro externo, cm.

α = semiángulo de la abertura del cono,

Habrá que tener en cuenta la corrosión debido al producto almacenado y a los agentes externos, por lo que el espesor final será:

$T_{fcilindro} = t_{cilindro} + t_{corrosión},\ mm$

$T_{fcono} = t_{cono} + t_{corrosión},\ mm$

$T_{fcabeza} = t_{cabeza} + t_{corrosión},\ mm$

El espesor de corrosión será función del material elegido para la construcción, y las condiciones de operación del tanque.

2.7.2.3. Material de construcción

Se escoge un material de construcción para el tanque de acuerdo con las necesidades de almacenamiento del producto y con tensión admisible (σ_a) suficiente para la construcción del mismo. Para el cálculo de los espesores de almacenamiento, es necesario utilizar la tensión máxima admisible del material, σ_t , que es el resultado de dividir la tensión admisible del material por el coeficiente de seguridad aplicado en cada caso.

$\sigma_t = \sigma_a/n$

Dónde:

n = coeficiente de seguridad.

2.7.2.4. Temperatura de proyecto

La temperatura de proyecto será:

$T_{proyecto} = T_{trabajo} + T_{ambiente}$

2.7.2.5. Prueba hidráulica

Antes de su puesta en operación, todos los recipientes deben ser comprobados sometiéndolos a una prueba hidráulica a una presión mayor que la de proyecto.

La presión de prueba hidráulica será:

$P_{hidráulica} = 1.5 * P * \sigma_t / \sigma_{amb}$

Donde:

P = presión del proyecto.

σ_t = tensión máxima admisible a temperatura de proyecto.

σ_{amb} = tensión máxima admisible a temperatura ambiente.

El recipiente debe soportar la presión hidráulica y se ha de verificar que la tensión máxima desarrollada en las paredes $< 90\,\%$ del límite elástico del material.

2.7.2.6. Calculo de espesores de la envolvente.

Los espesores mínimos de las placas de la envolvente se calculan de acuerdo con los esfuerzos en las juntas verticales. Las siguientes ecuaciones se pueden usar para calcular el espesor mínimo de la placa de la envolvente.

En unidades de S.I.	En unidad U.S
$t_d = \frac{4,9D(H-0,3)G}{S_d} + C$	$t_d = \frac{2,6D(H-1)G}{S_d} + C$
$t_t = \frac{4,9D(H-0,3)}{S_t}$	$t_t = \frac{2,6D(H-1)}{S_t}$

Dónde:

t_d = Espesor de diseño de la envolvente en S.I. (mm); U.S. (pulg).

t_t = Espesor de la envolvente por prueba hidrostática en S.I. (mm); U.S. (pulg).

D = Diámetro nominal del tanque en S.I. (m); U.S. (pie)

H = Nivel del liquido para diseño en S.I. (m); U.S. (pie) Altura desde el fondo del anillo bajo consideración a la parte superior de la envolvente incluyendo la parte superior del ángulo de coronamiento, algunas veces se establecen límites en la altura de llenado del tanque hasta que ocurra cualquier derrame, o cualquier otro nivel especificado por PEMEX, restringido por un techo flotante interno, o el control permitido por la acción de una onda sísmica.

G = Gravedad especifica del diseño del líquido almacenado, nunca menor de 1,0.

C = Corrosión permisible en S.I. (mm); U.S. (pulg) indicada por PEMEX.

S_d = Esfuerzo permisible para las condiciones de diseño en S.I. (MPa); U.S. (lb/pulg^2).

S_t= Esfuerzo permisible para las condiciones de prueba hidrostática en S.I. (MPa); U.S. (lb/pulg^2).

2.8. BALANCE TRANSITORIO DE TANQUES

La expresión general para un balance de materia es la siguiente:

$$\{Caudal\ de\ acumulación\ de\ materia\} = \{Caudal\ de\ entrada\ de\ materia\} - \{Caudal\ de\ salida\ de\ materia\} + \{Caudal\ de\ generación\ de\ materia\} \tag{2.5}$$

Que también puede expresarse como:

$$\{Caudal\ de\ acumulación\ de\ materia\} = \{Caudal\ neto\ de\ entrada\ de\ materia\} + \{Caudal\ de\ generación\ de\ materia\} \tag{2.6}$$

Si se considera un sistema como el de la figura del primer problema, el balance de materia anterior aplicado al componente i será:

$$\frac{dMi}{dt} = \sum_{n=1}^{N} m_{n,i} + R_i \qquad (i = 1, 2, ..., C) \tag{2.7}$$

Donde:

$\frac{dMi}{dt}$: Variación de la cantidad de componente i en el sistema con el tiempo.

$m_{n,i}$: Caudal de componente i que entra o sale del sistema con la corriente n.

R_i: Cantidad de componente i generado por unidad de tiempo en el sistema, debido a una o varias reacciones químicas (en general n reacciones) en las que i interviene.

En el sumatorio de la ecuación 2.7 se adoptará el signo (+) para las corrientes de entrada y el signo (-) para las de salida.

Reactor continúo de tanque agitado funcionando idealmente

Un reactor continuo de tanque agitado es, básicamente, un recipiente por el que circula un caudal de fluido m, y en cuyo seno el fluido se encuentra perfectamente agitado de manera que, en un momento dado, todos los puntos del mismo poseen idénticas propiedades, variando éstas con el tiempo.

Si se aplica el balance macroscópico de materia a un tanque agitado de volumen constante (caudal volumétrico de entrada = caudal volumétrico de salida) donde no ocurre reacción química, el balance 2.7 se puede expresar como:

$$\frac{dMi}{dt} - (m_{1,i} - m_{2,i}) = 0 \tag{2.8}$$

Donde $(m_{1,i} - m_{2,i})$ es la diferencia entre los caudales másicos de entrada y salida del componente i, y Mi la masa del componente i dentro del tanque de volumen V en un momento dado.

Si se tiene en cuenta:

(1) Que la diferencia entre los caudales de entrada y salida puede expresarse como:

$$m_{1,i} - m_{2,i} = Q(C_{1,i} - C_{2,i}) \tag{2.9}$$

Donde Q es el caudal volumétrico que fluye a través del sistema (y que se supone constante) y $C_{1,i}$ y $C_{2,i}$ son, respectivamente, las concentraciones de componente i a la entrada y salida del mismo.

(2) Que la masa de componente i dentro del volumen V es:

$$M_i = \int_V C_i dV \tag{2.10}$$

Y por tanto:

$$\frac{dMi}{dt} = C_i \frac{dV}{dt} + V \frac{dC_i}{dt} \tag{2.11}$$

Donde ci es la concentración de componente i en el tanque.

El balance 2.8 quedará de la siguiente forma:

$$Q(C_{2,i} - C_{1,i}) + V \frac{dCi}{dt} = 0 \tag{2.12}$$

Ecuación que, una vez integrada, permite obtener la función $Ci = C_i(t)$ que expresa la variación de la concentración del componente i en el tanque con el tiempo.

Si se supone que por el reactor continuo de tanque agitado circula un caudal constante de agua y que, en un momento dado, se introduce en el mismo una cierta cantidad de componente i; al integrar la ecuación 2.12 para determinar la variación de la concentración del componente i dentro del tanque con el tiempo, debe tenerse en cuenta:

(a) Que la concentración del componente i a la salida es la misma que la concentración del componente i dentro del tanque, es decir, $C_{2,i} = C_i$.

(b) Que la concentración del componente i en el caudal de entrada es cero.

Por tanto podrá escribirse:

$$QC_i + V \frac{dCi}{dt} = 0 \tag{2.13}$$

$$\frac{dCi}{Ci} = -\frac{Q}{V} dt \tag{2.14}$$

$$\int_{C_{io}}^{Ci} \frac{dCi}{Ci} = -\frac{Q}{V} \int_0^t dt \tag{2.15}$$

$$ln\left(\frac{dCi}{Cio}\right) = -\frac{Q}{V} t \tag{2.16}$$

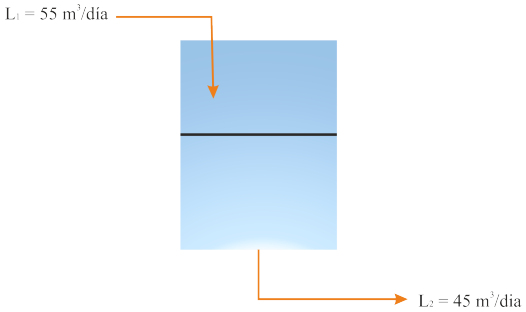
$$Ci = C_{io} exp\left(-\frac{Q}{V}\right) t \tag{2.17}$$

Donde C_{io} es la concentración de componente i en el tanque en el tiempo t=0.

2.9. PROBLEMAS DE APLICACIÓN

Problema 1

Un tanque de almacenamiento de agua de una planta tiene una capacidad de 70 m^3. Al comenzar un día de operación el ingeniero observa que hay 30 m^3 de agua en el tanque. Durante ese día el tanque recibió 55 m^3 y se le extrajeron 45 m^3. ¿Cuál será el volumen de agua en el tanque al final del día?



Como se tienen entradas, salidas y acumulación se aplica la ecuación completa de balance de masa:

E - S = A

$$L_1 - L_2 = \frac{dV}{d\theta}$$

$$L_1 - L_2 \int d\theta == \int dV$$

$$(L_1 - L_2)\theta + k = 0$$

Si θ = 0; V =V_0 $\quad\therefore V = V_0 + (L_1 - L_2)\theta$

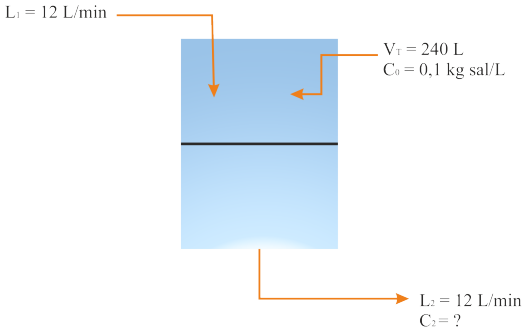
Balances: $\quad 55 - 45 = \frac{dV}{d\theta} = 10\frac{m^3}{día}$

V= 30 m^3 + (10 m^3/día) día = 40 m^3

Al finalizar el día el tanque tendrá 40 m^3 de agua.

Problema 2

Un tanque contiene 240 l de solución acuosa de NaCl que contiene 0.1Kg de sal/l y se alimenta al tanque de agua a razón de 12 l/mint y la mezcla agitada sale del tanque al mismo gasto a) Que cantidad de sal contiene el tanque en cualquier instante b) Cuando contendrá 0.07 Kg de sal/l de solución que sale del tanque.



E - S = A

$$L_1 - L_2 = \frac{dV}{d\theta}$$

Balance de sal

$$L_1C_1 - L_2C_2 = \frac{d(CV)}{d\theta}$$

$$L_1C_1 - L_2C_2 = V_0\frac{d(C_2)}{d\theta}$$

Como C_1 = 0

$$-L_2C_2 = V_0\frac{d(C_2)}{d\theta}$$

$$-\frac{L_2}{V_0}d\theta = \frac{d(C_2)}{C_2}$$

$$-\int_0^t \frac{L_2}{V_0}d\theta = \int_{0.1} \frac{d(C_2)}{C_2}$$

$$-\frac{L_2 t}{V_0} = (lnC_2 - ln0.1) = ln\frac{C_2}{0.1}$$

$$C_2 = 0.1\epsilon^{\frac{L_2 t}{V_0}}$$

$$C_2 = 0.1\epsilon^{-\frac{t}{20}}$$

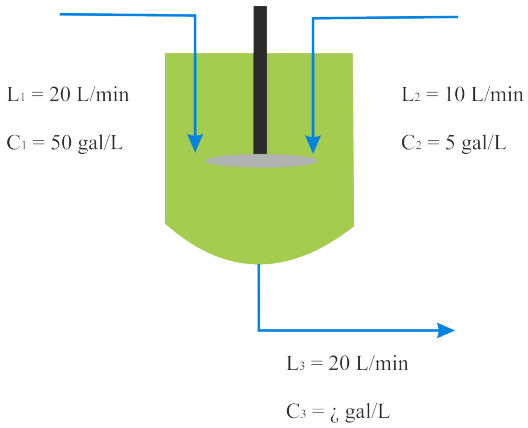
$$\frac{L_2 t}{V_0} = ln\frac{C_2}{0.1} = ln\frac{0.07}{0.1}$$

$$t = -20ln\frac{0.07}{0.1}$$

$$t = 7.1\ mint$$

Problema 3

A un tanque que contiene originalmente 2000 L de solución salina con una concentración de 63 g/L, se le introducen simultáneamente dos corrientes salinas, una de 20 L/min y 50g/L, y otra de 10 L/min, con 5 g/L de sal. Al mismo tiempo, por la parte inferior del tanque se extraen 20 L/min de solución. Si el tanque está perfectamente agitado, cuál será la concentración contenido en el tanque cuando llegue a 3000 L.



Este es un problema de régimen transitorio en el que cambia tanto el volumen como la concentración de sal que hay en el tanque.

Balance de masa total

$$L_1 + L_2 - L_3 = \frac{dV}{d\theta}$$

$$(L_1 + L_2 - L_3)\int d\theta = \int dV$$

$$(L_1 + L_2 - L_3)\theta + k = v$$

Si $\theta = 0$; V = V_0 $\quad\therefore k = V_0$

$$V = V_0 + (L_1 + L_2 - L_3)\theta$$

$$V = 2000 + 10\theta$$

Balance de sal

$$L_1C_1 + L_2C_2 - L_3C_3 = \frac{d(VC)}{d\theta} = V\frac{dC_3}{d\theta} + C_3\frac{dV}{d\theta}$$

Tiempo de llenado del tanque:

$$20 + 10 - 20 = 10 = \frac{dV}{d\theta}$$

$$(20)(50) + (10)(5) - 20C_3 = \frac{d(VC)}{d\theta} = V\frac{dC_3}{d\theta} + 10C_3$$

$$1050 - 20C_3 = \frac{d(VC)}{d\theta} = (2000 - 10\theta)\frac{dC_3}{d\theta} + 10C_3$$

$$1050 - 30C_3 = (2000 - 10\theta)\frac{dC_3}{d\theta}$$

$$V = 2000 + 10\theta$$

Para que V = 3000, se requiere θ = 100 min

$$\int_0^{100} \frac{d\theta}{2000 + 10\theta} = \int_{63}^{C_3} \frac{dC_3}{1050 - 30C_3}$$

$$\frac{1}{10} ln(2000 + 10\theta)|_0^{100} = -\frac{1}{30} ln(1050 - 30C_3)|_{63}^{C_3}$$

$$C_3 = 44g/L$$

2.10. PROBLEMAS APLICATIVOS

Problema 1: Dibuje un diagrama de flujo para el proceso que se describe a continuación, etiquetando todos los flujos de alimentación, de producción y de conexión entre las unidades: La deshidrogenación catalítica del propano se lleva a cabo en un reactor continuo de cama empacada. Un precalentador se alimenta con 100 libras por hora de propano puro, en el que se calienta a una temperatura de 670°C antes de pasar al reactor. El gas de salida del reactor, que contiene propano, propileno, metano e hidrógeno, se enfría desde 800°C hasta 110°C y alimenta una torre de absorción en la que el propano y el propileno se disuelven en aceite. El aceite entra a una torre de desorción en la que se calienta, permitiendo la salida de los gases disueltos; estos gases se comprimen y se transfieren a una columna de destilación de alta presión, en donde el propano y el propileno se separan. El flujo de propano se hace recircular hacia la alimentación del precalentador del reactor. El flujo del producto de la columna de destilación contiene 98 % de propileno, y el flujo de recirculación, 97 % de propano. El aceite desorbido se hace recircular a la torre de absorción

Problema 2: Se destilan cien kilogramos por hora de una mezcla que contiene partes iguales en masa de benceno y tolueno. La velocidad de flujo del producto en la cabeza de la columna es de 48,8 kg/h, y el residuo de la destilación contiene 7,11 % en peso de benceno. Dibuje y etiquete un diagrama de flujo del proceso. Después calcule las fracciones en masa y las fracciones molares del benceno y las velocidades de flujo molar del benceno y del tolueno (mol/h) en el flujo de productos en la cabeza de la destilación.

Respuestas: 0,95; 0,96; 26,5 moles tolueno/h.

Problema 3: Una mezcla de pintura que contiene 25 % de un pigmento y el resto de agua se vende a S/ 12,00/kg, y una mezcla que contiene 10 % de pigmento se vende a S/7,00/kg. Si un fabricante de pinturas produce una mezcla que contiene 15 % de pigmento, ¿en cuánto debe venderla (en S//kg) para tener una ganancia del 10 %?

Respuesta: S/ 9,53/kg.

Problema 4: Un flujo de agua líquida y aire entran a una cámara humectadora en la que el agua se evapora por completo. El aire a la entrada contiene 1,00 % en mol de H_20 (v), 20,8 % de O_2 y el resto de N_2, y el aire

húmedo contiene 10,0 % en mol de H_2O. Calcule la velocidad de flujo volumétrico (pie^3/min) del líquido requerida para humedecer 200 Ib mol/min del aire de entrada.

Respuesta: 5,77 pie^3/min.

Problema 5: Se desea preparar una tonelada de una solución acuosa de KOH al 6 % en masa. Para lo anterior se dispone de un tanque que contiene solución de KOH al 4 % en masa. ¿Cuánto KOH debe añadirse a la solución del 4 %?

Respuesta: 20.9 kg.

Problema 6: Una compañía tiene un contrato para NaCI del 98 % de pureza (2 % de impurezas insolubles) por S/ 1200 / tonelada. Su último cargamento de 10 toneladas tenía solamente el 90 % de pureza (10 % de sólidos insolubles). ¿Cuánto se debe pagar por el cargamento?

Respuesta: $11016.

Problema 7: En un proceso para la obtención de sal cristalizada se introduce a un evaporador - cristalizador una solución saturada de cloruro de sodio al 30 % en peso y 240º F. El proceso es isotérmico de tal manera que se obtiene por el fondo del aparato la sal cristalizada igual al 90 % de la sal alimentada. Se evaporan 100 lb/h de agua y se produce, además, una salmuera saturada (o sea de composición 30 % en masa). Calcúlese la cantidad de salmuera introducida en lb/h y la sal cristalizada en lb/h.

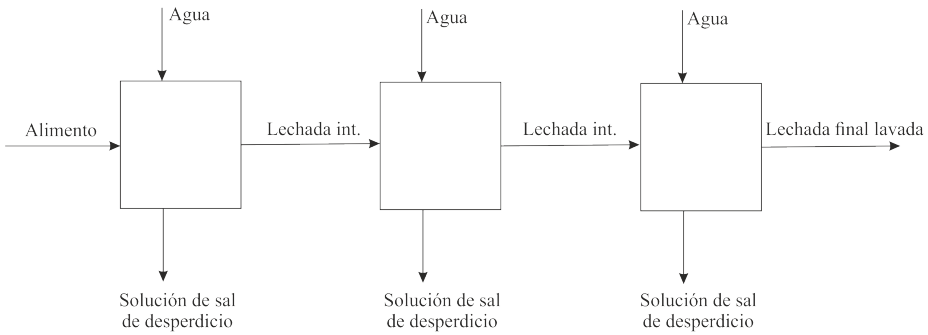
Problema 8: Una mezcla que contiene 20 % molar de butano, 35 % molar de pentano y 45 % molar de hexano se separa por destilación fraccionada. El destilado contiene 95 % molar de butano, 4 % de pentano y 1 % de hexano. El destilado debe contener 90 % del butano cargado en el alimento. Determínese la composición de los productos de fondo.

Respuesta: 2,46 % de butano, 42,24 % de pentano y 55,28 % de hexano

Problema 9: Se alimentan a un evaporador 10000 lb/h de una solución que contiene 6 % en masa de sal en agua. Se produce una solución saturada y parte de la sal cristaliza. Los cristales, con algo de solución adherida, son centrifugados para retirar parte de la solución. Luego los cristales se secan para remover el resto del agua. Durante una prueba de una hora, 837,6 lb de solución concentrada se retiran, 198,7 lb de solución son retiradas en la centrífuga y 361,7 lb de cristales secos salen del secador. Ensayos previos sobre la centrifuga demuestran que se retira aproximadamente el 60 % de la solución adherida. Calcúlese: la solubilidad de la sal en lb sal I / lb agua; el agua evaporada en el evaporador y el agua evaporada en el secador.

Respuestas: 0,298 lb sal / lb agua; 8500 lb; 102 lb.

Problema 10: Una lechada compuesta de un precipitado de TiO: en una solución de agua salada se va a lavar en tres etapas como se muestra en le diagrama de flujo. Si la lechada de alimentación consiste de 1000 lb/h de 20 % de TiOa, 30 % de sal y el resto de agua, calcúlese la alimentación de agua de lavado a cada etapa. Supóngase que:



(a) El 80 % de la sal alimentada a cada etapa sale con la solución de desperdicio.

(b) Se operan las etapas de manera que la lechada de salida contenga una tercera parte de sólidos.

(c) En cada etapa, la concentración de sal en su solución de desperdicio es la misma que la concentración de sal acarreada con la lechada de salida de la 1ra etapa.

Problema 11: Se bombea agua a alta presión a un proceso. Se desea añadir sal al agua con el fin de que ésta tenga un 4 % de sal. Por la dificultad de introducir un sólido a una corriente de alta presión, se utiliza el siguiente procedimiento: parte del agua que entra es derivada a través de un recipiente donde llega a saturarse de sal. Esta corriente saturada se mezcla con la de agua pura para obtener la solución al 4 %. Si la concentración de la solución saturada es del 17 %, ¿qué porcentaje de agua debe ser derivada a través del saturador?

Respuesta: 20,34 %.

Problema 12: Para un proceso se requieren 1000 pie^3/min de aire a 75º F con humedad de 0,01808 Ib-mol agua/lb-md aire seco. Para tal efecto se dispone de aire a 95º F con humedad de 0,05288 lb-mol agua/lb-mol aire seco, el cual se acondiciona pasando parte de él por un enfriador - condensador donde pierde agua y sale a 50º F con humedad de 0,01226 lb-mol agua/lb-mol aire seco para luego ser mezclado con la corriente derivada y recalentado hasta los 75º F. Calcúlese el porcentaje de aire derivado. La presión de trabajo es de 1 atm.

Problema 13: Un aceite lubricante se forma mezclando en un estanque agitado 350 lbs/min de aceite grado A, 225 lbs/min de aceite grado B y 120 lbs/min del aceite grado C. La mezcla se extrae a razón de 525 lbs/min a 70 ºF y 1 atm. Trace el diagrama y determine:

I. El balance de materia para una hora de operación

II. Si en un momento dado el inventario de aceite en el estanque es 10000 libras y se comienza a extraer aceite a razón de 1000 lbs/min, permaneciendo los ingresos originales idénticos, se pide determinar en cuanto tiempo el estanque quedaría vacío.

Problema 14: Un tanque contiene 100 galones de una solución salina, donde se encuentran disueltas 4 lb de sal. El flujo de agua fresca que entra al tanque es de 5 gal/min, saliendo un mismo flujo de solución del estanque. Si el tanque se encuentra perfectamente agitado. ¿Cuánta sal queda en el tanque a los 50 minutos?

Nota: Asuma que la densidad de la solución es igual a la densidad del agua.

CAPÍTULO 3

BALANCE DE MATERIA EN SISTEMAS ESTACIONARIO Y TRANSITORIO CON REACCIÓN QUÍMICA

OBJETIVOS

- Aplicar la ley de consevación de Materia a sistemas con reacción quimica
- Diferenciar entre reactivo limitante, en exeso, conversion, rendimiento y selectividad.
- Establecer un criterio para resolucion de problemas de Balance de materia en Procesos de combustión.
- Aplicar Balance de Materiales con reaccion química a unidades simples y Multiples

3.1. BALANCE DE MATERIA POR COMPONENTE EN SISTEMAS REACCIONANTES SIMPLES

Cuando en un proceso ocurren reacciones químicas, el balance de materia para sustancias que participan en la reacción no tiene la forma “entrada = salida” ya que debe contener un término de producción o de consumo.

Para resolver problemas de balances de masa en procesos con reacciones químicas, se pueden usar diferentes balances:

Balance para la masa total. Tiene la forma “Entrada = Salida”.

Balance para cada reactivo o para cada producto. Contiene un término de producción si se trata de un producto o un término de consumo si se trata de un reaccionante.

Balance para cada átomo participante en la reacción. Los balances de especies atómicas tienen la forma “entrada = salida” ya que los átomos no se crean ni se destruyen en una reacción química.

3.2. DEFINICIONES IMPORTANTES DE UNA REACCIÓN

3.2.1. ESTEQUIOMETRIA

La estequiometria estudia las proporciones en las que se combinan unas sustancias con otras. Una ecuación estequiometria representa a una reacción química e indica el número de moléculas o moles de reactivos y de productos que participan de la reacción. Como los átomos no se pueden crear ni destruir durante una reacción química, el número de átomos de cada elemento debe ser el mismo entre los productos y los reactivos para que la ecuación esté balanceada. Los coeficientes que se asignan a cada sustancia al balancear la ecuación se llaman coeficientes estequiométricos y al cociente entre dos coeficientes estequiométricos de una misma ecuación se le denomina cociente estequiométrico. Los cocientes estequiométricos se usan como factores de conversión para calcular cantidades consumidas de reactantes o producidas de productos.

Por lo tanto una ecuación química ha de tener el mismo número de átomos de cada elemento a ambos lados de la flecha. Se dice entonces que la ecuación está balanceada.

$$\begin{array}{ccc} 2H_2 + \text{O2} & \rightarrow & 2H_2O \\ \text{Reactivos} & & \text{Productos} \\ 4H \text{ y } 2\text{O} & \rightarrow & 4H + 2O \end{array}$$

3.2.2. VELOCIDAD DE REACCIÓN

La velocidad de reacción se define como la cantidad de sustancia que reacciona por unidad de tiempo. Por ejemplo, la oxidación del hierro bajo condiciones atmosféricas es una reacción lenta que puede tomar muchos años, pero la combustión del butano en un fuego es una reacción que sucede en fracciones de segundo.

Se define la velocidad de una reacción química como la cantidad de sustancia formada (si tomamos como referencia un producto) o transformada (si tomamos como referencia un reactivo) por unidad de tiempo.

La velocidad de reacción no es constante. Al principio, cuando la concentración de reactivos es mayor, también es mayor la probabilidad de que se den choques entre las moléculas de reactivo, y la velocidad es mayor, a medida que la reacción avanza, al ir disminuyendo la concentración de los reactivos, disminuye la probabilidad de choques y con ella la velocidad de la reacción. La medida de la velocidad de reacción implica la medida de la concentración de uno de los reactivos o productos a lo largo del tiempo, esto es, para medir la velocidad de una reacción necesitamos medir, bien la cantidad de reactivo que desaparece por unidad de tiempo, bien la cantidad de producto que aparece por unidad de tiempo. La velocidad de reacción se mide en unidades de concentración/tiempo, esto es, en moles/s.

Factores que afectan a la velocidad de una reacción química

Temperatura: Al aumentar la temperatura, también lo hace la velocidad a la que se mueven las partículas y, por tanto, aumentará el número de colisiones y la violencia de estas. El resultado es una mayor velocidad en la reacción. Se dice, de manera aproximada, que por cada 10 ^{o}C de aumento en la temperatura, la velocidad se duplica.

Esto explica por qué para evitar la putrefacción de los alimentos los metemos en la nevera o en el congelador. Por el contrario, si queremos cocinarlos, los introducimos en el horno o en una cazuela puesta al fuego.

Grado de pulverización de los reactivos: Si los reactivos están en estado líquido o sólido, la pulverización, es decir, la reducción a partículas de menor tamaño, aumenta enormemente la velocidad de reacción, ya que facilita el contacto entre los reactivos y, por tanto, la colisión entre las partículas.

Por ejemplo, el carbón arde más rápido cuanto más pequeño son los pedazos; y si está finamente pulverizado, arde tan rápido que provoca una explosión.

Naturaleza química de los reactivos que intervienen en la reacción: Dependiendo del tipo de reactivo que intervenga, una determinada reacción tendrá una energía de activación:

- Muy alta, y entonces será muy lenta.
- Muy baja, y entonces será muy rápida.

Así, por ejemplo, si tomamos como referencia la oxidación de los metales, la oxidación del sodio es muy rápida, la de la plata es muy lenta y la velocidad de la oxidación del hierro es intermedia entre las dos anteriores.

Concentración de los reactivos: Si los reactivos están en disolución o son gases encerrados en un recipiente, cuanto mayor sea su concentración, más alta será la velocidad de la reacción en la que participen, ya que, al haber más partículas en el mismo espacio, aumentará el número de colisiones.

El ataque que los ácidos realizan sobre algunos metales con desprendimiento de hidrógeno es un buen ejemplo, ya que este ataque es mucho más violento cuanto mayor es la concentración del ácido.

La variación de la velocidad de reacción con los reactivos se expresa, de manera general, en la forma:

$$v = k[A]^{\alpha}[B]^{\beta}$$

Donde α y β son coeficientes que no coinciden necesariamente con los coeficientes estequiométricos de la reacción general antes considerados. La constante de velocidad k, depende de la temperatura.

Catalizadores: Los catalizadores son sustancias que facilitan la reacción modificando el mecanismo por el que se desarrolla. En ningún caso el catalizador provoca la reacción química; no varía su calor de reacción.

Los catalizadores se añaden en pequeñas cantidades y son muy específicos; es decir, cada catalizador sirve para unas determinadas reacciones. El catalizador se puede recuperar al final de la reacción, puesto que no es reactivo ni participa en la reacción.

3.2.3. REACTIVO LIMITANTE

Cuando se ha ajustado una ecuación, los coeficientes representan el número de átomos de cada elemento en los reactivos y en los productos. También representan el número de moléculas y de moles de reactivos y productos.

Cuando una ecuación está ajustada, la estequiometria se emplea para saber las moles de un producto obtenidas a partir de un número conocido de moles de un reactivo. La relación de moles entre reactivo y producto se obtiene de la ecuación ajustada. A veces se cree equivocadamente que en las reacciones se utilizan siempre las cantidades exactas de reactivos. Sin embargo, en la práctica lo normal suele ser que se use un exceso de uno o más reactivos, para conseguir que reaccione la mayor cantidad posible del reactivo menos abundante.

Cuando una reacción se detiene porque se acaba uno de los reactivos, a ese reactivo se le llama reactivo limitante.

Aquel reactivo que se ha consumido por completo en una reacción química se le conoce con el nombre de **reactivo limitante** pues determina o limita la cantidad de producto formado.

Reactivo limitante es aquel que se encuentra en defecto basado en la ecuación química ajustada.

Ejemplo 1:

Para la reacción:

$$2H_2 + O_2 \longrightarrow 2H_2O$$

¿Cuál es el reactivo limitante si tenemos 10 moléculas de hidrógeno y 10 moléculas de oxígeno?

Necesitamos 2 moléculas de H_2 por cada molécula de O_2

Pero tenemos sólo 10 moléculas de H_2 y 10 moléculas de O_2.

La proporción requerida es de 2 : 1

Pero la proporción que tenemos es de 1 : 1

Es claro que el reactivo en exceso es el O_2 y el reactivo limitante es el H_2

Como trabajar con moléculas es lo mismo que trabajar con moles.

Si ahora ponemos 15 moles de H_2 con 5 moles de O_2 entonces como la estequiometria de la reacción es tal que 1 mol de O_2 reaccionan con 2 moles de H_2, entonces el número de moles de O_2 necesarias para reaccionar con todo el H_2 es 7,5, y el número de moles de H_2 necesarias para reaccionar con todo el O_2 es 10.

Es decir, que después que todo el oxígeno se ha consumido, sobrarán 5 moles de hidrógeno. El O_2 es el reactivo limitante.

Una manera de resolver el problema de cuál es el reactivo limitante es:

Calcular la cantidad de producto que se formará para cada una de las cantidades que hay de reactivos en la reacción.

El reactivo limitante será aquel que produce la menor cantidad de producto.

Ejemplo 2:

Considere la siguiente reacción:

$$2NH_3(g) + CO_2(g) \longrightarrow (NH_2)_2CO(ac) + H_2O(l)$$

Supongamos que se mezclan 637,2 g de NH_3 con 1142 g de CO_2. ¿Cuántos gramos de urea [$(NH_2)_2CO$] se obtendrán?

1) Primero tendremos que convertir los gramos de reactivos en moles:

   637,2 g de NH_3 son 37,5 moles

   1142 g de CO_2 son 26 moles

2) Ahora definimos la proporción estequiometria entre reactivos y productos:

   a partir de 2 moles de NH_3 se obtiene 1 mol de $(NH_2)_2CO$,

   a partir de 1 mol de CO_2 se obtiene 1 mol de $(NH_2)_2CO$

3) Calculamos el número de moles de producto que se obtendrían si cada reactivo se consumiese en su totalidad:

   a partir de 37,5 moles de NH_3 se obtienen 18,75 moles de $(NH_2)_2CO$

   a partir de 26 moles de CO_2 se obtienen 26 moles de $(NH_2)_2CO$

4) El reactivo limitante es el (NH_3) y podremos obtener como máximo 18.75 moles de urea.

5) Y ahora hacemos la conversión a gramos:

   18,75 moles de $(NH_2)_2CO$ son 1462,5 g

3.2.4. PORCENTAJE DE EXCESO DE REACTIVO

Cuando colocamos dos elementos o compuestos para que reaccionen químicamente entre sí, lo usual es colocar una cantidad exacta de uno de los reactivos, y colocar una cantidad en exceso del segundo reactivo, para asegurarnos que el primero podrá reaccionar completamente, y de esta manera, poder realizar cálculos basados en la ecuación química ajustada estequiométricamente.

El reactivo que no reacciona completamente, sino que “sobra”, es el denominado reactivo en exceso.

Si tenemos una cierta cantidad de dos elementos o compuestos diferentes, para producir una reacción química, podemos saber con anticipación cuál será el reactivo limitante y cuál el reactivo en exceso, realizando algunos cálculos basados en la ecuación química ajustada.

$$\%Exeso\ de\ reactivo = \frac{moles\ en\ exeso\ x\ 100}{moles\ necesarios\ para\ reaccionar\ con\ el\ reactivo\ limitante}$$

3.2.5. PORCENTAJE DE CONVERSIÓN O RENDIMIENTO

Se cree equivocadamente que las reacciones progresan hasta que se consumen totalmente los reactivos, o al menos el reactivo limitante.

La cantidad real obtenida del producto, dividida por la cantidad teórica máxima que puede obtenerse (100 %) se llama rendimiento.

Rendimiento teórico

La cantidad de producto que debiera formarse si todo el reactivo limitante se consumiera en la reacción, se conoce con el nombre de rendimiento teórico.

A la cantidad de producto realmente formado se le llama simplemente rendimiento o rendimiento de la reacción. Es claro que siempre se cumplirá la siguiente desigualdad.

Rendimiento de la reacción $\leq$ rendimiento teórico

Razones de este hecho:

- Es posible que no todos los productos reaccionen.
- Es posible que haya reacciones laterales que no lleven al producto deseado.
- La recuperación del 100 % de la muestra es prácticamente imposible.

Una cantidad que relaciona el rendimiento de la reacción con el rendimiento teórico se le llama rendimiento porcentual o % de rendimiento y se define así:

$$\%\ de\ rendimiento = \frac{Rendimiento\ de\ la\ reacción}{Rendimiento\ Teórico} x100$$

Ejemplo: La reacción de 6.8 g de H_2S con exceso de SO_2, según la siguiente reacción, produce 8.2 g de S. ¿Cuál es el rendimiento? (Pesos Atómicos: H = 1.008, S = 32.06, O = 16.00).

$$2H_2S + SO_2 \longrightarrow 3S + 2H_2O$$

En esta reacción, 2 moles de H_2S reaccionan para dar 3 moles de S.

1) Se usa la estequiometria para determinar la máxima cantidad de S que puede obtenerse a partir de 6.8 g de H_2S.

(6,8/34) x (3/2) x 32 = 9,6 g

2) Se divide la cantidad real de S obtenida por la máxima teórica, y se multiplica por 100.

(8,2/9,6) x 100 = 85,4 %

Rendimiento con Reactivos Limitantes

Ejemplo:

La masa de $SbCl_3$ que resulta de la reacción de 3.00 g de antimonio y 2.00 g de cloro es de 5.05 g. ¿Cuál es el rendimiento? (Pesos Atómicos: Sb = 121.8, Cl = 35.45)

$$Sb_4 + 6Cl_2 \longrightarrow 4SbCl_3$$

En esta reacción, 1 mol de Sb_4 y 6 moles de Cl_2 reaccionan para dar 4 moles de $SbCl_3$.

1) Calcular el número de moles que hay de cada reactivo:

   Peso Molecular del Sb_4: 487.2

   Número de moles de Sb_4 = 3/487.2 = 0,006156

   Peso Molecular del Cl_2: 70.9

   Número de moles de Cl_2 = 2/70.9 = 0,0282

2) Comparar con la relación de coeficientes en la ecuación ajustada. La relación es de 1 mol de Sb_4 a 6 moles de Cl_2. Usando la estequiometria:

   0,00656/0,0282 = 1/4,3 $>$ 1/6

   De modo que el reactivo limitante es Cl_2. Nosotros sólo tenemos 0.0282 moles de Cl_2.

3) Usar la estequiometria para determinar la máxima cantidad de $SbCl_3$ que puede obtenerse con 2.00 g de Cl_2 (el reactivo limitante).

   $$2gCl_2 x \frac{1\ mol\ de\ Cl_2}{70,9g\ de\ Cl_2} x \frac{4\ moles\ de\ SbCl_3}{6\ moles\ d3e\ Cl_2} x \frac{228,18g\ de\ SbCl_3}{1\ mol\ de\ SbCl_3} = 4,29gSbCl_3$$

4) Dividir la cantidad real de $SbCl_3$ obtenida por la máxima teórica y multiplicar por 100.

   (4,29/5,05) x 100 = 84,9 %

3.2.6. SELECTIVIDAD

La obtención de productos químicos suele implicar no una única reacción sino reacciones múltiples. En este caso el objetivo es maximizar la producción del producto deseado y minimizar la de los productos no deseados.

Se define SELECTIVIDAD:

$$Selectividad = \frac{moles\ formadas\ de\ producto\ deseado}{moles\ formadas\ de\ producto\ indeseable}$$

Valores altos de rendimiento y selectividad significan que las reacciones laterales indeseables han sido suprimidas respecto de la reacción deseada.

Ejemplo:

En un reactor continuo en régimen permanente se producen las siguientes reacciones:

$$C_2H_6 \ \rightarrow \ C_2H_4 + H_2$$

$$C_2H_6 + H_2 \rightarrow 2CH_4$$

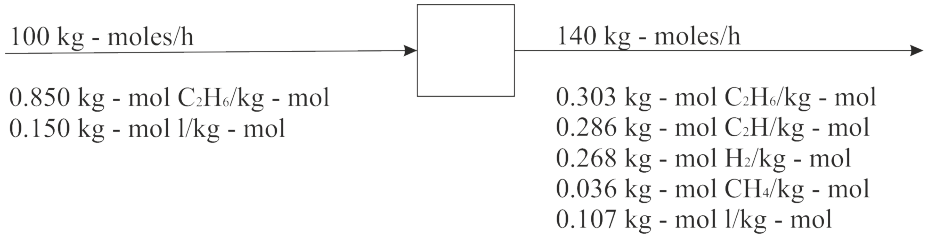
El flujo molar de la alimentación es 100 kg - moles/hr, y el del producto es 140 kgmoles/hr. A continuación figuran las composiciones de estos gases:

Porcentaje molares

Alimentación		**Producto**	
C_2H_6	85.0 %	C_2H_6	30.3 %
Inertes	15.0 %	C_2H_6	28.6 %
		H_2	26.8 %
		CH_4	3.6 %
		Inertes	10.7 %
	100.0 %		100.0 %

Calcular la fracción de conversión del etano, los rendimientos del etileno en base al consumo de alimentación y de reactivo, y la selectividad del etileno respecto del metano.

Base: flujos dados



Los subíndices “al” y “pr”. Señalan la alimentación y el producto respectivamente, mientras que con qi se denota el flujo molar del componente i-ésimo.

$(qc_2H_6)al. = 85.0kg - molesC_2H_6/h$

$$(qc_2H_6)_{pr} = \frac{140\ kg - moles}{h} \left| \frac{0.303\ kg - mol\ c_2H_6}{kg - mol} \right. = 42.4\ kg - moles\ c_2H_6/h$$

Balance para el etano: entrada - salida = consumo

$$85.0 - 42.4 = 42.6\ \frac{kg - moles\ C_2H_6\ consumido}{h}$$

Fracción de conversión:

$$\frac{42.6kg - molesC_2H_6\ consumido/h}{85.0kg - molesC_2H_6\ alim./h} = 0.501\ mol\ consumido/mol\ alim$$

$$(qc_2H_6)_{pr} = \frac{140\ kg - moles}{h} \left| \frac{0.286\ kg - mol\ c_2H_4}{kg - mol} \right. = 40.0\ kg - moles\ c_2H_6/h$$

$(qc_2CH_4)pr = (140)(0.036) = 5.0\ kg - moles\ CH_4/h$

Dado que no hay etileno o metano en la alimentación, estas cantidades representan el producto horario de etileno y metano, así como los flujos de salida. (Balances: salida = generación).

Rendimiento basado en la alimentación: $\dfrac{40.0kg - mol\ C_2H_4\ producido/h}{85.0kg - mol\ C_2H_6\ alim./h}$

$$= 0.470 \frac{mol\ C_2H_4\ producido}{mol\ C_2H_6\ alim.}$$

Rendimiento basado en el consumo: $\dfrac{40.0kg - mol\ C_2H_4\ producido/h}{42.6kg - mol\ C_2H_6\ consumido/h}$

$$= 0.939 \frac{mol\ C_2H_4\ producido}{mol\ C_2H_6\ consumido}$$

Selectividad: $\dfrac{40.0kg - mol\ C_2H_4\ producido/h}{5.0kg - mol\ CH_4\ producido/h}$

$$= 8.0 \frac{mol\ C_2H_4\ producido}{mol\ CH_4\ producido}$$

3.2.7. ANÁLISIS DE LOS GRADOS DE LIBERTAD EN SISTEMAS REACCIONANTES SIMPLES

Un análisis de grados de libertad es una herramienta útil para resolver BM que nos permite a) determinar si un problema concreto es resoluble (es decir, si la información disponible es suficiente) b) en caso positivo, por dónde comenzar la resolución (es decir, en qué orden resolver las ecuaciones).

Para BM basados en los componentes moleculares, en sistemas sin reacción química:

N° de grados de libertad (DFA) = N° de incógnitas - N° de ecuaciones independientes - N° de otras ecuaciones que relacionan las variables

Para BM basados en los componentes moleculares, en sistemas con reacción química:

DFA = N° de incógnitas + N° de reac. químicas independientes - N° de ecuaciones independientes - N° de otras ec. de relación

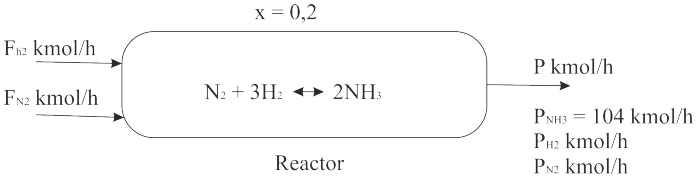
- NÚMERO DE INCÓGNITAS:
  - Número de variables desconocidas del problema.
- NÚMERO DE ECUACIONES INDEPENDIENTES
  - Sin reacción: Máximo Nº ecuaciones independientes= Nº de especies (compuestos químicos) en el proceso.
  - Con reacción: Nº ecuaciones = Nº de especies - Nº de reacciones químicas independientes entre las especies.
- OTRAS ECUACIONES QUE RELACIONAN LAS VARIABLES
  - Especificaciones del proceso dadas en el enunciado del problema: Cantidades, composiciones, relaciones entre corrientes.
  - Propiedades físicas y leyes: Relación de equilibrio, ley de gases ideales, relación de densidades, etc.
  - Restricciones físicas: Sumatorio de fracciones molares (o másicas) de los componentes de una corriente igual a 1, relaciones de estequiometria,....

- REACCIONES QUÍMICAS INDEPENDIENTES

  - Las reacciones son independientes si la ecuación estequiométricas de cada una de ellas no puede obtenerse sumando o restando múltiplos de las ecuaciones estequiométricas de las otras.

Ejemplo:

Para producir 4080 t/día de amoníaco se alimenta un reactor con $H_2(g)$ y $N_2(g)$ en cantidades estequiométricas. La conversión fraccional en el reactor es del 20 %. Hacer un análisis los grados de libertad y calcular todos los flujos másicos (kg/h) desconocidos.



Partiendo del diagrama preparamos la tabla siguiente de grados de libertad:

GRADOS DE LIBERTAD	**Reactor**
Número de incógnitas (4 flujos + 1 conversión)	4 + (1)
Número de ecuaciones independientes (3 componentes)	3
Nº de relaciones auxiliares (F_{H2}=3F_{N2} : X = 0.2)	2
GRADOS LIBERTAD	4+(1)-3-2 = 0

Ejemplo:

Una técnica para producir hidrógeno consiste en hacer reaccionar una mezcla de metano y etano con vapor de agua, en presencia de níquel como catalizador. El análisis (en base seca) de los gases que salen del reactor da: 4,6 % molar de CH_4, 2,5 % C_2H_6, 18,6 % CO, 4,6 % CO_2y 69,7 % H_2. Calcule:

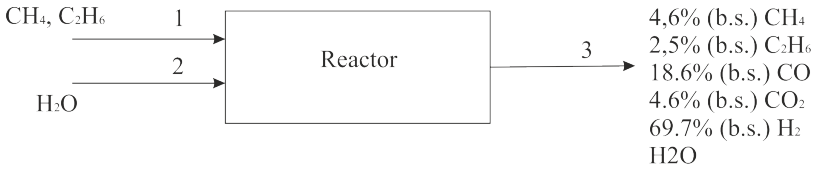
a) Los grados de libertad

b) Relación molar de metano a etano en la alimentación.

c) Cantidad de vapor, en libras/hora, que reaccionan con 1000 pie^3/hora de alimentación, a 1 atm y 60 ºF.

Solución:

El diagrama de flujo del proceso es:



Las reacciones estequiométricas:

$$2CH_4 + 3H_2O \longrightarrow 7H_2 + CO + CO_2$$
$$C_2H_6 + 3H_2O \longrightarrow 6H_2 + CO + CO_2$$

Base de cálculo: F1

Considerando gas ideal:

$$F1 = \frac{14.7(psi)1000(pie^3/h)}{10.73\left(\frac{psi\ pie^3}{lb-mol^oR}\right)520(^oR)} = 2,634lb-mol/h$$

Sea F3': flujo de gas seco en corriente 3

X: composición de CH_4 en corriente 1

Z: flujo de agua en corriente 3

F2: flujo de agua en corriente 2

a) Grados de libertad

Nº Variables flujo: F1, F2, F3', z = 4

Nº variables composición: X, $XCH_4(3)$, $XC_2H_6(3)$, XCO(3), $XCO_2(3)$ = 5

Nº datos flujo: F1 = 1

Nº datos composición: $XCH_4(3)$, $XC_2H_6(3)$, XCO(3), $XCO_2(3)$ = 4

Nº ec. Balances masa: C, H, O = 3

Nº datos adicionales: = 0

G.L. = 1

b) Balances por átomos:

$$\begin{aligned} H: 4X2,634 + 6(1-X)2,634 + 2F2 &= (4*0,046 + 6*0,025 + 2*0,697)F3' \\ &+2Z7,902 - 2,634X + F2 = 0,864F3' + Z \end{aligned} \tag{3.1}$$

$$\begin{aligned} C: X2,364 + 2(1-X)2,634 &= (0,046 + 2*0,025 + 0,186 + 0,046)F3'5,268 \\ &-2,634X = 0,328F3' \end{aligned} \tag{3.2}$$

$$O: F2 = (0,186 + 0,046*2)F3' + Z = 0,278F3' + Z \tag{3.3}$$

De la ecuación 3.3, F2 se reemplaza en la ecuación 3.1:

$$7,902 - 2,634X = 0,586F3' \tag{3.4}$$

De la ecuación 3.2, F3' se reemplaza en la ecuación 3.4:

$$0,562X - 1,512(1-X) = 0$$

Luego: $X = 0,729$ y $1 - X = 0,271$

$$\frac{moles\ metano}{moles\ etano} = \frac{0.729}{0.271} = 2,69$$

X = 72,9 %

c) F3' = 10,2079 lbmol/h

Reemplazando el valor de F3' en la ecuación 3.3, y F3' y X en la ecuación 3.1, se obtiene:

$$F2 = 2{,}8382 + Z$$

Ecuación que no tiene solución con los datos dados, lo que concuerda con el análisis que arrojó 1 grado de libertad. Si se diera el dato de un 100 % de exceso de vapor:

Agua teórica: 1,5 (X 2,634) + 3 [(1-X) 2,634] = 7,902 - 3,951 X

Agua real: F2 = 2*7,902 - 3,951 X = 15,804 - 7,902 X = 15,804 - 7,902 *0,792

$$F2 = 10{,}0434 \text{ Lb-mol/h}$$

$$Z = 7{,}2056 \text{ lb-mol/h}$$

3.3. ECUACIONES DE BALANCES ELEMENTALES Y ANÁLISIS DE LOS GRADOS DE LIBERTAD.

Cuando se lleva a cabo una reacción química en determinado proceso, los procedimientos aplicados de balance de materia se complican. Además de los balances por componentes y global que se siguen formulando para las unidades en las que no ocurren transformaciones químicas, hay que tomar en cuenta la información concerniente a la reacción química dada que se lleva a cabo en un reactor (i.e. la estequiometria, el reactivo limitante, la conversión de un reactivo). Se sigue considerando sistemas en estado estacionario o muy cercano a sus condiciones de operación de estado estacionario.

La ecuación de balance de materia que se aplica para el reactor es la ecuación:

Entrada + Generación = Salida + Consumo

En ítem anterior se estudió la estequiometria de las reacciones químicas, así como la manera de efectuar cálculos de sustancias en reacciones con reactivo limitante y rendimiento porcentual. Esta información es nuevamente relevante para los casos que se analizan en esta parte.

Problema 1

¿Qué masa de ácido sulfúrico se podrá obtener a partir de 250 g. de azufre 98 % de pureza?. Hacer un diagrama de bloques que muestre todas las entradas y salidas. Comprobar la conservación de materia.

Solución

Base de Cálculo: 250 g de azufre al 98 %

La ecuación teórica de formación del trióxido de azufre es la siguiente:

$$2S + 3O_2 \rightarrow 2SO_3$$

$$2(32.0645) + 3((2)15.9994g) = 2(32.0645) + (3)(15.99945)$$

$$64.1285 + 95.99645 = 160.12445$$

Mediante regla de tres simple calculamos qué masa de azufre puro interviene:

Para: 100 % - 250 g de S Impuro

98 % - M azufre puro

M azufre puro = 245 g de azufre puro

Con este resultado y mediante regla de tres simple calculamos la masa de trióxido de azufre obtenido:

Para: 64.128 g de S - 160.1244 g de $S0_3$

Luego: 245 g de S - m trióxido de azufre

$$m_{trióxido\ de\ azufre} = \frac{(245\ g\ de\ azufre)(160.1244\ g\ de\ SO_3)}{64.128\ g\ de\ S}$$

$m_{trióxido\ de\ azufre}$ = 611.7527 g de SO_3 puro.

Luego la ecuación de formación del ácido sulfúrico es la siguiente:

$$SO_3 + H_2O \longrightarrow H_2SO_4$$
$$32.064g + 3(15.9994g)\ \ 2(1,00797g) + 15.9994g\ \ 2(1.007975) + 32,0644(15.9994g)$$
$$80.0622g\ \ 18.01534g\ \ 98.07754g$$

Con el valor de m trióxido de azufre y mediante regla de tres simple calculamos la masa de ácido sulfúrico obtenido:

Para: 80.0622 g de $S0_3$ - 98.07754 g de H_2S0_4

Luego: 611.7527 g de $S0_3$ - $m_{ácido\ sulfúrico}$

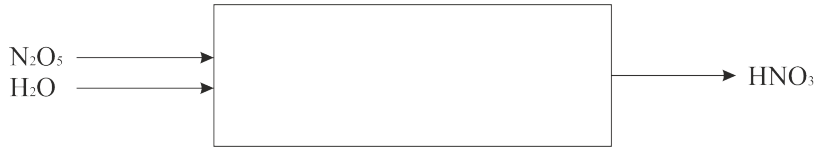
$$m_{ácido\ sulfúrico} = \frac{(611,7527g\ de\ SO_3).(98.07754g\ de\ H_2SO_4)}{(80.0622g\ de\ S0_3)}$$

$m_{ácido\ sulfúrico}$ = 749.4074 g de H_2SO_4 puro.

Problema 2

¿Qué masa de óxido resulta necesaria para obtener 3150 g de ácido nítrico?, ¿cuántos moles de agua reaccionan?

Solución



Base de Cálculo: 3150 g de HNO_3

La ecuación de formación del ácido nítrico es la siguiente:

$$N_2O_5 + H_2O \longrightarrow 2HNO_3$$

$$2(14.0067g)\ \ 2(1.007975)\ \ 2(1.00797g + 14.0067g$$
$$+5(15.9994g)\ \ + 15.9994g\ \ + (3)15.9994g)$$
$$108.0104g + 18,01534g = 126,0257g$$

Mediante regla de tres simple calculamos que masa de óxido nítrico necesaria:

Para: 126.0257 g de $HN0_3$ - 108.0104 g de N_2O_5

Luego: 3150 g de $HN0_3$ - $m_{óxido\ nítrico}$

$$m_{óxido\ nítrico} = \frac{(3150g\ de\ HNO_3)(108.0104g\ de\ N_2O_5)}{(126.0257g\ de\ HN0_3)}$$

$m_{óxido\ nítrico}$ = 2699.7085g de N_2O_5

Para calcular los moles lo hacemos de igual manera:

Para: 126.0257g de $HN0_3$ - 1 mol de H_2O

Luego: 3150 g de HNO_3 - moles de H_2O

$$moles_{H_2O} = \frac{(3150g\ de\ HNO_3)(1\ mol\ de\ H_2O)}{126.0257\ g\ de\ HNO_3}$$

$moles_{agua}$ = 25 moles de agua.

Problema 3

Se quieren obtener 15 litros de dióxido de carbono (CNPT) según la reacción:

$$Na_2C0_3 + 2HCI \longrightarrow C0_2 + H_20 + 2NaCl$$

Calcular:

a) Volumen de solución de HCl 38 % p/p (ρ= 1.19 g/cm^3) necesario.

b) Masa de Na_2CO_3 necesaria.

c) Masa de NaCl que se forma.

Solución

Base de Cálculo: 15 litros de CO_2 (CNPT)

La ecuación estequeométrica es la siguiente:

$$Na_2CO_3 + 2HCI \longrightarrow CO_2 + H_2O\ 2\ NaCl$$
$$2(23)g + 12g\ 2(1)5 \qquad 12g\ 2(1)g\ 2(23)g$$
$$+ 3(16)5 + 35.5 \qquad +2(16) +16\ g + 35.5\ g$$
$$106\ g\ 73\ g \qquad 44\ g\ 18\ g\ 117\ g$$

a) Para calcular el ácido clorhídrico:

Para: 22.4 litros de CO_2 - 73 g de HCI

Luego: 15 litros de CO_2 - m_{HCl}=:

$$m_{HCl} = \frac{(15\ litros\ de\ CO_2)(73g\ de\ HCI)}{(22.4\ litros\ de\ CO_2)}$$

$m_{HCl} = 48.885\ de\ HCI\ puro.$

Para calcular el volumen de solución de HCl 38 % p/p

Para: 38 % - 48.88 g

Luego: 100 % - $m_{solución}$

$$m_{solución} = \frac{(100\,\%).(48.88g)}{(38\,\%)}$$

$m_{solución}$ = 128.63 g

$$\text{Si } \rho = \frac{m}{V} \therefore V = \frac{m}{\rho}$$

V = (128.63 g)/(1.19g/cm^3)

V = 108.1 cm^3

b) Para calcular la masa de Na_2C0_3:

Para: 22.4 litros de C02 - 106 g de Na_2C0_3

Luego: 15 litros de CO_2 - $m_{carbonato\ de\ sodio}$

$$m_{carbonato\ de\ sodio} = \frac{(15\ litros\ de\ C02)(1060\ de\ Na2C03)}{(22.4\ litros\ de\ C0_2)}$$

$m_{carbonato\ de\ sodio}$ = 71 g de Na_2C0_3

c) Para calcular la masa de NaCI:

Para: 22.4 litros de C02 - 117 g de NaCI

Luego: 15 litros de CO_2 - $m_{cloruro\ de\ sodio}$

$$m_{cloruro\ de\ sodio} = \frac{(15\ litros\ de\ C0_2)(117\ g\ de\ NaCl)}{(22.4\ litros\ de\ C0_2)}$$

$m_{cloruro\ de\ sodio}$ = 78,35 g de NaCI

Problema 4

El oxido de etileno (C_2H_4O), materia fundamental para la producción de glicoles, se produce por oxidación parcial de etileno (C_2H_4) con exceso de aire sobre un catalizador de plata. La reacción básica es:

$$2C_2H_4 + O_2 \rightarrow 2C_2H_4O$$

Sin embargo, se produce una reacción colateral de oxidación del etileno a dióxido de carbono y agua según la reacción:

$$2C_2H_4 + O_2 \rightarrow 2CO_2 + 2H_2O$$

Suponer que con una alimentación conteniendo el 10 % de etileno y una conversión de etileno del 25 %, se obtiene un rendimiento del 80 % de oxido. Determinar si el problema está completamente especificado y calcular la composición de la corriente de salida del reactor.

Solución

Base de Cálculo: 1000 mol/h de alimentación

- Número de incógnitas
  - Número de Variables 10
  - Número de reacciones independientes 2
  - **TOTAL 12**
- Número de ecuaciones
  - Balances de materia 6
  - Restricciones (sumatorios) 2
  - Especificaciones 3 (Conversión, rendimiento y ratio del aire O_2/N_2=21/79)
  - Base de cálculo 1
  - **TOTAL 12**

Tabla de corrientes

	(1)		**(2)**	
C_2H_4		10		?
O_2		?		?
CO_2		0		?
H_2O		0		?
C_2H_4O		0		?
N_2		?		?
	?		?	

Grados de libertad: 12-12 = 0, luego el problema está correctamente especificado. (NOTA: Se ha hecho el análisis teniendo en cuenta componentes moleculares, igualmente se podría hacer y resolver el problema empleando balance a los elementos atómicos).

La composición de la alimentación resulta:

C_2H_4 = 0.1 · 1000 = 100 mol/h

O_2 = 0.21 · (1000 - 100) = 189 mol/h

N_2 = 0.79 · (1000 - 100) = 711 mol/h

De la ecuación de la conversión obtenemos:

$$0.25 = \frac{N_{1,etileno} - N_{2,etileno}}{N_{1,etileno}} \Rightarrow N_{2,etileno} = 75mol/h$$

Es decir se convierten 25 mol/h de etileno

Si el rendimiento fuera del 100 % los 25 mol/h convertidos lo harían según la primera reacción como no es así podemos obtener la cantidad de óxido de etileno mediante la ecuación del rendimiento:

$$0.8 = \frac{N_{2,oxido} - N_{1,oxido}}{etileno\ convertido} = \frac{N_{2,oxido} - 0}{25} \Rightarrow N_{2,oxido} = 20mol/h$$

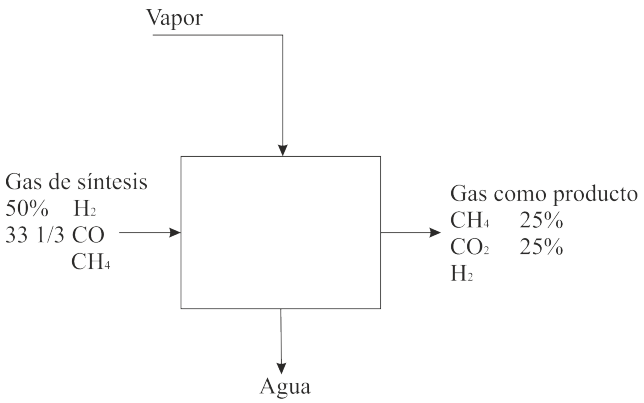
Ahora se plantean los 6 balances de materia:

Etileno	$75 = 100 - 2\,\varepsilon1 - \varepsilon2$
Oxígeno	$N_2,O_2 = 18 - \varepsilon1 - 3 \cdot \varepsilon2$
Nitrógeno	$N_2,N_2 = 711$
Oxido de etileno	$20 = 0 + 2\,\varepsilon1$
CO_2	$N_2,CO_2 = 0 + 2 \cdot \varepsilon2$
Agua	$N_2,H_2O = 0 + 2 \cdot \varepsilon2$

Se obtiene del balance al óxido de etileno $\varepsilon1 = 10$ mol/h y del balance al etileno $\varepsilon2 = 5$. El resto de las variables resulta: $N_{2,O2} = 163$ mol/h; $N_{2,N2} = 711$mol/h; $N_{2,CO_2} = 10$ mol/h; $N_{2,H2O} = 10$ mol/h

Problema 5

A un proceso de producción de metano a partir de gas de síntesis y vapor de agua, se alimentan 6 kgmol/min de un gas que contiene 50 % de H_2, 33 1/3 % de CO y el resto CH_4 (todos en base molar), así como 72 kg/min de vapor de agua. Los productos son 3 kgmol/min de agua líquida y 96 kg/min de un gas que contiene 25 % de CH_4, 25 % de CO_2 y el resto H_2 (todos en base molar).



Determine, con tres cifras significativas, si: a. ¿Se conserva la masa total? b. ¿Se conservan las moles totales? c. ¿Se conservan las moles de cada tipo de átomo? d. ¿Se conserva la masa de cada tipo de sustancia química? e. ¿Qué puede concluirse que ocurre en este proceso?

SOLUCION:

Para la mezcla gaseosa de salida se conoce el flujo másico y su porcentaje molar, puede efectuarse un cambio de fracción molar a másica o, lo que es más sencillo, encontrar la masa molecular media de la mezcla.

Procediendo de ambas maneras:

$$\text{Masa Molecular Media} = (0.25 \times 16 + 0.25 \times 44 + 0.5 \times 2) = 16$$

por tanto:

$$\text{Flujo molar de mezcla} = \left(\frac{96Kg/min}{16Kg/kgmol}\right) = 6 \text{ kgmol/min}$$

Por lo tanto de los productos tendremos:

$CH_4 = 6 * 0.25 = 1.5$ Kgmol * 16 Kg/Kgmol = 24 Kg.

$CO_2 = 6 * 0.25 = 1.5$ Kgmol * 44 Kg/Kgmol = 66 Kg.

$H_2 = 6 * 0.50 = 3$ Kgmol * 2 Kg/Kgmol = 6 Kg.

$H2O_{salida}$ = 3 Kgmol * 18 Kg/Kgmol = 54 Kg.

Para la entrada se tendría:

CH_4 = 6 * 0.167 = 1.0 Kgmol * 16 Kg/Kgmol = 16 Kg.

CO = 6 * 0.333 = 2.0 Kgmol * 28 Kg/Kgmol = 56 Kg.

H_2 = 6 * 0.50 = 3 Kgmol * 2 Kg/Kgmol = 6 Kg.

$H2O_{entrada}$ = 72 Kg /* 18 Kg/Kgmol = 4 Kgmol.

Para visualizar el balance de materia, se toma como base un minuto y con los flujos másicos y/o molares conocidos se construye la tabla 3.1.

En ella se hace inventario de las masas de los componentes y las moles totales a la entrada y a la salida:

Tabla 3.1: Componentes y moles

	ENTRADA			**SALIDA**	
	Kgmol	**Kg**		**Kgmol**	**Kg**
H_2	3	6	H_2O	3	54
CO	2	56	CH_4	1.5	24
CH_4	1	16	CO_2	1.5	66
H_2O	4	72	H_2	3	6
Total	**10**	**150**	**Total**	**9**	**150**

a **¿Se conserva la masa total?**

Al proceso entran 150 kg y de él salen 150 kg. La masa total que entra es igual a la masa total que sale, de acuerdo con la Ley de la Conservación de la Materia.

b **¿Se conservan las moles totales?**

Las moles totales no se conservan: Al proceso entran 10 kgmol y de él salen 9 kgmol.

c **¿Se conservan las moles de cada tipo de átomo?**

Sumando los átomos mol de cada componente a la entrada y a la salida se tiene que:

ENTRADA: Los elementos que intervienen en el proceso son H, C y O.

$$kg - átomo\ de\ H = H\ del\ H_2 + H\ del\ CH_4 + H\ del\ H_2O$$

$$= 3kgmolH_2X\frac{2Kg - átomo}{kgmolH_2} + 1kgmolCH_4X\frac{4kg - átomoH}{kgmolCH_4} + 4kgmolH_2OX\frac{2kg - átomoH}{kgmolH_2O} =$$

$$18$$

$$kg - at\ de\ C = C\ del\ CO + C\ del\ CH_4$$

$$2kgmolCOx\frac{1kg - átomoC}{kgmolCO} + 1kgmolCH_4x\frac{1kg - átomoC}{kgmolCH_4} = 3$$

$$kg - at\ de\ O = O\ del\ CO + O\ del\ H_2O$$

$$2kgmolCOx\frac{1kgátomoO}{kgmolCO} + 4kgmolH_2Ox\frac{1kgátomoO}{kgmolOH_2} = 6$$

SALIDA: Efectuando el mismo procedimiento para los componentes a la salida (sin colocar las unidades):

kg - átomo de H = H del H_2 + H del CH_4 + H del H_2O

= (3 × 2 + 1.5 × 4 + 3 × 2) = 18

kg - átomo de C = C del CH_4 + C del CO_2

$$= (1.5 \times 1 + 1.5 \times 1) = 3$$

kg - átomo de O = O del H_2O + O del CO_2

$$= (3 \times 1 + 1.5 \times 2) = 6$$

Los kg - átomo que entran y salen de los elementos H, C y O son, respectivamente: 18, 3 y 6. Se conserva el número de átomos mol de cada tipo de átomo.

d **¿Se conserva la masa de cada tipo de sustancia química?**

Como puede verse en la tabla anterior, la masa de cada tipo de sustancia no se conserva. Esto se debe a que en el proceso ocurre una reacción química en la que, como es obvio, desaparecen unas sustancias y se forman otras.

e **¿Qué puede concluirse que ocurre en este proceso?**

Que hay interacción química entre los diferentes componentes. Puede plantearse que ocurre la reacción:

$$2CO + H_2O \rightarrow 1.5CO_2 + 0.5CH_4$$

La cual explica que en el proceso haya desaparecido el CO, que los kg-mol de agua hayan disminuido en 1, que hayan aparecido 1.5 kg-mol de CO_2 y que el número de kg-mol de CH_4 haya aumentado en 0.5, tal como puede constatarse en la tabla.

3.4. BALANCE POR COMPONENTES EN UNIDADES MÚLTIPLES CON REACCIÓN - RENDIMIENTO - SELECTIVIDAD Y ANÁLISIS DE LOS GRADOS DE LIBERTAD EN UNIDADES MÚLTIPLES

Los procesos químicos industriales casi nunca incluyen una sola unidad de proceso, A menudo hay uno o más reactores químicos, y también unidades para mezclar reactivos, combinar productos, calentar y enfriar corrientes de proceso, separar un producto de otro y de los reactivos sin consumir, y eliminar de la corriente contaminantes que podrían ser peligrosos antes de descargarla al medio circundante.

En la figura 3.1 se muestra un diagrama de flujo para un proceso de dos unidades. Las cinco fronteras dibujadas en torno a las porciones del proceso definen aquellos sistemas para los cuales pueden escribirse balances.

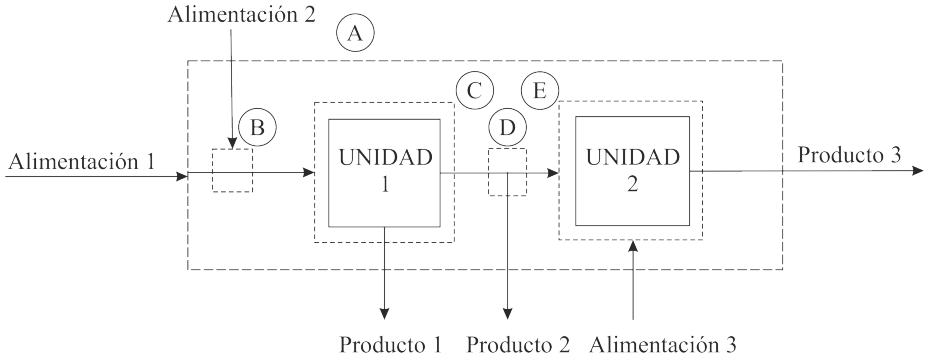


Figura 3.1: Diagrama de flujo para un proceso de dos unidades

La frontera A encierra al proceso entero; el sistema definido por esta frontera tiene como entradas las corrientes de alimentación 1, 2 y 3 y las corrientes de producto 1, 2 y 3. (Convénzase.) Los balances para

este sistema se denominan balances generales. La corriente que conecta a las unidades 1 y 2 es interna en este sistema, de modo que no participaría en los balances generales de este.

La frontera B encierra un punto de mezcla de la corriente de alimentación. Las corrientes de alimentación 1 y 2 constituyen entradas a este sistema y la corriente que fluye hacia la unidad 1 es una salida. La frontera C abarca a la unidad 1 (una corriente de entrada y dos de salida), la frontera D delimita un punto de división de la corriente (una corriente de entrada y dos de salida), y la frontera E encierra a la unidad 2 (dos corrientes de entrada y una de salida).

El procedimiento para efectuar cálculos de balance de materia en procesos de unidades múltiples es casi el mismo que el descrito para unidades simples. La diferencia es que en los procesos de unidades múltiples quizá sea necesario aislar varios subsistemas del proceso y escribir sus balances para obtener suficientes ecuaciones y despejar todas las variables desconocidas de las corrientes. Al analizar procesos de unidades múltiples, determine los grados de libertad sobre el proceso total y para cada subsistema, tomando en cuenta sólo las corrientes que se intercepten con la frontera del sistema bajo consideración. No comience a escribir y resolver ecuaciones para un subsistema hasta que haya verificado que tiene cero grados de libertad.

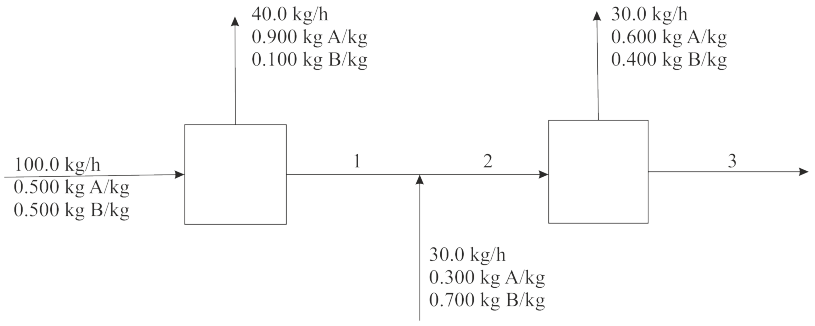
Problema 1

A continuación se muestra un diagrama de flujo marcado de un proceso continuo y en estado estacionario de dos unidades. Cada corriente contiene dos componentes, A y B, en diferentes proporciones. Las tres corrientes cuyas velocidades de flujo y/o composiciones se desconocen, se marcaron como 1, 2 y 3.

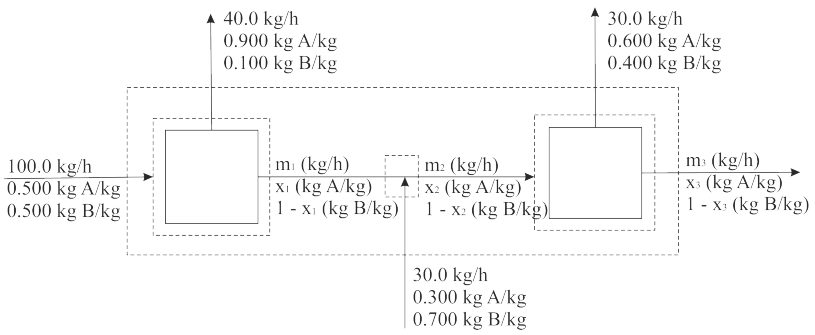
Calcule las velocidades de flujo desconocidas y las composiciones de las corrientes 1, 2 y 3.

SOLUCIÓN:

Base de Cálculo: dadas las velocidades de flujo



Los sistemas para los cuales pueden escribirse balances se muestran en la siguiente representación del diagrama de flujo:



La frontera externa abarca el proceso completo y tiene corrientes de entrada y salida de todas las corrientes que entran y salen del proceso. Dos de las fronteras interiores rodean unidades individuales de proceso, y la tercera encierra un punto de unión de corrientes.

Análisis de grados de libertad

Primero se esboza el procedimiento de solución llevando a cabo análisis de grados de libertad de los distintos sistemas. Recuerde que sólo las variables asociadas con corrientes que interceptan alguna frontera del sistema se cuentan en el análisis de dicho sistema.

Sistema general (frontera externa de línea punteada):

2 incógnitas ($\dot{m}_3$) - 2 balances (2 especies) = 0 grados de libertad $\Rightarrow$ $Determinar:\ m_3\ y\ x_3$

En análisis subsecuentes, podemos considerar que se conocen estas dos variables. Suponga que decidimos considerar el punto de mezcla intermedio de las corrientes como el siguiente sistema.

Punto de mezcla:

4 incógnitas ($\dot{m}_1$, x_1, $\dot{m}_2$, x_2) - 2 balances (2 especies) = 2 grados de libertad

Hay demasiadas incógnitas para el número de ecuaciones disponibles. Veamos la unidad 1.

Unidad I:

2 incógnitas ($\dot{m}_1$, x_1) — 2 balances (2 especies) = 0 grados de libertad $\Rightarrow$ Determine $\dot{m}_1$ y x_1.

Ahora podemos analizar el punto de mezcla o la unidad 2, cada uno de los cuales tiene dos variables desconocidas asociadas.

Punto de mezcla:

2 incógnitas ($\dot{m}_2$, x_2) - 2 balances (2 especies) = 0 grados de libertad $\Rightarrow$ Determinar $\dot{m}_2$ y x_2.

Por tanto, el procedimiento será escribir balances generales del sistema para determinar $\dot{m}_3$ y x_3 y después balances de la unidad 1 para determinar $\dot{m}_1$ y x_1, por último, balances en el punto de mezcla intermedio para determinar $\dot{m}_2$ y x_2.

Los cálculos son directos. Observe que todos los balances en estos procesos no reactivos en estado estacionario tienen la forma entrada = salida, y observe, además, que los balances se escriben en un orden que no requiere resolución de ecuaciones simultáneas (cada ecuación sólo tiene una variable desconocida).

Cálculos

Balance general de masa:

$$(100.0 + 30.0)Kg./h = (40.0 + 30.0)Kg./h + \dot{m}_3 \Rightarrow \dot{m}_3 = 60.0Kg./h$$

Balance general para A: (Verifique que cada término aditivo tenga las unidades de kg A/h.)

$$(0.500)(100.0) + (0.300)(30.0) = (0.900)(40.0) + (0.600)(30.0) + x_3(60.0) \Rightarrow x_3 = 0.0833kgA/kg$$

Balance de masa para la Unidad 1: (Cada término tiene las unidades kg/h)

$$100 = 40 + \dot{m}_1 \Rightarrow \dot{m}_1 = 60.0Kg./h$$

Un balance para la Unidad I: (Cada término aditivo tiene las unidades kg A/h.)

$$(0.500)000.0) = (0.900)(40.0) + x_1(60.0) \Rightarrow x_1 = 0.233 kgA/kg$$

Balance de masa en el punto de mezcla de corrientes: (Cada término tiene las unidades kg/h.)

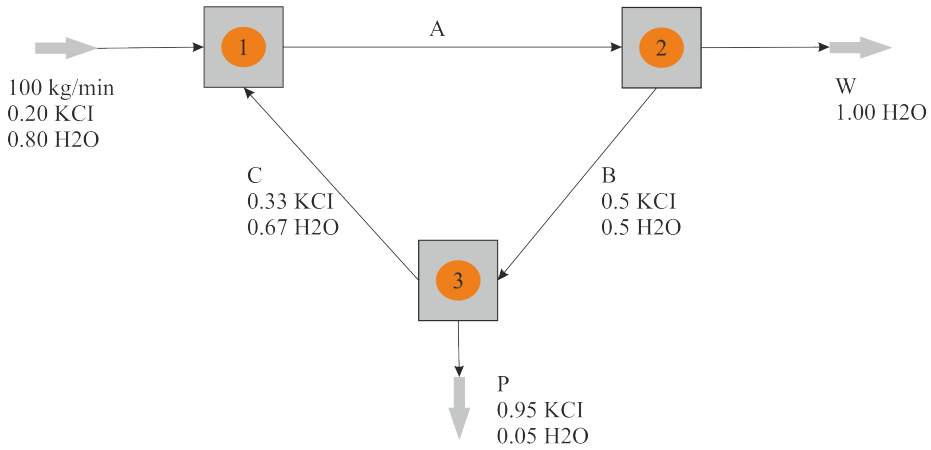
$$\dot{m}_3 = 60.0 kg/$$
$$\dot{m}_1 + 30.0 = \dot{m}_2 \Rightarrow \dot{m}_2 = 90.0 kg/h$$

Un balance en el punto de mezcla de corrientes: (cada término aditivo tiene las unidades kg A/h.)

$$x_1\dot{m}_1 + (0.300)(30.0) = x_2\dot{m}_2$$
$$\dot{m}_1 = 60.0 kg/h$$
$$x_1 = 0.233 kg/h$$
$$\dot{m}_2 = 90.0 kg/h$$
$$x_2 = 0.255 kgA/kg$$

Problema 2

Determinar las corrientes A, B, C, P y W, así como las composiciones $w_{KCl,A}$ y $w_{H_2O,A}$



Cuando en un problema de balances de materia tenemos varios subsistemas aplicaremos dos tipos de balance:

- Balance de materia a todo el sistema.
- Balance de materia a cada subsistema.

Debe tenerse en cuenta que la ecuación que resulta del balance total es dependiente de las ecuaciones obtenidas por balance a los diferentes subsistemas.

- Balance de masa a todo el sistema: 100 = P + W
- Balance al KCl: (0.20)(100) = 0.91P

- Balance a la unidad 1: 100 + C = A
- Balance al KCl : (0.20)(100)+0.33C=$w_{KCl,A}$A
- Balance a la unidad 2: A = B + W
- Balance al KCl:w$_{KCl,A}$A=0.50B
- Podemos escribir una última ecuación para la corriente A: w$_{KCl,A}$ + w$_{H2O,A}$=1

Hemos planteado 7 ecuaciones independientes que permiten por resolución del sistema obtener las 7 incógnitas.

3.5. SUSTANCIA DE REFERENCIA - SUSTANCIAS INERTES

Sustancia de referencia, Sustancia o material cuyas propiedades, o al menos una de ellas, son suficientemente estables para ser usados en la calibración de aparatos, evaluación de métodos de medición o para caracterizar otros materiales.

Sustancia Inerte es aquella sustancia que no sufre transformaciones ni reacción química en un proceso.

3.6. REACCIONES DE COMBUSTIÓN

Cualquier material que pueda quemarse para liberar energía recibe el nombre de combustible. La mayoría de los combustibles líquidos conocidos por lo general se componen principalmente de hidrógeno y carbono. Reciben el nombre de combustible hidrocarburos y se denotan por la formula general C_nH_m. Los combustibles hidrocarburos existen en todas las fases y algunos ejemplos son el carbón, la gasolina y gas natural.

El principal constituyentes del carbón mineral es el carbono; también contiene cantidades variables de oxígeno, nitrógeno, azufre, humedad y ceniza. Es difícil dar un análisis de la masa exacta del carbono mineral pues que su composición varia de un área geográfica a otra e incluso dentro de la misma región. La mayor parte de los combustibles hidrocarburos líquidos son una mezcla de diversos hidrocarburos y se obtiene del petróleo crudo mediante la destilación, los hidrocarburos más volátiles se vaporizan primero obteniéndose durante la destilación el querosene, el diésel y el combustóleo. La composición de un combustible particular depende de la fuente de petróleo crudo, así como de la refinería.

Aunque los combustibles hidrocarburos líquidos son mezclas de muchos hidrocarburos diferentes, por conveniencia suelen considerarse como un solo hidrocarburo. Por ejemplo, la gasolina se trata como octano, C_8H_{18}, y el diésel como dodecano, $C_{12}H_{26}$.Otro hidrocarburo liquido común es el alcohol metílico CH_3OH, al que también se le llama metanol y se usa en algunas mezclas de gasolina. El gas natural combustible hidrocarburo gaseoso, algunas veces se trata como metano CH_4, por simplicidad.

Una reacción química durante la cual se oxida un combustible y se libera una gran cantidad de energía recibe el nombre de combustión.El oxidante empleado con mayor frecuencia en los procesos de combustión es el aire, por obvias razones; es gratis y es fácil de conseguir. EL oxígeno puro O molecular se emplea como oxidante solo en algunas aplicaciones especializadas como el corte y soldadura donde no se puede utilizar aire. En consecuencia, son pertinentes unas cuantas palabras acerca de la composición del aire.

En unas base molar o de volumen, el aire seco está compuesto por 20.9 por ciento de oxígeno, 78.1 por ciento de nitrógeno, 0.9 por ciento de argón y pequeñas cantidades de dióxido de carbono, helio, neón e hidrógeno. En el análisis de los procesos de combustión, el argón en el aire se trata como nitrógeno, y los gases que existen en cantidades muy pequeñas se descartan. De modo que el aire seco puede considerarse aproximadamente como 21 por ciento de oxigeno de un mol que entra en una cámara de combustión será acompañado por 0.79/0.21 = 3.76 mol de nitrógeno. Es decir

$$1 \text{ kmol } O_2 + 3.76 \text{ kmol } N_2 = 4.76 \text{ kmol aire}$$

A temperatura de combustión ordinaria el nitrógeno se comporta como un gas inerte y no reacciona con otros elementos químicos. Pero aun en ese caso la presencia de nitrógeno influye de manera considerable en el resultado de un proceso de combustión, pues el nitrógeno suele entrar en una cámara de combustión en grandes cantidades a temperaturas bajas y salir a temperaturas considerablemente altas, absorbiendo una gran proporción de la energía química liberada durante la combustión. En todo este proceso de combustión se supondrá que el nitrógeno permanecerá perfectamente inerte. Téngase en mente, sin embargo, que a temperaturas muy altas, como las que se encuentran en las máquinas de combustión interna, una pequeña fracción de nitrógeno reacciona con oxígeno, formando gases peligrosos como el óxido nítrico.

El aire que entra en una cámara de combustión contiene algo de vapor de agua (o humedad), el cual también es digno de consideración. En casi todos los procesos de combustión, la humedad en el aire puede tratarse como gas inerte, como nitrógeno. Sin embargo a temperaturas muy altas un poco de vapor de agua se descompone en H_2 y O_2, así como en H, O y OH. Cuando los gases de combustión se enfrían por debajo de la temperatura de punto de rocío del vapor de agua, una parte de la humedad se condensa, es importante predecir la temperatura de punto de rocío debido a que las gotas de agua suelen combinarse con el dióxido de azufre que puede estar presente en los gases de combustión, formando ácido sulfúrico, el cual es muy corrosivo.

Durante un proceso de combustión los componentes que existen antes de la reacción reciben el nombre de reactivos, y los componentes que existen después de la reacción se denominan productos. Considere, por ejemplo, la combustión de 1 kmol de carbón con 1 kmol de oxígeno puro, que forma dióxido de carbono:

$$C + O_2 \longrightarrow CO_2$$

Aquí C y O_2 son los reactivos, puesto que existen antes de la combustión y CO_2 es el producto, debido a que existe después de la combustión. Observe que un reactivo no tiene que reaccionar químicamente con la cámara de combustión. Por ejemplo, si el carbono se quema con aire en lugar de oxígeno puro, ambos lados de la ecuación de combustión incluirán N_2. Es decir, el N_2 aparecerá como un reactivo y como un producto.

Debe mencionarse que poner un combustible en estrecho contacto con el oxígeno no es suficiente para iniciar la combustión. (Gracias a dios que es así. de otro modo, el mundo entero estaría en llamas). El combustible debe llevarse arriba de su temperatura de ignición para iniciar la combustión. Las temperaturas de ignición mínimas aproximadas de varias sustancias del aire atmosférico son 260°C para la gasolina, 400°C para el carbono, 580°C para el hidrógeno, 610°C para el monóxido de carbono y 630°C para el metano. Además, las proporciones del combustible y del aire deben estar en un nivel adecuado para que comience la combustión. Por ejemplo, el gas natural no se quemara en el aire en concentraciones menores a 5 por ciento o mayores a 15 por ciento aproximadamente.

Por ejemplo, ambos lados de la ecuación química de combustión contiene 12 kg de carbono y 32 kg de oxígeno, aun cuando el carbono y el oxígeno existen como elementos en los reactivos y como compuesto en el producto. Asimismo, la masa total de los reactivos es igual a la masa total de los productos, siendo cada una 44 kg. (Es una práctica común redondear las masas molares hasta el entero más cercano si no se requiere más exactitud.) Sin embargo, advierta que el número de moles total de los reactivos (2 kmol) no es igual al número de moles total de los productos (1kmol). Es decir, el número total de moles no se conserva durante una reacción química.

Una cantidad utilizada en el análisis de procesos de combustión para cuantificar las cantidades de combustible y aire es la relación aire - combustible A/C. Suele expresar en una base de masa y se define como la proporción entre la masa del aire y la masa de combustible en un proceso de combustión. Es decir:

$$A/C = m_{aire}/m_{combustible}$$

La masa m de una sustancia se relaciona con el número de moles N por medio de la relación m = NM, donde M es la masa molar.

La relación aire-combustible puede expresarse también en una base molar como la proporción entre el número de moles del aire y el número de moles del combustible. Pero aquí se utilizara la primera definición. El reciproco de la relación aire- combustible se conoce como relación combustible-aire.

Problema

Un kmol de octano (C_8H_{18}) se quema con aire que contiene 20 kmol de O_2, como se muestra en la figura siguiente. Suponga que los productos contienen solo CO_2, O_2, H_2O y N_2, determine el número de moles en cada gas en los productos y la relación aire-combustible para este proceso de combustión.

Solución

La ecuación química para este proceso de combustión puede escribirse como:

$$C_8H_{18} + 20(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow xCO_2 + yH_2O + wN_2 + zO_2$$

Donde los términos en el paréntesis representan la composición del aire seco que contiene 1 kmol de O_2, y "x, y, z y w" representan los números de moles desconocidos de los gases en los productos. Estas incógnitas se determinan con la aplicación del principio de la conservación de la masa a cada uno de los elementos, es decir, la masa o el número de moles total de cada elemento en los reactivos debe ser igual a la de los productos:

$C : 8 = x \rightarrow x = 8$

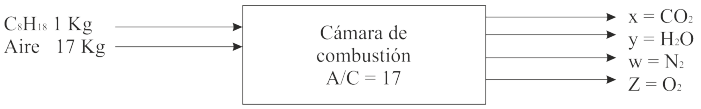
$H : 18 = 2y \rightarrow y = 9$

$O : 40 = 2x + y + 2z \rightarrow z = 7.5$

$N2 : (20)(3.76) = w \rightarrow w = 75.2$

La sustitución produce

$$C_8H_{18} + 20(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 8CO_2 + 9H_2O + 7.5O_2 + 75.2N_2$$



La relación aire - combustible (A/C) representa la cantidad de aire utilizada por unidad de masa de combustible durante un proceso de combustión.

Observe que el coeficiente 20 en la ecuación balanceada anterior representa el número de moles de oxígeno, no el número de moles de aire. Éste se obtiene sumando 20 x 3.76 = 75.2 moles de nitrógeno a los 20 moles de oxígeno, lo que da un total de 95.2 moles de aire. La relación aire-combustible (A/C) se determina tomando la proporción entre la masa de aire y la masa del combustible:

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} = \frac{(NM)_{aire}}{(NM)_c + (NM)_{H_2}} = \frac{(20x4.76kmol)(29kg/mol)}{(8kmol)(12kg/kmol) + (9kmol)(2kg/kmol)} = 24.2Kg\ aire/kg\ combustible$$

Es decir, se emplea 24.2 Kg. de aire para quemar cada kilogramo de combustible durante este proceso de combustión.

3.6.1. PROCESOS DE COMBUSTIÓN TEÓRICO Y REAL

Muchas veces es muy útil estudiar la combustión de un combustible con la suposición de que la combustión es completa. Un proceso de combustión es completo si todo el carbono en el combustible se transforma en el CO_2, todo el hidrógeno se transforma en H_2O y todo el azufre (si lo hay) se transforma en SO_2 . Todos los componentes combustibles del combustible se queman por completo durante un **proceso de combustión completa**. En sentido inverso, un proceso de **combustión es incompleto** si los productos de combustión contienen cualquier combustible o componentes no quemados, como C, H_2, CO u OH_2.

El oxígeno insuficiente es una razón obvia para la combustión incompleta, pero no la única. La combustión incompleta sucede incluso cuando en la cámara de combustión hay más oxigeno del necesario para la combustión completa. Esto puede atribuirse a la mezcla insuficiente en la cámara de combustión durante el limitado tiempo que el oxígeno y el combustible están en contacto. Otra causa de combustión incompleta es la disociación, la cual se vuelve importante a elevadas temperaturas.

La cantidad mínima de aire necesaria para la combustión completa de un combustible recibe el nombre de aire estequiométrico o **aire teórico**. De manera que cuando un combustible se quema por completo con aire teórico, no estará presente oxigeno no combinado en el producto de los gases. El aire teórico también se conoce como cantidad de aire químicamente correcta, o aire 100 por ciento teórico. Un proceso de combustión con menos cantidad de aire teórico está condenado a ser incompleto. El proceso de combustión ideal durante el cual un combustible se quema por completo con aire teórico se conoce como combustión estequiométrico o teórico de ese combustible. Por ejemplo, la combustión teórica del metano es :

$$CH_4 + 2(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 7.52N_2$$

Advierta que los productos de la combustión teórica no contienen metano no quemado ni C, H_2, CO, OH_2 u O_2 libre.

3.6.2. PORCENTAJE DE EXCESO DE AIRE

En los procesos de combustión reales es una práctica común emplear más aire que la cantidad estequiométrica, con el fin de aumentar las oportunidades de combustión completa o para controlar la temperatura de la cámara de combustión. La cantidad de aire en exceso sobre la cantidad estequiométrica se llama **exceso de aire**. La cantidad de exceso de aire suele expresarse en términos del aire estequiométrico como aire de exceso porcentual o aire teórico porcentual. Por ejemplo, 50 por ciento de exceso de aire es equivalente a 150 por ciento de aire teórico, y 200 por ciento de exceso de aire equivalente a 300 por ciento de aire teórico. Desde luego, el aire estequiométrico puede expresarse como cero por ciento de exceso de aire o 100 por ciento de aire teórico. Cantidades de aire menores que la cantidad estequiométrica reciben el nombre de deficiencia de aire y se expresa a menudo como deficiencia de aire porcentual. Por ejemplo, 90 por ciento de aire teórico es equivalente a 10 por ciento de deficiencia de aire. La cantidad de aire utilizada en procesos de combustión se expresa también en términos de la razón de la equivalencia, la cual es la proporción entre la relación combustible-aire real y la relación combustible-aire estequiométrica.

3.6.3. ANÁLISIS DE GASES EN BASE SECA Y EN BASE HÚMEDA

La predicción de la composición de los productos es relativamente fácil cuando se supone que el proceso de combustión será completo y que se conocen las cantidades exactas de combustible y aire utilizados. Todo lo que se necesita hacer en este caso es aplicar el principio de conservación de la masa cada elemento que aparece en la ecuación de la combustión, sin necesidad de tomar otras medidas. Sin embargo, cuando uno trata con procesos de combustión reales, las cosas no son tan sencillas. Por alguna razón, es difícil que los

procesos de combustión reales siempre sean completos, incluso en la presencia de un exceso de aire. Por tanto, es imposible predecir la composición de los productos con base sólo en el principio de la conservación de la masa. Por ello, la única opción es medir directamente la cantidad de cada componente en los productos.

Para analizar la composición de los gases de combustión se emplea un dispositivo conocido como analizador de gases Orsat. En este dispositivo se recoge una muestra de los gases de combustión y se enfría a temperatura y presión ambiente, en cuyo punto se mide su volumen. Después la muestra es puesta en contacto con un compuesto químico que absorbe el CO_2. Los gases restantes se vuelven a llevar a la temperatura y presión ambiente, y se mide el nuevo volumen que ocupan. La proporción entre la reducción de volumen y el volumen original es la fracción de volumen del CO_2 , la cual es equivalente a la fracción molar si se supone comportamiento de gas idea. Las fracciones de volumen de los otros gases se determinan al repetir este procedimiento. En el análisis Orsat se acopia la muestra gaseosa sobre agua y se mantiene saturada todo el tiempo. Así, la presión de vapor del agua permanece constante durante toda la prueba. Por esta razón se ignora la presencia de vapor de agua en la cámara de prueba y los datos se registran en una base seca. Sin embargo, la cantidad de H_2O formada durante la combustión se determina con facilidad balanceado la ecuación de combustión

3.6.4. APLICACIONES DE BALANCE DE MATERIA EN REACTORES DE COMBUSTIÓN

Problema 1

Durante un proceso de combustión se quema etano (C_2H_6) con 20 por ciento de exceso de aire, como se muestra en la figura. Suponga su combustión completa y una presión total de 100 kpa, y determine a) la relación de aire- combustible.

Solución

Se especifica que el etano se quema por completo. En consecuencia, los productos contendrán sólo CO_2, H_2O, N_2 y el O_2 no utilizado. La ecuación de combustión en este caso puede escribirse como:

$$C_2H_6 + 1.2a_t(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O + 0.2a_tO_2 + (1.2X3.76)a_tN_2$$

Donde a_t es el coeficiente estequiometrico para el aire. De manera automática se tomo en cuenta 20 por ciento de exceso de aire utilizando el factor 1.2 a_t en lugar del aire teórico. La cantidad estequiométrica de oxigeno (a_t O_2) se utilizara para oxidar el combustible y la cantidad de exceso restante($0.2a_t$ O_2) aparecerá en los productos como oxigeno no utilizado. Observe que el coeficiente N_2 es el mismo en ambos lados de la ecuación. También notará que hubo balanceó del C y el H_2 total al momento de escribir la ecuación de combustión. El coeficiente a_t se determina del balanceo de O_2:

$$O_2 \Rightarrow 1.2a_t = 2 + 1.5 + 0.2a_t \qquad a_t = 3.5$$

La sustitución produce

$$C_2H_6 + 4.2(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O + 0.7O_2 + 15.79N_2$$

a) la relación aire - combustible se encuentra al tomar la proporción entre la masa del aire y la masa del combustible:

$$A/C = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} = \frac{(4.2X4.76Kmol)(29kmol)}{(2kmol)(12kg/kmol) + (3kmol)(2kg/kmol)}$$
$$= 19.32Kg.\ AIRE/kg\ COMBUSTIBLE$$

Es decir, se suministra 19.3 kg de aire para cada kilogramo de combustible durante este proceso de combustión.

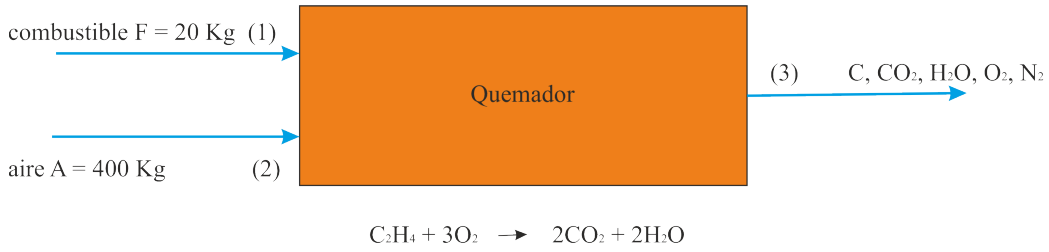
Problema 2

20 Kg./h de etileno C_2H_4 se queman como fuente de combustible con 400 Kg de aire. Determinar la composición de la mezcla resultante. ¿Cuál es el porcentaje en exceso de aire, suponiendo conversión completa?

Aire: N_2 =79 %, O_2 =21 %

Compuesto	**Masas moleculares**
C_2H_4	28
O_2	32
N_2	28
CO_2	44
H_2O	18
Aire	**28.84**

Solución



1 mol de C_2H_4 = 28g

1 Kmol de C_2H_4 = 28Kg, por tanto 20Kg

Tabla 3.2: Algunos resultados y operaciones del problema 2

Corriente número	(1)		(2)		(3)	
Nombre de corriente	Combustible F		Aire A		Combinado C	
Componente	Fracción	$\frac{kgmol}{h}$	Fracción	$\frac{kgmol}{h}$	Fracción	$\frac{kgmol}{h}$
C_2H_4	1.0	0.71	x	x	?	0.71
O_2	x	x	0.21	$\frac{0.21(400)}{28.84} = 2,91$	?	2.91
N_2	x	x	0.79	$\frac{0.79(400)}{28.84} = 10,96$	?	10.96
CO_2	x	x	x	x		
H_2O	x	x	x	x		
Total	1.0	0.71	1.0	13.87	1.0	14.58

Tabla 3.3: Resultados y operaciones del problema.

Componente	Entrada $\frac{kgmol}{h}$	Generado $\frac{kgmol}{h}$	Consumido $\frac{kgmol}{h}$	Salida $\frac{kgmol}{h}$
C_2H_4	0.71	x	0.71	0
O_2	2.91	x	2.13	0.78
N_2	10.96	x	x	10.96
CO_2	x	1.42	x	1.42
H_2O	x	1.42	x	1.42
			Total	$14.58 \frac{kgmol}{h}$

La tabla entrada-salida se prepara a partir de lo siguiente. No se genera C_2H_4 y se consume todo. Hay 2.91 Kmol de O_2 en la alimentación y reaccionan con el C_2H_4 de acuerdo con:

$$C_2H_4 + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 2H_2O$$
$$0.71 \quad 3(0.71) \quad 2(0.71) \quad 2(0.71)$$
$$0.71 \quad 2.13 \quad 1.42 \quad 1.42$$

De los 2.91 kmol de 0_2 en la alimentación, se consumen 2.13 kmol dejando 2.91 - 2.13 = 0.78 Kmol en la salida. El N_2 es inerte y pasa a los productos sin cambio alguno. Se generan 1.42 Kmol de CO_2, al igual que 1.42 de H_2O. De la tabla 3.2 14.58 Kmol van a la corriente de salida.

CH_4	45 %
H_2	35 %
CO	15 %
O_2	2 %
N_2	3 %

Problema 3: Combustión sin exceso de aire

Calcular la composición de los humos en la combustión completa estequiométrica del combustible cuya composición molar se detalla en la siguiente tabla:

Solución

Base de Cálculo: 1 kmol

Planteamos las reacciones:

CH_4 + 2 (O_2 + 3.762 N_2) $\rightarrow$ CO_2 + 2 H_2O + 2$*$3.762 N_2 = 0.45

H_2 + 1/2 (O_2 + 3.762 N_2) $\rightarrow$ H_2O + 1/2 3.762 N_2 = 0.35

CO + 1/2 (O_2 + 3.762 N_2) $\rightarrow$ CO_2 + 1/2 3.762 N_2 = 0.15

$O_2 \rightarrow O_2$ = 0.02

$N_2 \rightarrow N_2$ = 0.03

Los productos de combustión para un mol de combustible resultan así:

0.45 (CO_2 + 2H_2O + 2 * 3.762 N_2) + 0.35 (H_2O + 1/2 3.762N_2) + 0.15 (CO_2 + 1/2 3.762N_2) + 0.02 O_2 + 0.03 N_2

Agrupamos:

0.6 CO_2 + 1.25 H_2O + 4.3563 N_2 + 0.02 O_2

Al ser la combustión estequiométrica no debe haber aire entre los productos de combustión, por lo que restamos el término 0.02 O_2 y su complemento 3.762*0.02N_2, con lo que los productos son:

0.6 CO_2 + 1.25 H_2O + 4.2811 N_2

Para los reactantes, tenemos

(0.45 CH_4 + 0.35 H_2 + 0.15 CO + 0.02 O_2 + 0.03 N_2) + 0.45 (O_2 + 3.762N_2) + 0.35* 1/2 (O_2 + 3.762N_2) + 0.15* 1/2 (O_2 + 3.762N_2) - 0.02 O_2 - 0.03 * 3.762N_2

Agrupamos:

(0.45 CH_4 + 0.35 H_2 + 0.15 CO + 0.02 O_2 + 0.03 N_2) + 1.13 (O_2 + 3.762N_2)

Podemos ahora calcular todos los parámetros de la combustión. Obtenemos:

a) La masa molecular del combustible

$$W_c = \sum x_i W_i \ (combustibles) = 13.58 \ kg/kmo$$

b) La densidad del combustible relativa al aire

$$\rho = \frac{W_c}{W_A} = 0.47$$

c) La masa molecular de los humos húmedos

$$\sum x_i W_i \ (humos) = 27.527 \ kg/kmol$$

d) La masa molecular de los humos secos

$$\sum x_i W_i \ (humos \ sin \ H_2O) = 29.967 \ kg/kmol$$

e) La densidad de los humos húmedos a 0ºC y 1 atm

$$\rho_h = \frac{W_H}{W_A}\rho_A = 1.228 \ kg/m^3$$

f) La relación molar oxígeno - combustible = 1.130 kmoles de O_2/ kmol de combustible

g) La relación molar aire - combustible = 1.13 * 4.762 = 5.381

h) La relación másica aire - combustible

$$5.381\frac{W_A}{W_C} = 11.43\frac{kg \ de \ aire}{kg \ de \ combustible}$$

i) La relación molar humos húmedos - combustible

$$\sum n_i(productos) = 6.131 m^3 \ humos/m^3 \ combustible$$

j) La relación másica humos húmedos - combustible

$$6.131\frac{W_h}{W_C} = 12.428\frac{kg \ de \ humos}{kg \ de \ combustible} = kg \ humos/kg \ combustible$$

k) La relación molar humos secos - combustible

$$\sum n_i(productos,\ sin\ H_2O) = 4.881 m^3\ humos/m^3\ combustible$$

l) La relación másica humos secos - combustible

$$4.881 \frac{W_{hs}}{W_C} = 10.771 \frac{kg\ de\ humos}{kg\ de\ combustible}$$

m) La relación masa de humos húmedos - volumen de combustible

$$12.428 \rho_r, \rho_A = 7.517\ kg\ humos/m^3\ combustible$$

n) La relación masa de humos secos - volumen de combustible

$$10.771 \rho_r, \rho_A = 6.515\ kg\ humos/m^3\ combustible$$

ñ) La composición molar (en %) de los humos húmedos

Composición de los humos húmedos	
CO_2	0.600* 100/6.131 =9.79 %
H_2O	1.250* 100/6.131=20.39 %
N_2	4.281 * 100/6.131 = 69.83 %

o) La composición molar (en %) de los humos secos.

Composición de los humos secos	
CO_2	0.600* 100/4.881 =12.29 %
N_2	4.281 * 100/4.881 =87.71 %

3.6.5. PROBLEMAS DE APLICACIÓN

Problema 1: Se desea obtener monoclorometano en un reactor continuo en el que se producen las siguientes reacciones:

$$CH_4(g) + Cl_2(g) \rightarrow CH_3Cl(g) + HCl(g)$$
$$CH_3Cl(g) + Cl_2(g) \rightarrow CH_2Cl_2(g) + HCl(g)$$

La alimentación contiene 70 % molar de etano y el resto de cloro. Si la conversión alcanzada es del 80 % y la selectividad de 5 mol CH_3Cl / mol CH_2Cl_2 hallar la composición completa del efluente del reactor y el rendimiento.

Problema 2: Una mezcla de combustible (hidrógeno y metano) se quema completamente en una caldera que usa aire. El análisis de los gases de la chimenea son: 83.4 % de N_2, 11.3 % de O_2, y 5,3 % de CO_2; (en base seca, sin agua). Reacción:

$$CH_4 + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$$
$$H_2 + O_2 \rightarrow H_2O$$

a) Cuales son los porcentajes de la mezcla de combustible (H_2 y CH_4)

b) Cual es el porcentaje de exceso de aire

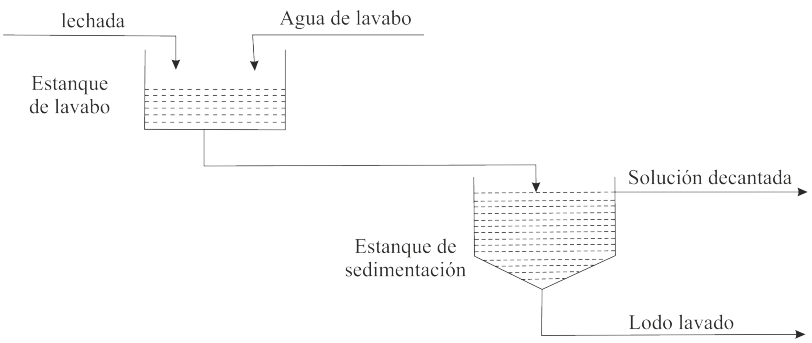
Se está fabricando NaOH en solución, añadiendo una solución que contiene 12 % de Na_2CO_3; y otra solución que contiene 28 % de $Ca(OH)_2$ en peso. Cuál será la composición de la suspensión final?

Reacción: $Ca(OH)_2 + Na_2C0_3 \rightarrow 2NaOH + CaC0_3$

Problema 3: Para un proceso de preparación de Yoduro de metilo, a un exceso de metanol se añaden 2000 lb/día de ácido yodhídrico. Si el producto contiene 81.6 % de yoduro de metilo junto con el metanol sin reaccionar, si el desperdicio está formado por 82.6 % de Acido yodhídrico y 17.4 % de agua. Calcular: Suponiendo que a reacción se consuma un 40 % en el reactor:

- Peso del metanol que se añade por día
- La cantidad de Ac. Yodhídrico que se recircula.

Problema 4: En la producción de aluminio a partir de mineral de bauxita, un paso crucial es la separación de la alúmina de las impurezas minerales. En el proceso Bayer, esto se logra mediante el tratamiento de bauxita con NaOH en solución, para producir $NaAlO_2$. Debido a que el $NaAlO_2$ es soluble en agua, pero no los componentes residuales del mineral de bauxita, puede obtenerse una separación dejando asentar dichos minerales y decantando la solución acuosa de $NaAlO_2$ y NaOH que no reaccionó. Para recuperar algo más del $NaALO_2$ que quedó en la solución atrapada entre los sólidos asentados, se lava este "lodo" repetidas veces con agua, se deja asentar y se decanta el agua de lavado. La figura muestra una etapa de este proceso de lavado y asentamiento. En esta etapa, se lava una lechada de alimentación que contiene 10 % de sólidos, 11 % de NaOH, 16 % de $NaAlO_2$ y el resto agua, con una corriente de agua de lavado que contiene 2 % de NaOH, para producir una solución decantada libre de sólidos, formada por 95 % de agua y un lodo asentado con 20 % de sólidos. Calcule la cantidad de $NaAlO_2$ que se recupera en la solución decantada, si se alimenta lechada a razón de 1000 lb/h.



Problema 5: La reacción entre el etileno (C_2H_4) y el bromuro de hidrógeno (HBr) se efectúa en un reactor continuo. Al analizar el flujo de productos se encontró que contiene 50 % molar de C_2H_5Br y 33.3 % de HBr. La alimentación del reactor contiene sólo etileno y bromuro de hidrógeno. Determine:

a) El porcentaje de conversión del reactivo limitante

b) El porcentaje en exceso del reactivo no limitante

Problema 6: En un reactor químico, donde se logra un 80 % de conversión del reactivo limitante, se produce la oxidación del amoniaco de acuerdo a la siguiente reacción:

$$NH_3 + O_2 \rightarrow N_2 + H_2O$$

Sí se alimentan 300 kg/h de amoniaco y 2500 kg/h de aire (21 % O_2 y 79 % N_2, en moles), determine:

I. Escriba la reacción química con los coeficientes estequiometricos que corresponden

II. Cuál es el reactivo limitante.

III. La composición de la corriente de salida del reactor.

IV. El porcentaje de exceso del reactivo no limitante, con el que se alimenta el reactor.

Datos: M_N = 14 M_O = 16 M_H = 1 M_{aire} = 29

Problema 7: Suponga la combustión de 12 Kg de gas butano, C_4H_{10}

a) Calcule la masa de agua formada.

b) Calcule el volumen de CO_2, medido a 0,8 atm y 20°C.

c) Calcule el volumen de aire necesario para la combustión, medido en condiciones normales (suponga el 21 % en volumen de O_2 en el aire).

d) Se desea recoger el CO_2 generado en una disolución de NaOH, por formación de carbonato sódico. ¿Qué cantidad de NaOH se necesitará?

Problema 8 : Una muestra de 0,322 g de un vapor orgánico a 100 ^{o}C y 0,974 atm, ocupa un volumen de 62,7 ml. Un análisis de dicho vapor da una composición elemental de C= 65,43 %, O= 29,16 % e H= 5,5 %. ¿Cuál es su formula molecular?

Masas atómicas: C= 12; O= 16; H= 1

Problema 9: En un motor entra dodecano ($C_{12}H_{26}$) que se quema con aire para dar unos gases de combustión de análisis molar en base seca del 12,1 % de CO_2, 3,4 % de CO, 0,5 % de O_2, 1,5 % de H_2 y 82,5 % de N_2. Calcular la relación aire-combustible en base molar.

Problema 10: Los gases de una caldera que quema fuel, presentan la siguiente composición sobre base seca: CO $_2$=12,2 %; CO=1,2 %; O_2=3,1 %; N_2=83,5 %. Suponiendo que el combustible no contiene más que C y H, calcular: (a) La composición centesimal del combustible. (b) Los moles de aire empleados por kg de combustible. (c) El porcentaje de exceso de aire empleado.

CAPÍTULO 4

BALANCE DE MATERIA QUE INVOLUCRA CORRIENTES DE RECIRCULACIÓN Y DE DERIVACIÓN Y SISTEMAS DE VARIAS FASES

OBJETIVOS

- Comprender y reconocer corrientes de recirculación, derivación y purga.
- Usar Balance de materia en equilibrio de Fases.
- Usar el diagrama psicrometico en proceso de evaporacion y condensación.

4.1. RECIRCULACIÓN, DERIVACIÓN O BY PASS Y PURGA

Se llaman corrientes normales a las de entrada y salida de las unidades de proceso. Las corrientes especiales son de tres tipos:

- Recirculación
- Derivación
- Purga

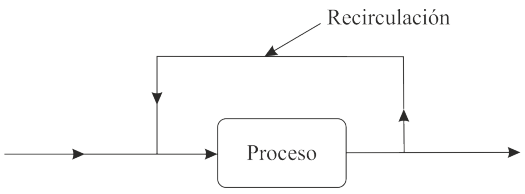


Figura 4.1: Corriente de recirculación

La corriente de recirculación es aquella mediante la cual, parte de la corriente principal de salida de un proceso regresa a la entrada del mismo (Figura 4.1).

La corriente de derivación o bypass es una parte de la corriente principal de alimentación a un proceso que se separa y no pasa por la unidad del proceso volviendo a unirse a la corriente de salida (Figura 4.2).

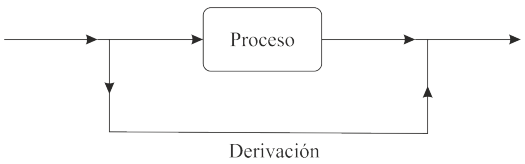


Figura 4.2: Corriente de derivación

La corriente de purga es la que envía substancias hacía el exterior de sistema (Figura 4.3).

Las corrientes de recirculación y derivación son muy usadas en la industria. Sirven para controlar a los procesos, ahorrar materiales y energía y en términos generales, para mejorar la eficiencia.

La purga es también una corriente muy usada en la práctica y sirve fundamentalmente para eliminar del sistema los materiales indeseables.

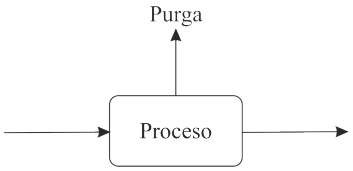


Figura 4.3: Corriente de purga

4.2. BALANCE DE MATERIA CON RECIRCULACIÓN EN OPERACIONES Y PROCESOS EN ESTADO ESTACIONARIO

Problema 1

Una planta piloto de evaporación en cortina tiene una capacidad de evaporación de 10 kg/h de agua. El sistema consiste en un calentador a través del cual el fluido circula hacia abajo en forma de cortina y el fluido calentado se descarga en un colector que trabaja a vacío en el cual, una evaporación "flash" reduce la temperatura del fluido caliente hasta su punto de ebullición. En una operación continua, una bomba recircula parte del concentrado del reservorio (almacenamiento) con la alimentación del concentrado, e impulsa la mezcla a través del intercambiador. La bomba impulsa 20 kg/h de fluido. El fluido del colector debe encontrarse a la concentración deseada para que el evaporador funcione continuamente. Si la alimentación consiste en 5.5 % sólidos y se necesita concentrarlos hasta un 25 %, calcular:

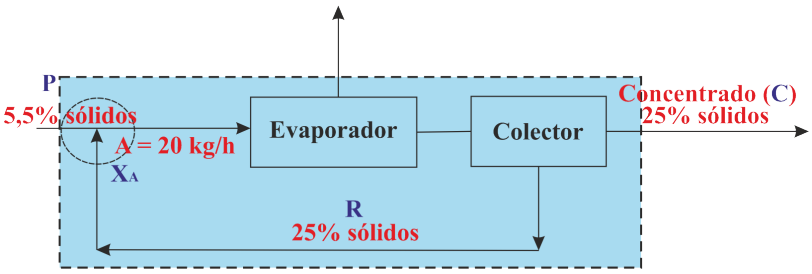
1. Caudal de alimentación y producción de concentrado
2. Cantidad de concentrado recirculado
3. Concentración de la mezcla de alimentación y concentrado recirculado.

Solución:

Base de Cálculo = 1 hora

Vapor (V), 100 % agua

V = 10 kg/h



1. Balance Global: Masa total: F = C + V

$$F = C + 10$$

De los sólidos: $F \cdot x_F = C.x_c + V.x_v$

$$F \cdot 0{,}055 = C \cdot 0{,}25 + V \cdot 0$$

Sustituyo F:

$$(C + 10)\cdot 0{,}055 = C\cdot 0{,}25$$
$$C = 2{,}82 \text{ kg}$$
$$F = 12{,}82 \text{ kg}$$

2. Balance al Punto de Mezcla:

   Masa total: F + R = 20

$$12{,}82 + R = 20$$
$$R = 7{,}18 \text{ kg}$$

A los sólidos: $F\cdot x_F + R\cdot x_R = A\cdot x_A$

$$12{,}82\cdot 0{,}055 + 7{,}18\cdot 0{,}25 = 20\cdot x_A$$
$$x_A = 0{,}125$$

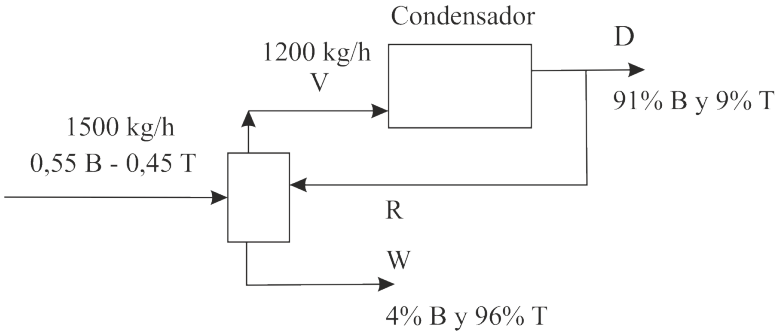
Problema 2

Una columna de destilación separa 1500 kg/h de una mezcla de benceno y tolueno que contiene 55 % en masa de benceno. El producto recuperado del condensador en el domo de la columna contiene 91 % de benceno y los fondos de la columna contienen 96 % de tolueno. La corriente de vapor que entra al condensador de la parte superior de la columna es 1200 kg/h. Una parte del producto se regresa a la columna como reflujo y el resto se saca para utilizarlo en otra parte. Suponga que las composiciones de las corrientes en la parte superior de la columna (V), del producto retirado (D) y del reflujo (R) son idénticas. Encuentre la relación entre el reflujo y el producto retirado.

Al dibujar y etiquetar el diagrama de flujo se observa que se conocen todas las composiciones y se desconocen algunas masas. Se pueden efectuar balances de materia sobre la columna de destilación y sobre el condensador y cualquiera que sea la unidad elegida incluye la corriente R (recirculación o reflujo).

Solución:

Base de Cálculo = 1500 Kg./ h de alimentación



Balance global total de masa:

$$1500 \text{ kg/h} = D + W$$

$$W = 1500 \text{ kg/h} - D$$

Balance global parcial de masa para benceno:

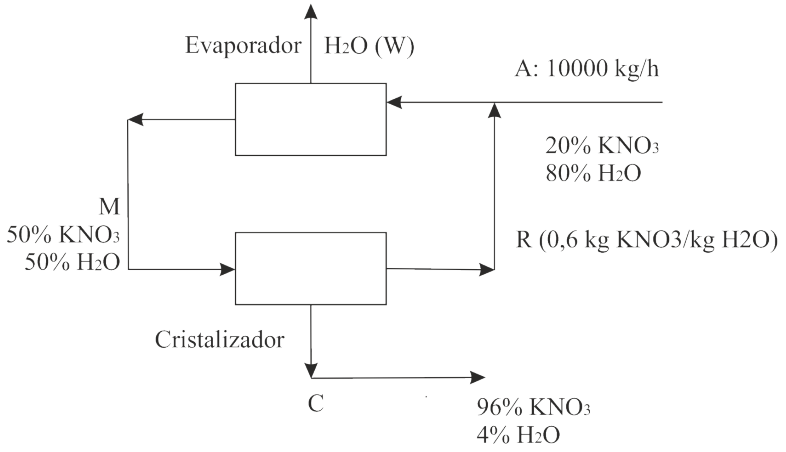
$$0{,}55*1500 \text{ kg/h} = 0{,}91*D + 0{,}04*W$$
$$825 \text{ kg/h} = 0{,}91* D + 0{,}04*(1500 \text{ kg/h} - D)$$
$$D = 879{,}31 \text{ kg/h}.$$

Balance total de masa en el condensador:

$$V = D + R \quad R = 1200 \text{ kg/h} - 879{,}31 \text{ kg/h}$$
$$R = 320{,}69 \text{ kg/h}.$$
$$R/D = 0{,}365.$$

Problema 3

En la siguiente figura se presentan los datos para un proceso que incluye una evaporación y una cristalización. ¿Cuál es la corriente de recirculación en kilogramos por hora?



Balances globales:

Balance parcial de masa para el KNO_3:

$$10000 \text{ kg/h} * 0{,}20 = 0{,}96\ C$$
$$C = 2083{,}33 \text{ kg /h}$$

Balance total de masa:

$$A = W + C$$
$$W = 7916{,}67 \text{ kg/h}.$$

Balances de masa en el cristalizador:

Balance total de masa:

$$M = C + R$$
$$M = 2083{,}33,\ kg/h + R$$

Balance parcial de masa para el KNO_3:

$$0{,}5 * M = 0{,}96 * C + (0{,}6/1{,}6) * R$$
$$0{,}5 * (C + R) = 0{,}96 * C + (0{,}6/1{,}6) * R$$
$$0{,}125 * R = 0{,}46 * C$$
$$R = 7666{,}65\ kg/h$$

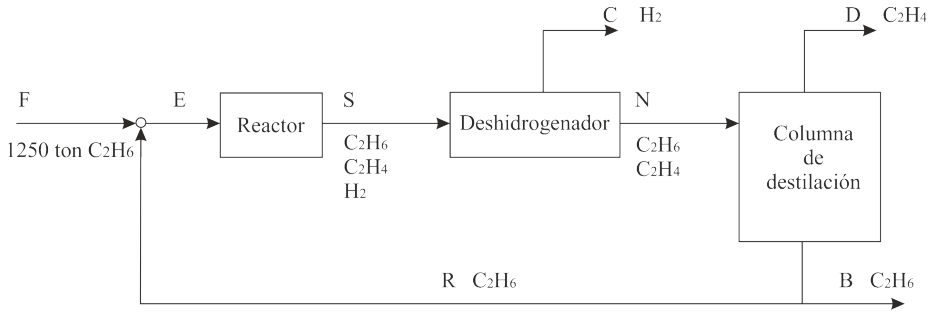
Problema 4

Se está analizando el funcionamiento de la unidad de craqueo de etano de la figura. Este proceso de refinación es muy común en la industria de hidrocarburos, consiste en quebrar las moléculas mayores y más complejas para transformarlas en otras más simples y livianas. La unidad procesa diariamente 1250 toneladas de hidrocarburo (etano. C_2H_6) para obtener etileno e hidrógeno, según la ecuación química. La conversión en un paso es del 35,0 % y se desea lograr una conversión total del 95.0 %. Determinar el reciclo necesario para lograr este objetivo así como la producción diaria de etileno. C_2H_4.

$$C_2H_6 \rightarrow C_2H_4 + H_2$$

Solución:

Hay dos maneras de plantear y resolver este problema. La primera es plantear las ecuaciones de balance de materia en cada unidad considerando conocida la corriente de alimentación fresca F tal y como está dado en el problema. Esto trae algunas dificultades pues la alimentación al reactor E no sería conocida, por lo que habría que plantear un conjunto de varias ecuaciones donde aparecen varias incógnitas, y luego habría que sustituir unas en otras hasta obtener la solución.



La segunda manera de abordar el problema es suponer un flujo de alimentación al reactor E, calcular en base a la conversión del proceso las cantidades obtenidas de productos, las cantidades consumidas de reactivos y determinar las corrientes faltantes entre estas la corriente F. Luego, se hace un escalamiento de magnitud a fin de ajustar los flujos de material cuando la alimentación fresca F es de 1250 toneladas diarias. Es preciso mencionar que los fraccionamientos de las corrientes no se ven modificados al hacer escalamientos de magnitud. Por lo tanto, las composiciones de cada corriente del sistema se mantendrán iguales sin importar la base de cálculo que se suponga en cualquiera de los flujos del sistema.

Este problema será resuelto aquí de la segunda manera. Para ello, se supone que la corriente de alimentación al reactor es de 100 kgmol de C_2H_6.

Base de Cálculo: un día.

Para efectuar el análisis en el reactor se debe tomar en cuenta que la conversión en un paso es de 35 %.

Además, la ecuación de balance a utilizar es:

Salida = Entrada - Consumo - Generación

Balance de C_2H_4:

$$\text{S } x_{s,c_2H_4} = 0 - 0 + 100 \text{ Kgmol } C_2H_6 \frac{35}{100} \frac{kgmol\ C_2H_4}{kgmol\ C_2H_6} = 35 \text{ kgmol } C_2H_4$$

Balance de H_2:

$$\text{S } x_{s,H_2} = 0 - 0 + 35.0 \text{ Kgmol } H_2 \frac{1}{1} \frac{kgmol\ H_2}{kgmol\ C_2H_4} = 35.0 \text{ kgmol } H_2$$

Balance de C_2H_6:

$$\text{S } x_{s,c_2H_6} = 100 - 100 \text{ Kgmol } C_2H_6 \frac{35}{100} = 65.0 \text{ Kgmol } C_2H_6$$

En el deshidrogenador (en el que no ocurre ninguna reacción) se aplica la ecuación de balance:

Salida = Entrada

Por lo tanto, se tiene que:

C = 35,0 kgmol H_2, (100 %hidrógeno)

N x_{N,C_2H_4} = 35,0 Kgmol C_2H_4

N x_{N,C_2H_6} = 65,0 Kgmol C_2H_6

Los moles totales en la corriente N son:

N = 35,0 + 65,0 = 100 Kgmol

En la columna de destilación (asumiendo que no ocurre ninguna reacción) también se aplica la ecuación de balance:

Salida = Entrada

Por lo tanto, se tiene que:

Balance de C_2H_4:

$$\text{N x}_{N,C_2H_4} = \text{D x}D, C_2H_4 = \text{D} = 35{,}0 \text{ kgmol } (100\,\%\ \text{C}_2\text{H}_4).$$

Balance de C_2H_6:

$$\text{N } x_N, C_2H_6 = \text{B x}_{B,C_2H_6} + \text{R x}_{R,C_2H_6}$$

$$B + R = 65,0Kgmol(100\,\%C_2H_6) \tag{4.1}$$

En el punto de unión de corrientes, se obtiene la relación:

$$F + R = E = 100Kgmol(100\,\%C_2H_6). \tag{4.2}$$

Se desea que la conversión total del proceso de craqueo sea del 95 %. Es decir:

$$\frac{F_{C_2H_6} - B_{C_2H_4}}{F_{C_2H_6}} = 0,95$$

$$F = 20,0B(corrientes100\,\%C_2H_6). \tag{4.3}$$

Sustituyendo la expresión 4.3 en 4.2 y resolviendo simultáneamente con la ecuación 4.1, se obtiene que:

B = 1.84 Kgmol.

F = 36.8 Kgmol.

R = 63,2 Kgmol.

Ahora bien, solo falta escalar en magnitud los valores obtenidos de las corrientes R y D (corriente de reciclo y de etileno respectivamente) en base al valor obtenido y valor real de la corriente F:

Moles reales alimentados de $F = 1250\ Ton\ \frac{100\ kg}{1\ Ton}\frac{1\ kgmol\ C_2H_6}{30,069\ kgmol\ C_2H_6} = 41,57x10^3$

$$\frac{Valor\ real\ de\ F}{Valor\ obtenido\ de\ F} = \frac{41,57x10^3\ kgmol\ de\ C_2H_6}{36,8\ kgmol\ de\ C_2H_6} = 1,13x10^3$$

Los valores pedidos para las corrientes D y R son:

D = 1,13 x 10^3 (35,0kgmol) = 39.6 x 10^3 Kgmol

R = 1,13 x10^3 (63,2 kgmol) = 71,4 x 10^3 Kgmol

4.3. BALANCE EN OPERACIONES Y PROCESOS CON CORRIENTE DE DERIVACIÓN O BY PASS EN ESTADO ESTACIONARIO

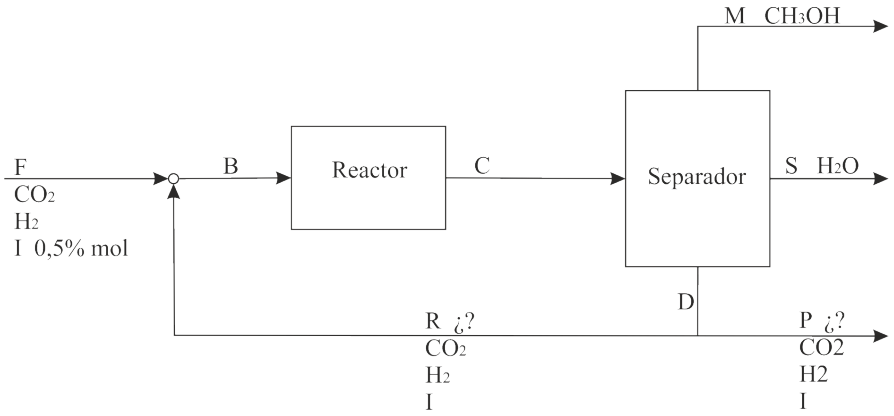
Problema 1

En un reactor que opera a elevada presión, se lleva a cabo la síntesis de metanol basada en la reacción. La figura muestra un diagrama simplificado de este proceso.

$$CO_2 + 3H_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O$$

El H_2 y el CO_2 se hacen reaccionar en proporciones estequiométricas exactas. La alimentación fresca de reactivos proviene de un proceso de reformado de gas natural y contiene 0.500 % molar de inertes. En el reactor se obtiene una conversión del 60.0 % molar. La concentración de inertes que entra en el reactor debe de mantenerse por debajo del 2,00 % molar. El proceso se realiza en estado estacionario y se puede admitir que todas las corrientes se comportan como gases ideales, (a) ¿Cuántos moles se deben recircular por cada

mol de alimentación que entra al reactor? (b) ¿Cuántos moles se deben purgar por cada mol de alimentación fresca?



Solución:

En este ejemplo se tiene un sistema con recirculación de reactivos y con una purga. La recirculación permite elevar el rendimiento del proceso mediante la reutilización de los reactivos presentes en la corriente de productos. La purga tiene una función bien particular en procesos donde hay presencia de sustancias inertes.

La alimentación fresca viene compuesta por reactivos pero también por impurezas que tienden a acumularse en el flujo de recirculación. Si no es posible separar las impurezas de la corriente de reactivos a ser reciclada, habrá que purgar una parte de la corriente de recirculación a fin de mantener un nivel tolerable de la concentración de impurezas en la alimentación del reactor. Este es el caso que se estudia en este ejemplo.

Para comenzar a resolver el problema, se puede fijar la alimentación del reactor B. En esta unidad hay cero grados de libertad (cinco ecuaciones con cinco incógnitas, ¿el lector puede decir cuáles son?).

Base de Cálculo: 1.00 mol de CO_2 en la corriente B.

Lo que implica 3.00 moles de H_2 en B por estequiometria de la ecuación química, se puede plantear la ecuación siguiente a fin de determinar la composición en inertes de la corriente B manteniendo la concentración de estas sustancias a lo máximo igual al 2.00 % del flujo de alimentación:

$$Bx_{Bi} <= 0,0200\ B$$

Considérese para el análisis siguiente el caso más desfavorable:

$$Bx_{Bi} = 0,0200\ B$$

Entonces, la relación en sustancias inertes viene dada por:

$$\text{B } x_{Bi} = 0{,}0200 \text{ B} = 0{,}0200(\text{B } x_{Bi} + \text{B } x_{CO_2} + \text{B } x_{BH_2})$$

$$\text{B } x_{Bi} = 0.0200 \text{ B } x_{Bi} + 0.0200(1.00 \text{ mol } CO_2 + 3.00 \text{ mol } H_2) = 0{,}0200 \text{ B } x_{Bi} + 0.0800$$

$$0.98 \text{ B } x_{Bi} = 0.0800 \text{ [mol]}$$

$$B\ x_{Bi} = 0.0816\ mol$$

Ahora se puede calcular la corriente B:

$$B = B\ x_{Bi} + B\ x_{CO_2} + B\ x_{BH_2} = 0.0816 + 1.00 + 3.00\ [mol] = 4.082 mol$$

Recuérdese que la conversión del CO_2 en el reactor es del 60 % molar. Los componentes de la corriente C que sale del reactor se determinan como sigue:

$$Salida = Entrada - Consumo - Generación$$

Balance del CH_3OH:

$$C\ x_{C,CH_3OH} = 0 - 0 + 1.00\ mol\ CO_2\ \frac{60}{100}\frac{1\ mol\ CH_3OH}{1\ mol\ CO_2} = 0.600\ mol\ CH_3OH$$

Balance del H_2O:

$$C\ x_{C,H_2O} = 0 - 0 + 1.00\ mol\ CO_2\ \frac{60}{100}\frac{1\ mol\ H_2O}{1\ mol\ CO_2} = 0.600\ mol\ CH_3OH$$

Balance del CO_2:

$$C\ x_{C,CO_2} = 1{,}00 - 1{,}00\ mol\ CO_2\frac{60}{100} + 0 = 0.400\ mol\ CO_2$$

Balance del H_2:

$$C\ x_{C,CO_2} = 3{,}00 - 1{,}00\ mol\ CO_2\frac{60}{100} + 0 = 1.20\ mol\ H_2$$

Balance de I:

$$C\ x_{C,I} = 0{,}0816 - 0 + 0 = 0.0816\ mol\ l$$

Los moles totales en la corriente C son:

$$C = C\ x_{C,I} + C\ x_{C,CH_3OH} + C\ x_{C,H_2O} + C\ x_{C,H_2} + C\ x_{C,CO_2}$$
$$C = 0.0816 + 0{,}600 + 0{,}600 + 1{,}200 + 0{,}400\ [mol] = 2{,}882\ mol$$

Haciendo el balance de materia en el separador, se obtiene que:

$$M = C\ x_{C,CH_3OH} = 0{,}600\ mol\ CH_3OH$$
$$S = C\ x_{C,H_2O} = 0{,}600\ mol\ H_2O$$
$$D = C\ x_{C,CO_2} + C\ x_{C,H_2} + C\ x_{C,I} = 0{,}400 + 1{,}20 + 0{,}0816\ [mol] = 1{,}682 mol$$

Además:

D x_{D,CO_2} = C x_{C,CO_2} = 0,400 mol $\rightarrow$ $x_{D,CO_2} = \frac{0,400}{1,682}$ = 0,238

D x_{D,H_2} = C x_{C,H_2} = 1,20 mol $\rightarrow$ $x_{D,H_2} = \frac{1,20}{1,682}$ = 0,713

D $x_{D,I}$ = C $x_{C,I}$ = 0,0816 $\rightarrow$ $x_{D,I} = \frac{0,0816}{1,682}$ = 0,0485

Las composiciones de las corrientes D, R y P son las mismas, aunque los valores de las corrientes no sean iguales. Con esta información, haciendo balances de materia en el punto de unión de la alimentación fresca y recirculación, se puede determinar qué: Balance General:

$$F + R = B = 4,082 \text{ mol}$$

Balance de I:

$$F\ x_{F,I} + R\ x_{R,I} = B\ x_{B,I} \rightarrow F(0,00500) + R(0,0485) = 0,0816$$

Resolviendo estas dos ecuaciones se obtiene que:

$$R = 1,41 \text{mol}$$
$$F = 2,67 \text{ mol}$$

Parte (a). Los moles que se recirculan R, por mol alimentado al reactor B. son:

$$1,41 \text{ mol R} / 4.082 \text{ mol B} = 0,345 \text{ mol R1/ mol B}$$

Parte (b). Hay que calcular la corriente de purga:

$$D = R + P \rightarrow P = D - R = 1,682 - 1,41[\text{mol}] = 0,272\text{mol}$$

Los moles que se purgan P. por mol de alimentación fresca F, son:

$$0,272 \text{ mol P}/2.67\text{mol F} = 0.102 \text{ mol P/mol F}$$

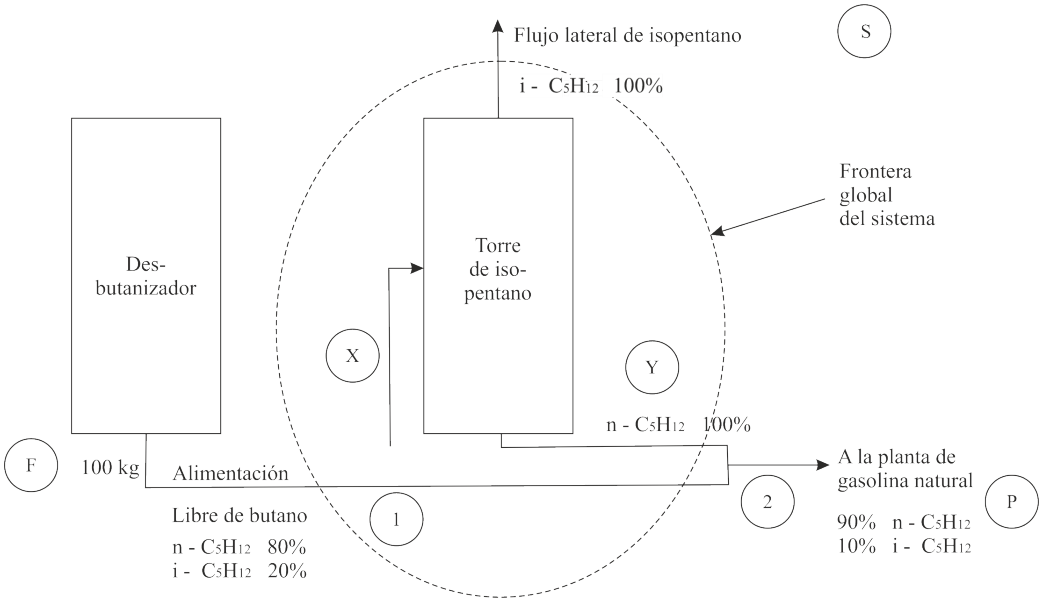
Problema 2

En el área de preparación de la alimentación a una planta que fabrica gasolina, se elimina isopentano de una gasolina libre de butano. Supongamos, para simplificar, que el proceso y los componentes son como se muestra en la figura. Qué fracción de la gasolina libre de butano se pasa por la torre de isopentano? El proceso está en estado estacionario y no ocurre reacción.

Solución

Si examina el diagrama de flujo verá que parte de la gasolina libre de butano pasa por alto la torre de isopentano y procede a la siguiente etapa en la planta de gasolina natural. Se conocen todas las composiciones (los flujos son líquidos). ¿Qué clases de balances podemos escribir para este proceso? Podemos escribir lo siguiente:

Base de Cálculo: 100 Kg. De alimentación



a) Balances Globales

Balance de materia total:

$$S + P = 100$$

Balance de n-pentano:

$$S\ (0) + P\ (0.90) = 100\ (0.80)$$

Consecuentemente,

$$P = 100\left(\frac{0.80}{0.90}\right) = 88.9\ kg$$
$$S = 100 - 88.9 = 11.1\ kg$$

Los balances globales no nos dirán qué fracción de la alimentación entra en la torre de isopentano; para este cálculo necesitamos otro balance.

b) Balance alrededor de la torre de isopentano: Sea x = kg de gasolina libre de butano que entra en la torre de isopentano y y = kg del flujo de n-C_5H_{12} que sale de la torre de isopentano.

Balance de materia total:

$$X = 11.1 + y$$

Balance de n-pentano:

$$x\ (0.980) = y$$

Por tanto, al combinar estas dos últimas ecuaciones:

X = 55.5 Kg. O sea que la fracción deseada es 0.55

Otra forma de enfocar este problema sería hacer un balance en los puntos de mezcla 1 y 2.

Aunque no hay equipos en esos puntos, podemos ver que entran y salen flujos de las uniones.

c) Balance alrededor del punto de mezcla 2:

Material que entra en la unión = material que sale

Material total:

$$(100 - x) + y = 88.9$$

Balance de isopentano:

$$(100 - x)\,(0.20) + 0 = 88.9\,(0.10)$$

En esta última ecuación se hace innecesario usar y. Si la resolvemos tenemos

x = 55.5 Kg como antes

Problema 3

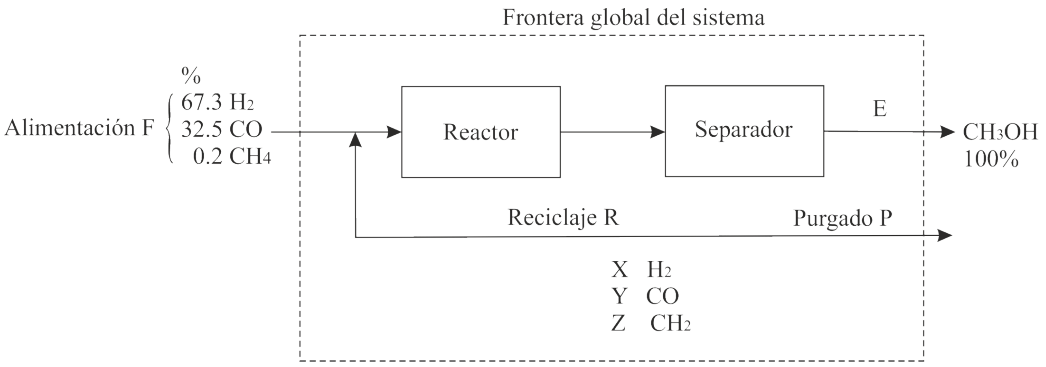
Se ha despertado un interés considerable en la conversión de carbón en productos líquidos más útiles para la subsecuente producción de compuestos químicos. Dos de los principales gases que podemos generar en condiciones apropiadas a partir de la combustión de carbón in situ en presencia de vapor de agua (como sucede en presencia de aguas freáticas) son H_2 y CO. Después de lavarlos, estos dos gases se pueden combinar para producir metanol de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$CO + 2H_2 \rightarrow CH_3OH$$

La figura ilustra un proceso en estado estacionario. Todas las composiciones están en fracciones o porcentajes molares. Los flujos están en moles.

El lector observará en la figura que una fracción del CH_4 ingresa en el proceso, pero no participa en la reacción. Se usa un flujo de purgado para mantener la concentración de CH_4 en la salida del separador en no más de 3.2 % mol. La conversión en una pasada del CO por el reactor es del 81 %.

Calcule los moles de reciclaje, CH_3OH y el purgado por mol de alimentación, y también calcule la composición del gas de purgado.



Solución

Pasos 1, 2, 3 y 4 Ya se colocó toda la información conocida en el diagrama. El proceso está en estado estacionario con reacción. Los flujos de purgado y reciclaje tienen la misma composición (lo implica el separador de la figura). La fracción molar de los componentes en el flujo de purgado se designó con X, Y y Z para H_2, CO y CH_4, respectivamente.

Pasó 5 Escogemos una base de cálculo conveniente:

Base de Cálculo: 100 moles de alimentación

Paso 6 Las variables cuyos valores desconocemos son X, Y, Z, E, P y R. Ignoraremos el flujo entre el reactor y el separador porque no se nos hacen preguntas al respecto.

Pasó 7 Como el problema se plantea en términos de moles, no nos conviene realizar un balance de masa global. En vez de ello, usaremos balances elementales. Podemos hacer tres balances elementales independientes para el proceso global, los de H, C y O. Tendremos un balance adicional realizando un balance molar de CO en el reactor más el separador. ¿Cómo podemos obtener un quinto y un sexto balance para que el sistema de ecuaciones quede determinado? Un dato del enunciado del problema que no hemos usado es la información acerca del límite superior de la concentración de CH_4 en el flujo de purgado. Este límite puede expresarse como $z \leq 0.032$. Supongamos que el flujo de purgado contiene el máximo de CH_4 permitido y escribamos:

$$Z = 0.032 \tag{4.4}$$

Otro dato es el balance implícito en el flujo de reciclaje

$$x + y + z = 1 \tag{4.5}$$

Pasos 8 Los balances globales de los elementos son (en moles):

Balance de H_2:

$$67.3 + 0.2(2) = E(2) + P(x + 2z) \tag{4.6}$$

Balance de Carbono:

$$32.5 + 0.2 = E(1) + P(y + z) \tag{4.7}$$

Balance de Oxigeno:

$$32.5 = E(1) + P(y)03 \tag{4.8}$$

Para un sistema compuesto por el reactor y el separador (el cual escogemos para no tener que calcular la información desconocida acerca de la salida directa del reactor), el balance de CO es:

Entra Sale Consumido

$$32.5 + Ry - y(R + P) = (32.5 + Ry)(0.81) \tag{4.9}$$

Paso 9 La ecuación 4.4 puede sustituirse en las ecuaciones 4.5 - 4.9 para después resolver las cinco ecuaciones resultantes por sustitución sucesiva o empleando un programa de computadora. Los valores resultantes son (en moles).

$$E = CH_3OH = 31.25$$

$$P = \text{purgado} = 6.25$$

$$R = \text{reciclaje} = 70.5$$

$$x = H_2 = 0.768$$

$$y = CO = 0.200$$

$$Z = CH_4 = 0.032$$

Paso 10 Compruebe que se satisfaga cada uno de los balances 4.5 - 4.9.

4.4. ANALISIS DE LOS GRADOS DE LIBERTAD EN SISTEMAS CON RECIRCULACIÓN

Para hacer el análisis de los grados de libertad, se hace como cualquier sistema simple, solo que se tendrá que analizar uno por uno cada proceso y cada interjección de corriente del proceso.

Problema 1

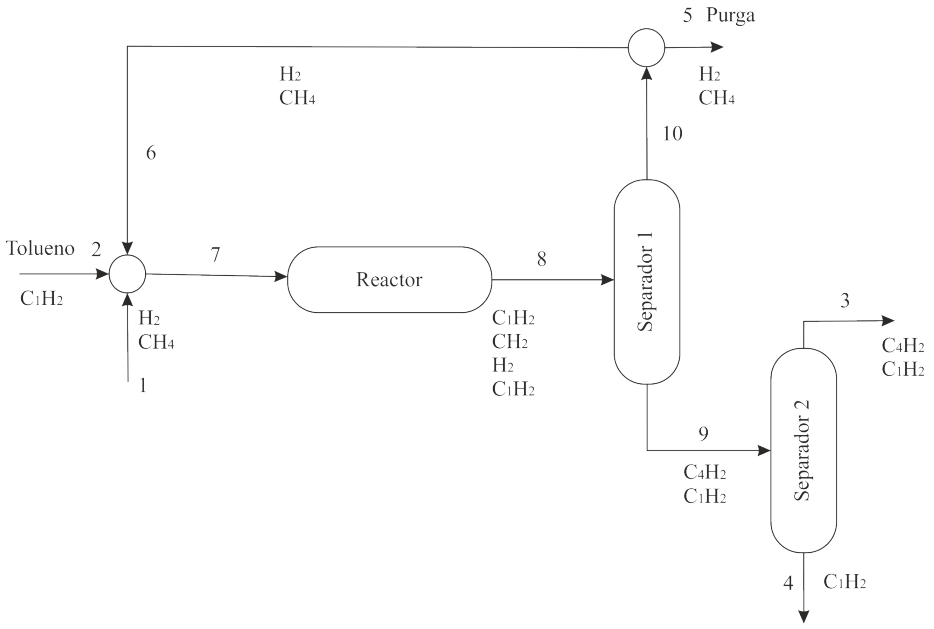
Se dispone de una planta de hidro desalquilación de tolueno (C_7H_8) a benceno (C_6H_6) como la indicada en la figura. Se quieren obtener 105,6 kmol/h de benceno con una pureza del 99,6 % m. En el reactor tiene lugar la siguiente reacción,

$$C_7H_8 + H_2 \rightarrow C_6H_6 + CH_4$$

Con una conversión del 75 %.

Determinar el balance de materia de la planta sabiendo que la corriente de alimentación del hidrogeno tiene de composición un 95 %m de hidrogeno y un 5 %m de metano CH_4.

Datos: Relación hidrogeno/tolueno a la entrada del reactor 5. La corriente de purga tiene un 60 %m de hidrogeno.



Solución

Primero se analizan los grados de libertad del problema, se pueden realizar tantos balances como unidades de proceso existan, en este caso hay 5 unidades (mezclador, reactor, separador1, divisor y separador2). Por tanto se pueden plantear balances a esas 5 unidades o bien a 4 de ellas y un balance global a la planta. A continuación se pone la tabla de grados de libertad para todas las unidades y para el proceso global (debe ser suma de las unidades).

	Mezclador	**Reactor**	**Separador1**	**Divisor**	**Separador2**	**Proceso**
Número de incógnitas	8	7+1	8	6	5	21+1
Número de Ecuaciones						
Balance Tolueno	1	1	1	-	1	4
Balance hidrógeno	1	1	1	1	-	4
Balance Benceno	-	1	1	-	1	3
Balance Metano	1	1	1	1	-	4
Especificaciones						
Composición aliment.	1	-	-	-	-	1
Composición purga	(1)	-	(1)	1	-	1
Relación H2/Tol	(1)	1	-	-	-	1
Flujo/Pureza Benceno	-	-	-	-	2	2
Conversión	-	1	-	-	-	1
Restricción divisor	-	-	-	1	-	1
Grados de Libertad	2	2	3	2	1	0

Los balances realizados son a especies moleculares, no a elementos, de ahí sumar una incógnita más por la reacción. Las restricciones del divisor corresponden a que las composiciones de las 3 corrientes participantes en el divisor deben ser iguales.

BALANCE GLOBAL

Tolueno: $N_{3,Tol} + N_{4,Tol} = N_{2,Tol} - \varepsilon$

Hidrógeno: $N_5, x_{5H_2} = N_{\Delta x_{1,H_2} - \varepsilon}$

Benceno: $N_{3,Bz} = \varepsilon$

Metano: $N_{5,Met} = N_1 \Delta x_{1,Met} + \varepsilon$

$$\varepsilon = \mathrm{N}_{3,Bz} = 105{,}6 \cdot 0{,}996 = 105{,}2 \text{ kmol/h}$$
$$\Rightarrow \mathrm{N}_{3,Tol} = 105{,}6 - 105{,}2 = 0{,}4 \text{ kmol/h}$$

Como la conversión de Tolueno es del 75 % en el reactor:

$$\mathrm{Conv} = \mathrm{N}_{3,Bz} / \mathrm{N}_{2,Tol}$$
$$\Rightarrow \mathrm{N}_{2,Tol} = 105{,}2 / 0{,}75 = 140{,}3 \text{ kmol/h}$$

Ahora de la primera ecuación de los balances planteados obtenemos el tolueno de la corriente 4.

$$N_{4,Tol} = 140,3 - 105,2 - 0,4 = 34,7 \text{ kmol/h}$$

De la ecuación 2 queda

$$0,6\ N_5 = 0,95\ N_1 - \varepsilon$$
$$\Rightarrow N_5 = 300,6 \text{ kmol/h}$$

Sumando las ecuaciones 2 y 4 de los balances queda $N_1 = N_5$

$$\Rightarrow N_1 = 300,6 \text{ kmol/h}$$

Con esta información obtenemos 2 nuevas especificaciones para el mezclador, los caudales de las corrientes 1 y 2 con lo cual sus grados de libertad son ahora 0 y se puede resolver:

BALANCE AL MEZCLADOR

Tolueno: $N_{2,Tol} = N_{7,Tol} \Rightarrow N_{7,Tol} = 140,3$ kmol/h

Hidrógeno: $N_{7,H_2} = N_{1,H_2} + N_{6,H_2}$

$$N_{7,H_2} = 300,6 \cdot 0,95 + N_6 \cdot 0,6$$

Metano: $N_{7,Met} = N_{1,Met} + N_{6,Met} = 300,6 \cdot 0,05 + N_6 \cdot 0,4$

Especificación: $N_{7,H_2} / N_{7,Tol} = 5$

$$\Rightarrow N_{7,H_2} = 5 \cdot 140,3 = 701,5 \text{ kmol/h}$$

Quedando de los balances El H_2 y el metano:

$$N_6 = 693,2 \text{ kmol/h y } N_{7,Met} = 292,3 \text{ kmol/h}$$

BALANCE AL REACTOR

$N_{8,Tol} = N_{7,Tol} - \varepsilon = 140,3 - 105,2 = 35,1$ kmol/h

$N_{8,H_2} = N_{7,H_2} - \varepsilon = 791,5 - 105,2 = 596,3$ kmol/h

$N_{8,Bz} = N_{7,Bz} + \varepsilon = 0 + 105,2 = 105,2$ kmol/h

$N_{8,Met} = N_{7,Met} + \varepsilon = 292,3 + 105,2 = 397,5$ kmol/h

BALANCE AL SEPARADOR1

$N_{9,Tol} = N_{8,Tol} = 35,1$ kmol/h

$N_{10,H_2} = N_{8,H_2} = 596,3$ kmol/h

$N_{9,Bz} = N_{8,Bz} = 105,2$ kmol/h

$N_{10,Met} = N_{8,Met} = 397,5$ kmol/h

El balance al separador2 no hace falta, es combinación lineal de los realizados.

4.5. BALANCE DE MASA EN SISTEMA DE VARIAS FASES

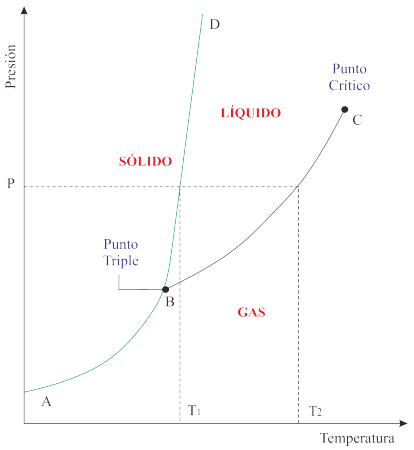
Las corrientes de los procesos en los que intervienen varios componentes pueden ser mezclas de sólidos, líquidos y gases. Las fases sólidas y líquidas pueden a su vez constar de más de una fase, que se define como una región de propiedades físicas uniformes.

En un sistema multicomponente de varias fases, la concentración de los componentes es diferente en cada una de las fases. Entre las operaciones y procesos de multifase tenemos:

1. **Destilación:** Una fase líquida homogénea, formada por dos o más líquidos, se calienta para generar un vapor que es más rico en el componente más volátil. La aplicación más importante, sin duda, de esta operación, es la destilación de crudos de petróleo para obtener gasolina y fuel-oil.
2. **Humidificación.** La mayor parte de las operaciones de humidificación corresponden a la evaporación de agua en torres de enfriamiento (con el fin de suministrar agua fría a los cambiadores de calor), o bien la eliminación o adición de agua al aire para controlar la humedad del mismo.
3. **Extracción.** En este caso hay transferencia de soluto desde una fase li quida a otra. La extracción se utiliza habitualmente para recuperar el producto de un medio de reacción.
4. **Cristalización.** La solubilidad de muchos sólidos en líquidos aumenta con la temperatura. Por consiguiente, se puede separar un sólido disuelto separando calor de la disolución con la consiguiente cristalización del sólido.
5. **Intercambio de ion y adsorción.** Estos procesos comprenden la recuperación de un soluto contenido en una solución, por transferencia del mismo hacia una fase sólida. La principal aplicación del intercambio de iones el acondicionamiento de agua.
6. **Lixiviación.** Se trata de una operación sólido-líquido que es equivalente a la extracción liquido-líquido. Un componente de una fase sólida se transfiere selectivamente hacia un líquido con el cual el sólido se pone en contacto. Una aplicación típica es la fabricación de café soluble.
7. **Absorción.** La absorción es una operación en la que un componente de una mezcla gaseosa se transfiere hacia una fase líquida. Constituye una importante etapa de la fabricación de muchos de los productos químicos más frecuentes. Los aparatos en los que se lleva a cabo la operación de absorción deben proporcionar un íntimo contacto entre las fases gaseosa y líquida. La absorción de gases se realiza con frecuencia en el mismo tipo de aparatos que se utilizan en destilación.

4.5.1. DIAGRAMA DE FASES

Los elementos químicos y las sustancias formadas por ellos, salvo algunas excepciones, pueden existir en tres estados diferentes: sólido, líquido y gaseoso en dependencia de las condiciones de presión y temperatura en las que se encuentren y esto se debe básicamente a las fuerzas intermoleculares. El diagrama que representa el tránsito entre estos estados, se conoce como diagrama de fases.



El dibujo de la izquierda representa el diagrama de fases de una sustancia.

En los ejes están representados los valores de presión y temperatura y las tres curvas AB, BD y BC, la frontera entre los diferentes estados. Si el punto de presión y temperatura en que

está la sustancia cae en alguna de las áreas señaladas como sólido, líquido o gas, ese será su estado para esas condiciones. Veamos: Si consideramos que la presión a que está la sustancia es P, entonces para temperaturas menores que T_1 será sólida, para temperaturas entre T_1 y T_2 será líquida y por encima de T_2 gaseosa. Si este punto coincide con alguna de las curvas, coexistirán en equilibrio ambos estados, así si está sobre AB la sustancias será parcialmente sólida y parcialmente gaseosa, si está sobre BD será parcialmente líquida y parcialmente sólida y sobre BC lo mismo entre los estados líquido y gaseoso.

En el diagrama están señalados además dos puntos particularmente importantes:

Punto triple

En este punto en la sustancia coexisten en equilibrio los tres estados, está parcialmente sólida, parcialmente líquida y parcialmente gaseosa. Obsérvese que para valores de presión o temperatura más bajas que el punto triple la sustancia en cuestión no puede existir en estado líquido y solo puede pasar desde sólido a gaseoso en un proceso conocido como sublimación.

Punto crítico

El punto C indica el valor máximo de temperatura en el que pueden coexistir en equilibrio dos fases, y se denomina **punto crítico**. Representa la temperatura máxima a la cual se puede licuar el gas simplemente aumentando la presión. Gases a temperaturas por encima de la temperatura del punto crítico no pueden ser licuados por mucho que se aumente la presión. En otras palabras, por encima del punto crítico, la sustancia solo puede existir como gas.

Punto de ebullición

El punto de ebullición de una sustancia, es aquel valor de temperatura para el cual coexisten en equilibrio, los estados líquido y gaseoso a determinada presión. Los diferentes puntos de ebullición para las diferentes presiones corresponderían a la curva BC.

Punto de fusión

El punto de fusión de una sustancia, es aquel valor de temperatura para el cual coexisten en equilibrio, los estados líquido y sólido a determinada presión. Los diferentes puntos de fusión para las diferentes presiones corresponderían a la curva BD.

4.5.2. REGLA DE FASES

La “Regla de las Fases”, la cual permite calcular el número de fases que pueden coexistir en equilibrio en cualquier sistema, y su expresión matemática está dada por:

$$P + F = C + 2$$

Dónde:

C = número de componentes del sistema

P = número de fases presentes en el equilibrio

F = número de grados de libertad del sistema (variables: presión, temperatura, composición)

En 1875 J. Willaid Gibbs relacionó tres variables: fases(P), componentes(C), y grados de libertas o varianza (F) para sistemas multicomponentes en equilibrio. El número de grados de libertad se determina por la regla de las fases, si y solo si el equilibrio entre las fases no está influenciado por la gravedad, fuerzas eléctricas o magnéticas y solo se afecta por la temperatura, presión y concentración. El número dos en la regla corresponde a las variables de temperatura T y presión P.

Componente (de un sistema): es los menores números de constituyentes químicos independientemente variables necesarios y suficientes para expresar la composición de cada fase presente en cualquier estado de equilibrio.

Fase: es cualquier fracción, incluyendo la totalidad, de un sistema que es físicamente homogéneo en si mismo y unido por una superficie que es mecánicamente separable de cualquier otra fracción. Una fracción separable puede no formar un cuerpo continuo, como por ejemplo un líquido dispersado en otro.

- Un sistema compuesto por una fase es homogéneo.
- Un sistema compuesto por varias fases es heterogéneo.

Para los efectos de la regla de las fases, cada fase se considera homogénea en los equilibrios heterogéneos.

Grado de libertad (o varianza): es el número de variables intensivas que pueden ser alteradas independientemente y arbitrariamente sin provocar la desaparición o formación de una nueva fase. Variables intensivas son aquellas independientes de la masa: presión, temperatura y composición. También se define con el número de factores variables.

F = 0 indica invariante

F = 1 univariante

F = 2 bivariante

La regla de las fases se aplica sólo a estados de equilibrios de un sistema y requiere:

1. Equilibrio homogéneo en cada fase
2. Equilibrio heterogéneo entre las fases coexistentes

La regla de las fases no depende de la naturaleza y cantidad de componentes o fases presentes, sino que depende sólo del número. Además no da información con respecto a la velocidad de reacción.

El número de componentes más dos (C+2), representa el número máximo de fases que pueden coexistir al equilibrio, donde los grados de libertad (F) no pueden ser inferiores a cero (a condiciones invariantes).

Ejemplo: (1 componente)

- Para el punto de triple coexistencia a (C en diagrama):

$$3 + F = 1 + 2$$

$$F = 0 \text{ (cero grados de libertad)}$$

  Como ninguna de las variables (presión, temperatura o composición) se pueden cambiar manteniendo las tres fases de coexistencia, el punto triple es un punto invariante.

- Un punto de la curva de congelación sólido-líquido (BD):

$$2 + F = 1 + 2 \; F = 1 \text{ (un grado de libertad)}$$

  Una variable (T o P) se puede cambiar manteniendo aún un sistema con dos fases que coexisten.

Si se especifica una presión determinada, sólo hay una temperatura en la que las fases sólida y líquida coexisten.

- Un punto dentro de la zona de fase única (En la zona Liquida):

$$1 + F = 1 + 2$$

$$F= 2 \text{ (dos grados de libertad)}$$

Dos variables (T o P) se pueden cambiar independientemente y el sistema permanece con una única fase.

4.5.3. PROPIEDADES FÍSICAS QUE SE BASAN LAS SEPARACIONES DE EQUILIBRIO ENTRE FASES

En una mezcla de varias fases las propiedades físicas de los componentes individuales, así como sus interacciones mutuas, son las que determinan las concentraciones en cada una de las fases. En general, estas propiedades físicas no se pueden predecir a partir de ninguna teoría molecular, sino que se determinan experimentalmente y se presentan en forma tabular o gráfica. A continuación se consideran algunas de las propiedades más importantes.

Presión de vapor

La presión de vapor de un componente, P_v es una medida de su volatilidad a una determinada temperatura. Excepto para presiones muy extremas, puede considerarse independiente de la presión.

La presión de vapor es una propiedad que generalmente permite establecer si dos sustancias se pueden separar o no por destilación. Si se calienta una mezcla liquida de dos componentes, la sustancia de menor punto de ebullición (de mayor volatilidad, y, por tanto, con un mayor valor de P_v) tenderá a hervir antes; de esta forma, el vapor en equilibrio con el líquido en ebullición tendrá una concentración del componente más volátil mayor que el líquido. La presión de vapor es también la propiedad física clave en humidificación, secado, evaporación y procesos de acondicionamiento de aire.

Solubilidad

Si bien las sustancias ideales, tales como gases o hidrocarburos homólogos, son totalmente miscibles entre sí en un amplio intervalo de temperatura, presión y concentración, lo más frecuente es que una sustancia solo se disuelva en otra en cantidad limitada sin que se forme una nueva fase. Por consiguiente, si se forma una mezcla con sustancias químicas diferentes que no coexisten en la misma fase, existe siempre una solubilidad límite de equilibrio. Esta solubilidad es generalmente una función complicada de la temperatura, así como de otros parámetros, y resulta muy conveniente representarla gráficamente.

Miscibilidad

Cuando se mezclan líquidos de distinta estructura química, sólo son, en general, parcialmente miscibles. Desafortunadamente no se conocen bien las propiedades físicas y químicas de los componentes individuales a partir de las cuales fuese posible predecir exactamente la región de inmiscibilidad.

Fenómenos de adsorción

Si se amplía la definición de adsorción para abarcar todos los fenómenos en los que una o más mono capas de una sustancia se adhieren en alguna forma a la superficie de otra, es preciso tener en cuenta una amplia gama de propiedades físicas, tales como tensiones superficiales, interacciones entre dipolos y fuerzas de dispersión. No se dispone de métodos adecuados para predecir la distribución de sustancias entre la fase adsorbida y la fase de soluto.

4.6. FASE LÍQUIDO - VAPOR

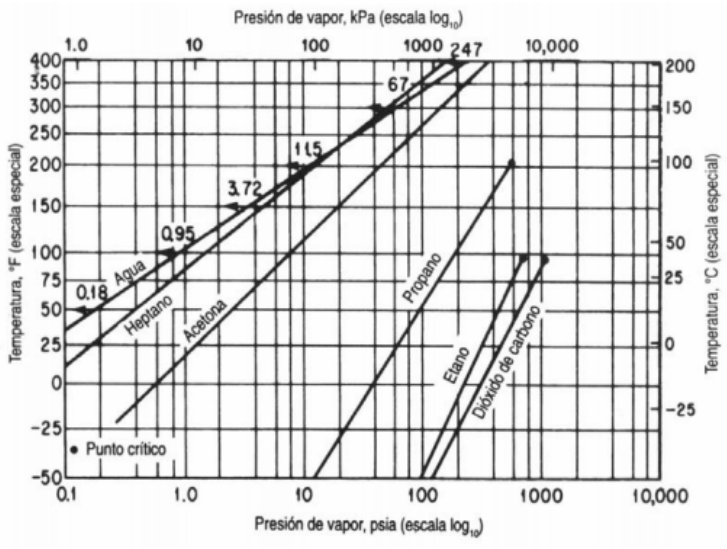
La separación de estas fases se hace en fusión de la presión de vapor, los componentes más volátiles se desprenderán primero y los menos volátiles quedaran en solución.

4.6.1. GRÁFICA DE COX

Una forma de relacionar la presión de vapor con la temperatura es mediante una técnica gráfica. La curva que se ilustra en la figura para P_v contra T se puede enderezar por medio de una graficación especial conocida como diagrama de Cox u Othmer que se prepara como sigue:

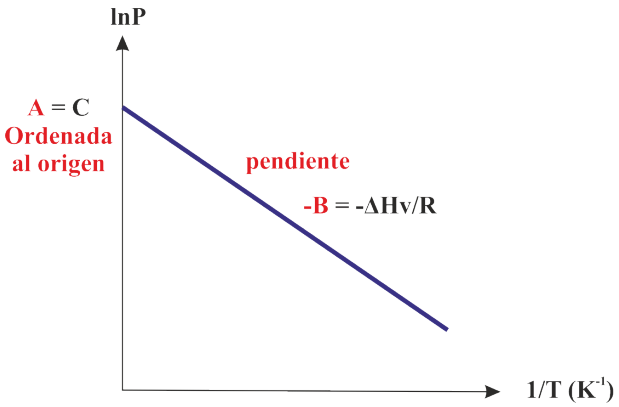
- Marque en la escala horizontal valores de log p_v para abarcar el intervalo de p_v deseado.
- A continuación, trace una línea recta sobre la gráfica con un ángulo apropiado, digamos 45°, que cubra el intervalo de p_v.
- A fin de calibrar el eje vertical en enteros comunes como 25, 50, 100, 200 grados, etc., usamos una sustancia de referencia, a saber, agua. Para el primer entero, digamos 100°F, buscamos en las tablas de vapor la presión de vapor del agua, o la calculamos a partir de la ecuación de Antoine, obteniendo 0.9487 psia. Ubicamos este valor en el eje horizontal y procedemos verticalmente hasta llegar a la línea recta. Luego procedemos horizontalmente hasta toparnos con el eje vertical y marcamos ese punto de la escala como 100°F.
- Escogemos la siguiente temperatura, digamos 200°F.
- Repetimos los pasos 3 y 4 hasta haber establecido la escala vertical dentro del intervalo de temperaturas deseado.

La utilidad del diagrama de Cox radica en que las presiones de vapor de otras sustancias graficadas en este conjunto de coordenadas preparadas especialmente producen líneas rectas dentro de intervalos de temperatura amplios, lo que facilita la extrapolación y la interpolación de datos de presión de vapor. Se ha observado que las líneas así construidas para compuestos similares, como los hidrocarburos, convergen en un punto común. Como en el diagrama de Cox se obtienen líneas rectas, basta con dos conjuntos de datos de presión de vapor para obtener la información completa sobre la presión de vapor de una sustancia dentro de un intervalo de temperatura bastante amplio.



4.6.2. ECUACIÓN DE CLAUSIUS - CLAPEYRON

La relación de Clausius-Clapeyron es una manera de caracterizar la transición de fase entre dos estados de la materia, como el líquido y el sólido, liquido - gas y solido - gas. En un diagrama P-T (presión-temperatura), la línea que separa ambos estados se conoce como curva de coexistencia. La relación de Clausius-Clapeyron da la pendiente de dicha curva. Matemáticamente se puede expresar como:



$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H}{T\Delta V}$$

$$ln\frac{P_2}{P_1} = -\frac{\Delta H}{R}\left[\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right]$$

Donde dP/dT es la pendiente de dicha curva, ΔH es el calor latente o entalpía del cambio de fase y ΔV es el volumen. Esta última ecuación también la podemos expresar así:

$$\text{lnP} = -\frac{\Delta H}{R}\left[\frac{1}{T}\right] + C$$

Comparándola con una ecuación de la recta y =- B x + A podríamos obtener la gráfica siguiente:

$$y = \ln P$$

$$-B = \frac{\Delta H}{R}$$

$$x = 1/T$$

4.6.3. ECUACIÓN DE ANTOINE

La ecuación de Antoine describe la relación entre la temperatura y la presión de saturación del vapor de sustancias puras. Se deduce de la relación de ClausiusClapeyron.

$$log_{10}P = A - \frac{B}{C+T}$$

Siendo:

P, presión, generalmente en mm de Hg;

T, temperatura, generalmente en ^{o}C;

A, B y C parámetros empíricos, específico para cada sustancia.

Problema

Se tiene un sistema a 25 ^{o}C formado por benceno y tolueno, estas mezclas se van a destilar, para ello primero se le agrega energía hasta que alcanza la temperatura requerida, la presión en la torre de destilación es de 490 mm Hg.

a) Realizar los cálculos necesarios para comprobar cuál de los dos líquidos es más volátil.

b) Punto de ebullición del menos volátil.

Constantes en la ecuación de Antoine			
Sustancia	**A**	**B**	**C**
Benceno	6.9056	1211.033	220.79
Tolueno	6.95334	1343.143	219.377

Donde la presión esta en mm Hg y la temperatura en ^{o}C.

$$log_{10}P = A - \frac{B}{C+T}$$

a) Para el benceno.

$$\text{T = - } \frac{B}{log_{10}P - A} - C = -\frac{1211.033}{log490 - 6.9056} \text{ - 220.79 = 66.49 }^{o}\text{C}$$

Para el tolueno.

$$\text{T = - } \frac{B}{log_{10}P - A} - C = -\frac{1343.943}{log490 - 6.95334} \text{ - 219.377 = 95.86 }^{o}\text{C}$$

b) Para el tolueno.

$$\text{T = - } \frac{B}{log_{10}P - A} - C = -\frac{1343.943}{log760 - 6.95334} \text{ - 219.377 = 110.62 }^{o}\text{C}$$

Nota: el inciso b) se realiza con una presión de 760 mm Hg ya que se mide en condiciones normales de presión.

4.7. HUMIDIFICACION Y SECADO

La humedad es un término utilizado para describir la presencia de vapor de agua en el aire, ya sea a la intemperie, o dentro de un espacio. Nuevamente, hacemos énfasis en que la humedad está “en el aire”, solamente en el sentido de que los dos, aire y vapor de agua, existen juntos en un espacio dado al mismo tiempo.

4.7.1. SATURACIÓN TOTAL O MOLAR

La capacidad del aire de retener vapor de agua aumenta con la temperatura. El aire más caliente puede contener más agua. La curva de saturación muestra la cantidad de agua que puede contener el aire a una cierta temperatura, antes de que comience la condensación.

Cuando cualquier gas puro (o mezcla gaseosa) entra en contacto con un líquido, adquiere moléculas del líquido. Si el contacto se mantiene durante un tiempo largo, la vaporización continúa hasta que se alcanza el equilibrio, y entonces lapresión parcial del vapor en el gas igualará la presión de vapor del líquido a la temperatura del sistema. Sea cual sea la duración del contacto entre el líquido y el gas, una vez que se alcanza el equilibrio no habrá más vaporización neta del líquido a la fase gaseosa. Se dice entonces que el gas está saturado con el vapor a la temperatura dada. También decimos que la mezcla de gases está en su punto de rocío. El punto de rocío para la mezcla de vapor puro y gas no condensable es la temperatura en la que el vapor apenas comienza a condensarse si se enfría a presión constante.

4.7.2. SATURACIÓN PARCIAL O RELATIVA

En muchos casos el tiempo de contacto requerido en un proceso para alcanzar el equilibrio (o la saturación) entre el gas y el líquido es demasiado largo, y el gas no queda saturado por completo con el vapor. Entonces, el vapor no está en equilibrio con una fase líquida y la presión parcial del vapor es menor que la presión de vapor del líquido a la temperatura dada. Esta condición se denomina saturación parcial. Lo que tenemos no es más que una mezcla de dos o más gases que obedecen las leyes de los gases. Lo que distingue este caso de los ejemplos anteriores de mezclas gaseosas es el hecho de que en las condiciones apropiadas es posible condensar una parte de los componentes gaseosos.

$$\text{Saturación relativa} = \frac{P_v}{P_{sat}}$$

4.7.3. HUMEDAD ABSOLUTA

El término "humedad bsoluta" (ha), se refiere a la masa del vapor de agua por unidad de volumen. Esta unidad de volumen, generalmente es un espacio de un metro cúbico (o un pie cúbico). En este espacio, normalmente hay aire también, aunque no necesariamente. La humedad relativa está basada en la humedad absoluta, bajo las condiciones establecidas; es decir, la humedad relativa es una comparación con la humedad absoluta a la misma temperatura, si el vapor de agua está saturado.

Tanto la humedad absoluta, como la relativa, están basadas en la masa del vapor de agua en un volumen dado.

4.7.4. HUMEDAD RELATIVA

La humedad relativa (hr), es un término utilizado para expresar la cantidad de humedad en una muestra dada de aire, en comparación con la cantidad de humedad que el aire tendría, estando totalmente saturado y a la misma temperatura de la muestra. La humedad relativa se expresa en porciento, tal como 50 %, 75 %, 30 %, etc.

4.7.5. PORCENTAJE DE SATURACIÓN

El porcentaje de saturación (o porcentaje de humedad), es un término que algunas veces se confunde con la humedad relativa. El porcentaje de saturación, es 100 veces la relación del peso de vapor de agua con el peso del vapor de agua necesario para saturar un kilogramo de aire seco a la temperatura del bulbo seco. Esto se puede expresar en una ecuación:

$$\% \text{ de Saturación} = \frac{w_1}{w_S}$$

Dónde:

w_1 = humedad específica en el punto de rocío de la mezcla de aire seco y vapor de agua.

w_s = humedad específica en el punto de saturación.

Si deseamos calcular la humedad relativa y el porcentaje de saturación a la temperatura de bulbo seco de 35 ^{o}C, y a la temperatura de punto de rocío de 15°C, usamos los valores de presión de vapor y los de humedad específica de las tablas 4.1 y 4.2, respectivamente.

$$h_r = 1.70 / 5.62 \text{ x } 100 = 30.25\ \%$$

$$\% \text{ saturación} = (4.835 / 16.611) \text{ x } 100 = 29.10\ \%$$

Nuevamente, hay una diferencia entre los dos resultados. La humedad relativa está basada en las presiones, las cuales son afectadas por la temperatura y el volumen. El porcentaje de saturación está basado en el peso, el cual no es afectado por los cambios de temperatura, y éste es el más preciso de los dos.

4.7.6. CARTA PSICROMÉTRICA

Una carta psicrométrica, es una gráfica de las propiedades del aire, tales como temperatura, h_r , volumen, presión, etc. Las cartas psicrométricas se utilizan para determinar, cómo varían estas propiedades al cambiar la humedad en el aire.

Las propiedades psicrométricas del aire que se describen en las ilustraciones de las tablas 4.2, han sido recopiladas a través de incontables experimentos de laboratorio y de cálculos matemáticos, y son la base para lo que conocemos como la Carta Psicrométrica.

Aunque las tablas psicrométricas son más precisas, el uso de la carta psicrométrica puede ahorrarnos mucho tiempo y cálculos, en la mayoría de los casos donde no se requiere una extremada precisión.

Existen muchos tipos de cartas psicrométricas, cada una con sus propias ventajas. Algunas se hacen para el rango de bajas temperaturas, algunas para el rango de media temperatura y otras para el rango de alta temperatura.

A algunas de las cartas psicrométricas se les amplía su longitud y se recorta su altura; mientras que otras son más altas que anchas y otras tienen forma de triángulo. Todas tienen básicamente la misma función; y la carta a usar, deberá seleccionarse para el rango de temperaturas y el tipo de aplicación.

En este texto, utilizaremos una carta psicrométrica basada en la presión atmosférica normal, también llamada presión barométrica, de 101.3 kPa ó 760 mm Hg. Esta carta cubre un rango de temperaturas de bulbo seco (bs) de -10ºC hasta 55ºC, y un rango de temperaturas de bulbo húmedo (bh) desde -10ºC hasta 35ºC.

Tabla 4.1: Propiedades del vapor de agua saturado.

Temp. de Saturación ºC	**Presión de Vapor (Absoluta)**		**Volumen Específico m^3/kg**	**Peso del Vapor**			**Entalpía kcal/kg**		
				Densidad kg/m^3	**Humedad Absoluta**				
	kPa	**psia**			**g/m^3**	**granos /pie^3**	**Sensible**	**Latente**	**Total**
0	0.61	0.0885	206.32	0.004847	4.84	2.11	0	597.66	597.66
1	0.65	0.0945	194.1	0.005152	5.15	2.25	1	596.87	597.87
2	0.7	0.1023	179.58	0.005569	5.57	2.43	2	596.28	598.28
3	0.76	0.1098	168.18	0.005946	5.95	2.6	3	595.68	298.68
4	0.81	0.1179	157.4	0.006353	6.35	2.77	4	595.09	599.09
5	0.87	0.1265	147.14	0.006796	6.79	2.97	5	594.53	599.53
6	0.93	0.1356	137.74	0.00726	7.26	3.18	6	593.93	599.93
7	1	0.1452	129.04	0.00775	7.75	3.38	7	593.37	600.37
8	1.07	0.1556	120.95	0.008268	8.27	3.61	8	592.79	600.79
9	1.15	0.1664	113.39	0.008819	8.82	3.85	9	592.25	601.25
10	1.23	0.178	106.37	0.009401	9.4	4.1	10	292.03	602.03

11	1.31	0.1903	99.9	0.01001	10.01	4.37	11	591.1	602.1
12	1.4	0.2033	93.82	0.01066	10.66	4.66	12	590.56	602.56
13	1.5	0.2187	88.13	0.01135	11.35	4.96	13	589.98	602.98
14	1.6	0.2317	82.85	0.01207	12.07	5.27	14	589.41	603.41
15	1.7	0.2472	77.97	0.01283	12.83	5.6	15	588.87	603.87
16	1.82	0.2636	73.35	0.01363	13.63	5.96	16	588.31	604.31
17	1.94	0.2809	69.09	0.01447	14.47	6.32	17	587.72	604.72
18	2.06	0.2992	65.07	0.01537	15.37	6.72	18	587.18	605.18
19	2.2	0.3186	61.32	0.01631	16.31	7.13	19	586.59	605.59
20	2.33	0.339	57.81	0.0173	17.3	7.56	20	586.03	606.03
21	2.48	0.3606	54.54	0.01834	18.34	8.01	21	585.48	606.48
22	2.64	0.3834	51.48	0.01943	19.43	8.48	22	584.89	606.89
23	2.83	0.4102	48.6	0.02058	20.58	8.99	23	584.34	607.34
24	2.98	0.4327	45.91	0.02178	21.78	9.52	24	583.76	607.76
25	3.16	0.4593	43.38	0.02305	23.05	10.07	25	583.2	608.2
26	3.36	0.4875	41.02	0.02438	24.38	10.65	26	582.65	608.65
27	3.56	0.5171	38.8	0.02577	25.77	11.26	27	582.09	609.09
28	3.78	0.5482	36.72	0.02723	27.23	11.9	28	581.45	609.45
29	4	0.581	34.76	0.02876	28.76	12.57	29	580.93	609.93
30	4.24	0.6154	32.91	0.03038	30.38	13.27	30	580.43	610.43
31	4.49	0.6517	31.18	0.03207	32.07	14.01	31	579.87	610.87
32	4.75	0.6897	29.56	0.03383	33.83	14.78	32	579.28	611.28
33	5.03	0.7297	28.03	0.03568	35.68	15.59	33	578.74	611.74
34	5.32	0.7717	26.59	0.03761	37.61	16.43	34	578.15	612.15
35	5.62	0.8157	25.23	0.03964	39.64	17.32	35	577.59	612.59
36	5.94	0.8619	23.96	0.04174	41.74	18.24	36	576.99	612.99
37	6.27	0.9104	22.88	0.0437	43.7	19.09	37	576.45	613.45
38	6.63	0.9612	21.62	0.04625	46.25	20.21	38	575.87	613.87
39	6.99	1.0144	20.55	0.04866	48.66	21.26	39	575.3	614.3
40	7.38	1.07	19.54	0.05118	51.18	22.36	40	574.7	614.7
41	7.78	1.1285	18.58	0.05382	53.82	23.52	41	574.16	615.16
42	8.08	1.1723	17.69	0.05653	56.53	24.7	42	573.59	615.59
43	8.64	1.2536	16.83	0.05942	59.42	25.97	43	573.08	616.08
44	9.1	1.3204	16.03	0.06238	62.38	27.26	44	572.42	616.42
45	9.58	1.3903	15.27	0.06549	65.49	28.62	45	571.87	616.87
46	10.09	1.4634	14.55	0.06873	68.73	30.03	46	571.27	617.27
47	10.62	1.5398	13.88	0.07205	72.05	31.48	47	570.72	617.72

48	11.17	1.6196	13.02	0.0768	76.8	33.56	48	570.13	618.13
49	11.75	1.7024	12.42	0.08052	80.52	35.18	49	569.59	618.59

Tabla 4.2: Propiedades de mezclas de aire seco y vapor de agua saturado, a la presión atmosférica (101.3 kPa).

TEMP. ºC	**Volumen Específico m^3/kg**	**Densidad kg/m^3**	**Contenido de Humedad**		**Entalpía (cont. de calor) kcal/kg**		
			g/kg	**granos/lb**	**aire seco (sensible)**	**humedad (latente)**	**Total**
-10	0.7472	1.3383	0.725	11.19	1.8778	0.9613	2.8391
-9	0.7501	1.3332	0.793	12.24	2.1179	1.0512	3.1691
-8	0.7515	1.3307	0.841	12.98	2.358	1.1467	3.5047
-7	0.7561	1.3226	0.945	14.58	2.598	1.2522	3.8502
-6	0.7595	1.3167	1.026	15.83	2.8391	1.3623	4.2014
-5	0.7628	1.311	1.124	17.35	3.0835	1.4835	4.567
-4	0.7656	1.3062	1.224	18.89	3.3235	1.6124	4.9359
-3	0.769	1.3004	1.333	20.57	3.5636	1.7556	5.3192
-2	0.772	1.2953	1.45	22.38	3.8035	1.9102	5.7137
-1	0.7751	1.2902	1.577	24.34	4.0447	2.0757	6.1204
0	0.7785	1.2845	1.716	26.48	4.2892	2.2557	6.5449
1	0.7812	1.2801	1.845	28.47	4.5292	2.4246	6.9538
2	0.7846	1.2745	1.983	30.6	4.7692	2.4879	7.2571
3	0.788	1.269	2.13	32.87	5.0148	2.789	7.8038
4	0.7913	1.2637	2.287	35.29	5.2548	2.9957	8.2505
5	0.7947	1.2583	2.454	37.87	5.4948	3.2113	8.7061
6	0.7981	1.253	2.632	40.62	5.7404	3.4402	9.1806
7	0.8014	1.2478	2.823	43.56	5.9804	3.6832	9.6639
8	0.8048	1.2425	3.024	46.67	6.2204	3.9436	10.164
9	0.8082	1.2373	3.239	49.98	6.4615	4.2203	10.6818
10	0.8116	1.2321	3.467	53.5	6.706	4.5114	11.2174
11	0.8154	1.2264	3.708	57.22	6.946	5.1414	12.0874
12	0.8189	1.2212	3.967	61.22	7.186	5.1581	12.3441
13	0.825	1.2121	4.237	65.38	7.3983	5.5359	12.9342
14	0.8263	1.2102	4.529	69.89	7.6716	5.8715	13.5431
15	0.8303	1.2044	4.835	74.61	7.9116	6.2671	14.1787
16	0.8336	1.1996	5.161	79.64	8.1183	6.7204	14.8387
17	0.8376	1.1939	5.408	83.45	8.3972	7.126	15.5232

18	0.8416	1.1882	5.873	90.63	8.6372	7.5961	16.2333
19	0.8458	1.1823	6.26	96.6	8.8772	8.0917	16.9689
20	0.8496	1.177	6.672	102.96	9.1228	8.6117	17.7345
21	0.8541	1.1708	7.109	109.71	9.3628	9.1662	18.529
22	0.8583	1.1651	7.438	114.78	9.6028	9.7507	19.3535
23	0.8625	1.1594	8.055	124.3	9.8484	10.3651	20.2135
24	0.867	1.1534	8.573	132.3	10.0706	11.0385	21.1091
25	0.8715	1.1474	9.117	140.69	10.3284	11.7119	22.0403
26	0.8765	1.1409	9.696	149.63	10.574	12.4453	23.0193
27	0.8811	1.1349	10.306	159.04	10.764	13.2698	24.0338
28	0.8858	1.1289	10.949	168.96	11.054	14.032	25.086
29	0.8908	1.1226	11.632	179.5	11.2996	14.8887	26.1883
30	0.8958	1.1163	12.351	190.6	11.5396	15.7955	27.3351
31	0.9014	1.1094	13.114	202.38	11.7796	16.7589	28.5385
32	0.9071	1.1024	13.919	214.8	12.0252	17.7657	29.7919
33	0.9127	1.0957	14.768	227.9	12.2652	18.8346	31.0998
34	0.9183	1.089	15.662	241.7	12.5052	19.9591	32.4643
35	0.9239	1.0824	16.611	256.34	12.7564	21.1402	33.8966
36	0.9302	1.075	17.613	271.8	12.9908	22.3981	35.3889
37	0.9364	1.0679	18.669	288.1	13.2308	23.7216	36.9524
38	0.9429	1.0606	19.783	305.29	13.4764	25.1165	38.5925
39	0.9496	1.0531	20.961	323.47	13.7164	26.5828	40.2992
40	0.957	1.0449	22.204	342.65	13.962	28.1351	42.0971
41	0.9643	1.037	23.524	363.02	14.202	29.773	43.975
42	0.9715	1.0293	24.912	384.44	14.402	31.5032	45.9452
43	0.9802	1.0202	26.381	407.11	14.682	33.3311	48.0131
44	0.9872	1.013	27.846	429.72	14.9276	35.2467	50.1743
45	0.9957	1.0043	29.575	456.4	15.1676	37.2802	52.4478
46	1.004	0.996	31.289	482.85	15.4132	39.387	54.8002
47	1.0131	0.9871	33.122	511.14	15.6532	41.6927	57.3459
48	1.0227	0.9778	35.063	541.09	15.8955	44.0783	59.9738
49	1.0323	0.9687	36.901	569.46	16.14	46.584	62.724

En la figura 4.4, se muestra una carta psicrométrica básica. Está hecha con datos basados a la presión atmosférica normal de 101.325 kPa, y las unidades son las del Sistema Internacional, S.I. Las temperaturas están en grados centígrados; el volumen en m^3/kg; la humedad relativa en porcentajes; el contenido de humedad en g/kg aire seco; la entalpía y la entropía están en kilo Joules (kJ) por kg de aire seco. Un kJ/kg = 0.239 kcal/kg = 0.430 btu/lb.

En una carta psicrométrica se encuentran todas las propiedades del aire, de las cuales las de mayor importancia son las siguientes:

1. Temperatura de bulbo seco (bs).
2. Temperatura de bulbo húmedo (bh).
3. Temperatura de punto de rocío (pr)
4. Humedad relativa (hr).
5. Humedad absoluta (ha).
6. Entalpía (h).
7. Volumen específico.

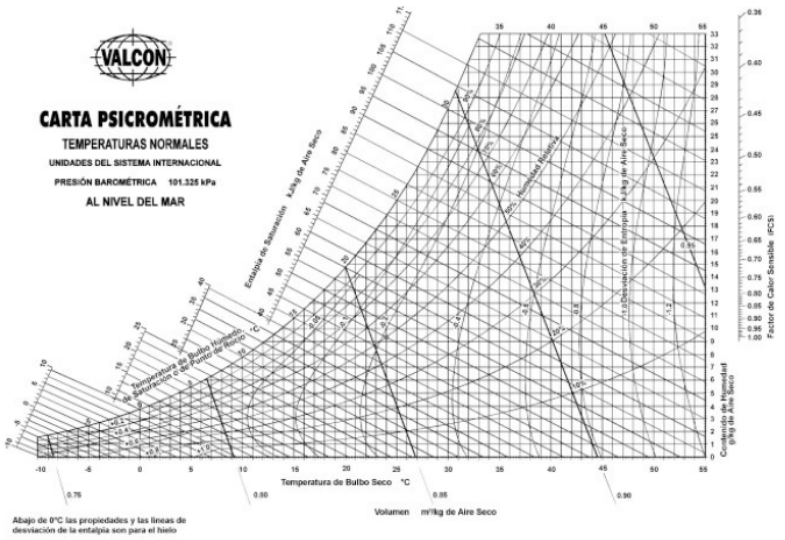
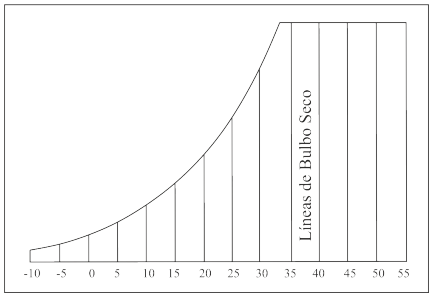


Figura 4.4: Carta Psicrometrica

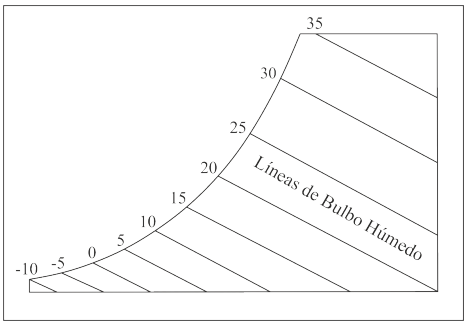
Conociendo dos de cualquiera de estas propiedades del aire, las otras pueden determinarse a partir de la carta.

1. Temperatura de Bulbo Seco.- En primer término, tenemos la temperatura de bulbo seco. Como ya sabemos, es la temperatura medida con un termómetro ordinario. Esta escala es la horizontal (abcisa), en la parte baja de la carta, según se muestra en la figura. Las líneas que se extienden verticalmente, desde la parte baja hasta la parte alta de la carta, se llaman líneas de temperatura de bulbo seco constantes, o simplemente «líneas de bulbo seco».



Son constantes porque cualquier punto a lo largo de una de estas líneas, corresponde a la misma temperatura de bulbo seco indicada en la escala de la parte baja. Por ejemplo, en la línea de 40º C, cualquier punto a lo largo de la misma, corresponde a la temperatura de bulbo seco de 40ºC.

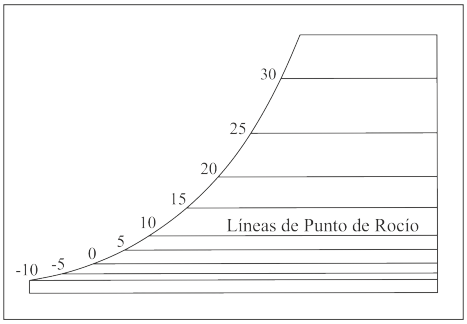
2. Temperatura de Bulbo Húmedo.- Es la segunda propiedad del aire de nuestra carta psicrométrica. Corresponde a la temperatura medida con un termómetro de bulbo húmedo. Como ya se explicó en la sección anterior, es la temperatura que resulta cuando se evapora el agua de la mecha, que cubre el bulbo de un termómetro ordinario.



La escala de temperaturas de bulbo húmedo, es la que se encuentra del lado superior izquierdo, en la parte curva de la carta psicrométrica, como se muestra en la figura. Las líneas de temperatura de bulbo húmedo constantes o líneas de bulbo húmedo, corren diagonalmente de izquierda a derecha y de arriba hacia

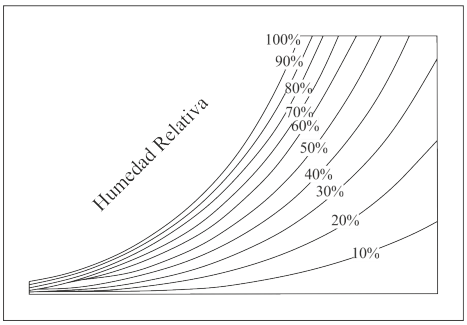
abajo, en un ángulo de aproximadamente 30º de la horizontal. También se les dice constantes, porque todos los puntos a lo largo de una de estas líneas, están a la misma temperatura de bulbo húmedo.

3. Temperatura de Punto de Rocío.- Es otra propiedad de aire incluida en una carta psicrométrica. Esta es la temperatura a la cual se condensará la humedad sobre una superficie. La escala para las temperaturas de punto de rocío es idéntica que la escala para las temperaturas de bulbo húmedo; es decir, es la misma escala para ambas propiedades. Sin embargo, las líneas de la temperatura de punto de rocío, corren horizontalmente de izquierda a derecha, como se ilustra en la figura, no en forma diagonal como las de bulbo húmedo.



4. Humedad Relativa.- En una carta psicrométrica completa, las líneas de humedad relativa constante, son las líneas curvas que se extienden hacia arriba y hacia la derecha. Se expresan siempre en porciento, y este valor se indica sobre cada línea.

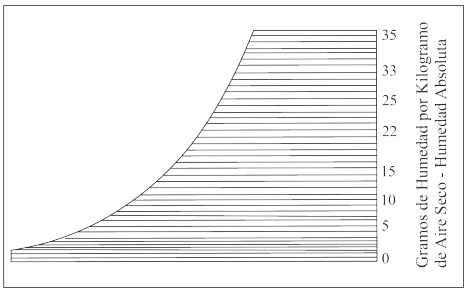
Como ya hicimos notar previamente, la temperatura de bulbo húmedo y la temperatura de punto de rocío, comparten la misma escala en la línea curva a la izquierda de la carta. Puesto que la única condición donde la temperatura de bulbo húmedo y el punto de rocío, son la misma, es en condiciones de saturación; esta línea curva exterior, representa una condición de saturación o del 100 % de humedad relativa. Por lo tanto, la línea de 100 % de h_r, es la misma que la escala de temperaturas de bulbo húmedo y de punto de rocío.



Las líneas de h_r constante, disminuyen en valor al alejarse de la línea de saturación hacia abajo y hacia la derecha, como se ilustra en la figura.

5. Humedad Absoluta.- La humedad absoluta, es el peso real de vapor de agua en el aire. También se le conoce como humedad específica. La escala de la humedad absoluta, es la escala vertical (ordenada) que se encuentra al lado derecho de la carta psicrométrica, como se indica en la figura.

Los valores de esta propiedad se expresan, como ya sabemos, en gramos de humedad por kilogramo de aire seco (g/kg), en el sistema internacional, y en granos por libra (gr/lb), en el sistema inglés.



Las líneas de humedad absoluta, corren horizontalmente de derecha a izquierda, y son paralelas a las líneas de punto de rocío y coinciden con éstas. Así pues, podemos ver que la cantidad de humedad en el aire, depende del punto de rocío del aire.

A continuación, veremos algunos ejemplos sencillos del uso de la carta psicrométrica, con las cinco propiedades físicas descritas hasta este punto. Luego, veremos las demás propiedades que faltan por estudiar.

Como se mencionó anteriormente, conociendo dos de estas propiedades del aire, se pueden determinar las demás con el uso de la carta psicrométrica.

Ejemplo 1: Supongamos que con un psicrómetro se tomaron las lecturas de las temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo, siendo éstas de 24°C y de 17°C, respectivamente. ¿Cuál será la humedad relativa? Refiriéndonos a la carta psicrométrica de la figura 1, encontramos la temperatura de bulbo seco (24°C) en la escala inferior, y la temperatura de bulbo húmedo (17°C) en la escala curva del lado izquierdo de la carta. Extendiendo estas dos líneas, se interceptan en el punto "A". A partir de este punto, se puede determinar toda la demás información. La humedad relativa es de 50 %.

En esa misma muestra de aire, ¿cuál será el punto de rocío?

Partiendo del punto "A" y desplazándonos hacia la izquierda en forma horizontal, la línea corta a la escala de temperatura de punto de rocío en 12.6°C. ¿Cuál será la humedad absoluta? Partiendo nuevamente del punto "A", en forma horizontal, pero hacia la derecha de la carta, la línea intercepta en la escala de humedad absoluta en un valor de 9.35 g/kg de aire seco.

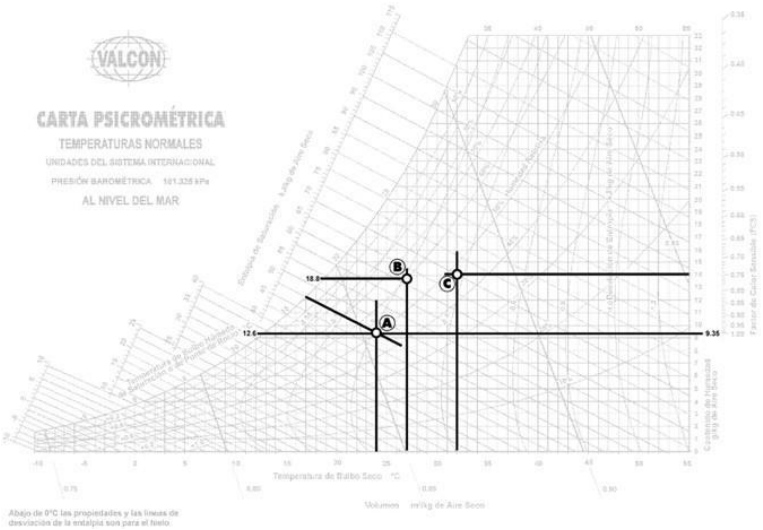


Figura 4.5: Resolución de ejemplos 1, 2 y 3

Ejemplo 2: A una muestra de aire se le midió la humedad relativa, utilizando un higrómetro y ésta es de 60 %. Si la temperatura de bulbo seco es de 27°C, ¿cuál será el punto de rocío?

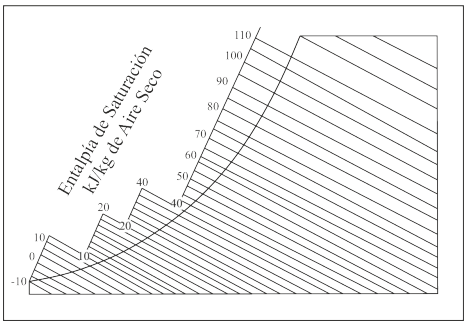
Encontramos el punto donde la temperatura de 27°C de bulbo seco, cruza con la línea de 60 % de h_r, en la fig. 4.5 A este punto lo llamamos "B". Si la muestra de aire en estas condiciones fuera enfriada, sin cambiar su contenido de humedad, lo cual está representado en la carta psicrométrica como una línea horizontal, la línea del punto de rocío seria interceptada aproximadamente en 18.8°C.

Ejemplo 3: Encontrar la h_r cuando la temperatura de bulbo seco es de 32°C, y el contenido de humedad (presión del vapor de agua) es de 14 g/kg de aire seco.

Primero, se encuentra la línea vertical que representa la temperatura de bulbo seco constante de 32°C. Subiendo a lo largo de esta línea, hasta cruzar la línea horizontal que representa 14 g de humedad por kg de aire seco. A la intersección le llamamos punto "C", (ver fig. 4.5).

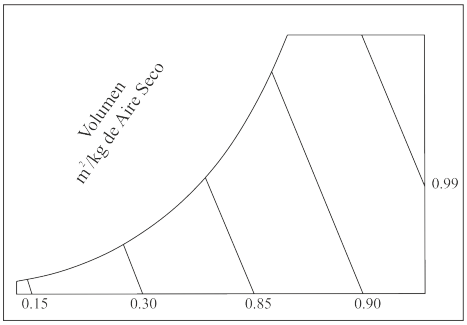
Este punto cae entre las líneas de 40 % y 50 % de humedad relativa. La respuesta sería una humedad relativa de 47 %.

6. Entalpía.- Las líneas de entalpía constantes en una carta psicrométrica, son las que se muestran en la figura. Debe notarse que estas líneas, son meramente extensiones de las líneas de bulbo húmedo; puesto que el calor total del aire, depende de la temperatura de bulbo húmedo. La escala del lado izquierdo lejana a la línea curva, da el calor total del aire en kJ/kg (kilojoules por kilogramo) de aire seco, en el sistema internacional o en btu/lb de aire seco, en el sistema inglés. Esta escala aumenta de -6 kJ/kg a la temperatura de -10°C de bulbo húmedo, hasta aproximadamente 115 kJ/kg a 33°C de bulbo húmedo.



7. Volumen Específico.- En la figura, se muestran las líneas del volumen específico constante en una carta psicrométrica.

Estas líneas están en un ángulo aproximado de 60° con la horizontal, y van aumentando de valor de izquierda a derecha. Por lo general, el espacio entre cada línea, representa un cambio de volumen específico de 0.05 m^3 /kg. Cualquier punto que caiga entre dos de estas líneas, naturalmente debe ser un valor estimado. Si se desea saber la densidad del aire a cualquier condición, como ya sabemos, se debe dividir uno entre el volumen específico, puesto que la densidad es la inversa del volumen específico y viceversa.



Debido a que la mayoría de los cálculos en trabajos de aire acondicionado, se basan en el peso del aire en lugar del volumen de aire, se recomienda el uso del volumen específico (m^3 /kg de aire) en vez de la densidad (kg/m^3 de aire).

Ahora, echemos un vistazo a la carta psicrométrica de la figura 4.4. Su constitución consiste de la sobreimposición de las siete propiedades descritas, ocupando la misma posición relativa sobre la carta. En la descripción de cada una de las siete propiedades, se definió la línea constante como una línea que puede contener un número infinito de puntos, cada uno a la misma condición; esto es, si fuésemos a trazar una sola condición del aire, tal como la temperatura del bulbo seco sobre la carta psicrométrica, ésta podría caer en cualquier punto sobre la línea constante, correspondiente a esa temperatura de bulbo seco.

Pero ahora, en la carta psicrométrica compuesta, tenemos un número de líneas que se cruzan una con otra; así que si trazamos un punto sobre una línea de bulbo seco constante, este punto también corresponderá a diferentes valores sobre las líneas constantes para la temperatura de bulbo húmedo, punto de rocío, humedad relativa, volumen específico, humedad específica y entalpía.

Suponiendo que dos de cualquiera de estas líneas constantes se cruzaran en un punto común sobre la carta, podremos trazar ese punto exactamente, si conocemos dos de cualquiera de esas propiedades del aire. A partir de este punto, podemos entonces movernos a lo largo de las respectivas líneas constantes para las otras propiedades del aire, y podemos leer el valor en sus escalas respectivas, sin tener que recurrir al problema de calcularlos, como vimos en la sección de las tablas psicrométricas. Aunque este método no es

tan preciso como el método de las tablas, es mucho más rápido, y el grado de precisión es suficientemente cercano para fines prácticos.

Ejemplo 4: Si a una muestra de aire se le toman las temperaturas de bulbo seco (35°C) y bulbo húmedo (22°C), ¿cuáles serán las demás propiedades?

Primero, trazamos un punto donde estas dos líneas se cruzan, como se muestra en la figura 4.6, y lo marcamos como punto "A". Este es el único punto en la carta donde existen estas dos condiciones (35°C bs y 22°C bh).

Las demás condiciones pueden encontrarse fácilmente, simplemente nos desplazamos a lo largo de la línea constante correspondiente, leyendo el valor en esa escala.

El orden no es importante, y puede comenzarse por cualquier propiedad. Por ejemplo, la temperatura de punto de rocío. Para determinarla, partimos del punto "A", horizontalmente hacia la izquierda de la carta, y donde cruza la escala de temperatura de bulbo húmedo, esa es la temperatura de punto de rocío, ya que es la misma escala, puesto que en esa línea curva el aire está en su condición de saturación. La temperatura de punto de rocío para este ejemplo es de 15.8°C (punto "B").

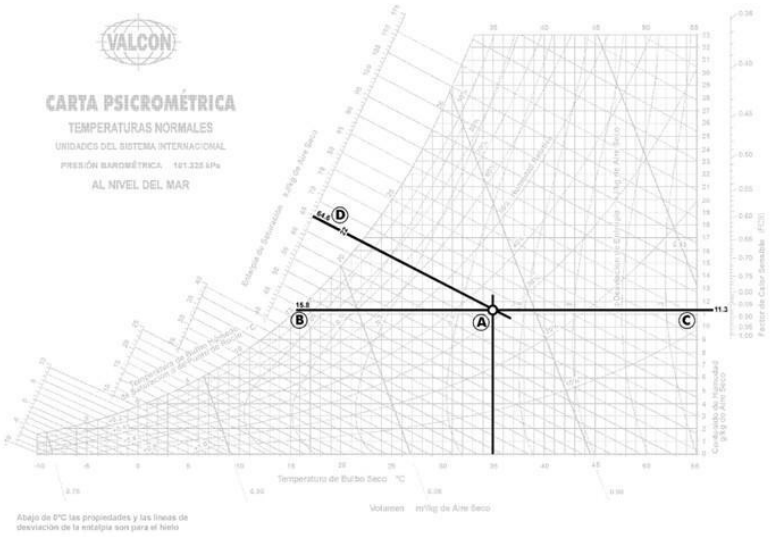


Figura 4.6: Carta psicrométrica 1

El contenido de humedad se determina sobre la escala del lado derecho de la carta; por lo que, partiendo del punto "A", nos desplazamos horizontalmente hacia la derecha, y cruzamos la escala en aproximadamente 11.3 g/kg de aire seco (punto "C").

La humedad relativa se determina por la posición del punto "A", con respecto a las líneas de humedad relativa de la carta. Examinando de cerca este punto, vemos que está aproximadamente a una quinta parte de la distancia entre las líneas de 30 % y 40 % de h_r . Por lo que podemos estimar que la h_r es de 32 %.

La ubicación del punto "A", con respecto a las líneas constantes del volumen específico, indica que cae aproximadamente a 4/5 partes de la distancia entre la línea de 0.85 y 0.90 m^3/kg de aire seco, (4 / 5 = 0.80). Como hay una diferencia de 0.05 m^3/kg entre una línea y otra, podemos estimar que el volumen específico es 0.85 + 0.80 veces 0.05, o sea 0.89 m^3/kg de aire seco, 0.85 + (0.80 x 0.05) = 0.89. La densidad sería lo inverso del volumen específico, o sea 1 / 0.89 = 1.12 kg/m^3.

Extendiendo la línea constante de bulbo húmedo, de 22°C directo hacia arriba y a la izquierda, hasta cortar la escala de calor total o entalpía (punto "D"), podemos leer que la entalpía del aire es de 64.6 kJ/kg de aire seco. Para convertir kilojoules por kilogramo a kilocalorías por kilogramo, dividimos los kJ/kg entre 4.184(64.6 kJ/kg / 4.184 = 15.44 kcal/kg). Para convertir los kJ/kg a btu/lb, se dividen los kJ/kg entre 2.326(64.6 kJ/kg / 2.326 = 27.77btu/lb).

Mientras que los valores de las demás propiedades obtenidos en la carta psicrométrica, son muy parecidos a los calculados mediante el método de las tablas psicrométricas, parecería que el valor de la entalpía es considerablemente menos preciso; pero, debe recordarse que en el proceso de acondicionamiento de aire, nos interesa el cambio de calor, en lugar del valor absoluto del calor total.

La diferencia entre las tablas y la carta, es consistente a través de todo el rango de temperaturas con las cuales se va a trabajar; así que, los cambios en los valores de entalpía en la carta, serán casi idénticos a los cambios en las tablas.

Como se puede observar, es relativamente simple determinar las propiedades del aire en una carta psicrométrica, conociendo dos (cualquiera) de ellas. Se requiere que a partir de un punto dado en la carta, las demás propiedades se obtengan siguiendo una serie de líneas, que pueden ser horizontales, verticales, diagonales o curvas.

La precisión del resultado, depende grandemente de la versión individual, la habilidad para trazar líneas y el método de interpolación. La interpolación significa obtener matemáticamente, los valores de los puntos que caen entre dos líneas; lo cual, en ocasiones, puede consumir una gran cantidad de tiempo y esfuerzo.

Pero, el uso de la carta no se limita solamente a determinar las propiedades de una muestra de aire, también se pueden calcular las cargas térmicas al calentar o enfriar la muestra de aire, con o sin humidificación o deshumidificación, cambios en el volumen, mezclas de aire, etc.

4.8. BALANCES DE HUMIDIFICACION Y SECADO

Problema 1

El aire de una habitación tiene humedad H de 0.021 kg H_2O/kg de aire seco a 32.2°C (90°F) y a 101.3 kPa abs de presión. Calcule: a) El porcentaje de humedad; b) El porcentaje de humedad relativa.

Solución

Temperatura (aire): 32.2 °C (90°F)

Presión total (aire): 101.325 kPa abs

Humedad (Aire): 0.021 kg H_2O/kg de aire seco

a) Cálculo de la presión de vapor de agua, P_A

$$H = \frac{18.02}{28.97} \cdot \frac{P_A}{P - P_A}$$

$$P_A = \frac{1,608\ HP}{(1,608\ H + 1)}$$

$$P_A = \frac{1,608(0,021)(101,325)}{(1,608(0,021) + 1)} = 3,31\ KPa\ absolutos$$

b) Cálculo de la Humedad de saturación, H_S

De las tablas de vapor se obtiene que la presión de vapor de agua a 32.2°C es 4.83 kPa.

$$H_S = \frac{18.02}{28.97} \cdot \frac{P_{AS}}{P - P_{AS}}$$

$$H_S = \frac{18.02}{28.97} \cdot \frac{4,83}{101,325 - 4,83} = 0,03113 \frac{Kg\ de\ H_2O}{Kg\ de\ Aire}$$

c) Cálculo del porcentaje de humedad H_P.

$$H_P = \frac{H}{H_S} * 100 = \frac{0,021}{0,03113} * 100 = 67,46\,\%$$

d) Cálculo del porcentaje de humedad relativa, H_R.

$$H_S = \frac{P_A}{P_{AS}} * 100 = \frac{3,31}{4,83} * 100 = 68,53\,\%$$

Problema 2

El aire entra a un secador a temperatura de 65.6 ºC (150 ºF) y punto de rocío de 15.6 ºC (60 ºF). Usando la gráfica de humedad, determine la humedad real, el porcentaje de humedad y el volumen húmedo de esta mezcla. Además, calcule también cs usando unidades SI y del sistema inglés.

Solución

Temperatura (entrada): 65.6 ºC (150ºF)

Punto de rocío (aire): 15.6ºC (60ºF)

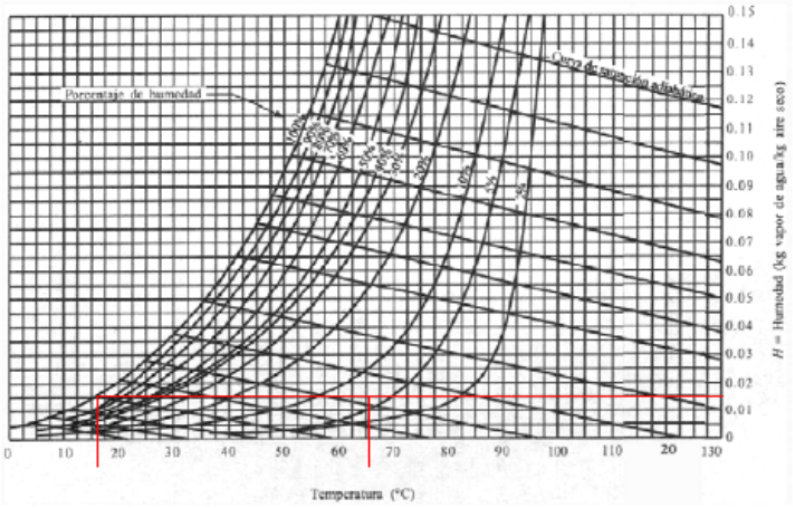


Figura 4.7: Carta psicrométrica

a) Cálculo de la humedad, H

De la carta psicrométrica se obtiene que la humedad es H=0.015 kg H_2O/kg aire seco. Localizando en la gráfica este punto de H y T = 65.6 ºC, el porcentaje de humedad Hp resulta ser 6.6 %, procediendo con una interpolación vertical entre las líneas de 5 y 10 %.

b) Cálculo del calor húmedo, c_S

$$C_S = 1{,}005 + 1{,}88\ H$$

$$C_S = 1{,}005 + 1{,}88\ (0{,}015) = 1{,}0332\ \text{kJ/kg aire seco. K}$$

c) Cálculo del volumen húmedo, V_H

$$V_H = (0.00283 + 0.0456H)T$$

$$V_H = (0.00283 + 0.0456(0,015))(65.6 + 273)$$

$$V_H = 0,9814 \frac{m^3\ de\ aire\ +\ vapor\ de\ agua}{kg\ aire\ seco}$$

Problema 3

Se desea secar aire con temperatura de bulbo seco de 37.8 °C y temperatura de bulbo húmedo de 26.7 °C, enfriándolo primero a 15.6 °C para condensar el vapor de agua y después calentándolo a 23.9 °C.

a) Calcule la humedad y el porcentaje de humedad iniciales.

b) Calcule la humedad y el porcentaje de humedad fínales.

[Sugerencia: Localice el punto inicial en la gráfica de humedad. Después, desplácese horizontalmente (enfriamiento) hasta la línea de 100 % de saturación. Siga la línea hasta 15.6 °C. Después, desplácese horizontalmente hacia la derecha hasta 23.9 °C.]. Ver figura 4.7.

Solución

Temperatura (b.s): 37,8 °C

Enfriamiento 15,6°C

Temperatura (b.h): 26,7 °C

Calentamiento: 23.9°C

a) Cálculo la humedad, H y el porcentaje de humedad H_P iniciales. De la carta psicrométrica se obtiene que H es igual a 0.0177 y que H_P es 42,9 %.

b) Cálculo la humedad, H y el porcentaje de humedad H_P fínales.

De la carta psicrométrica se obtiene que H es igual a 0.0111 y que H_P es 61,3 %.

Problema 4

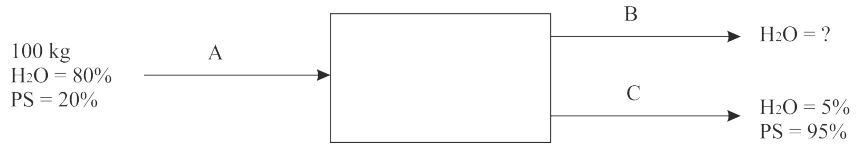
Se tienen 100 kg de un producto con el 80 % de humedad que debe secarse hasta el 5 %. Calcular:

a) La cantidad de agua que hay que eliminar.

b) Masa total del producto al final del secado.

Solución

Base de Cálculo: 100 kg de alimentación.



Balance Parcial de Producto solido:

$$100\ (0{,}20) = C\ (0{,}05)$$

$$C = 21{,}05\ Kg$$

Balance Parcial de Agua:

$$100\ (0{,}80) = B + 21.05\ (0{,}05)$$

$$B = 78{,}95\ kg$$

Problema 5

Después del secado, se determinó que un lote de piel pesa 900 lb y que contiene 7 % de humedad. Durante el secado la piel perdió 59.1 % de su peso inicial cuando se encontraba húmeda.

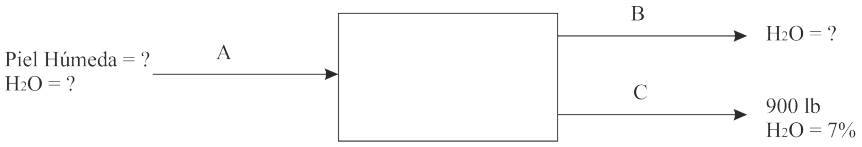
a) Calcular el peso de la piel "totalmente seca" o "exenta de humedad" en la carga de alimentación inicial.

b) Calcular el número de libras de agua eliminadas en el proceso de secado por libra de piel totalmente seca.

c) Calcular el porcentaje de agua eliminada en base del agua presente inicialmente.

Solución

Para resolver el problema hacemos el diagrama de flujo siguiente:



Base de Cálculo: 900 lb de piel seca

$B = H_2O = 0.591A$

Agua en la Piel seca: 900 x $\%H_2O$ = 900 * 0,07 = 63 lb

H_2O: 1 - x Piel seca: 837 lb

Balance de Agua:

$(1 - x)Q = 0{,}591Q + 63$

$Q - xQ = 0{,}591Q + 63$... (1)

Balance de Piel seca:

X * Q = 837... (2)

Reemplazando (2) en (1) obtenemos: Q = 2200,49 lb; x = 0,383

a) Piel seca = 837 lb

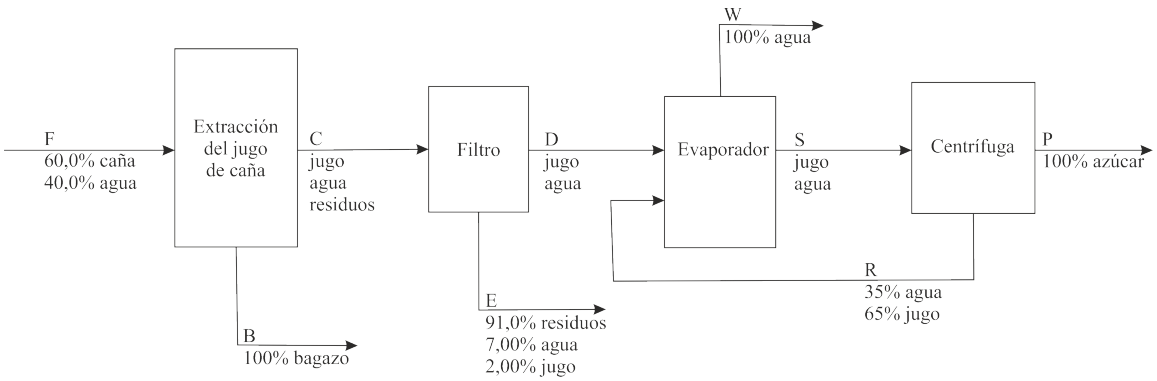
b) R = $\dfrac{0.591 * 2200,49}{837} \dfrac{lb\ H_2O\ eliminadas}{lb\ de\ piel\ seca}$

c) % H_2O eliminada = $\dfrac{0,591 * 2200.49}{0,591 * 2200,49 + 63} x100 = 95,34\,\%$

4.9. PROBLEMAS DE APLICACIÓN

Problema 1.- El diagrama adjunto ilustra de manera simplificada el proceso para la obtención del azúcar de mesa, a partir de la caña de azúcar. La unidad de extracción del jugo de caña es alimentada por trapiches en los que se tritura la caña empleando agua de imbibición, haciendo que la caña ingrese desmenuzada.

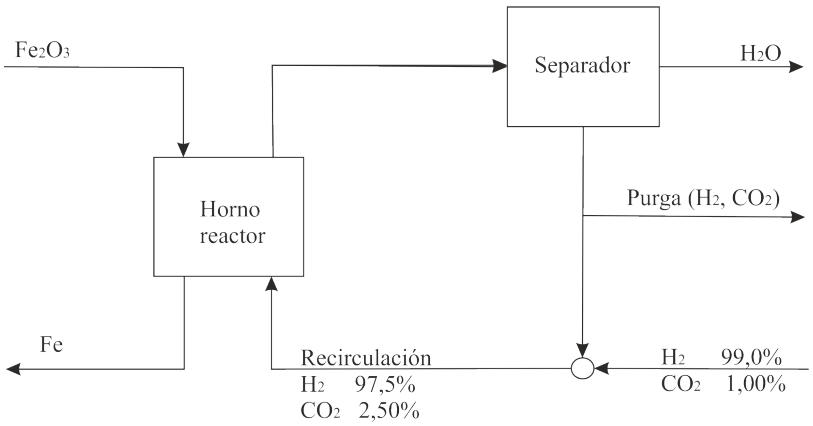
Aproximadamente el 86,0 % de la caña es bagazo y el resto es jugo de caña (azúcar). En esta operación ingresa la caña y el agua (corriente F: 60 % de caña y 40 % de agua) y pasa al filtro el jugo diluido, con un bajo porcentaje de residuos de bagazo (5.00 % del bagazo de la caña alimentada). El resto del bagazo se retira para combustible (corriente B).



En el filtro se retiran los residuos a fin de limpiar el jugo de caña diluido (corriente E). El jugo pasa a un evaporador en el que se retira el 75.0 % del agua que entra al mismo (corriente W) proveniente tanto del jugo de caña diluido (corriente D) como de la corriente de recirculación R.

El jarabe que sale del evaporador pasa a una unidad de centrifugado de la que se extrae azúcar cristalizada (corriente P). Sin embargo, en la centrífuga se obtienen mieles (azúcar no cristalizada) que se recirculan nuevamente al evaporador para disminuir su contenido de agua, (a) Si se alimentan 500 kg de caña troceada embebida en agua al extractor, determinar las corrientes desconocidas y las composiciones faltantes; (b) Se desea producir 12 ton de azúcar cristalizada, ¿cuántos kg de caña de azúcar deben emplearse para esto?

Problema 2.- Uno de los procesos empleados en la industria para obtener hierro es reducir los óxidos de hierro utilizando ciertos gases como componentes de una reacción que se lleva a cabo en un horno de alta temperatura. En particular, en los procesos de reducción de la hematita. Fe_2O_3 es frecuente observar la utilización de hidrógeno. La figura representa un diagrama de flujo simplificado de este proceso.



La reacción que se lleva a cabo en el homo es:

$$Fe_2O_3 + 3H_2 \rightarrow 2Fe + 3H_2O$$

Se quiere reducir 3.00 ton/día de Fe 2O3 a Fe. El H_2 de la alimentación fresca utilizado para la reducción contiene 1.00 %p de CO_2 como impureza y se mezcla con la recirculación antes de entrar al reactor. A fin de evitar que la concentración de CO_2 a la entrada del reactor sobrepase el 2.50 %p se retira parte de la corriente proveniente del separador con una purga. La relación entre la corriente gaseosa de recirculación y la corriente de alimentación de gas fresco es de 4 a 1. Calcular la cantidad y composición del gas de purga.

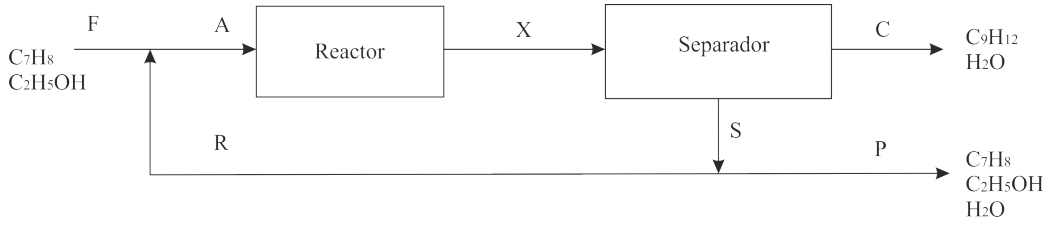
Problema 3.- Un proceso de producción de NH3 se alimenta con hidrógeno y nitrógeno que reaccionan para formar amoníaco, según la reacción:

$$N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3$$

La alimentación fresca tiene una relación molar entre el N_2 y el H_2 de 1 de N_2 a 3 de H_2. En el reactor, solo el 25 % del nitrógeno se transforma en NH_3. Los productos pasan a una cámara de condensación en la que el NH_3 que se forma se condensa al estado líquido y se remueve completamente del proceso, mientras que el N_2 y el H_2 que no reaccionaron se recirculan de nuevo para mezclarse con la carga de alimentación fresca al proceso. Determinar: (a) ¿La relación entre la recirculación y la carga de alimentación fresca expresada en kilogramos de recirculación por kilogramos de carga de alimentación?: (b) La carga de alimentación fresca (expresada en moles) necesaria para obtener 170 kg de amoníaco.

Problema 4.- El etiltolueno (C_9H_{12}) puede obtenerse por alquilación catalítica del tolueno con etanol en fase vapor en una instalación como la esquematizada en la figura:

El alimento fresco contiene un 20 % en exceso de etanol sobre el estequiométrico necesario y en el reactor se convierte el 80 % del tolueno alimentado. Los productos de reacción pasan a un separador del que se obtienen dos corrientes, una corriente C que contiene un 35 % en moles de agua y todo el etiltolueno formado y otra corriente S que se desdobla en dos, una de purga P, para evitar que se acumule el vapor de agua formado, y otra R, que se recircula al reactor. Si la relación entre las corrientes C y P es 2:1 (en moles). Calcúlese



a) Caudales y composiciones de todas las corrientes indicadas.

b) Rendimiento de tolueno a etiltolueno.

Problema 5.- En cierto proceso se requiere generar los reactivos AB y B_2. Las sustancias AB, B y A_2 son completamente solubles en agua en tanto que B_2 es completamente insoluble en el mismo medio. La reacción que predice la formación de estos compuestos es:

$$A_2 + B \rightarrow AB + B_2$$

El proceso consta de un reactor que es alimentado por la mezcla de una corriente fresca con otra de recirculación. La relación molar entre estos dos flujos es de 20:17. La alimentación fresca contiene 50.7 % de B, 14.3 % de A2 y 35 % de agua. El reactor funciona con una conversión del 40 % respecto del limitante.

El producto del reactor es alimentado a un filtro (separador sólido-líquido) donde todo el compuesto insoluble se retira acompañado del 10 % de la solución que entra al filtro. La otra corriente de descarga del filtro (solo solución) es enviada a un separador, que recupera todo el AB por una corriente, y por otra, la corriente de reciclo hacia el reactor. La corriente de reciclo contiene un 35.29 % de A_2 y un 5.88 % de B. El resto es agua.

De acuerdo a lo anterior:

A. Dibuje el diagrama de flujo del proceso

B. Ubique las variables conocidas y desconocidas sobre el esquema. Enumere las corrientes, y especifique claramente las incógnitas que va a utilizar.

C. Plantee los Balances de masa a todos los subsistemas.

D. Resuelva el balance de masa calculando el valor de todas las corrientes y composiciones. Preséntelos en una tabla ordenada.

E. Calcule:

   I. El porcentaje de AB en el producto del separador respecto del total generado.

   II. Fracción recirculada respecto de la alimentación al separador.

   III. Razón másica entre sólidos insolubles y solución producto del reactor.

Problema 6.- Un alimento con un 7,5 % de humedad se traslada a un ambiente más húmedo que el actual. Se observa que su masa aumenta en 0,1 kg agua/kg producto hasta que alcanza el equilibrio. Calcular la humedad del producto en base seca en ambos ambientes.

Problema 7.- En la figura se muestra un diagrama de flujo simplificado de la fabricación de azúcar.

La caña de azúcar se alimenta a un molino donde se extrae jarabe por trituración; el "bagazo" resultante contiene 80 % de pulpa. El jarabe (E) que contiene fragmentos finamente divididos de pulpa se alimenta a una malla que separa toda la pulpa y produce un jarabe transparente (H) que contiene 15 % de azúcar y 85 % de agua. El evaporador produce un jarabe "pesado" y el cristalizador produce 1000 kg/h de cristales de azúcar.

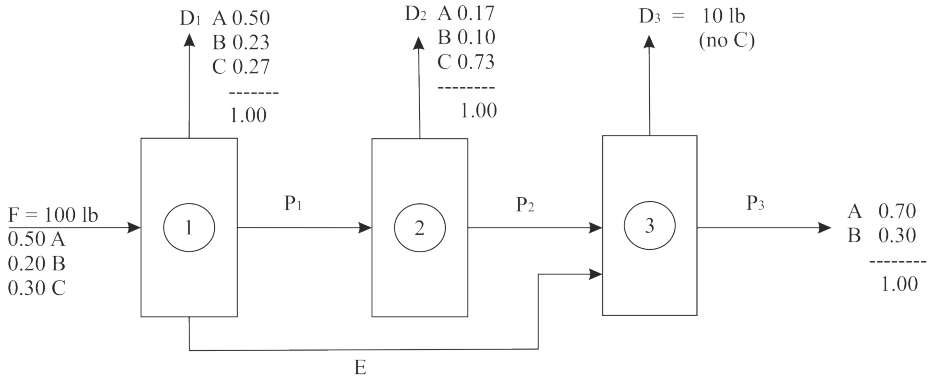
a) Determine el agua eliminada en el evaporador en kg/h

b) Determine las fracciones de masa de los componentes del flujo de desecho G

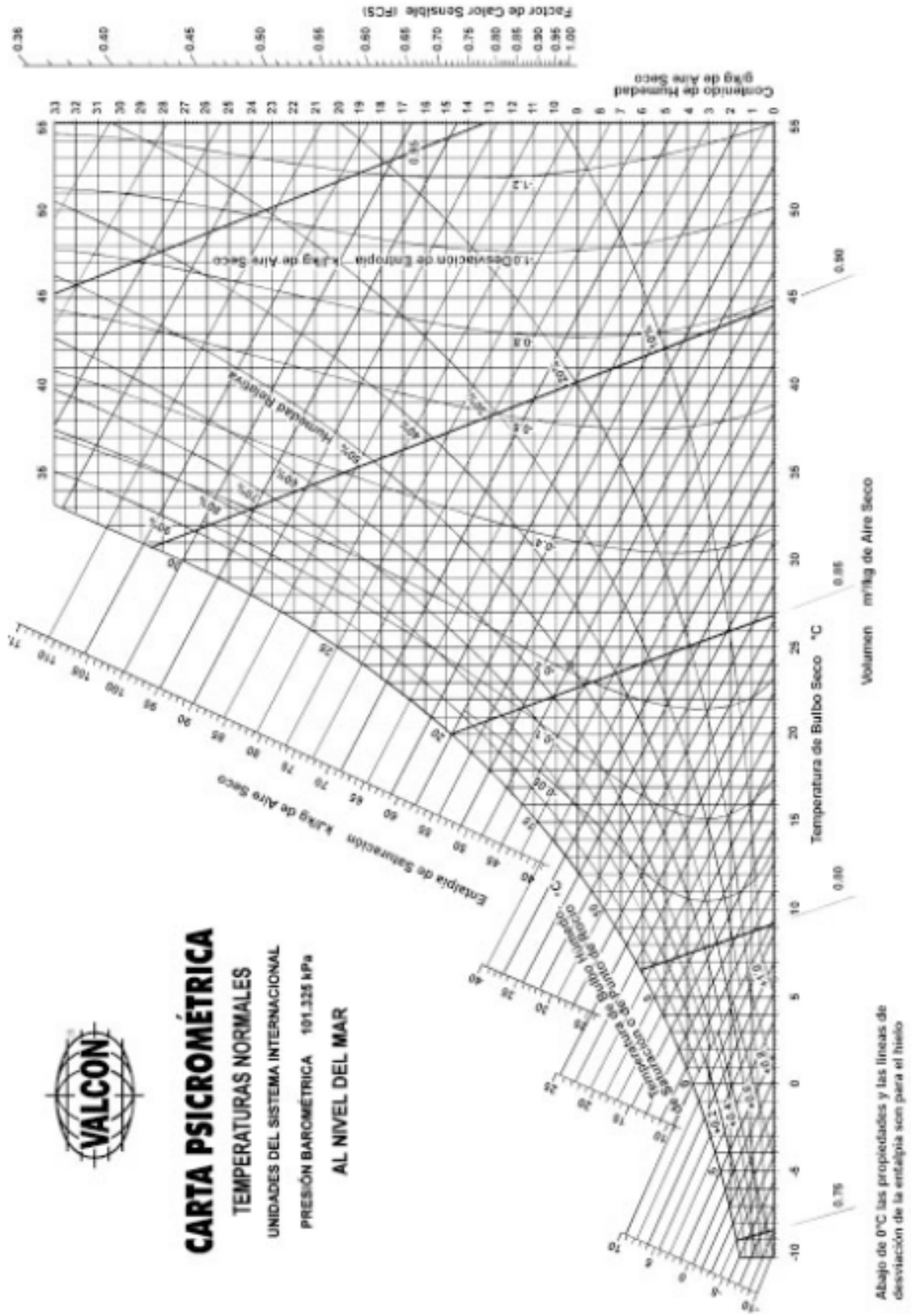
c) Determine la tasa de alimentación de caña de azúcar a la unidad en kg/h

d) Del azúcar que entra con la caña, ¿qué porcentaje se pierde con el bagazo?

e) ¿Es ésta una operación eficiente? Explique por qué sí o por qué no.



Problema 8.- Se usa un secador de aire caliente para reducir el contenido de humedad de 1500 kg/min de pulpa húmeda de madera, de 0.75 kg H_20 / kg de pulpa seca a 0.15 % por peso de H_2O. Se toma aire dé la atmósfera a 28°C. 760 mm de Hg y 50 % de humedad relativa, se envía a través de un soplador-calentador, y luego se alimenta al secador. El aire sale del secador a 80°C y 10 mm Hg (manométrico). Una muestra del aire de salida se introduce en una cámara que contiene un espejo, donde se enfría con lentitud manteniendo la presión manométrica a 10 mm Hg. Se observa que el espejo se empaña a una temperatura de 40.0°C. Calcule la masa de agua que se elimina de la pulpa (kg/min) y la velocidad de flujo volumétrico del aire que entra al sistema (m^3/min).


CARTA PSICROMÉTRICA
TEMPERATURAS NORMALES
UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL
PRESIÓN BAROMÉTRICA 101.325 kPa
AL NIVEL DEL MAR
VALCON
Factor de Calor Sensible (FCS)
Contenido de Humedad g/kg de Aire Seco
Temperatura de Bulbo Seco °C
Volumen m³/kg de Aire Seco
Entalpía de Saturación, kJ/kg de Aire Seco
Temperatura de Punto de Rocío
Saturación
Humedad Relativa
Desviación de Entropía - kJ/kg de Aire Seco
Abajo de 0°C las propiedades y las líneas de desviación de la entalpía son para el hielo

CAPÍTULO 5

BALANCE DE MATERIA SISTEMA SÓLIDO - LÍQUIDO

OBJETIVOS

- Definir, principios generales de disoluciones.
- Determinar los puntos de rocio y de burbuja de soluciones.
- Revisar saturación y solubilidad en las operaciones de cristalización, extracción y secado.

5.1. LEY DE RAOULT

Una de las características coligativas de soluciones es la disminución de la presión de vapor que ocurre cuando se agrega soluto a un solvente puro. Raoult encontró que cuando se agregaba soluto a un solvente puro disminuía la presión de vapor del solvente. Entre más se agrega más disminuye la presión de vapor. Este estatuto llego a ser conocido como ley de Raoult.

Desde un punto de vista molecular, si introducimos partículas no-volátiles de soluto, iones o moléculas, en un solvente puro, algunas de las partículas del soluto tomarán la posición de moléculas solventes en la superficie de la solución. La evaporación es un fenómeno superficial por lo que las moléculas o iones no se convertirán en vapor cuando están sumergidas por debajo de la superficie. Las partículas sumergidas tienen a otras partículas que las rodean y las fuerzas entre éstas son suficientes para evitar que las partículas sumergidas superen dichas fuerzas con la energía cinética disponible para su separación. Sin embargo las partículas superficiales tienen solamente las partículas debajo de ellas en el estado líquido. Por lo tanto, las moléculas superficiales son capaces de superar estas fuerzas internas entre las partículas y entran en estado de vapor. Si las partículas del soluto toman el lugar de moléculas del solvente y son partículas de soluto no-volátiles, estas bloquean las moléculas de solvente y evitan la vaporización. Por lo tanto, la presión de vapor del solvente será menos como resultado de la presencia de las partículas del soluto. A mayor cantidad de partículas del soluto en la solución (aumento de la concentración) más posiciones superficiales serán bloqueadas.

La ley de Raoult se expresa matemáticamente como:

$$P_1 = ix_1P_1^0 \tag{5.1}$$

Donde P_1 es la presión de vapor del solvente una vez agregado el soluto x_1 como fracción molar del componente de la solución, P_1^0 es la presión de vapor de solvente puro, e *i* está dado por,

$$i = \frac{de\ moles\ después\ de\ la\ solución}{de\ moles\ antes\ de\ la\ solución}$$

Para una solución de dos componentes:

$$x_1 + x_2 = 1$$

Así que

$$x_1 = 1 - x_2$$

Si sustituimos esta relación en la ecuación (5.1) obtenemos que

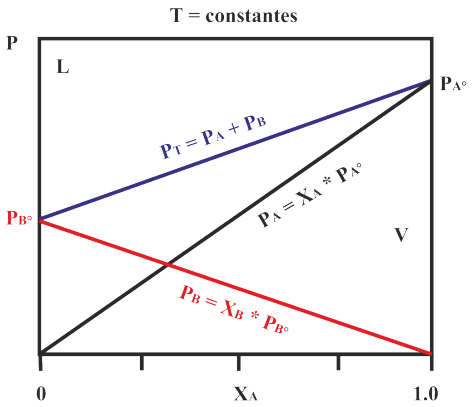
$$P_1 = i(1 - x_2)P_1^0$$

Si el soluto es un no-electrolito entonces i = 1 y la ecuación se convierte:

$$P_1 = (1 - x_2)P_1^0 \tag{5.2}$$

La ecuación (5.2) estima la disminución de la presión de vapor de una solución que contiene un solvente volátil y un soluto no volátil no electrolítico.

La ley de Raoult se cumple de forma cuantitativa únicamente para disoluciones ideales. A medida que nos alejamos de la idealidad, nos alejamos de los resultados exactos. Por consiguiente se puede plantear que una disolución es ideal cuando cumple con la ley de Raoult. Es obvio que estas no son más que un modelo físico que refleja simplificadamente la realidad objetiva.



Disolución ideal

Es aquella en la que cada molécula de los componentes en la mezcla es afectada por las mismas fuerzas, como si estuviesen en estado puro. Las mezclas que presentan un gráfico similar al de la figura se denominan mezclas ideales.

En las disoluciones ideales ha de cumplirse que:

- Sus componentes pueden mezclarse entre sí en cualquier proporción, o sea, que la solubilidad de cada uno de ellos en el otro es ilimitada.
- No se consume ni libera energía al formar la disolución partiendo de sus componentes (sin variación térmica).
- No hay cambio de volumen al formar la mezcla (sin variación de volumen).
- La naturaleza química de ambos líquidos deben ser muy semejantes.

En la práctica las disoluciones muy diluidas se comportan como disoluciones ideales.

Ejemplo de esto son las disoluciones formadas por los componentes:

- benceno-tolueno

- benceno - xileno
- n. hexano- n heptano (30 ^{o}C)
- bromuro de etilo-yoduro de etilo
- cloruro de n-butilo - bromuro de n-butilo (50 ^{o}C)

Cuya analogía es evidente

Desviación positiva y negativa de la ley de Raoult

Cuando existen interacciones entre las moléculas de A y B de una mezcla, la presencia de una de ellas afectará a la tendencia al escape de la otra.

- Si B presenta fuerzas intermoleculares entre sí mayores que las de A entre sí, el efecto que producirá agregar moléculas de B al líquido A será aumentar la tendencia al escape de este último; por lo tanto la presión de vapor de A será mayor a la del líquido puro. Este comportamiento se denomina desviación positiva de la ley de Raoult.
- En cambio, si las moléculas de A interaccionan más fuertemente con las moléculas de B que consigo mismas, la presión de vapor de A será menor que la del líquido puro. Este tipo de comportamiento se conoce con el nombre de desviación negativa de la ley de Raoult.

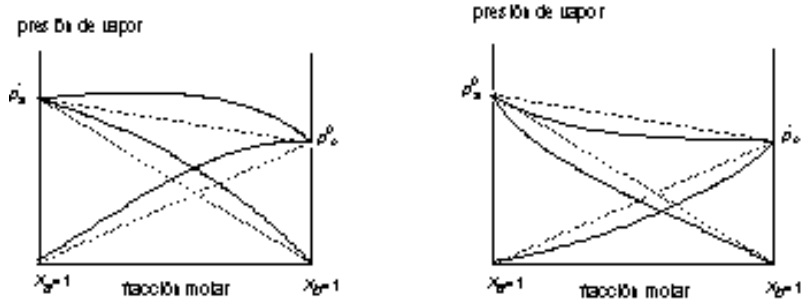


Figura 5.1: (a) Gráfico de presión de vapor versus fracción molar para sistemas con desviaciones positivas de la Ley de Raoult. (b) Gráfico de presión de vapor versus fracción molar para sistemas con desviaciones negativas de la Ley de Raoult.

5.2. LEY DE HENRY

La Ley de Henry fue formulada en 1803 por William Henry. Enuncia que a una temperatura constante, la cantidad de gas disuelto en un líquido es directamente proporcional a la presión parcial que ejerce ese gas sobre el líquido. Matemáticamente se formula del siguiente modo :

$$S = Ks * P$$

Donde:

P es la presión parcial del gas.

S es la concentración del gas (solubilidad).

ks es la constante de Henry, que depende de la naturaleza del gas, la temperatura y el líquido.

Las unidades de la constante que dependen de las unidades elegidas para expresar la concentración y la presión. Un ejemplo de la aplicación de esta ley está dado por las precauciones que deben tomarse al volver a un buzo a la superficie. Al disminuir la presión parcial de los distintos gases, disminuye la solubilidad de los mismos en la sangre, con el consiguiente riesgo de una eventual formación de burbujas. Para evitarlo, esta descompresión debe efectuarse lentamente.

También se puede expresar la ley de Henry en función de las presiones:

$$p_i = Ks * x_i$$

Donde: p_i es presión en la fase gaseosa del componente diluido en equilibrio, X_i es la fracción molar del componente diluido en la solución.

A continuación podrás ver gráficamente el comportamiento de la presión de vapor a temperatura constante y a presión constante.

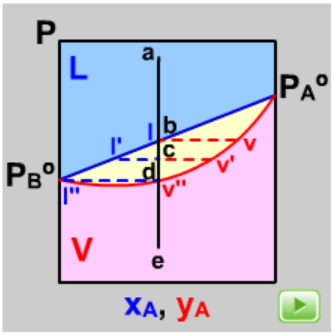


Figura 5.2: Gráfico de presión de vapor versus fracción molar a temperatura constante.

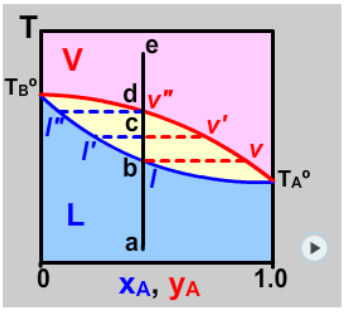


Figura 5.3: Gráfico de presión de vapor versus fracción Molar a presion constante.

5.3. USOS DEL COEFICIENTE DE EQUILIBRIO DE HENRY O RAOULT

Los problemas típicos que el lector tal vez tendrá que resolver y que implican el uso del coeficiente de equilibrio K_i son:

1) Calcular la temperatura de punto de burbuja de una mezcla líquida dada la presión total y la composición del líquido.

2) Calcular la temperatura de punto de rocío de una mezcla de vapores dada la presión total y la composición del vapor.

3) Calcular las composiciones relacionadas vapor-líquido en equilibrio dentro del intervalo de fracciones molares de 0 a 1 en función de la temperatura, dada la presión total.

   Se presentan problemas análogos en lo tocante al cálculo de la presión total dada una temperatura fija. Otro cálculo útil es:

4) Calcular la composición de las corrientes de vapor y de líquido, y sus cantidades respectivas, cuando un líquido de composición dada se vaporiza parcialmente (se destella) a una temperatura y presión dadas (la temperatura debe estar entre las temperaturas de punto de burbuja y punto de rocío de la alimentación).

Para calcular la temperatura de punto de burbuja (dada la presión total y la composición del líquido), puede escribir la ecuación como $y_i = k_i * x_i y$ se sabe que $\sum$y$_i$= 1 en la fase de vapor.

$$1 = \sum k_i x_i$$

en donde las k$_i$ son funciones exclusivamente de la temperatura y n es el número de componentes.

Como cada k$_i$ aumenta con la temperatura, la ecuación sólo tiene una raíz positiva. Puede usar el método de Newton para obtener la raíz si puede expresar cada K$_i$ como una función explícita de la temperatura. En el caso de una disolución ideal, la ecuación anterior se convierte en

$$P_{tot} = \sum_{i=1}^{n} p_i * x_i$$

y podríamos usar la ecuación de Antoine para p$_i$*. Una vez determinada la temperatura del punto de burbuja, la composición del vapor se puede calcular de

$$y_i = \frac{p_i * x_i}{p_{tot}}$$

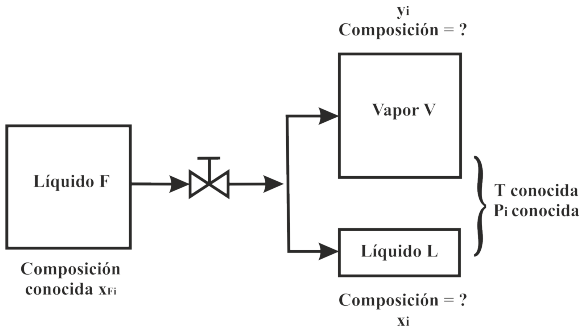
Para calcular la temperatura del **punto de rocío** (dada la presión total y la composición del vapor), podemos escribir la ecuación como $x_i = y_i/k_i$, y sabemos que $\sum x_i$ = 1 en la fase líquida. En consecuencia, lo que queremos es resolver la ecuación en

$$1 = \sum_{i=1}^{n} \frac{y_i}{k_i}$$

En la que las K son función de la temperatura como se explicó para el cálculo de la temperatura del punto de burbuja. Para una disolución ideal

$$1 = p_{tot} \sum_{i=1}^{n} \frac{y_i}{k_i}$$

Si queremos calcular la cantidad de las respectivas fases de vapor y de líquido que aparecen en el equilibrio cuando un líquido de composición conocida se evapora (vaporización instantánea o vaporización flash) a temperatura y presión conocidas, tenemos que usar la ecuación de Raoult junto con un balance de materia. La figura ilustra el proceso en estado estacionario. Un balance de moles para el componente i muestra que



$$F\ X_{Fi} = Lx_i + Vy_i$$

donde F se refiere a los moles de líquido que se evaporaran, L a los moles de líquido en equilibrio y Va los moles de vapor en equilibrio. La introducción de $y_i = K_i x_i$ en la ecuación da:

$$F\ x_{Fi} = L\left(\frac{y_i}{k_i}\right) + V\ y_i$$

$$y_i = \frac{F\ x_{F_1}}{\frac{L}{k_i} + (F - L)} = \frac{x_{F_1}}{1 - \frac{L}{F}\left[1 - \frac{1}{k_i}\right]}$$

donde L/F es la fracción de líquido que se forma durante la vaporización. En consecuencia, como $\sum y_i = 1$, después de sumar las y_i debemos resolver la siguiente ecuación:

$$1 = \sum_{i=1}^{n} \frac{x_{F_1}}{1 - \frac{L}{F}\left[1 - \frac{1}{k_i}\right]}$$

para L/F (>O). Hay muchos programas para computadora que resuelven el problema de la vaporización instantánea.

Si usamos las ecuaciones anteriores, podremos preparar diagramas como las figuras de equilibrio para mezclas binarias.

Las ecuaciones anteriores no son las únicas formulaciones con que se realizan cálculos de vapor-líquido. Por ejemplo, en el caso del cálculo del punto de burbuja, una ecuación equivalente es

$$ln \sum_{i=1}^{n} k_i x_i = 0$$

y otra ecuación equivalente sería

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{x_{F_1}(k_i - 1)}{(k_i - 1)\left(\frac{V}{F}\right) + 1}$$

Al seleccionar la forma específica de la ecuación que usará para sus cálculos de equilibrio, deberá escoger un método de resolución de la ecuación que tenga características de convergencia deseables. La convergencia a la solución deberá:

1) Llevar a la raíz deseada si la ecuación tiene múltiples raíces.

2) Ser estable, es decir, acercarse a la raíz deseada asintóticamente, no por oscilaciones.

3) Ser rápida, y no hacerse más lenta conforme se aproxima a la solución.

Problema 1

Se tiene una mezcla ideal con la siguiente composición: 20 % mol n-Hexano, 50 % mol Benceno y 30 % mol Tolueno.Determinar:

a) La presión de Punto de Rocío de la mezcla a 150 °F.

b) La temperatura de Punto de Rocío de la mezcla a 85 psia.

c) El Punto de Burbuja de la mezcla a 70 psig (Presión Barométrica 780 mm Hg).

d) La presión en el Punto de Burbuja si la mezcla esta a 150 °F.

Solución:

a) Presión de Punto de Rocío de la mezcla a 150 °F.

La presión en el Punto de Rocío es la presión a la cual el primer vapor comienza acondensar a 150 °F. La mezcla se asume toda vapor y la composición del condensado es determinada por:

$$1 = p_{tot} \sum_{i=1}^{n} \frac{y_i}{p_i^*} \qquad\qquad \frac{1}{p_{tot}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{y_i}{p_i^*}$$

Al asumir que se tiene una mezcla ideal, se puede usar la Ecuación de Antoine para determinar la presión de vapor de los componentes puros (p_i^*):

$$ln(p^*) = A - \frac{B}{C+T}$$
$$T = 150^oF = 338,6K$$

	A	**B**	**C**	P_i^*	y_i	y_i/P_i^*
n-Hexano	15,8366	2697,55	-48,78	684,67	0,20	2,921 x 10^{-4}
Benceno	15,9008	2788,51	-52,36	472,93	0,50	1,057 x 10^{-3}
Tolueno	16,0137	3096,52	-53,67	171,75	0,30	1,747 x 10^{-3}
						3,096 x 10^{-3}

$$\frac{1}{p_{tot}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{y_i}{p_i} = 3,096x10^{-3}$$
$$p_{tot} = 333\ mm\ Hg$$

b) La temperatura en el Punto de Rocío de la mezcla a 85 psia.

La Temperatura del Punto de Rocío es la temperatura a la cual el primer vapor comienza a condensar a 85 psia. Para una solución ideal a 85 psia (4935 mm Hg) la relación a usar es:

$$\frac{1}{p_{tot}} = \sum_{i=1} n \frac{y_i}{p_i^*}$$
$$p^* = exp\left[A - \frac{B}{C+T}\right]$$
$$\frac{1}{4394,6} = \left[\frac{0,2}{e^{[15,8366 - \frac{2697,55}{-48,78+T}]}} + \frac{0,5}{e^{[15,9008 - \frac{2788,51}{-52,36+T}]}} + \frac{0,3}{e^{[16,0137 - \frac{3096,52}{-53,67+T}]}}\right]$$

Se resolverá para T mediante el método de ensayo y error para obtener:

T = 500 K $\qquad$ P_T = 13105 mm Hg

T = 425 K $\qquad$ P_T = 3842 mm Hg

T = 435 K $\qquad$ P_T = 4321 mm Hg

Donde T ≈ 435 K

c) La temperatura en el Punto de Burbuja de la mezcla a 70 psig (Presión Barométrica 780 mm Hg).

La Temperatura del Punto de Burbuja a una presión dada es la temperatura a la cual la presión de vapor de la mezcla iguala la presión total, y en este momento la primera parte del líquido se convierte en vapor. La mezcla se asume toda líquida y la composición de vapor se asume en equilibrio con el líquido. La relación usada bajo estas suposiciones para un líquido ideal es:

$$p_T = \sum_{i=1}^{n} p_i^* x_i$$

$$70\ psi \frac{760,0\ mm\ Hg}{14,696\ psia} = 3619\ mm\ de\ Hg$$

$$p_t = 3619 + 780 = 4399\ mm\ de\ Hg\ abs$$

$$4399 = \left[0,20e^{[15,8366-\frac{2697,55}{-48,78+T}]} + 0,5e^{[15,9008-\frac{2788,51}{-52,36+T}]} + 0,3e^{[16,0137-\frac{3096,52}{-53,67+T}]}\right]$$

Al resolver por ensayo y error se obtiene:

T = 400 K $\qquad$ P_T = 2372 mm Hg

T = 425 K $\qquad$ P_T = 4070 mm Hg

T = 430 K $\qquad$ P_T = 4496 mm Hg

Donde T ≈ 429 K

d) Presión de Punto de Burbuja de la mezcla a 150 °F

La presión en el Punto de Rocío a 150 °F (338.6 K) es la presión a la cual el primer líquido comienza a vaporizar cuando el vapor y el líquido están en equilibrio. Para un líquido ideal:

$$p_T = \sum_{i=1}^{n} p_i^* x_i$$

	A	**B**	**C**	P_i^*	y_i	y_i/P_i^*
n-Hexano	15,8366	2697,55	-48,78	684,67	0,20	136,93
Benceno	15,9008	2788,51	-52,36	472,93	0,50	236,47
Tolueno	16,0137	3096,52	-53,67	171,75	0,30	51,53
						424,90

$$P_t = 425\ mm\ Hg$$

Problema 2

Un depósito de vaporización instantánea se alimenta con una mezcla líquida de 42 % molar de propano, y 58 % molar de etano. En el depósito se reduce la presión y se separan corrientes de L y V. El sistema está a 305 K y ha de vaporizar 40 % molar de líquido suministrado. ¿Cuál es la presión a la que debe operar el depósito? ¿Cuáles son las composiciones en el equilibrio?

Solución

T= 305K

P= ?

z_1 = 0,58

z_2 = 0,42

Asumiendo: B.C.= 100 kgmol de Alimentación

V = 40 kgmol

Podemos establecer los límites de la P, con el cálculo de Presión de burbuja y cálculo de Presión de rocío.

Presión de Burbuja: se aplica la condición de la ecuación

$$1 = \sum k_i x_i$$

Asumiendo la alimentación como la composición de la fase líquida nos queda:

$z_1 = x_1$ = 0,58

$z_2 = x_2$ = 0,42

Asumiremos valores de Presión de burbuja hasta que se cumpla la condición de la ecuacion mostrada arriba.

Asumiendo P = 2800 kPa. Con la presión asumida y la T dada, se traza una línea entre la P y T en el nomograma, que corte cada una de las líneas de las constantes del etano y propano. Las constantes de equilibrio se leen directamente de la figura (Nomograma de Depriester)

Tabla 5.1: P = 2800 kPa Condición de Burbuja

Componente	K_i	z_i	$K_i * x_i$
C2	1,5	0,58	0,87
C3	0,52	0,42	0,2184

$$1,0884 = \sum k_i x_i$$

La condición de la ecuación no se cumple, se debe asumir un nuevo valor de P, que disminuya la constante de equilibrio, para así disminuir la sumatoria.

Observando el nomograma, para que disminuya la constante de equilibrio debe aumentar la presión. Asumiendo otro valor de P:

Tabla 5.2: P = 3000kPa Condición de Burbuja

Componente	K_i	z_i	$K_i * x_i$
C2	1,38	0,58	0,8004
C3	0,49	0,42	0,2058

$$1,0062 = \sum k_i x_i$$

Como se cumple la condición, la presión de burbuja es 3000 kPa.

Presión de Rocío

Asumiendo las z_i = y_i, tenemos que:

z_1 = x_1 = 0,58

z_2 = x_2 = 0,42

Asumimos valor de P, hasta que se cumpla la condición.

$$1 = \sum_{i=1}^{n} \frac{y_i}{k_i}$$

Tabla 5.3: P = 2500kPa Condición de Rocío

Componente	K_i	z_i	y_i/K_i
C2	1,70	0,58	0,34
C3	0,58	0,42	0,72

$$1,06 = \sum_{i=1}^{n} \frac{y_i}{k_i}$$

La condición no se cumple, se asume un nuevo valor de P. Para disminuir la sumatoria, se debe incrementar el valor de K_i , para que esto ocurra, observemos la Figura, se debe disminuir la P.

Asumiendo un nuevo valor de 2300 kPa se tiene:

Nomograma de DePriester: La Figuras 5.4 y 5.5, muestran un nomograma para valores de K de hidrocarburos ligeros como funciones de T y P.

Tabla 5.4: P = 2300kPa Condición de Rocío

Componente	K_i	z_i	y_i/K_i
C2	1,80	0,58	0,32
C3	0,62	0,42	0,68

Como se cumple la condición la presión de rocío es 2300 kPa.

La presión del sistema, es la incógnita del problema, debe estar entre la presión de burbuja y la de rocío para que se vaporice el 40 % de la alimentación.

Para determinar la P del sistema, se deben asumir valores de P, hasta que se cumpla la ecuación de vaporización instantánea.

$$1 = \sum \frac{y_i k_i}{1 + V(k_i + 1)}$$

Asumiendo P = 2700 kPa

Se leen las constantes de equilibrio en el nomograma, a la presión de 2700 kPa y la temperatura del sistema 31,85 ^{o}C.

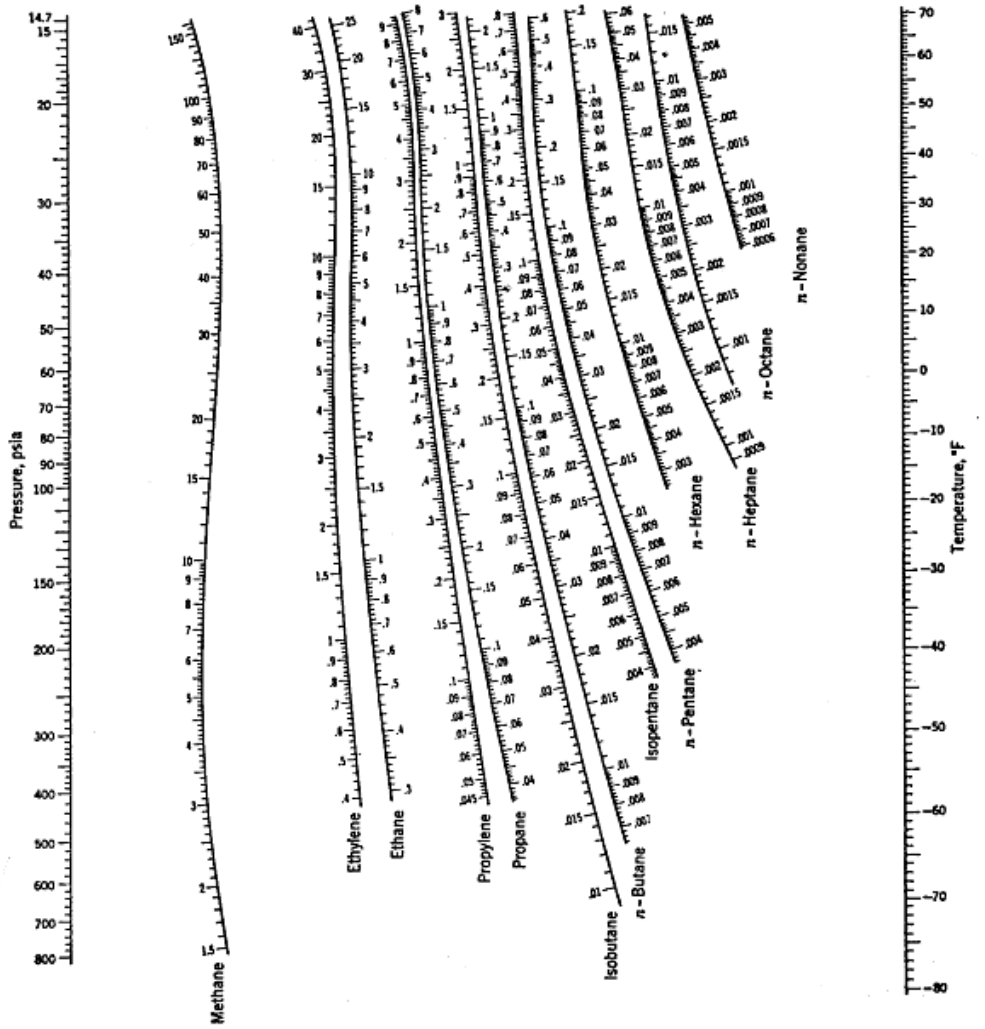


Figura 5.4: Distribution coefficients $(K = y/x)$ in light hydrocarbon system, low-temperature range. [*C.L. Depriester, Chemical Eng. Progr. Symposium Ser.*, 49(7), 1 (1953).]

Tabla 5.5: P = 2700kPa Vaporización

Componente	K_i	z_i	y_i/K_i
C2	1,51	0,58	0,727
C3	0,52	0,42	0,271

Ya que:

$$0.998 = \sum \frac{y_i k_i}{1 + V(k_i + 1)} \qquad \text{La presión del sistema es 2700 kPa.}$$

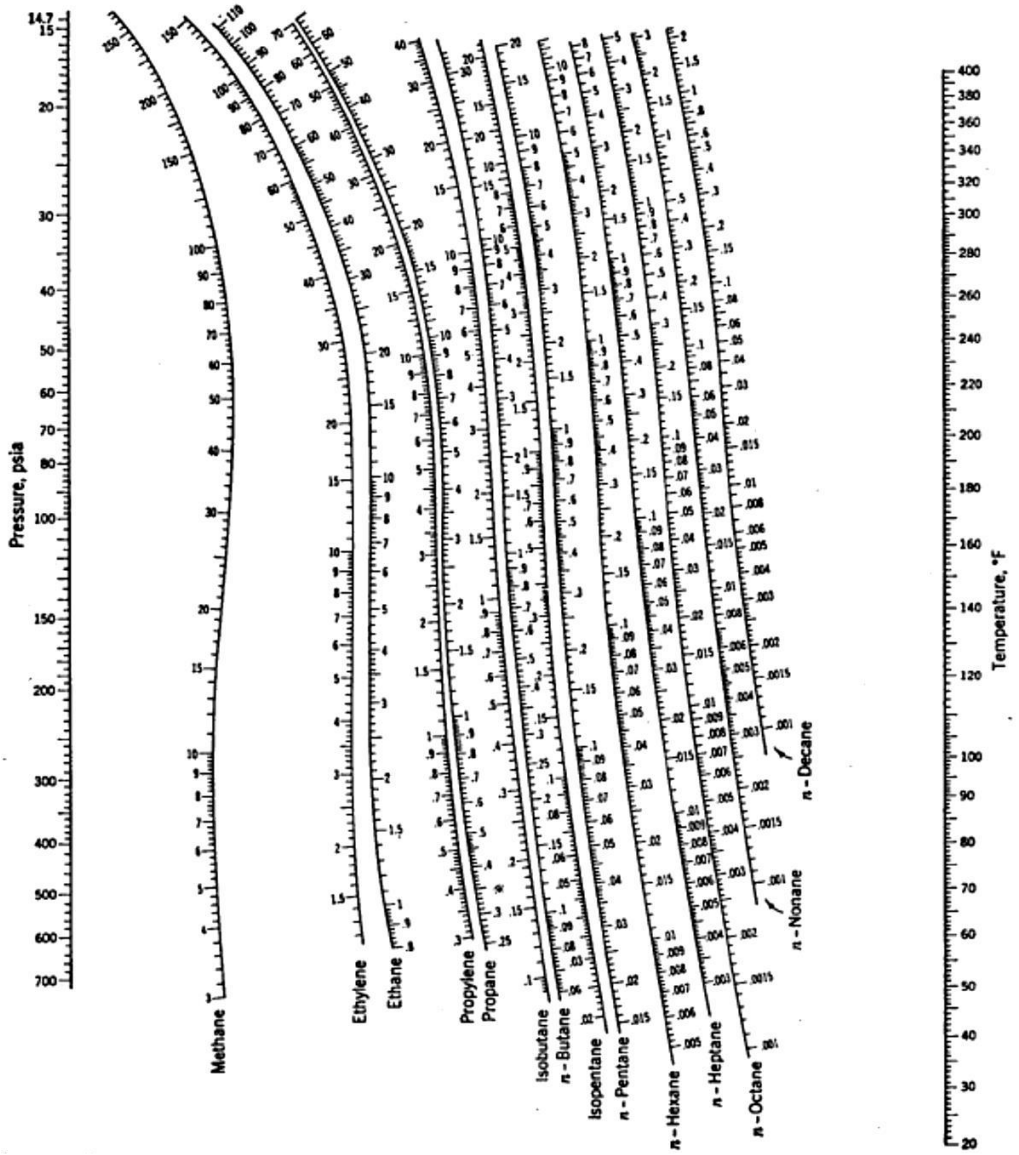


Figura 5.5: Distribution coefficients $(K = y/x)$ in light hydrocarbon system, high-temperature range. [*C.L. Depriester, Chem. Eng. Progr. Symposium Ser.*, 49(7), 1 (1953).]

5.4. SOLUBILIDAD Y SATURACIÓN Y DATOS DE SOLUBILIDAD

La **solubilidad** es una medida que indica la facilidad que tienen unas sustancias para disolverse en otras. Esta capacidad de disolverse tiene un máximo a partir del cual el soluto no consigue mantenerse en el seno del disolvente. En este máximo, la disolución está saturada. En una disolución saturada, el soluto disuelto está en equilibrio con el soluto sin disolver.

Los gases se pueden mezclar entre ellos en cualquier proporción. Los líquidos si son miscibles también. Pero en las disoluciones de sólidos en líquidos, existe un valor máximo de concentración a partir del cual ya no es posible disolver más soluto.

Una disolución **saturada** es la que no admite más soluto.

En las disoluciones de sólidos en líquidos al aumentar la temperatura de la disolución es posible aumentar la solubilidad. En las disoluciones de gases en líquidos, el aumento de la temperatura disminuye la solubilidad, es decir la solubilidad de las sustancias depende de la temperatura, por ello al expresar la solubilidad debemos indicar la temperatura (normalmente 25 ^{o}C) a la que corresponde ese dato.

La solubilidad es la concentración de la disolución saturada. Se suele expresar en gramos del soluto por cada 100 cm^3 de disolvente. Si la queremos expresar en g soluto / l de disolvente deberemos multiplicar la anterior por diez.

La influencia de la temperatura en la solubilidad se refleja en las curvas de solubilidad.

Las curvas de solubilidad representan la concentración a la que el soluto se encuentra saturado. Se representa en el eje de abscisas (eje de las X) la temperatura, y en el eje de ordenadas (eje de las Y) la solubilidad (concentración en gramos de soluto por cada 100 cm^3 de agua o concentración en gramos de soluto por litro de disolvente).

El unico solido que no aumenta su solubilidad con la temperatura es el $Ce_2(SO_4)_3$, cuya solubilidad disminuye al aumentar la temperatura, a continuación veremos algunas curvas de solubilidad.

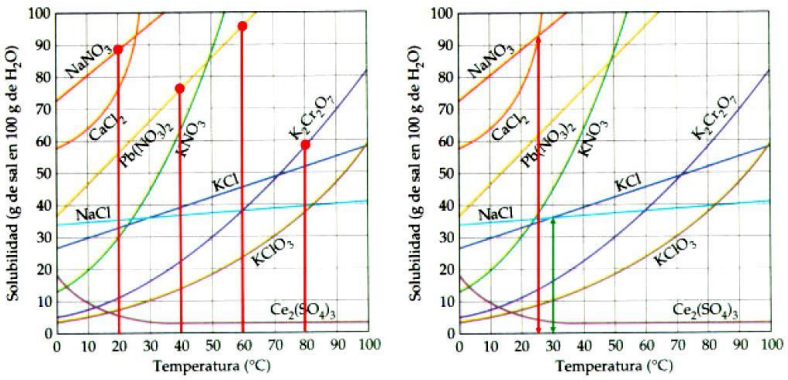


Figura 5.6: (a) Curvas de solubilidad (b) Representación de solubilidades

Como puede verse, de las sales representadas, y en el rango de temperaturas y solubilidades representadas en la figura 5.6 (a), a 20°C la más soluble es el $NaNO_3$; a 40°C el $Pb(NO_3)_2$; a 60°C también el $Pb(NO_3)_2$; y a 80°C el $K_2Cr_2O_7$.

Aproximadamente a 25°C, que es la temperatura a la que $NaNO_3$ y el Ca_2Cl ambas curvas se cruzan en la figura 5.6 (b).

En la figura 5.6 (b) al comparar las solubilidades del cloruro de sodio (NaCl) y del cloruro de potasio (KCl) en todo el rango de temperaturas, hasta los 30°C es más soluble el NaCl, ya que, hasta esa temperatura, la curva del NaCl queda por encima de la del KCl. A los 30°C se cruzan ambas curvas y, por lo tanto, ambos presentan la misma solubilidad. A partir de esa temperatura la curva del KCl queda por encima, por lo que éste es el más soluble.

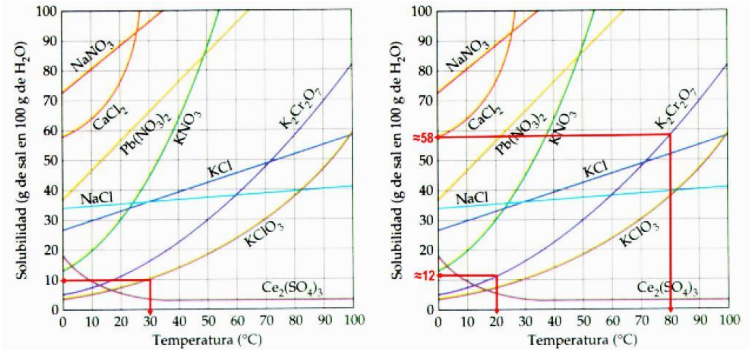
Mediante esta gráfica podemos determinar la cantidad de clorato potásico ($KClO_3$) que habrá que mezclar con 50 g de agua para obtener una disolución saturada a 30ºC. En figura 5.7(a) se puede ver que a 30ºC se pueden disolver 10 g de $KClO_3$ en 100g de H_2O. En 50g habrá que mezclar 5 gramos.

Una disolución saturada de dicromato potásico ($K_2Cr_2O_7$) a 80ºC se enfría hasta los 20ºC. ¿Qué cantidad de sal precipitará?

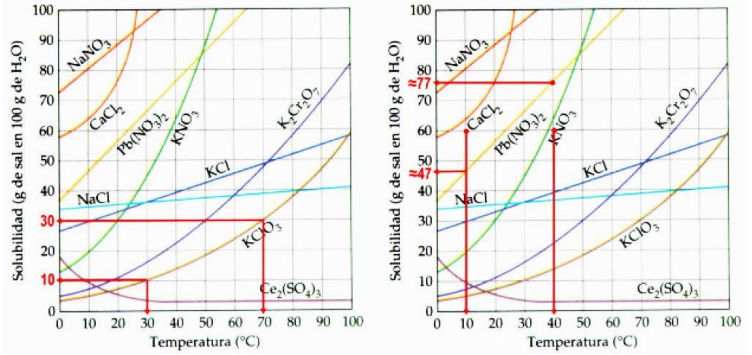
Precipitarán unos 46 gramos de dicromato potásico (58 - 12). Como puede verse en la figura 5.7(b),58 g es la máxima cantidad que puede disolverse a 80ºC y 12g es a los 20ºC. Desde 12 hasta 58, habrá 46 g que ya no pueden permanecer disueltos.

Tenemos una disolución saturada de clorato potásico ($KClO_3$) a 30ºC y la calentamos hasta los 70ºC. ¿Qué cantidad habrá que agregar a la disolución para saturarla de nuevo?. La disolución saturada de clorato potásico a 30ºC contendrá 10 g de la sal como se ve en la figura 5.7(c). A los 70ºC, en cambio, admitirá 30 g hasta saturarse. Por lo tanto habrá que añadir 20 gramos (30 - 10).

Si enfriamos una disolución formada por 120 g de nitrato plumboso ($Pb(NO_3)_2$) y 200 g de agua desde los 40 hasta los 10ºC que sucederá. A 40ºC estará por debajo del punto de saturación como se ve en la figura 5.7(d), ya que hay 60 g por cada 100 g de H_2O (120 g en 200 g de H_2O) y puede admitir hasta 77 aproximadamente. Sin embargo a 10ºC estará por encima del punto de saturación, que ahora se sitúa en los 47 g. Por tanto habrá un exceso de $Pb(NO_3)_2$ de 13 g (60 - 47) por cada 100 g de H_2O que precipitará. En total, por lo tanto, precipitarán 26 g de $Pb(NO_3)_2$ puesto que hay 200 g de H_2O.



(a) (b)



(c) (d)

Figura 5.7: Curvas de solubilidad

En la figura 5.8 al comparar la solubilidad de los gases vemos que para cualquier temperatura el gas más soluble es el metano (CH_4), seguido del oxígeno (O_2), a continuación el monóxido de carbono (CO) y, por último, el menos soluble es el helio (He).

También vemos que la solubilidad del O_2 en función de la temperatura disminuye con el incremento de la temperatura. En todos los gases representados la solubilidad disminuye a medida que aumenta la temperatura.

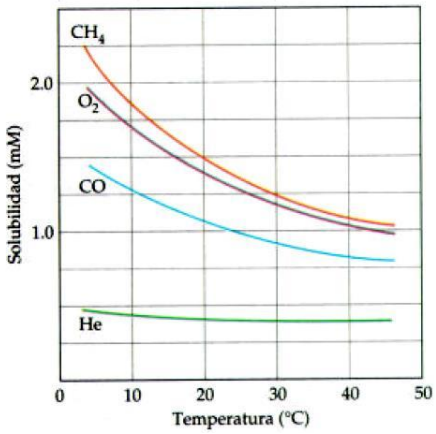


Figura 5.8: Solubilidad de Gases

Tabla 5.6: Solubilidad de materiales inorgánicos en DMSO

Solubilidad, Gramos/100 cc DMSO			Solubilidad, Gramos/100 cc DMSO		
Material	25°C	90-100°C	Material	25°C	90-100°C
Sulfato de aluminio ($I8H_2O$)	Insoluble	5	Nitrato de amonio	80	
Cloruro de aluminio	Reacciona		Tiocianato de amonio amónico	30	
Borato de amonio amónico ($3H_20$)	10		Nitrato bárico	1	
Carbonato amónico (H_2O)	1		Nitrato de berilio ($4H_2O$)	10	
Cloruro amónico	Insoluble	10	Tricloruro de bismuto	1	
Cromato amónico	1		Acido bórico[8]	45	
Dicromato de amonio	50		Bromo	Reacciona	
Cloruro de cadmio[b]	20		(Cloruro potásico)	0.2	
Yoduro de cadmio	30		Cianuro potásico	1	2
Cloruro calcico	Insoluble		Hidróxido potásico	0.013	
Dicromato calcico (3HaO)[6]	50		Yoduro potásico	20	20
Nitrato cálcico($4H_20$)	30		Nitrato potásico	12	
Nitrato amónico cérico	1		Nitrito potásico	2	
Cloruro cobaltoso	30	Mise. p.f. 86°	Perclorato potásico[0]	38	
Acetato cúprico(H_20)	Insoluble	6	Tiocianato potásico	20	50

Bromuro cúprico[b]	1	20@150°C	Cloruro de plata	<0.01	
Cloruro cúprico($2H_20$)	Insoluble	27	Yoduro de plata	<0.01	
Sulfato cúprico ($5H_2$)	<0.01		Nitrato de plata	130	180
Yoduro cuproso	1 at 30°C		Sulfato sódico	<0.01	
Sulfato amónico férrico	Insoluble	Mise. m.p.	Azida sódica	<1.0	1.6
Cloruro férrico	30	90	Cloruro sódico	0.4	
Cloruro ferroso	30	90	Cianuro sódico	1	10
Cianuro sódico	5		Dicromato sódico($2H_2O$)[c]	12	
Yodo	>100		Hidróxido sódico	0.035	
Cloruro de plomo[b]	10		Yodo sódico	30	
Nitrato de plomo	20	60	Nitrato sódico	20	
Bromuro de litio	31.4		Sodium nitrite	20	
Cloruro de litio	10.2		Perclorato sódico[0]	24.2	
Dicromato de litio($2H_20$)c	10		Tiocianato sódico	1	
Yodo de litio	41.1		Cloruro estánnico	25	
Nitrato de litio	10		Cloruro estannoso($2H_20$)	40	
Perclorato de litio	31.5		Bromuro de estroncio	5	
Cloruro magnésico	1.0		Cloruro de estroncio	10	
Nitrato magnésico ($6H_2O$)	40		Bicloruro de azufre	Reacciona violentamente	
Cloruro manganoso	20		Monocloruro de azufre	Reacciona violentamente	
Acetato mercúrico	100		Hexacloruro de tungsteno	5	
Bromuro mercúrico	90		Nitrato de uranillo	30	
Yodo mercúrico	100		Cloruro de vanadio		1
Sulfato mercúrico	<0.01		Acetato de cinc	>1Q0	
Bromuro de molibdeno	1		Cloruro de cinc	30	
Cloruro de niquel	60		Nitrato de cinc	55	
Nitrato de niquel	60		Sulfato de cinc	<0.01	
Bromuro potásico	6.5				
a) @20.3° b)reacción posible c) no recomendada debido a consideraciones de seguridad					

5.5. BALANCE DE MATERIA EN CRISTALIZACIÓN Y FILTRACIÓN

5.5.1. CRISTALIZACIÓN

La cristalización es un proceso físico-químico en el cual se van formando compuestos sólidos a partir de una solución inicial que se va saturando. Esta saturación permite la síntesis de cristales, y su formación depende principalmente del tipo de solvente que se utilice, la temperatura, presión de trabajo, la velocidad de agitación y la acidez libre en el medio ácido.

La formación de cristales requiere de una serie de etapas consecutivas que permitan la visualización final del sólido, etapas que se describen a continuación.

Etapa de sobre saturación de la solución

Se ha podido observar que un compuesto sólido se puede formar por cristalización desde una solución acuosa cuando se excede el límite de solubilidad en las condiciones de concentración de solutos y de temperatura a las que se encuentra.

Esto se debe a que la sobre saturación genera que la solubilidad de los sólidos vaya disminuyendo.

Etapa de nucleación de cristales

Posterior a la sobresaturación de la solución, es necesario contar con pequeñas partículas que actúen como núcleos o semillas, en torno a las cuales los sólidos puedan comenzar a crecer.

Existen casos en que no es necesario utilizar semillas, sino que la solución sobresaturada genera cristales a medida que aumenta el tiempo de reacción.

La etapa de nucleación se puede dividir en mecanismos primarios y secundarios, y, a su vez, la nucleación primaria puede desarrollarse tanto de forma homogénea como heterogénea.

La nucleación primaria homogénea y su mecanismo exacto es aún desconocido, pues se basa en la formación de sólidos a partir de una solución sobresaturada sin la presencia de partículas extrañas, donde los sólidos formados deben coagular y a su vez resistir la tendencia a la resolución.

Por otro lado la nucleación primaria heterogénea se lleva a cabo gracias a la presencia de partículas extrañas a la solución sobresaturada. Este tipo de cristalización ocurre comúnmente.

La nucleación secundaria es generalmente heterogénea, pues la solución que se encuentra sobresaturada es inoculada con partículas del material del cual se buscan cristales. Así se mantiene el control sobre las características finales de los cristales obtenidos, especialmente relacionado con el tamaño de los cristales finales.

Etapa de crecimiento de los cristales

La etapa final de la cristalización consiste en el crecimiento de los cristales. Aquí cada núcleo comienza a crecer y se empiezan a observar cristales en la solución. La forma de los cristales depende de su hábito cristalino, es decir, la apariencia externa de los cristales o el tamaño relativo de las caras del cristal, hábito que es el resultado de las diferentes velocidades de crecimiento de las caras del cristal, y que finalmente da las principales propiedades del cristal, pues cristales con hábitos muy alargados y delgados son más frágiles que aquellos con hábitos más grandes.

5.5.2. FILTRACIÓN

La filtración es la separación de una mezcla de sólidos y fluidos que incluye el paso de la mayor parte del fluido a través de un medio poroso, que retiene la mayor parte de la partículas sólidas contenidas en la mezcla. El medio filtrante es la barrera que permite que pase el líquido, mientras retiene la mayor parte de los sólidos, los cuáles se acumulan en una capa sobre la superficie o filtro (torta de filtración), por lo que el fluido pasará a través del lecho de sólidos y la membrana de retención.

El sistema de filtración va desde un simple colado hasta separaciones altamente complejas. El fluido puede ser un líquido o un gas; las partículas sólidas pueden ser gruesas o finas, rígidas o plásticas, redondas o alargadas, individuales separadas o agregados. La suspensión de alimentación puede llevar una fracción elevada o muy baja de sólidos.

En algunos casos, la separación de las fases debe ser prácticamente completa; en otros se desea un separación parcial, por lo que se han desarrollado numerosos filtros para las diferentes situaciones.

Filtración a presión constante

Para una suspensión determinada en un filtro dado, la variable principal que se puede controlar, es la caída de presión, en la que si la diferencia de ésta es constante, la velocidad de flujo es máxima al comienzo de la filtración y disminuye continuamente hasta el final; este método es llamado filtración a presión constante.

Filtración a velocidad constante

Al comienzo de la filtración, con frecuencia la resistencia del filtro es grande comparada con la resistencia de la torta, ya que ésta es delgada. En estas circunstancias la resistencia ofrecida al flujo es prácticamente constante, por lo que la filtración transcurre a velocidad casi constante. A través de relaciones matemáticas se puede obtener la cantidad de líquido que ha pasado por el filtro, la caída de presión necesaria para obtener cualquier velocidad de flujo deseada y además determinar la resistencia de la torta de filtración.

Compresibilidad de la torta

En las tortas obtenidas por filtración, la resistencia específica de ésta varia con la caída de presión producida a medida que ésta se deposita; esto se explica porque la torta se va haciendo más densa a medida que la presión se hace mayor y dispone por ello de menos pasadizos con un tamaño menor para que pase el flujo. Este fenómeno se conoce como compresibilidad de la torta.

Tortas muy compresibles serán aquellas que derivan de sustancias blandas y floculentas, en contraste con sustancias duras y granulares, como el azúcar y los cristales de sal, que se ven muy poco afectados por la presión (la velocidad es independiente de la presión).

Medios filtrantes

La resistencia del material del filtro y la de la capa preliminar de la torta, se combinan en una sola resistencia, que se conoce como resistencia del filtro y que se expresa en función de un espesor ficticio de torta de filtración; este espesor se multiplica por la resistencia específica de la torta, obteniéndose así el valor numérico de la resistencia del filtro.

El medio de filtración de cualquier filtro debe cumplir con los siguientes requisitos:

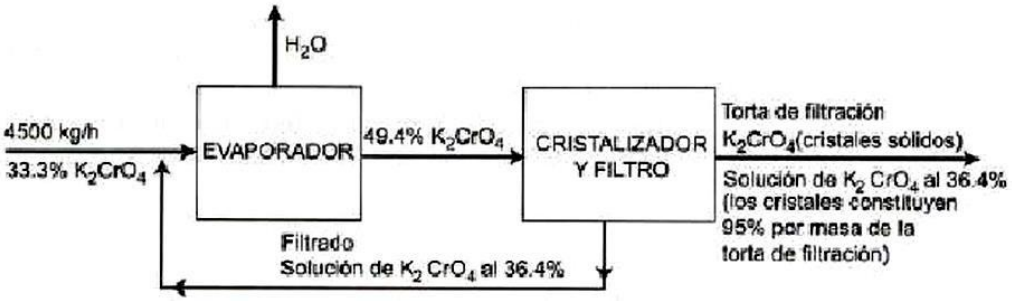
1. Retener los sólidos que han de filtrarse con una rapidez después que se inicie la alimentación, dando un filtrado suficientemente claro.
2. No debe obstruirse, o sea velocidad baja de arrastre de sólidos dentro de sus intersticios.
3. Resistencia mínima al flujo de filtrado.
4. Ser químicamente resistente
5. Tener la suficiente consistencia física para resistir las condiciones del proceso (o sea suficiente resistencia para sostener la presión de filtración)
6. Resistencia aceptable del desgaste mecánico.
7. Permitir la descarga limpia y completa de la torta formada.
8. Capacidad para conformarse mecánicamente al tipo de filtro con el cuál se utilizará.
9. Tener un costo que sea amortizado por los gastos del proceso (costo mínimo).

Ejemplos de medios filtrantes son: telas, tejidos de fibras, fieltro o fibras no tejidas, sólidos porosos o perforados, membranas poliméricas o sólidos particulados en forma de un lecho permeable.

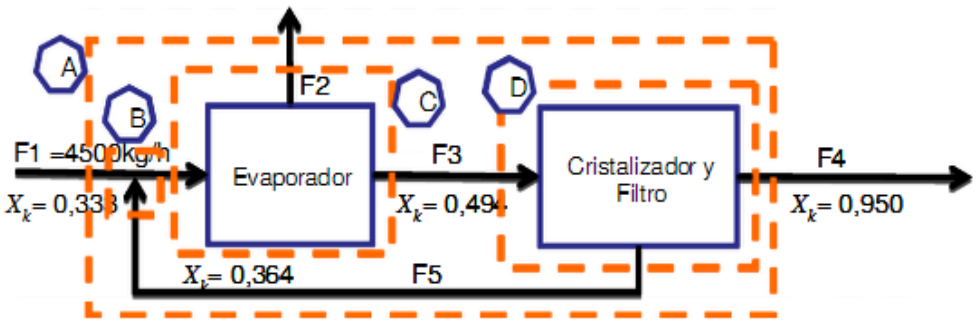
5.5.3. BALANCES DE MATERIA EN CRISTALIZACIÓN Y FILTRACIÓN

Problema 1

A continuación se muestra el diagrama de flujo de un proceso en estado estacionario para recuperar cromato de potasio cristalino (K_2CrO_4) de una solución acuosa de sal.



En el proceso, 4500 kg/h de una solución que contiene un tercio de K_2CrO_4 se unen a una corriente de recirculación con 36,4 % de K_2CrO_4, y se alimenta la corriente combinada a un evaporador. La corriente concentrada que sale del evaporador contiene 49,4 % de K_2CrO_4; dicha corriente se alimenta a un cristalizador en el cual se enfría(haciendo que los cristales de K_2CrO_4 se separen de la solución) y después se filtra. La torta de filtración consta de cristales de filtración y una solución que contiene 36,4 % de K_2CrO_4 por masa; los cristales constituyen 95 % de la masa total de la torta de filtración. La solución que atraviesa el filtro, constituye la corriente de recirculación. Calcule la velocidad de evaporación (agua evaporada), la velocidad de producción de K_2CrO_4 cristalino, las velocidades de alimentación a las que el evaporador y el cristalizador deben estar diseñados y la relación de recirculación (masa recirculada) / (masa de alimentación fresca) Definamos los límites de los diferentes balances de materia que se podrían definir en el diagrama de flujo planteado y definamos todas las corrientes y composiciones, tal y como se presenta en el esquema a continuación.



Tomemos como Base de Calculo: 4500 kg/h F1

Las incógnitas a determinar en el balance de materia son velocidad de evaporación (F2), la velocidad de producción de K_2CrO_4 cristalino (F4), las velocidades de alimentación a las que el evaporador (F6) y el cristalizador (F3) deben estar diseñados y la relación de recirculación (F5/F1).

Balance de Materia en la frontera A del diagrama de flujo:

Balance General:

F1 = F2 + F4 (incógnita: F2 y F4)

$$\Longrightarrow F1 - F4 = F2 \tag{5.3}$$

Balance para el componente k :

$$x_{kF1} * F1 = x_{kF2} * F2 + x_{kF4} * F4 \ (incógnita: \ F2 \ y \ F4) \tag{5.4}$$

Sustituyendo (5.3) en (5.4) y despejando F4, tenemos:

$$\Longrightarrow x_{kF1} * F1_{kF1} = x_{kF2} * (F1 - F4) + x_{kF4} * F4$$
$$F4 = \frac{(x_{kF1} - x_{kF2}) * F4}{(x_{kF4} - x_{kF2})} = \frac{(0,333 - 0,00) * 4500 \ kg/h}{(0,95 - 0,00)} = 1577,4 \ kg/h$$
$$F2 = 4500 \ kg/h - 1577,4 \ kg/h = 2922,6 \ kg/h$$

Balance de Materia en la frontera D del diagrama de flujo:

Balance General:

$$F3 = F4 + F5 \ (incógnita: \ F3 \ y \ F5) \tag{5.5}$$

Balance para el componente k:

$$x_{kF3} * F3 = x_{kF4} * F4 + x_{kF5} * F5 \ (incógnita: \ F3 \ y \ F5) \tag{5.6}$$

Sustituyendo (5.5) en (5.6) y despejando F5 (Recirculación), tenemos:

$$\Longrightarrow x_{kF3} * (F4 + F5) = x_{kF4} * F4 + x_{kF5} * F5$$
$$F5 = \frac{(x_{kF4} - x_{kF3}) * F4}{(x_{kF3} - x_{kF5})} = \frac{(0,95 - 0,494) * 1577,4 \ kg/h}{(0,494 - 0,364)} = 5533,04 \ kg/h$$
$$F3 = 1577,4 \ kg/h + 5533,0 \ kg/h = 7110,4 \ kg/h \ (alimentación \ al \ cristalizador)$$

Relación de Recirculación = (masa recirculada)/(masa de alimentación fresca)

$$Relación \ de \ Recirculación = \frac{F5}{F1} = \frac{5533,0 \ kg/h}{4500,0 \ kg/h} = 1,23 \ kg \ recirculación/kg \ alim. \ fresca$$

Balance de Materia en la frontera B del diagrama de flujo:

Balance General:

F1 + F5 = F6 (incógnita: F6)

$\Longrightarrow$ F6 = 4500 kg/h + 5533 kg/h = 10033 kg/h (Alimentación al Evaporador)

De esta manera, ya está resuelto el balance de materia, al conseguir todas las incógnitas.

Problema 2

Si se disuelven 100 g de Na_2SO_4 en 200 g de H_2O y la solución se enfría hasta obtener 100 g de $Na_2SO_4.10H_2O$ encontrar:

a) Composición de la solución residual (“licor madre”)

b) Gramos de cristales que se recuperan por 100 g iniciales de la solución.

Solución

Datos

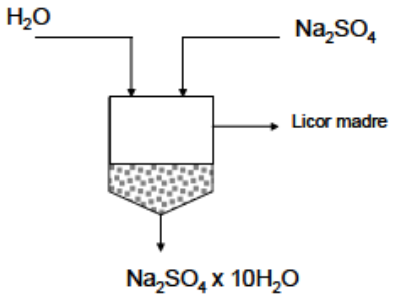
masa (H_2O) = 200 g

masa (Na_2SO_4) = 100 g

masa ($Na_2SO_4.10H_2O$) = 100 g

PM ($Na_2SO_4.10H_2O$) = 322 g/mol

PM (Na_2SO_4) = 142 g/mol



$$322 \text{ g de } Na_2SO_4.10H_2O \rightarrow 142 \text{ g de } Na_2SO_4$$

$$100 \text{ g de } Na_2SO_4.10H_2O \rightarrow x$$

$$x = 44{,}09 \text{ g de } Na_2SO_4$$

Se han utilizado 44,09 g de Na_2SO_4 los cuales pasan al estado sólido, entonces queda en la solución.

$$100 - 44{,}09 = 55{,}91 \text{ g de } Na_2SO_4$$

Igualmente procedemos para el H_2O:

$$322 \text{ g de } Na_2SO_4.10H_2O \rightarrow 180 \text{ g de } H_2O$$

$$100 \text{ g de } Na_2SO_4.10H_2O \rightarrow y$$

$$y = 55{,}9 \text{ g de } H_2O \text{ que pasan a la sal}$$

$$\text{masa } (H_2O) \text{ solución} = 200 - 55{,}9 = 144{,}1 \text{ g}$$

$$\Longrightarrow \text{masa total} = 55{,}91 + 144{,}1 = 200{,}01\text{g}$$

Composición de la solución residual.

Al inicio la fracción en peso viene dada por:

$$\%p/p = 55,91/200,01 = 27,8\,\%$$

Para un peso inicial de 100 g

masa (Na_2SO_4) = 0,3333 x 100 = 33,33 g

masa (H_2O) = 0,6667 x 100 = 66,67 g

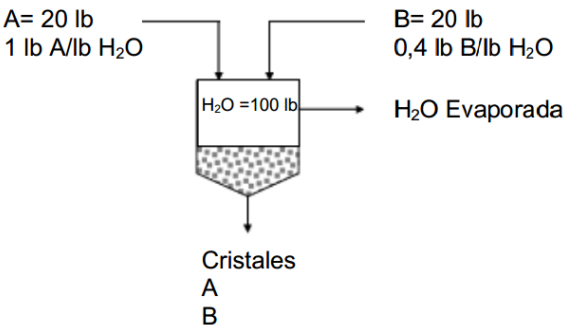
$$300 \text{ g de solución al } 33{,}33\,\% \Longrightarrow 100 \text{ g de cristales}$$

$$100 \text{ g de solución al } 33{,}33\,\% \Longrightarrow z$$

$$z = 100 * 100 / 300 = 33{,}33 \text{ g cristales}$$

Problema 3

Dos sales A y B se disuelven en agua. A la temperatura de experimento la solubilidad de A es 1 lb de A/lb de agua pura, y la de B es 0.4 lb B/lb de agua pura. Puede suponerse que las solubilidades de las dos sales no se afectan mutuamente, es decir, 1 lb de agua disolverá 1 lb de A más 0.4 lb de B. Cuando el agua se evapora, la concentración de la solución se incrementa. Sin embargo, si la concentración alcanza el punto de saturación de cada sal, entonces causará cristalización de la sal, mientras la concentración de la sal en la solución permanece constante en el punto de saturación. Si originalmente, 20 lb de A y 20 lb de B se disuelven en 100 lb de agua y parte del agua es evaporada de la solución, calcular:



a) La cantidad de agua evaporada. b) Peso de la solución final. c) Composición de la solución. d) Cantidad de cada sal cristalizada. Para cada uno de los siguientes casos: 1) 50 % del agua original es evaporada. 2) Se evapora agua hasta reducir el peso total de la solución y cristales hasta el 50 % del valor inicial. 3) Se evapora agua hasta que la solución quede saturada de A, sin cristalización de A. 4) Se evapora agua hasta que la solución remanente (no incluídos los cristales) sea el 50 % del valor original.

Base de Calculo: 100 lb de agua de dilusión

Para el caso 1:

a) H_2O Evaporada = 100 * 0.50 = 50 lb

b) A disuelto en H_2O no evaporada = 20 lb $\Longrightarrow$ Para 20 lb de A se necesita 20 lb de agua, por lo que no sobrepasa la solubilidad de saturación.

B Disuelto en H_2O no evaporada = 20 lb $\Longrightarrow$ Para 20 lb de B se necesita 50 lb de agua.

$$H_2O \text{ de disolución de B} = 20 \text{ lb B} * \frac{1 Lb de H_2O}{0,4 lb de B} = 50 \text{ lb}$$

Por lo tanto B estará saturada en la solución.

Masa de la solución será = 50 lb de H_2O + 20 lb A + 20 lb B = 90 lb

c) Composición de la solución:

$$H_2O = (50 / 90) * 100 = 55,56\,\%$$
$$A = (20 / 90) * 100 = 22,22\,\%$$
$$B = (20 / 90) * 100 = 22,22\,\%$$
$$\text{Total} = 100,00\,\%$$

d) Cantidad de sal cristalizada de A y B = 0 lb

Para el caso 2:

a) El peso de la solución final y cristales es:
   $A + B + H_2O = 20 + 20 + 100 = 140$ lb
   Por lo tanto el 50 % de solución será:
   140 x 0,5 = 70 lb de solución
   Lo que se evapora es el agua que es 70 lb

b) Se prueba si hay cristalización: En la solución hay 100 - 70 = 30 lb H_2O
   Para A = (20 lb A/30 lb H_2O) = 0,66 lb A/lb H_2O No hay cristalización de A.
   Para B = (20 lb B/30 lb H_2O) = 0,66 lb B/lb H_2O Hay cristalización de B.
   La cantidad de B en solución sera:
   B en solución = 0,4 x 30 = 12 lb B
   Se habrá cristalizado = 20 - 12 = 8 lb de B
   El peso de la solución final será: 20 lb A + 12 lb B + 30 lb H_2O = 62 lb solución

c) La composición de la solución final será:

A = 20 lb	32,25 %
B = 12 lb	19,35 %
H_2O = 30 lb	48,38 %
Total = 62 lb	100,00 %

d) Sal cristalizada correspondiente a A = 0 lb.
   Sal cristalizada correspondiente a B = 8 lb

Para el caso 3:

a) Para calcular el agua evaporada se utiliza la solubilidad de A:
   El agua necesaria para saturar a Seria:
   20 lb A x 1 lb H_2O / 1 lb de A = 20 lb H_2O
   Agua evaporada = 100 - 20 = 80 lb

b) Se calcula la cantidad de B disuelta: 20 lb H_2O x 0,4 lb B / lb de H_2O = 8 lb de B en solución
   Peso de la solución final = 20 + 20 + 8 = 48 lb

c) En la solución final hay:

A = 20 lb	41,66 %
B = 8 lb	16,66 %
H_2O = 20 lb	41,66 %
Total = 48 lb	100,00 %

d) Cantidad de A cristalizada = 0 lb
Cantidad de B cristalizada = 20 - 8 = 12 lb

Para el caso 4:

a) Peso de la solución final sin incluir los cristales: 140 lb x 0,5 = 70 lb
Según los resultados de la parte (2) puede suponerse que no hay cristalización de A.
Si Y = fracción en peso de H_2O en la solución.
Balance total de masa:
A + B + H_2O = H_2O evaporada + solución + cristales
Reemplazando:
140 = H_2O evaporada + 70 + cristales

$$70 = H_2O\ evaporada + cristales \tag{5.7}$$

Balance de B:
20 = 0,4 (70 * Y) + cristales

$$20 = 28 * Y + cristales \tag{5.8}$$

Balance de agua:

$$100 = H_2Oevaporada + 70 * Y \tag{5.9}$$

Resolviendo las ecuaciones (5.7), (5.8) y (5.9):

Y = 0,51
H_2O evaporada = 64,3 lb
Cristales de B = 5,7 lb

b) Peso de la solución final = 70 lb

c) Composición de la solución final:
Primero determinaremos la cantidad de B que se encuentra en solución:

B = 20 lb - 5,78 lb = 14,28 lb de B

También determinaremos el agua que queda en solución:

H_2O en solución = H_2O inicial - H_2O evaporada = 100 lb - 64,3 lb = 35,7 lb

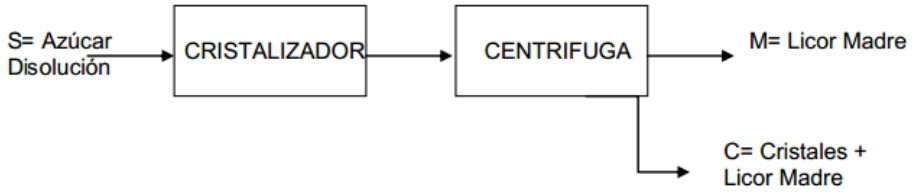
Ahora determinamos la composición:

A = (20/70) x 100 = 28,57 %
B = (14,28/70) x 100 = 20,4 %
H_2O = (35,7/70) x 100 = 51,0 %

d) Sal cristalizada = 5,7 lb de B

Problema 4

Dibujar el diagrama de flujo para un cristalizador en el que entran 100 kg de azúcar concentrado conteniendo un 85 % de sacarosa y 1 % de inerte soluble. Al disminuir la T°, el azúcar cristaliza. Una centrífuga separa los cristales del líquido llamado "licor madre". La corriente de cristales húmedos tiene como 20 % de su peso, un líquido con la misma composición que el licor madre. El licor madre contiene un 60 % de sacarosa en peso. Calcular los flujos y composiciones de todas las corrientes.



La composición de S es: Sacarosa 85 %, Inertes 1 % y Agua 14 %.

La composición de C es: 100 % de Sacarosa: Cristales de Sacarosa 80 % y Licor Madre 20 %

La composición de M es: 60 % de Sacarosa, x de impurezas y 1 - (0,6 + x) de Agua

Base de Calculo: 100 Kg de azúcar en disolución = S

Balance global: E = S

$$S = C + M$$

$$100 = C + M \tag{5.10}$$

Balance parcial de sacarosa:

$$S * (0{,}85) = M* (0{,}6) + C * (0{,}2 * 0{,}6) + C * (0{,}8)$$
$$100 * (0{,}85) = 0{,}6 * M + 0{,}12 * C + 0{,}8\ C$$

$$85 = 0,6 * M + 0,92C \tag{5.11}$$

Tanto en C como en M la composicion de sacarosa del licor madre es la misma.

Resolviendo la ecuación (5.10) y (5.11), tenemos:

$$C = 78 \text{ kg}$$
$$M = 22 \text{ kg}$$

Balance de Impurezas:

$$S * (0{,}01) = M * x + C * (0.2 * x)$$
$$100 * 0.01 = 22 * x + 78 * 0{,}2 * x$$
$$1 = 22 * x + 15{,}6 * x$$

$$1 = 37,6x \tag{5.12}$$

x = 0,0266 $\Longrightarrow$ 2,66 % Impurezas en Licor Madre

% Agua en licor madre = 100 - 60 - 2,66 = 37,34 %

Flujos en el licor madre:

Sacarosa = 22 * 0.60 = 13,2 kg

Inertes = 22 * 0,0266 = 0,5852 kg

Agua = 22 * 0,3734 = 8,2148 kg

Flujos en los cristales:

Licor madre = 78 * 0,20 = 15,60 kg

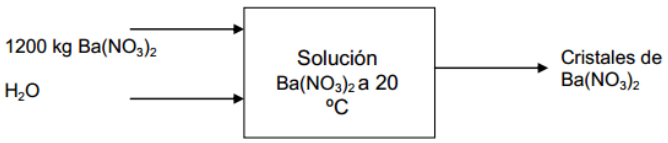
Sacarosa = 15,60 * 0,60 = 9,36 kg

Inertes = 15,60 * 0,0266 = 0,415 kg

Agua = 15,60 * 0,3734 = 5,825 kg

Cristales = 78 * 0,80 = 62,40 kg

Problema 5



1200 kg de $Ba(NO_3)_2$, se disuelven en la cantidad suficiente de agua para formar una solución saturada a 90 ^oC de temperatura, a la cual se tiene la solubilidad de 30,6 gr de $Ba(NO_3)_2$ por 100 gr de agua. La solución luego se enfría a 20 ^oC, temperatura a la cual la solubilidad es de 8,6 gr de $Ba(NO_3)_2$ por 100gr de agua. a) Cuantos kg de agua se requieren para la solución a 90 ^oC y que peso de cristales se obtienen a 20 ^oC. b) Cuantos kg de agua se requieren para la solución a 90 ^oC y que peso de cristales se obtienen a 20 ^oC suponiendo que se utiliza un 10 % de exceso de agua con respecto a la necesaria para la solución a 90 ^oC. c) Cuantos kg de agua se requieren para la solución a 90 ^oC y que peso se obtienena 20 ^oC, suponiendo que el grado de saturación de la solución es de 90 % a 90 ^oC.

Base de Calculo: 1200 kg de $Ba(NO_3)_2$

a) A 90 ^oC:

Si 30,6 g de $Ba(NO_3)_2$ se disuelven en 100 gr de Agua

1200 kg de $Ba(NO_3)_2$ se disuelve en x

$$x = \frac{1200\ Kg * 100\ gr}{30,6\ g} = 3921,57\ Kg\ de\ H_2O$$

A 20 ^oC

Si 8,6 g de $Ba(NO_3)_2$ se disuelven en 100 gr de Agua

x de $Ba(NO_3)_2$ se disuelve en 3921,57 kg de agua

$$x = \frac{3921,57\ Kg * 8,6\ gr}{100\ g} = 337,255\ Kg\ de\ Ba(NO_3)_2$$

Por lo tanto los cristales de $Ba(NO_3)_2$ son:

Cristales de $Ba(NO_3)_2$ = 1200 - 337,255 = 862,745 Kg

b) Agua utilizada = 3921,5 * 1,10 = 4313,65 Kg

A 20 °C

$$Ba(NO_3)_2 = 4313,65\ kg\ de\ agua * \frac{8,6\ gr\ de\ Ba(NO_3)_2}{100\ g\ de\ agua} = 370,97\ kg.$$

Por lo tanto los cristales de $Ba(NO_3)_2$ son:

Cristales de $Ba(NO_3)_2$ = 1200 - 370,97 = 829 Kg

c) A 90 °C

Si 30,6 g de $Ba(NO_3)_2$ / 100 gr de Agua es 100 % de saturación.

x kg de $Ba(NO_3)_2$/100 gr de Agua cuanto es 90 % de saturación x

X = 27,54 gr de $Ba(NO_3)_2$/100 gr de agua

Agua necesaria = 1200 kg de $Ba(NO_3)_2$ * $\frac{100\ g\ de\ agua}{27,584\ gr\ de\ Ba(NO_3)_2}$ = 4357,30 kg

$$Ba(NO_3)_{2\ 20^oC} = 4357,30 * \frac{8,6}{100} = 374,73kg$$

Cristales de $Ba(NO_3)_2$ = 1200 - 374,073 = 825,27 kg

Problema 6

Una solución consistente en 30 % de $MgS0_4$ y 70 % de H_2O se enfría hasta 60 °F. Durante el enfriamiento se evapora 5 % del agua total del sistema. ¿Cuántos kilogramos de cristales se obtendrán por 1000 kg de mezcla original?

Solución:

En el gráfico de concentración temperatura en Operaciones Unitarias de McCabe figura 27.3, la solución al 30 % corresponde a $MgSO_4.7H_2O$ A 60 °F la concentración es de 24,5 % de $MgSO_4$ anhidro y 75,5 % de agua.

Tomando como base: 1000 kg de alimentación.

H_2O = 1000 x 0,70 = 700 kg

Evaporación = 5 % = 700 x 0,05 = 35 kg

PM $MgSO_4$ = 120,4

$MgSO_4.7H_2O$ = 246,5

$MgSO_4.7H_2O$ es la carga inicial = 1 000 x 0,30 (246,5/120,4) = 614 kg

H_2O libre = 1 000 - 614 - 35 = 351 kg de agua

En 100 kg de aguas madres hay 24,5 (246,5 / 120,4) = 50,16 kg $MgSO_4.7H_2O$

100 - 50,16 = 49,84 kg de agua libre

$MgSO_4$*$7H_2O$ en aguas madres:

(50,16 / 49,84) 351 = 353

Cosecha final:

614 - 353 = 261 kg de cristales

5.6. BALANCE DE MATERIA EN EXTRACCIÓN POR SOLVENTES

5.6.1. EXTRACCIÓN POR SOLVENTES

La extracción sólido-líquido consiste en tratar un sólido que está formado por dos o más sustancias con un disolvente que disuelve preferentemente uno de los sólidos, que recibe el nombre de soluto.

La extracción sólido líquido recibe también el nombre de lixiviación, nombre más empleado al disolver y extraer sustancias inorgánicas. Otro nombre empleado es de percolación; en este caso, la extracción se hace con disolvente caliente o a su punto de ebullición. La extracción sólido-líquido puede ser una operación a régimen continuo (paralelo) o a contracorriente, según sea necesario. Muchas sustancias biológicas, así como compuestos inorgánicos y orgánicos,se encuentran como mezclas de diferentes componentes en un sólido. Para separar el soluto deseado o eliminar un soluto indeseable de la fase sólida, el sólido se pone en contacto con una fase líquida. Ambas fases entran en contacto íntimo y el soluto o los solutos se difunden desde el sólido a la fase líquida, lo que permite una separación de los componentes originales del sólido. Cuando la lixiviación tiene por objeto eliminar con agua un componente indeseable de un sólido, el proceso recibe el nombre de lavado. Los equipos utilizados reciben el nombre de extractores, lixiviadores o percoladores. El equipo más sencillo consistiría en un tanque agitado y luego un sedimentador.

La Extracción por Solventes es un proceso de separación que se emplea en metalurgia con tres fines fundamentales: concentrar, purificar y separar los elementos o metales disueltos en la solución rica generada en la etapa de la lixiviación. Esta solución se caracteriza por tener una baja concentración de cobre disuelto, junto con impurezas como, Fe, Cl, Mn, Mg, Na y otros metales disueltos durante el proceso. Esta etapa consiste en el contacto de una fase orgánica que contiene un extractante con una fase acuosa que contiene el metal de interés. El extractante reacciona químicamente con el metal para formar un complejo organo-metal el cual es soluble en la fase orgánica. Las impurezas por lo general no reaccionan con el extractante y se quedan en la fase acuosa. La fase orgánica que contiene el complejo organo-metal es separada de la fase acuosa. El metal es recuperado y concentrado en otra fase acuosa por la reacción química inversa. Además del cobre este proceso se utiliza en la separación por extracción con solventes de Uranio, Molibdeno y Vanadio.

5.6.2. COEFICIENTE DE EXTRACCIÓN

La habilidad del solvente para extraer un metal iónico A, de la alimentación acuosa en determinadas condiciones se conoce como coeficiente de extracción, E_a^o. Este valor mide la fuerza impulsora global de la reacción y es análogo a la constante de equilibrio de una ecuación química ordinaria.

$$E_a^o = \frac{Concentración\ de\ A\ en\ la\ fase\ orgánica}{Concentración\ de\ A\ en\ la\ fase\ acuosa}$$

5.6.3. PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN

La transferencia de un soluto de la fase acuosa a la fase orgánica frecuentemente se expresa cuantitativamente en términos de porcentaje de extracción. El coeficiente de extracción E_a^o , y el porcentaje de extracción están relacionados como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de Extracción} = \frac{100}{1 + \dfrac{V_a}{E_a^{\circ} * V_0}}$$

donde V_a y V_0 son los volúmenes de la alimentación acuosa y orgánica respectivamente. Una relación de volumen igual a la unidad y $E_a^{\circ} = 1$ es equivalente a un 50 % de extracción.

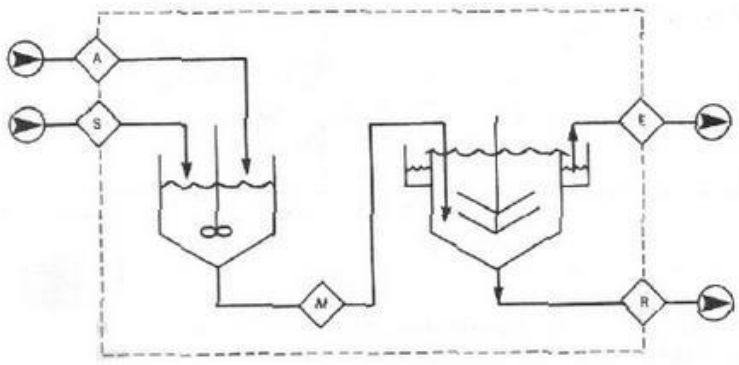
5.6.4. SELECTIVIDAD

La selectividad en la extracción está representada por el llamado factor de separación, que mide la efectividad de un solvente dado para extraer un metal de la alimentación acuosa con respecto a otro. Se calcula mediante la razón de los valores de los dos coeficientes de extracción.

$$\text{Selectividad} = \frac{E_a^{\circ}(A)}{E_a^{\circ}(B)}$$

Donde $E_a^{\circ}(A) > E_a^{\circ}(B)$

5.6.5. BALANCE DE MATERIA



Donde: A son los sólidos, S es el Solvente, M es la mezcla, E es el extracto y R son los refinados o sólidos.

Problema 1

Doscientos cm^3 de una mezcla de acetona-agua que contiene 10,0 % por peso de acetona se combinan con 400,0 cm^3 de cloroformo a 25ºC, y después se dejan separar las fases. ¿Qué porcentaje de acetona se transfiere del agua al cloroformo?

Solución:

Base de Calculo: cantidades dadas

Las densidades de las sustancias puras se se obtienen de tablas;

Acetona (A)	0,792 g/cm^3
Cloroformo (C)	0,489 g/cm^3
Agua(W)	1,000 g/cm^3

Como no se dispone de los datos de densidad para el sistema acetona-agua, usaremos la ecuación de abajo para estimar la densidad de la solución de alimentación:

$$\frac{1}{\overline{\rho}} = \frac{x_A}{\rho_A} + \frac{x_W}{\rho_W} = \left(\frac{0,100}{0,792} + \frac{0,900}{1,000}\right) \frac{cm^3}{g}$$

$$\overline{\rho} = 0{,}974 \text{ g/cm}^3$$

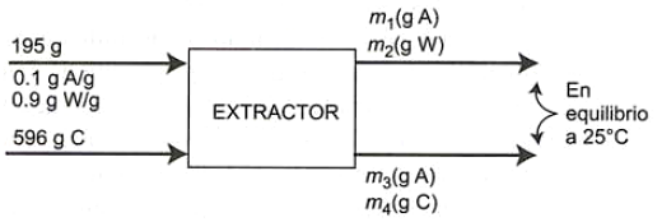
La masa de la solución de alimentación es, entonces:

$$200\ cm^3 * \frac{0,974\ g}{cm^3} = 195\ g$$

y la de cloroformo es:

$$400\ cm^3 * \frac{1,489\ g}{cm^3} = 596\ g$$

Ahora supongamos que la mezcla de cloroformo y agua es inmiscible. Al dibujar el diagrama de flujo de este problema, es aconsejable marcar las cantidades de cada componente de las dos corrientes de salida, en vez de las masas totales de las corrientes y las fracciones masicas de los componentes. (Al marcar de este último modo es necesario resolver cuatro ecuaciones simultáneas con cuatro incógnitas).



El coeficiente de distribución para el sistema A-C-W se da como 1.72 en la p. 15-12 del Manual de Perry. Si x representa la fracción másica de la acetona.

$$K = \frac{(x)_C\ fase}{x_W\ fase} = \frac{m_3/(m_3 + m_4)}{m_1/(m_1 + m_2)} = 1,72$$

Esto da una ecuación con las cuatro incógnitas m_1, m_2, m_3, y m_4. Las otras se obtienen por los balances de materia.

Balance de C	596 g = m_4
Balance de W	(0,900) * (195 g) = $m_2 \Longrightarrow m_2$ = 175,5 g
Balance de A	(0,100) * (195 g) = $m_1 + m_3$

Al sustituir los valores conocidos de m_2 y m_4 en ta primera ecuación tenemos (con el balance de acetona) dos ecuaciones con dos incógnitas, que pueden resolverse para obtener:

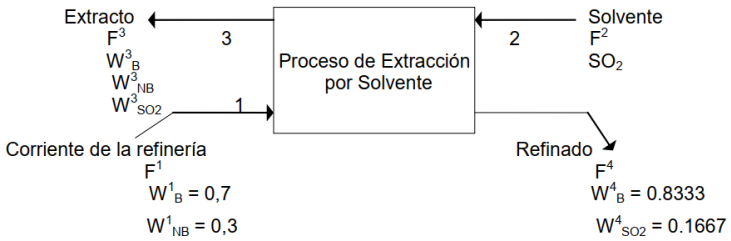
m_1 = 2.7 g de A en fase de agua

m_3 = 16.8 g de A en fase de cloroformo

Por tanto, el porcentaje de acetona que se transfiere es:

$$\frac{16,8\ g\ acetona\ en\ fase\ cloroformo}{(0,100 * 195)\ gacetona\ alimentada} x100 = 86,1\,\%$$

Problema 2



A menudo puede recuperarse un soluto de una solución mediante el uso de un segundo solvente que sea inmiscible en la solución, pero que disuelva al soluto. A este tipo de proceso de separación se le llama extracción por solvente. Se separa benceno de una corriente de refinería que contiene 70 % (en masa) de benceno en una mezcla de hidrocarburos parafinicos y de naftaleno, mediante SO_2 liquido. Cuando se utilizan 3 lb de SO_2 por 1 lb de alimentación al proceso, se obtiene una corriente residual, o refinado, que contiene 0,1667 fracción masa de SO_2 y el resto benceno, algo de SO_2 y aproximadamente 1/4 lb. de benceno por 1 lb de hidrocarburos diferentes del benceno. Bajo estas condiciones, ¿Cuál es el porcentaje de recuperación del benceno (libras de benceno en el refinado por libra de benceno en la alimentación)?

Solución

Base de Cálculo: se supone F^1 = 1000 lb/h

Determinando los grados de Libertad

NV = 8

NB = 3

ND = 2

EA = 2

BC = 1

GL = 0

Ecuaciones adicionales

$F^2/F^1 = 3$

$F^3 * W_B^3/F^3 * W_{NB}^3 = 0,25 = W_B^3/W_{NB}^3 = 0.25$

Balances de Materia

Total $1000 + F^2 = F^3 + F^4$

Benceno $700 = F^3 * W_B^3 + 0.8333 * F^4$

No Benceno $300 = F^3 * W_{NB}^3$

SO_2 $F^2 = F^3 * (1 - W_B^3 - W_{NB}^3) + 0.1667 * F^4$

Los resultados obtenidos al resolver las 4 ecuaciones es:

$F^2 = 3000$ lb

$F^3 = 3250$ lb/h

$F^4 = 750$ lb/h

$W_B^3 = 0.0231$

$$W^3_{NB} = 0.09231$$

La separación de benceno para el proceso es:

$$\frac{100 * (Benceno\ en\ el\ refinado)}{(Benceno\ en la\ alimentación)} = \frac{100 * 625}{700} = 89,3\,\%$$

5.7. BALANCE DE MATERIA EN SECADO

Concepto

Entendemos por "secado" la disminución de la humedad de un sólido húmedo mediante un procedimiento térmico.

A veces el concepto de secado se extiende a la eliminación de agua mediante procedimientos mecánicos (prensado, filtrado, centrifugado, etc.), sin embargo en este caso es preferible denominar al proceso como deshidratación de alimentos.

Utilidades

El secado de los alimentos es uno de los métodos más antiguos utilizados para su conservación, ya que al reducirse el contenido de agua en un alimento:

- Se reduce la posibilidad de su deterioro biológico, y se reducen otros mecanismos de deterioro.
- Se reduce su peso y volumen, aumentando la eficacia de los procesos de transporte y almacenaje (sopas deshidratadas, leche en polvo, etc).
- Puede conseguirse un alimento más apto para el consumo (jamón serrano, chorizo, pimientos para pimentón, etc).

Factores que intervienen

En el proceso de secado intervienen una gran cantidad de factores que hay que tener en cuenta. Por ejemplo, no debe dañarse la estructura de los productos, influyendo negativamente sobre la calidad de los mismos. Otras veces será necesario que el producto seco se pueda rehidratar hasta un producto que tenga prácticamente la misma calidad que el original.

Nos centraremos aquí en los aspectos termodinámicos del proceso de secado. Es decir, consideraremos que el secado es un proceso de transferencia simultánea de materia (agua) y de energía (calor).

Por tanto, desde nuestro punto de vista, en el proceso de secado intervendrán:

a) Una transmisión de calor que proporcione el calor latente de vaporización necesario para eliminar el agua.

b) Una transmisión de agua desde el alimento hacia el exterior.

Ambos procesos se realizan simultáneamente, influyendo uno sobre el otro. La velocidad a la que se produce el secado, así como el tiempo necesario para ello, dependerán de estas transferencias.

Contenido de humedad

Antes de comenzar con el estudio de los balances de materia y energía en el proceso de secado, resulta conveniente definir y conocer algunos términos que permiten expresar la cantidad de agua que contiene el

sólido a secar, así como la cantidad de agua que es necesario eliminar para secarlo. Al igual que en el caso del aire húmedo, consideraremos que el sólido húmedo está formado por una parte completamente seca (sólido seco) más una cierta cantidad de agua.

Contenido de **humedad en base húmeda**, es la cantidad de agua que contiene el sólido referido al sólido húmedo (sólido seco + agua).

$$W = m_w / (m_w + m_s) \text{ kg de agua/ kg sólido (x100 = \%)}$$

Este será el que se utilice salvo que se indique otra cosa.

Contenido de **humedad en base seca**, es la cantidad de agua referida al sólido seco:

$$W_s = m_w / m_s \text{ kg de agua/kg sólido seco (x100 = \%)}$$

Donde hay que tener en cuenta que este porcentaje puede ser mayor del 100 % en el caso de que el producto contenga más agua que parte sólida. Resulta muy sencillo relacionar un contenido con el otro:

$$W = W_s / (W_s+1)$$
$$W_s = W / (1-W)$$

Balance de materia

En el proceso de secado se supone que toda el agua que sale del producto pasa al aire, entonces debe cumplirse:

Disminución de agua en el producto = Aumento de agua en el aire

$$m_w = m_s \Delta W_s = m_a \Delta X$$

Siendo m_w la cantidad de agua, m_s la masa de producto seco, m_a la masa de aire seco, ΔW_s la humedad pérdida por el producto en base seca y ΔX la humedad ganada por cada kg de aire seco. En esta ecuación también pueden utilizarse caudales en lugar de masas.

Balance de energía

Para establecer el balance de energía hay que realizar una serie de suposiciones:

Suponemos que, en principio y siempre que no existan pérdidas de energía, la temperatura del termómetro húmedo permanece constante durante el proceso de secado. Esto significa que la variación de entalpía específica será muy pequeña y positiva, pero no exactamente cero (como sería si el proceso fuese estrictamente isoentálpico).

La mayor parte de la energía que aporta el aire se emplea en la evaporación del agua contenida en el sólido. Esto quiere decir, que se supone que el producto a secar se mantiene siempre, o al menos cuando la velocidad de secado es constante, a la temperatura del termómetro húmedo del aire, T_h.

En estas condiciones debe cumplirse el siguiente balance de energía:

$$m_a(\Delta h * 2 - \Delta h * 1) \approx m_s \Delta W_s c_w(T_h) T_h$$

Donde $(\Delta h * 2 - \Delta h * 1)$ es la variación de entalpía específica que sufre el aire, $(m_s \Delta W_s) = mw$ es el agua evaporada del sólido e incorporada al aire, y $c_w(T_h)$ es el calor específico del agua líquida a la temperatura del termómetro húmedo.

Resolviendo el sistema de ecuaciones formado por el balance de materia y por el de energía, encontramos, por ejemplo:

- Cantidad de sólido seco y la humedad de aire que sale, sabiendo la cantidad de aire seco que entra.
- Cantidad de aire necesario y cantidad de producto seco sabiendo la humedad del aire que sale.

Estos cálculos se simplifican mucho si se utiliza el diagrama psicométrico, en el que el proceso de secado sigue la línea de T_h constante, siendo sumamente sencillo encontrar todos los términos del balance de energía una vez que se conoce el balance de masas. Así, si se utiliza el diagrama psicométrico, y se obtiene el calor específico del agua mediante una tabla, no es necesario resolver el sistema de ecuaciones, y el balance de energía se utiliza solamente para comprobar si se cumple (al menos aproximadamente) la suposición de que el sólido a secar no cambia su temperatura durante el secado y que ésta es precisamente T_h.

Teniendo en cuenta las condiciones anteriores, puede definirse un RENDIMIENTO TÉRMICO del proceso de secado, como el cociente (en %) entre el calor necesario para la vaporización del agua contenida en el producto a una temperatura aproximadamente igual a la del termómetro húmedo, y la entalpía del aire al comienzo del proceso de secado.

$$R_t = \frac{m_W L_V(T_h)}{m_a \Delta h_1^*}$$

Este rendimiento nos indica que porcentaje de la energía inicial del aire se ha empleado en eliminar el agua, y suele situarse en torno al 40 % - 60 %.

Problema 1

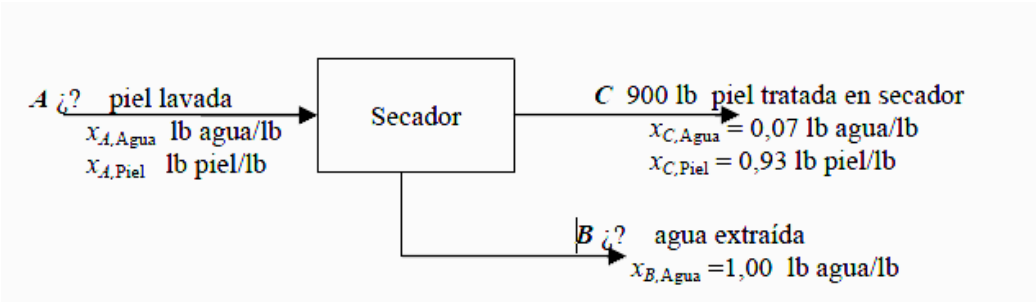
En una operación de secado de pieles, se determinó que un lote de piel previamente pasado por el secador pesaba 900 lb y que contenía 7 % de su peso en humedad. Se sabe que durante el secado la piel lavada perdió 59,1 % de su peso inicial cuando se encontraba húmeda. Determinar:

(a) El peso de la piel totalmente seca o exenta de humedad, en la carga de alimentación inicial.

(b) Las libras de agua eliminadas durante el proceso de secado por libra de piel totalmente seca.

(c) El porcentaje de agua eliminada respecto de la cantidad de agua presente inicialmente en el lote de piel.

Solución



Base de Cálculo: 900 lb de piel secada

$x_{C,Agua}$ = 0,07 [Ib agua / Ib] ⇒ C $x_{C,Agua}$ = 900 (0,07) [Ib] = 63 Ib agua.

$x_{C,Piel}$ = 0,93 [Ib piel / Ib] ⇒ C $x_{C,Piel}$ = 900 (0,93) [Ib] = 837 Ib piel totalmente seca.

Las incógnitas son la masa del lote inicial de piel lavada. A. y una de las fracciones másicas de la alimentación inicial. $x_{A,Agua}$ o $x_{a,Piel}$. La cantidad de agua extraída B no debe ser considerada una incógnita pues está expresada en términos del % de masa que pierde el lote de piel introducida en el secador A.

$$B = 0{,}591 * A$$

Se pueden escribir dos ecuaciones de balances independientes. Por lo tanto, el sistema tiene cero grados de libertad.

Parte (a). Haciendo un balance en piel, se tiene que:

BP en Piel: A * $x_{a,Piel}$ = C * $x_{C,Piel}$ = 900 * 0,07 = 837 Ib de piel totalmente seca.

Parte (b).

BP en Agua: $A * x_{A,Agua} = B * x_{B,Agua} + C * x_{C,Agua}$

$A * x_{A,Agua} = 0{,}591 * A * (1{,}00) + 837$

BG: $A = B + C$

$A = 0{,}591 * A + 900$

$A = 2200$ lb

Por lo tanto:

B = 0,591* A = 0.591(2200) = 1300 lb de agua extraídas por 837 lb de piel seca.

Parte (c). Es necesario determinar la cantidad de agua en el lote de piel inicial:

$$A * x_{A,Agua} + A * x_{a,Piel} = A$$

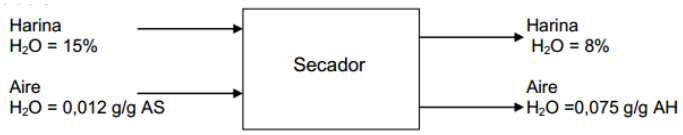
$$A * x_{a,Piel} = 2200 - 837 \text{ [lb]} = 1360 \text{ lb.}$$

$$\text{(Agua extraída / Agua inicial) x } 100\,\% = \frac{1300\ lb}{1360\ lb} \text{ x } 100$$

$$\text{(Agua extraída / Agua inicial) x } 100\,\% = 95{,}6\,\%$$

Problema 2

Se tiene un secador de harina que rebaja la humedad desde un 15 % a un 8 % en masa, a 10 toneladas iniciales de harina.



Para secar se usa aire caliente a 350ºC con una humedad 0,012 gr H_2O/g aire seco que sale a 80ºC con 0,075 gr H_2O/g aire húmedo. Determinar el volumen de aire alimentado, si la densidad del aire a las condiciones de entrada es de 1,1 g/l. y la del vapor de agua 1 g/l.

Solución:

Base de Cálculo: 10 toneladas de harina húmeda

Primero se calculará la cantidad de agua que retira el aire caliente de las 10 toneladas de harina.

Cantidad de agua inicial en la harina:

$$m_{H_2O(i)} = \frac{15 * 10000kg}{100}$$
$$m_{H_2O} = 1500\ kg$$

Cantidad de agua final en la harina:

$$m_{H_2O(f)} = \frac{8 * (10000 - H_2O\ retirada)\ kg}{100}$$
$$= \frac{8 * (10000 - (m_{H_2O(i)} - m_{H_2O(f)}))\ kg}{100}$$
$$m_{H_2O(f)} = 739\ kg$$

Agua retirada:

$$\text{Agua retirada} = m_{H_2O(i)} - m_{H_2O(f)}$$
$$\text{Agua retirada} = 761\ \text{kg}$$

Esta agua es captada (retirada) por el aire caliente. Se procederá a calcular la cantidad de aire caliente, en las condiciones del problema, que es capaz de retirar los 761 Kg de agua.

Inicialmente la humedad es 0,012 gr H_2O/gr aire seco.

Si definimos:

m_{H_2O}: masa de agua contenida en el aire de entrada.

m_a : masa de aire que entra.

Entonces:

$$\frac{m_{H_2O}}{m_a} = 0,012 \tag{5.13}$$

A la salida la humedad es 0,075 gr H_2O/gr aire húmedo, esto es:

$$\frac{m_{H_2O} + 761}{m_{H_2O} + 761 + m_a} = 0,075 \tag{5.14}$$

En que 761 son los kilos de agua destilada a la harina que paso a formar parte del aire de entrada de (5.13) y (5.14):

$$m_{H2O} = 132,2\ \text{kilos}$$
$$m_a = 11,016\ \text{kilos}$$

Volumen de aire alimentado:

$$\text{Volumen alimentado} = V_{aire} + V_{H_2O}$$
$$\text{Volumen Alimentado} = \frac{11016}{1,1 * 10^{-3}} + \frac{132,2}{10^{-3}}$$
$$\text{Volumen Alimentado} = 10,147 * 10^3\text{L}$$

5.8. BALANCE DE MATERIA EN FLOTACIÓN

El término “balance” en Procesamiento de Minerales engloba todos los cálculos metalúrgicos que se efectúan en una Planta Concentradora, para evaluar técnica y económicamente el proceso de concentración por flotación en este caso.

En una Planta Concentradora generalmente se efectúan dos tipos de balances, a saber:

1. Balance metalúrgico o contabilidad metalúrgica.
2. Balance de materiales (sólidos, agua, elemento, etc).

BALANCE METALÚRGICO

El balance metalúrgico o contabilidad metalúrgica se efectúa en una Planta Concentradora para determinar la producción diaria, la eficacia o recuperación obtenida, la calidad de los concentrados, etc.

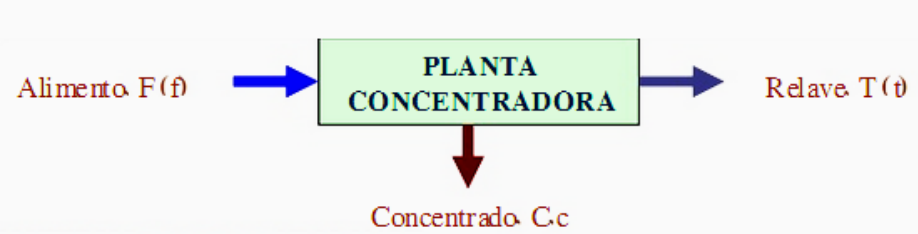
Generalmente se emplea dos métodos principales de contabilidad metalúrgica:

1. El sistema retrospectivo.
2. El sistema inspección entrada inspección salida.

De una u otra manera, estos dos modos de balance, en flotación de minerales, al igual que cualquier otro proceso de concentración, la cuantificación se puede efectuar a través de dos expresiones matemáticas que se las denomina Razón de Concentración y Recuperación.

RAZÓN DE CONCENTRACIÓN (K). Este término indirectamente se refiere a la selectividad del proceso. Directamente expresa cuántas toneladas de mineral de cabeza se necesitan procesar en la Planta Concentradora para obtener una tonelada de concentrado. En consecuencia, esta razón es un número que indica cuántas veces se concentró el mineral valioso contenido en la mena. Este término se puede deducir del siguiente modo:

Sea el esquema de una Planta Concentradora



Ahora hagamos un balance de materiales y de metal valioso contenido en cada flujo de la Concentradora. Esto es:

Balance de material:

$$F = C + T \tag{5.15}$$

Balance de metal:

$$F * f = C * c + T * t \tag{5.16}$$

Multiplicando la ecuación (5.15) por t y restando de la ecuación (5.16) se obtiene lo siguiente:

$$F * t = C * t - T * t$$

$$F * (f - t) = C * (c - t)$$

De donde se obtiene la razón de concentración, es decir:

$$k = \frac{F}{C} = \frac{(c-t)}{(f-t)} \tag{5.17}$$

RECUPERACIÓN. Este término se refiere a la eficiencia y rendimiento del proceso de flotación. Es decir, es la parte de mineral valioso que se obtiene en el concentrado, con respecto del mineral valioso contenido en el mineral de cabeza. Se expresa en porcentaje y su expresión matemática es:

$$R = \frac{C * c}{F * f} x 100 \tag{5.18}$$

Si se sustituye en la fórmula (5.18) el valor de C/F en función de las leyes, se obtiene:

$$R = \frac{(f-t)}{(c-t)} \; x \; \frac{c}{f} \; x \; 100 \tag{5.19}$$

La expresión (5.19) sirve para los cálculos cuando hay un solo elemento valioso, como se verá una deducción más completa en adelante. Cuando hay más de un elemento valioso, el sistema de cálculo se complica, pero se mantiene la misma filosofía de cálculo de las expresiones antes determinadas.

SISTEMA RETROSPECTIVO

En este sistema se asume que la recuperación teórica es correcta y la producción de concentrados se calcula a partir del mineral que entra a la Planta Concentradora y de los ensayos químicos de la alimentación, concentrado(s) y relave. En este sistema no hay inspección sobre la recuperación real que se obtiene. De acuerdo a la simplicidad o complejidad de las mismas, es decir, de acuerdo al número de elementos valiosos que contiene será:

- De dos productos un elemento valioso.
- De tres productos dos elementos valiosos.
- De cuatro productos tres elementos valiosos.
- De n productos más de tres elementos valiosos.

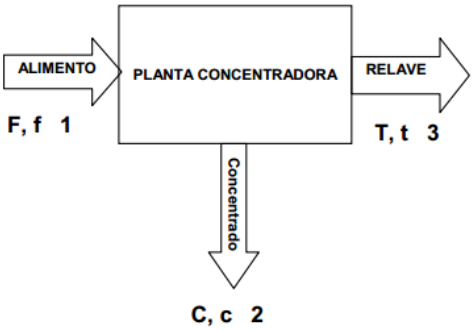
BALANCE METALÚRGICO DE DOS PRODUCTOS:

Se emplea cuando la mena que trata una planta concentradora contiene un solo elemento valioso principal, por consiguiente solo se producirá un concentrado y un relave. Los ensayos químicos necesarios serán del alimento, del concentrado final y del relave final. Para el establecimiento de la fórmula se partirá del siguiente esquema:

Aquí podemos observar que los puntos de muestreo son:

1. Cabeza que corresponde al mineral de faja que alimenta la tolva de finos al molino, o del rebose del clasificador.
2. Concentrado.
3. Relave.

Se establecen las siguientes relaciones:



Balance de materiales

Entrada = Salida

$$F = C + T \tag{5.20}$$

Balance del metal valioso

$$F * f = C * c + T * t \tag{5.21}$$

Multiplicando la ecuación (5.20) por t se obtiene:

$$F * t = C * t - T * t \tag{5.22}$$

Restando 5.21 de 5.22 se tendrá:

F * (f - t) = C * (c - t)

$$\frac{C}{F} = \frac{(f-t)}{(c-t)} \Longrightarrow C = F\ x\ \frac{(f-t)}{(c-t)} \tag{5.23}$$

Entonces el paso de concentrado obtenido estará dado por la siguiente fórmula:

$$C = F\ x\ \frac{(f-t)}{(c-t)} \qquad t/DÍA\ o\ ton/DÍA \tag{5.24}$$

La recuperación obtenida de metal valioso estará dada por:

$$Re = \frac{C * c}{F * t}\ x\ 10 \tag{5.25}$$

$$Re = \frac{f-t}{c-t}\ x\ \frac{c}{f}\ x\ 100 \tag{5.26}$$

La razón de concentración está dada por:

$$K = \frac{F}{C} = \frac{(c-t)}{(f-t)} \tag{5.27}$$

Problema 1

Si una planta concentradora produce 1200 t/día de concentrado de cobre que ensaya 27,6 % Cu a partir de un mineral de cabeza de 0,87 % Cu, dejando en los relaves 0,1 % Cu. Calcular: a)El peso de la alimentación, b)La recuperación, c)La razón de concentración, d)El peso de relave.

Solución

a) Cálculo del peso de la alimentación.

Para ello tenemos que acomodar la ecuación (5.24):

$$F = C\ x\ \frac{(c-t)}{(f-t)}$$

Datos: C = 1200 t.

c = 27.6 % Cu

f = 0.87 % Cu

t = 0.1 % Cu

Remplazando datos tenemos:

$$\text{F = 1200 x } \frac{(27,6-0,1)}{(0,87-0,1)} \text{ = 42875,143 } \frac{ton}{día}$$

b) Cálculo de la recuperación. Para este caso se emplea la ecuación (5.26):

$$Re = \frac{(0,87-0,1)}{(27,6-0,1)}\ x\ \frac{27,6}{0,87}\ x\ 100$$

$$Re = 88,83$$

c) Cálculo de la razón de concentración

Utilizamos la ecuación (5.27):

$$K = \frac{(27,6-0,1)}{(0,87-0,1)} = \frac{35,7}{1}$$

$$K = \frac{42857,143}{1200} = \frac{35,7}{1}$$

d) Cálculo del peso de relave.

De la relación: F = C + T

Se obtiene: T = F - C = 42857,143 -1200

T = 41657,143 ton / día

Ahora el balance metalúrgico puede tabularse tal como se muestra en el cuadro.

Producto	**Peso T**	**% Peso**	**Ensayo**	**Contenido metálico**	**% Distribución**	**Razón**
			%Cu	**Cu**	**Cu**	
Cabeza	42 857,143	100	0,87	372,857	100,00	
Conc.Cu	1 200,00	280	27,6	331,200	88,83	35,71
Relave	41 657,143	97,2	0,1	41,657	11,17	

Problema 2

En una planta concentradora se trata 25 000 ton / día de mena de cobre, cuyo reporte de ensaye químico es el que se muestra en el cuadro Siguiente.

Productos	Ensayo o Leyes		
	%Cu	%Fe	% Insolubles
Cabeza	5,20	11,9	
Concentrado Cu	30,00	18,3	15,4
Relave	0,25	10,6	

Determinar:

a) El paso de concentrado obtenido en t / día.

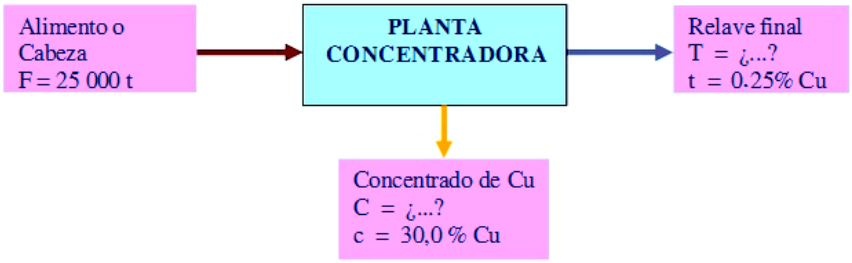
b) El tonelaje de relave.

c) La recuperación de Cu.

d) La razón de concentración.

Solución:

Sea el siguiente diagrama



1. Cálculo del peso de concentrado obtenido.

   Para este caso utilizamos la ecuación

$$C = 25000\ x\ \frac{(5,20 - 0,25)}{(30,0 - 0,25)}$$

$$C = 4159,66\ ton/dia$$

2. Cálculo del tonelaje de relave

Cabeza = Conc. Cu - Relave

F = C - T

T = F - C = 25.000 - 4.159,66 = 20.84034 7 = 20.840,34 ton / día

3. Cálculo de la recuperación de cobre.

Para este caso podemos utilizar la ecuación (5.20) o la ecuación (5.21).

$$R_{Cu} = \frac{C * C}{F * t}\ x\ 100 = \frac{(4159,66 * 30)}{(2500,6 - 5,2)}\ x\ 100$$
$$R_{Cu} = 95,99\,\%$$

4. Cálculo de la razón de concentración.

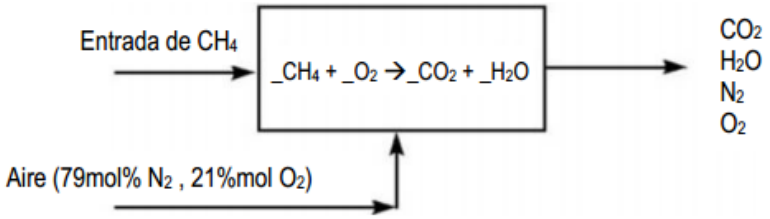
   Se puede determinar utilizando la fórmula (5.27)

$$k = \frac{F}{C} = \frac{25000}{4159,66} = \frac{6,010}{1}$$
$$k = \frac{F}{C} = \frac{(30,0 - 0,25)}{(5,2 - 0,25)} = \frac{6,010}{1}$$

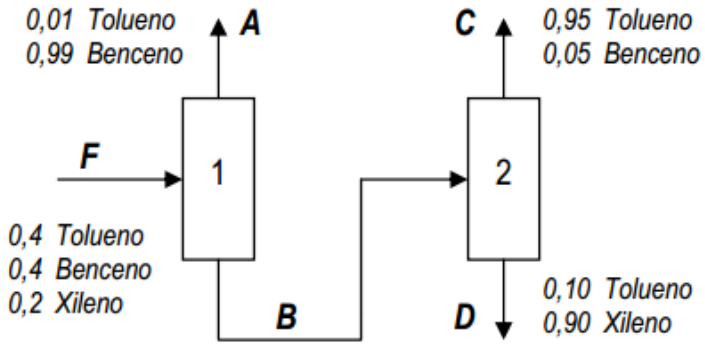
   Este valor nos indica que por cada 6,011 de mineral de cabeza se obtiene 1 t de concentrado.

5.9. PROBLEMAS DE APLICACIÓN

Problema 1.- Se queman completamente 60 kmol de metano en un horno con un 35 % de exceso de oxígeno. Determinar la composición molar de los humos a la salida de la chimenea. Considere que ocurre combustión completa.



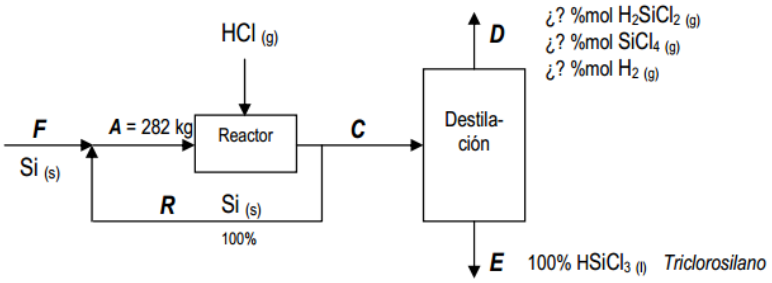
Problema 2.- En la figura siguiente se muestra una unidad de separación de compuestos en dos etapas. Dado el flujo de entrada F de 500 lb/h, calcular todas las corrientes desconocidas y la composición de la corriente B.



Problema 3.- El silicio de grado metalúrgico se purifica a grado electrónico para su uso en la industria de los semiconductores haciendo una separación química de sus impurezas. El Si (silicio) metálico reacciona

en diversos grados con suficiente cloruro de hidrógeno HCl gaseoso a 300°C para formar diversos silanos policlorados. El triclorosilano es líquido a temperatura ambiente y se separa fácilmente por destilación fraccionada de los demás gases. Si entran 282 kg de silicio al reactor, a una tasa de conversión en un paso del 91 %, como se muestra en la figura anexa, ¿cuánto triclorosilano se produce? Calcular, además, las corrientes de flujo desconocidas y su composición.

Masas atómicas (u.m.a.): C: 12; H: 1; N: 14; O: 16; Si: 28,09; Cl: 35,45.



Problema 4.- Una solución salina que pesa 10 000 kg y tiene 30 % en peso de Na_2CO_3, se enfría hasta 293 °K. La sal cristaliza como decahidrato. ¿Cuál será la cantidad de cristales de $Na_2CO_3.10H_2O$ si la solubilidad es 21kg de Na_2CO_3 anhidro/100 kg de agua?

Proceda a los cálculos para los siguientes casos.

a) Suponga que no se evapora agua.

b) Suponga que el 3 % del peso total de la solución se pierde por evaporación durante el enfriamiento.

Problema 5.- En un proceso que produce KNO_3, el evaporador se alimenta con 1 000 kg/h de una solución que contiene 20 % de KNO_3 de sólidos en peso y se concentra a 422 °K para obtener una solución de KNO_3 al 50 % de sólidos en peso. Esta solución se alimenta a un cristalizador a 311 °K, donde se obtiene cristales de KNO_3 al 96 % de sólidos en peso. La solución saturada que contiene 37.5 % de KNO_3 de sólidos en peso se recircula al evaporador. Calcule la cantidad de corriente de recirculación R en kg/h y la corriente de salida P en Kg/h.

Solución

Tomando como base: 150 kg de alimentación.

El filtrado y el líquido retenidos en la torta de filtración están en equilibrio con cristales sólidos de $AgNO_3$ y, por tanto, deben estar saturados con $AgNO_3$ a 20 °C.

Problema 6.- 150 kg. de solución acuosa saturada de $AgNO_3$ a 100 °C se enfrían hasta 20 °C, formando así cristales de $AgNO_3$, los cuales se filtran de la solución restante. La torta de filtración húmeda que contiene 80 % de cristales sólidos y 20 % de solución saturada por masa, pasa a un secador, donde se vaporiza el agua restante. Calcule la fracción de $AgNO_3$ en la corriente de alimentación que se recupera al final en forma de cristales secos y la cantidad de agua que debe eliminarse en la etapa del secado.

Dato: Las composiciones de las soluciones saturadas de nitrato de plata a 100 °C y 20 °C:

100 g de agua a 20°C pueden disolver 222 g de $AgNO_3$, y a 100 °C pueden disolver 952 g de $AgNO_3$.

Problema 7.- Una disolución de 30 % de $MgSO_4$ y 70 % de agua, se enfría a 60 °F. Durante el enfriamiento se evapora un 5 % de agua total del sistema. ¿Cuántos kg se obtendrá de cristales por cada kg de mezcla inicial?

Problema 8.- La solubilidad del sulfato de magnesio anhidro a 20 ^{o}C es 35,5 g / 100 g de H_2O ¿Cuánto $MgSO_4$*$7H_2O$ se debe disolver en 100 kg de H_2O?

Problema 9.- Si se disuelven 100 g de Na_2SO_4 en 200 g de agua y la solución se enfría hasta obtenerse 100 g de Na_2SO_4*$10H_2O$; encontrar:

a) Composición de la solución residual (licor madre), 38,8 g sal / 100 g agua

b) g de cristales que se recuperan por 100 g iniciales de la solución, 33,3 g

Problema 10.- Una planta industrial de producción de ácido sulfúrico quema 350 kg/h de azufre, empleando para ello aire. Tanto éste como el azufre se alimentan al horno a 20°C y los gases a la salida del mismo se encuentran a 760°C. Estos contienen un 17,4 % de SO_2 y un 2,7 % de O_2 (en volumen). El horno opera a 1 atm.

Determínese:

a) Concentración de SO_3 en los gases de salida del horno (% en volumen).

b) Caudal másico de SO_2.

c) Caudal volumétrico de gases a la salida del horno.

d) Pérdidas de calor en el horno.

Los gases que abandonan el horno se enfrían hasta 460°C antes de alimentarse al convertidor. Para ello se utiliza agua a 85°C, produciéndose vapor saturado a 80 atm.

¿Qué cantidad del mismo se produce diariamente?

Datos: Calores de combustión (a 20°C): 86.500 kcal/kmol para la reacción

$$S + O_2 \Rightarrow SO_2$$

y 110.000 kcal/kmol para la reacción:

$$S + 3/2\ O_2 \Rightarrow SO_3$$

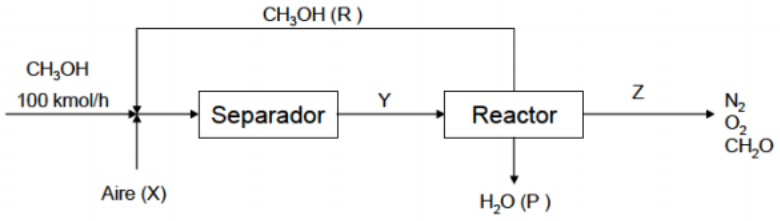
Calores específicos medios en todo el intervalo de temperaturas (kcal/kmol.^{o}C): SO_2: 11,7; SO_3: 17; O_2: 7,8; N_2: 7,3. Calor latente de vaporización del agua a 80 atm: 345 kcal/kg. Para los calores específicos del agua líquida y vapor utilícense los valores medios de 1 y 0,46 kcal/kg.^{o}C, respectivamente en todo el intervalo de temperatura.

Problema 11.- El formaldehído se obtiene por reacción entre metanol y oxígeno en presencia de un catalizador de plata, de acuerdo con el esquema que se indica en la figura. El aire se introduce en el sistema en un 100 % en exceso respecto del estequiométrico necesario para el alimento fresco, alcanzándose una conversión en el reactor del 60 %. El producto de reacción pasa a un separador en el que se obtienen tres corrientes, una de metanol puro no convertido, que se recircula a la entrada del reactor, el agua líquida y una corriente gaseosa que contiene nitrógeno, oxígeno y formaldehído. Calcúlese:

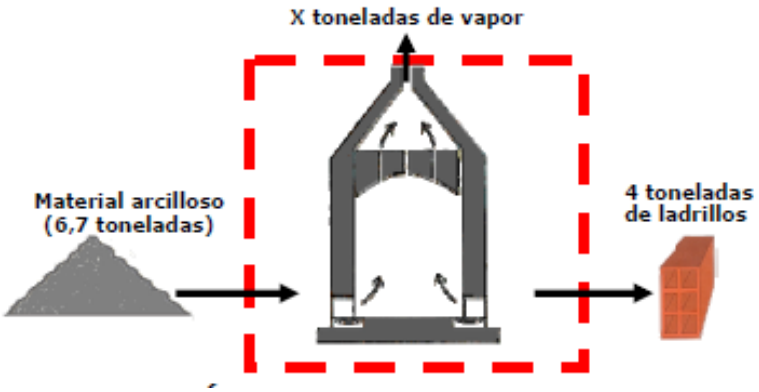
a) El caudal de las diferentes corrientes del proceso si se alimenta al sistema 100 kmol/h de metanol fresco.

b) La composición de las corrientes que entran y salen del reactor.

$$CH_3OH + 1/2\ O_2 \rightarrow CH_2O + H_2O$$

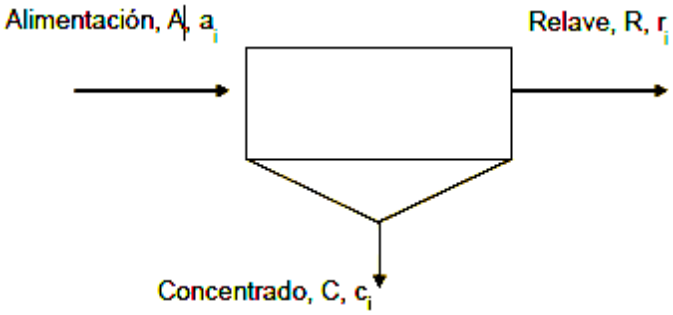


Problema 12.- En un horno de cocción de cerámica se introducen 6,7 toneladas de material arcilloso húmedo ya conformado, el cual después de someterse a temperaturas de 1100 °C durante un tiempo, produce 4 toneladas de ladrillos. Calcular la cantidad de agua desprendida.



Problema 13.- Un mineral cuya cabeza ensaya 5 % de Pb, al procesarlo por flotación se obtiene un concentrado de 68 % de Pb y un relave de 0.10 % de Pb. Si se trata 300 T/día, calcular la recuperación, tonelaje de concentrado producido y el radio de concentración:

Problema 14.- El análisis de alimentación a una planta de Flotación es de 0.8 % de Cu. El análisis del concentrado producido es de 25 % de Cu y el relave contiene 0.15 % de Cu. Calcue la recuperación de cobre en el concentrado, la razón de concentración y la razón de enriquecimiento.



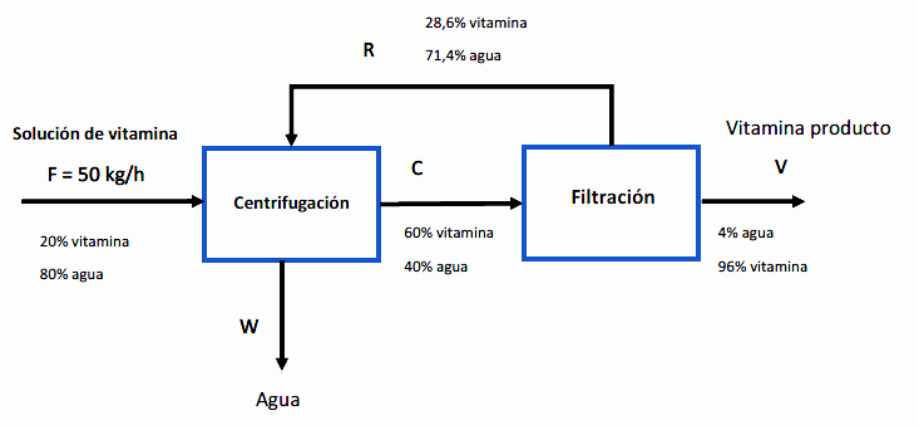
Problema 15.- Un gas natural contiene 83 % molar de metano y 17 % molar de etano. El gas se quema con un exceso de aire seco y se producen unos gases con el siguiente análisis Orsat: 6,76 % CO_2, 2,77 % CO,

5,63 % O_2 y 84,84 % N_2. Calcúlese: (a) Porcentaje de exceso de aire suministrado (b) Porcentaje de carbono que pasa a CO (c) Masa de vapor de agua por cada 1000 pie^3 de gas de combustión medidos a 800° F y 1 atm.

Respuestas: (a) 23,2 % (b) 29 % (c) 2,92 lb agua.

Problema 16.- La fabricación de productos como la penicilina, la tetraciclina, las vitaminas y otros fármacos, así como de químicos para fotografía, colorantes y otros compuestos orgánicos finos, por lo general requiere la separación de los sólidos suspendidos de su solución madre por centrifugación, seguida de secado por filtración de la torta húmeda. El extracto resultante de la filtración se recicla a la alimentación de la centrífuga.

Supongamos el caso de la obtención de una vitamina que se muestra en el diagrama de flujo:



Determinar la cantidad de agua eliminada, el caudal de extracto recirculado y los kilogramos horarios de vitamina producto.

CAPÍTULO 6

BALANCE DE ENERGÍA

OBJETIVOS

- Recapitular conocimientos sobre energía, calor y trabajo
- Evaluar conceptos sobre C_p y Entalpía.
- Formular la Ecuación general del Balance de energía, para procesos con y sin reacción.
- Aplicar la Ecuación de Benoulli.
- Aplicar balances de energía en procesos de humidificación

6.1. DEFINICIÓN

Al diseñar un proceso no solo se requiere hacer un estudio de materiales, capacidad de las unidades, conectividad y demás aspectos involucrados e imprescindibles para ello. Es preciso tomar en consideración las cantidades de materia que serán tratadas en dichas unidades y que serán transformadas en otros productos, así como el consumo o producción energética asociados al proceso en cuestión. Este último aspecto gana relevancia en esta época pues a nivel mundial, por diversas razones, se viene buscando el ahorro de energía, más aun cuando la misma proviene de recursos naturales no renovables (gas. petróleo, otros) de alto costo para la mayoría de países.

Es por esta razón que un ingeniero debe conocer y saber determinar los requerimientos energéticos de algún proceso que esté diseñando o estudiando. Para ello, debe recurrir a los balances de energía de manera análoga a como se plantean los balances de materia.

Procesos en los cuales el objetivo es la recuperación máxima del calor (por ejemplo, en el calentamiento o enfriamiento de un fluido), en la producción efectiva de calor en hornos y calderas (que conlleva el cálculo de pérdidas energéticas y aislamientos), en el cálculo del consumo de combustible de una maquinaria para producir trabajo y calor, o en refinerías industriales (para la fabricación de olefinas o para la síntesis de amoniaco, por ejemplo), es imprescindible el análisis energético.

Por lo tanto el Balance de Energía se encarga de establecer las relaciones de energía que existen en cualquier sistema, bajo el principio de la conservación.

6.2. UNIDADES

La energía, al igual que el trabajo tiene unidades de fuerza*distancia, por ejemplo joules (N.m), erg (dina.cm) ó ft.lbf. También es usual definir unidades de energía en términos de la cantidad de calor que debe

transferirse a una masa especificada de agua para aumentar su temperatura en un intervalo especificado a una presión constante de 1 atmósfera. Las unidades de este tipo más comunes se tabulan a continuación.

Unidad	Símbolo	Masa de agua	Intervalo de temperatura
Kilocaloría ó kilogramo-caloría	Kcal	1 kg	15°C a 16°C
Caloría ó gramo-caloría	cal	1 g	15°C a 16°C
Unidad térmica británica (British thermal unit)	Btu	1 lb_m	60°F a 61°F

La conversión entre estas unidades y otras de unidades de energía se realiza empleando las conversiones correspondientes.

1 Joule = 10^7 ergios = 0.23901 cal = 0.7376 ft-lbf = $9.486.10^{-4}$ Btu = $2.778.10^{-7}$ kW.h

6.3. FORMAS DE ENERGÍA

Trabajo (W): Es una forma de energía que representa una transferencia entre el sistema y el entorno. El trabajo no puede almacenarse. Es positivo si se efectúa sobre el sistema, el trabajo hecho por el sistema es negativo.

La energía que fluye como consecuencia de cualquier fuerza impulsora diferente a un gradiente de temperatura, tal como una fuerza, una diferencia de voltaje, etc. Por ejemplo, si un gas en un cilindro en su expansión mueve un pistón venciendo una fuerza que restringe el movimiento, este gas efectúa un trabajo sobre el pistón (la energía es transferida desde el sistema a los alrededores (que incluyen el pistón) como trabajo.

Calor (Q): Se define como la parte del flujo total energía que cruza a través de la frontera de un sistema debido a una diferencia de temperatura entre el sistema y el entorno. Se conoce en ingeniería también como flujo calórico.

El calor es positivo cuando es transferido al sistema, este puede ser transferido por conducción, convección y radiación.

Para evaluar cuantitativamente la transferencia de calor , se puede utilizar una fórmula empírica:

$$Q = UA\Delta T \tag{6.1}$$

Q = Velocidad de transferencia de calor.

A = área de transferencia.

U = coeficiente de transferencia total de calor (dato empírico).

ΔT = diferencia efectiva de temperatura entre el sistema y el entorno.

Energía cinética (Ec): es la energía que tiene el sistema asociada a su velocidad relativa al entorno en reposo.

$$Ec = 1/2mv^2 \tag{6.2}$$

Energía potencial (P): es la energía que posee el sistema debido a la fuerza ejercida sobre su masa por un campo gravitacional o electromagnético con respecto a un plano de referencia.

Energía potencial debida a un campo gravitacional: P = mgh

Dónde:

h = distancia al plano de referencia, medida a partir del centro de masa del sistema.

m = masa del sistema.

g = aceleración de gravedad.

Energía interna: la energía interna (U), es la medida macroscópica de la energías molecular, atómica, y subatómica, lo cual sigue reglas microscópicas definidas para los sistemas dinámicos. La energía interna se mide indirectamente a través de la medición de otras variables, tales como presión, volumen, temperatura y composición. La energía interna se calcula como en relativa a un estado de referencia, pero no en forma absoluta.

Entalpía (H): la entalpía se expresa como

$$H = U + PV \tag{6.3}$$

Donde U es la energía interna, P es la presión y V el volumen.

Al igual que en el caso de la energía interna, la entalpía no tiene un valor absoluto, sólo se miden los cambios de entalpía. Para determinar la entalpía se considera un estado de referencia:

Estado inicial del sistema	Estado final del sistema
Entalpía = H_1 - H_{ref}	H_2 - H_{ref}

Cambio neto de entalpía del sistema al pasar del estado inicial al estado final:

$$(H_2 - H_{ref}) - (H_1 - H_{ref}) = H_2 - H_1 = \Delta H \tag{6.4}$$

Se tiene que del primer principio de la termodinámica:

$$\Delta U = Q - W \tag{6.5}$$

Siendo Q el calor absorbido y W el trabajo realizado, W = PΔV.

Si consideramos un proceso a presión constante tenemos:

$$\Delta H = \Delta U + P\Delta V$$

En este caso ΔH corresponde al calor absorbido por el sistema, luego:

$$\Delta H = Q_p$$

Si el proceso se verifica a volumen constante ΔV = 0, luego:

$$Q_v = \Delta U = \Delta H$$

La entalpía es una función de estado y sólo depende de los estados inicial y final y no del camino recorrido.

6.4. CAPACIDAD TÉRMICA DE SÓLIDOS, LÍQUIDOS Y GASES

La capacidad calorífica de un cuerpo también es el cociente entre la cantidad de energía calorífica transferida a un cuerpo o sistema en un proceso cualquiera y el cambio de temperatura que experimenta. En una forma menos formal es la energía necesaria para aumentar una unidad de temperatura (SI: 1 K) de una

determinada sustancia, (usando el SI). Indica la mayor o menor dificultad que presenta dicho cuerpo para experimentar cambios de temperatura bajo el suministro de calor. Puede interpretarse como una medida de inercia térmica. Es una propiedad extensiva, ya que su magnitud depende, no solo de la sustancia, sino también de la cantidad de materia del cuerpo o sistema; por ello, es característica de un cuerpo o sistema particular. En general, la capacidad calorífica depende además de la temperatura y de la presión.

La capacidad calorífica no debe ser confundida con la capacidad calorífica específica o calor específico, el cual es la propiedad intensiva que se refiere a la capacidad de un cuerpo «para almacenar calor», y es el cociente entre la capacidad calorífica y la masa del objeto. El calor específico es una propiedad característica de las sustancias y depende de las mismas variables que la capacidad calorífica.

Por lo tanto es más fácil comparar la capacidad térmica mediante el uso del calor específico de las sustancias.

Capacidad calorífica: se definen las capacidades caloríficas a volumen constante (C_v) y a presión constante (C_p) $\frac{d\hat{U}}{dT}$ y $\frac{d\hat{H}}{dT}$ respectivamente. También se utiliza el término calor específico para indicar la capacidad calorífica expresada con base a la unidad de masa.

Para rangos no demasiado amplios de temperatura se puede considerar a las capacidades caloríficas como independientes de la temperatura. Para líquidos y sólidos C_v y C_p se pueden considerar prácticamente iguales. Para los gases ideales.

$$C_p = C_v + R$$

Con objeto de dar un significado físico a la capacidad calorífica, se puede pensar que representa la cantidad de energía necesaria para elevar en un grado la temperatura de la unidad de masa de una sustancia.

Si consideramos la dependencia de la capacidad calorífica a presión constante C_p, con la temperatura y teniendo en cuenta que casi todas las ecuaciones para C_p de sólidos y líquidos son empíricas, se expresa mediante una serie de potencias, con constantes a, b, c, d etc. por ejemplo:

$$C_p = a + bT + cT^2 + dT^3$$

6.5. ENTALPÍA EN TABLA DE VAPOR DE AGUA Y CALORES DE TRANSFORMACIÓN

Una tabla de vapor saturado es una herramienta indispensable para cualquier ingeniero que trabaja con vapor. Típicamente es usada para determinar la temperatura de saturación del vapor a partir de la presión del vapor o viceversa, presión a partir de la temperatura de saturación del vapor. Además de presión y temperatura, estas tablas usualmente incluyen otros valores relacionados tales como entalpía específica (h) y volumen específico (v).

Estos datos encontrados en una tabla de vapor saturado siempre se refieren al vapor en un punto de saturación particular, también conocido como punto de ebullición. Este es el punto donde el agua (líquido) y el vapor (gas) pueden coexistir en la misma temperatura y presión. Debido a que el agua puede ser líquida o gas en este punto de saturación, se requieren dos conjuntos de datos: datos para el agua saturada (líquido), los cuales se marcan típicamente usando una “f” como subíndice, y datos para el vapor saturado (gas), los cuales se marcan típicamente usando una “g” como subíndice.

Presión (Absoluta)	**Temp.**	**Volumen Específico**		**Entalpía Específica**		
kPa	**°C**	**m^3/Kg**		**kJ/kg**		
P	**T**	**Vf**	**Vg**	**h_f**	**h_g**	**h_{fg}**
1.0	6.970	0.00100014	129.183	29.30	2513.68	2484.38
2.0	17.495	0.00100136	66.9896	73.30	2532.91	2459.48
4.0	28.962	0.00100410	34.7925	121.40	2553.71	2432.31
6.0	36.160	0.00100645	23.7342	151.49	2566.67	2415.17
				173.85	2576.24	2402.39
200	120.21	0.00106052	0.885735	504.68	2706.24	2201.56
300	133.53	0.00107318	0.605785	561.46	2724.89	2163.44
400	143.61	0.00108356	0.462392	604.72	2738.06	2133.33
500	151.84	0.00109256	0.374804	640.19	2748.11	2107.92
600	158.83	0.00110061	0.315575	670.50	2756.14	2085.64
700	164.95	0.00110797	0.272764	697.14	2762.75	2065.61
800	170.41	0.00111479	0.240328	721.02	2768.30	2047.28
900	175.36	0.00112118	0.214874	742.72	2773.04	2030.31
1000	179.89	0.00112723	0.194349	762.68	2777.12	2014.44
1100	184.07	0.00113299	0.177436	781.20	2780.67	1999.47

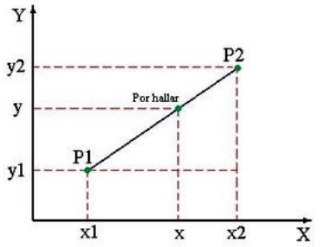
Los procesos de calentamiento que utilizan vapor generalmente usan el calor latente de evaporación (H_{fg}) para calentar el producto. Como se ha visto en la tabla, el calor latente de evaporación es mayor a bajas presiones. Mientras la presión del vapor saturado se eleva, el calor latente de evaporación disminuye gradualmente hasta alcanzar 0 en una presión súper crítica, esto es 22.06 MPa (3200 psi).

Una sustancia experimenta una transición de fases cuando cambia su estado físico, por ejemplo cuando pasa del estado sólido a líquido. Para sustancias simples, estas transiciones ocurren a una temperatura bien definida, que en general depende de la presión. Cuando una sustancia sólida se calienta, pasa del estado sólido al estado líquido en un proceso denominado fusión, que ocurre, para una dada presión, a la temperatura de fusión T_f. De manera similar, si se enfría el líquido por debajo de T_f pasará al estado sólido en un proceso que se denomina solidificación. Cuando se calienta un líquido hasta su temperatura de ebullición T_e, el líquido sufre una transición al estado de vapor denominada vaporización. De manera inversa, si un vapor que está a temperatura mayor que T_e se enfría, pasa al estado líquido y el proceso se denomina licuefacción. Otro tipo de transición es la sublimación, que es el cambio de estado sólido-vapor, sin pasar por un estado líquido intermedio. En todos estos procesos está involucrada una cantidad de calor que se denomina calor latente de transformación. El calor latente está asociado a la energía requerida (absorbida o entregada por la sustancia) para que la sustancia realice el cambio de fase, desde un estado a otro.

Los Valores relacionados con el vapor sobre calentado no pueden ser obtenidos por medio de una tabla de vapor saturado regular, en lugar de eso se requiere el uso de una Tabla de Vapor Sobre Calentado. Esto es porque la temperatura del vapor sobre calentado, a diferencia del de vapor saturado, puede variar considerablemente para una misma presión.

Presión kPa (Temperatura °C)		Temperatura del vapor (°C)				
		100	150	200	250	300
100 (99.606)	v	1.6960	1.9367	2.1725	2.4062	2.6389
	h	2675.77	2776.59	2875.48	2974.54	3074.54
	s	7.3610	7.6147	7.8356	8.0346	8.2171
200 (120.21)	v		0.95989	1.0805	1.1989	1.3162
	h		2769.09	2870.78	2971.26	3072.08
	s		7.2809	7.5081	7.7100	7.8940
300 (133.53)	v		0.63403	0.71644	0.79645	0.87534
	h		2761.18	2865.95	2967.93	3069.61
	s		7.0791	7.3132	7.5181	7.7037
400 (143.61)	v		0.47089	0.53434	0.59520	0.65488
	h		2752.78	2860.99	2964.56	3067.11
	s		6.9305	7.1724	7.3805	7.5677
500 (151.84)	v			0.42503	0.47443	0.52260
	h			2855.90	2961.13	3064.60
	s			7.0611	7.2726	7.4614

De hecho, el número de posibles combinaciones de temperatura-presión es tan grande que sería virtualmente imposible recolectarlos todo en una sola tabla. Como resultado, un gran número de tablas de vapor sobre calentado usa valores representativos de presión-temperatura para formar un resumen de tabla.



Los datos que no se encuentran directamente en la tabla se deben obtener por interpolación.

$$x = \frac{(y - y_1)}{(y_2 - y_1)}(x_2 - x_1) + x_1$$

TABLAS DE VAPOR SATURADO

Presión	Temperatura de saturación	Volumen específico		Densidad vapor saturado y seco	Entalpía del líquido	Entalpía del vapor saturado y seco	Calor latente de vaporización
		Líquido	Vapor saturado				
Kg/cm_2	C	Litro/kg	m^3/kg	kg/m^3	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg
0,010	6,7	1,000	131,6	0,007599	6,73	600,2	593,5
0,020	17,2	1,001	68,25	0,01465	17,25	604,9	587,6
0,030	23,7	1,003	46,52	0,02150	23,81	607,8	584,0
0,035	26,4	1,003	40,22	0,02486	26,39	608,9	582,5
0,040	28,6	1,004	35,46	0,02820	28,67	609,8	581,1
0,050	32,6	1,005	28,72	0,03482	32,57	611,5	578.9
0,075	40,0	1,008	19,69	0,05105	39,96	614,7	574,7
0,10	45,5	1,010	14,95	0,06689	45,45	617,0	571,6
0,15	53,6	1,014	10,20	0,09804	53,59	620,5	566,9
0,20	59,7	1,017	7,789	0,1284	59,65	623,1	563,4
0,25	64,6	1,020	6,318	0,1583	64,54	625,0	560,5

0,30	68,7	1,022	5,324	0,1878	68,66	626,8	558,1
0,40	75,4	1,026	4,066	0,2459	75,41	629,5	554,1
0,60	85,4	1,033	2,782	0,3595	85,47	633,5	548,0
0,80	93,0	1,038	2,125	0,4706	93,05	636,4	543,3
1,00	99,1	1,043	1,725	0,5797	99,19	638,8	539,6
1,50	110,8	1,052	1,181	0,8467	110,99	643,1	532,1
2,00	119,6	1,060	0,9018	1,109	119,94	646,3	526,4
2,50	126,8	1,067	0,7318	1,367	127,2	648,7	521,5
3,00	132,9	1,073	0,6169	1,621	133,4	650,7	517,3
3,50	138,2	1,078	0,5338	1,873	138,9	652,4	513,5
4,00	142,9	1,083	0,4709	2,124	143,7	653,9	510,2
4,60	147,2	1,087	0,4215	2,373	148,1	655,2	507,1
5,00	151,1	1,092	0,3817	2,620	152,1	656,3	504,2
6,00	158,1	1,100	0,3213	3,111	159,3	658,3	498,9
7,00	164,2	1,107	0,2778	3,600	165,7	659,9	494,2
8,00	169,6	1,114	0,2448	4,085	171,4	661,2	489,8
9,00	174,5	1,120	0,2189	4,568	176,5	662,3	485,8
10,0	179,0	1,126	0,1980	5,051	181,3	663,3	482,1
11,0	183,2	1,132	0,1808	5,531	185,7	664,1	478,4
12,0	187,1	1,137	0,1663	6,013	189,8	664,9	475,1
13,0	190,7	1,143	0,1540	6,494	193,6	665,6	472,0
14,0	194,1	1,148	0,1434	6,974	197,3	666,2	468,9
15,0	197,4	1,153	0,1342	7,452	200,7	666,7	465,9
16,0	200,4	1,157	0,1261	7,930	204,0	667,1	463,1
17,0	203,3	1,162	0,1189	8,410	207,2	667,5	460,3
18,0	206,1	1,166	0,1125	8,889	210,2	667,8	457,6
19,0	208,8	1,171	0,1067	9,372	213,1	668,2	455,1
20,0	211,4	1,175	0,1015	9,852	215,7	668,5	452,6
25,0	222,9	1,195	0,08150	12,27	228,6	669,3	440,7
30,0	232,8	1,214	0,06797	14,71	239,6	669,6	430,0
35,0	241,4	1,232	0,05819	17,18	249,5	669,5	420,0
40,0	249,2	1,249	0,05077	19,70	258,4	669,0	410,6
45,0	256,2	1,266	0,04495	22,25	266,6	668,4	401,8
50,0	262,7	1,282	0,04026	24,84	274,3	667,5	393,2
55,0	268,7	1,299	0,03639	27,48	281,5	666,6	385,1
60,0	274,3	1,315	0,03313	30,18	288,3	665,4	377,1
66,0	279,5	1,331	0,03036	32,94	294,8	664.0	369,2
70,0	284,5	1,347	0,02798	35,74	301,0	662,6	361,6
75,0	289,2	1,363	0,02589	38,63	307,0	661,0	364,0
80,0	293,6	1,379	0,02405	41,58	312,8	659,3	346,5
85,0	297,9	1,395	0,02243	44,58	318,4	657,6	339,2

90,0	301,9	1,412	0,02096	47,71	323,8	655,7	331,9
95,0	806,8	1,428	0,01965	50,89	329,1	653,8	324,7
100,0	309,5	1,445	0,01846	54,17	334,2	651,7	317,5
110,0	316,6	1,480	0,01638	61,05	344,2	647,2	303,0
120,0	323,2	1,517	0,01463	68,35	353,9	642,5	288,6
130,0	329,3	1,557	0,01318	76,16	363,4	637,2	273,8
140,0	335,1	1,600	0,01182	84,60	372,7	631,7	269,0
150,0	340,6	1,644	0,01066	93,81	381,9	625,6	243,7
160,0	345,7	1,693	0,009625	103,9	391,1	618,9	227,8
170,0	360,7	1,748	0,008681	115,2	400,4	611,5	211,1
180,0	365,3	1,812	0,007803	128,2	410,1	602,8	192,7
190,0	359,8	1,890	0,00697	143,5	420,4	593,0	172,6
200,0	364,1	1,987	0,00618	161,9	431,3	581,4	150,1
212,0	369,0	2,17	0,00517	193,2	447,6	562,2	114,6
224,0	373,6	2,67	0,00373	268	479	520,7	45,7

TABLAS DE VAPOR SOBRECALENTADO

Presión kg/cm^2	**100º**	**120º**	**150º**	**170º**	**200º**	**230º**	**260º**	**300º**	**320º**	**350º**	**400º**	**450º**	**500º**	**550º**	**600º**	**650º**	**700º**
0,10	642,0	651,0	664,7	673,9	687,7	701,6	715,7	734,8	744,4	758,9	783,4	808,3	833,6	859,3	885,4	912,0	938,9
0,400	641,1	650,3	664,2	673,4	687,4	701,4	715,5	734,7	744,3	758,8	783,3	808,2	833,6	859,3	885,4	911,9	938,9
0,700	640,2	649,7	663,7	673,0	687,0	701,1	715,3	734,5	744,1	758,7	783,2	808,1	833,5	859,2	885,4	911,9	938,8
1,00	639,2	649,0	663,0	672,5	686,6	700,7	714,9	734,0	743,6	758,0	782,6	807,6	833,0	858,8	884,8	911,1	938,0
1,50	-	647,8	662,3	671,8	686,0	700,2	714,5	733,7	743,3	758,0	782,6	807,6	833,0	858,8	884,8	911,1	938,0
2,00	-	646,5	661,5	671,2	685,4	699,7	714,1	733,4	743,1	757,9	782,6	807,6	833,0	858,8	884,8	911,1	937,9
2,50	-	-	660,6	670,4	684,8	699,2	713,7	733,0	742,8	757,6	782,4	807,5	832,9	858,7	884,7	911,0	937,8
3,00	-	-	659,7	669,6	684,2	698,7	713,2	732,7	742,5	757,4	782,2	807,3	832,7	868,5	884,5	910,8	937,7
3,60	-	-	658,6	668,8	683,5	698.1	712,7	732,3	742,2	757,1	782,0	807,2	832,6	858,4	884,4	910,8	937,7
4,00	-	-	657,9	668,2	683,0	697,7	712,4	732,1	742,0	756,9	781,8	807,1	832,5	858,4	884,4	910,7	937,6
4,60	-	-	656,6	667,2	682,3	697,2	711,9	731,7	741,7	756,5	781,7	806,9	832,3	858,2	884,2	910,7	937,6
5,00	-	-	-	666,6	681,7	696,6	711,5	731,4	741,4	756,4	781,5	806,7	832,1	858,0	884,1	910,6	937,5
6,00	-	-	-	664,8	680,6	695,7	710,7	730,7	740,8	755,9	781,1	806,4	831,9	857,8	884,0	910,5	937,4
7,00	-	-	-	663,2	679,4	694,7	709,9	730,1	740,2	755,3	780,6	806,1	831,7	857,6	883,8	910,3	937,3
8,00	-	-	-	661,5	678,2	693,8	709,2	729,4	739,5	754,9	780,3	805,7	831,4	857,4	883,6	910,1	937,1
9,00	-	-	-	-	676,8	692,7	708,4	728,9	739,0	754,3	779,9	805,4	831,2	857,2	883,4	909,9	936,9
10,00	-	-	-	-	675,4	691,9	707,6	728,0	738,4	753,8	779,5	805,1	830,9	856,9	883,2	909,8	936,8
11,00	-	-	-	-	674,1	690,9	706,8	727,3	737,7	753,2	779,1	804,8	830,7	856,7	883,0	909,6	936,6
12,0	672,9	690,0	705,9	726,7	737,1	752,8	763,1	778,7	788,9	804,5	814,9	830,5	840,9	856,5	882,8	909,4	936,5
13,0	671,5	689,0	705,1	726,0	736,5	752,2	762,7	778,2	788,6	804,2	814,6	830,2	840,6	856,3	882,7	909,4	936,5
14,0	670,0	688,0	704,2	725,1	735,8	751,7	762,2	777,9	788,3	803,9	814,3	829,1	840,3	856,0	882,5	909,2	936,3
15,0	668,4	686,9	703,4	724,7	735,2	751,2	761,8	777,5	787,9	803,5	813,9	829,6	840,0	855,8	882,3	909,0	936,1
16,0	-	685,8	702,3	724,0	734,7	750,7	761,3	777,1	787,5	803,2	813,6	829,4	839,8	855,6	882,1	908,9	936,0
17,0	-	684,5	701,5	723,3	733,9	750,2	760,8	776,7	787,2	802,9	813,3	829,1	839,5	855,4	881,9	908,7	935,9
18,0	-	683,3	700,6	722,8	733,6	749,7	760,3	776,2	786,7	802,5	812,9	828,8	839,3	855,2	881,7	908,5	935,7

Presión kh/cm	200º	230º	260º	300º	320º	350º	370º	400º	420º	450º	470º	500º	520º	550º	600º	650º	700º
19,0	-	682,1	699,7	722,0	732,9	749,2	759,9	775,8	786,4	802,2	812,7	828,6	839,1	855,0	881,5	908,3	935,6
20,0	-	681,0	698,9	721,3	732,4	748,8	759,4	775,5	786,1	801,9	812,4	828,3	838,8	854,7	881,3	908,2	935,5
25,0	-	674,5	694,1	717,8	729,1	746,1	757,1	773,4	784,2	800,4	811,0	827,0	837,6	853,7	880,5	907,5	934,8
30,0	-	-	688,9	714,2	726,1	743,5	754,8	771,4	782,4	798,7	809,5	825,7	836,5	852,6	879,6	906,7	934,1
35,0	-	-	683,8	710,5	722,8	740,7	752,3	769,3	780,4	797,0	808,0	824,4	835,3	851,5	878,7	905,9	933,4
40,0	-	-	678,0	706,6	719,6	737,9	749,7	767,2	778,5	795,4	806,5	823,0	834,0	850,4	877,7	905,1	932,7
46,0	-	-	671,6	702,5	716,0	735,0	747,3	765,1	776,6	793,7	804,9	821,7	832,8	849,3	876,8	904,3	932,0
50,0	-	-	-	698,4	712,5	732,2	744,7	762,9	774,7	792,0	803,4	820,3	831,5	848,2	875,8	903,4	931,3
56,0	-	-	-	692,8	708,2	728,7	741,6	760,4	772,3	789,9	801,5	818,7	830,0	846,8	874,6	902,4	930,5
60,0	-	-	-	689,0	705,1	726,4	739,7	758,7	770,9	788,5	800,1	817,5	828,9	845,8	873,8	901,7	929,9
66,0	-	-	-	683,1	700,3	722,9	736,7	756,0	768,3	786,5	798,3	815,9	827,4	844,5	872,7	900,9	929,2

6.6. ECUACIÓN GENERAL DE BALANCE DE ENERGÍA

La ecuación general del balance de energía se expresa de la siguiente forma:

Acumulación de energía Dentro del sistema = **Transferencia de energía a través de la frontera del sistema** - **Transferencia de energía fuera de la frontera del sistema** + **Energía generada dentro del sistema** - **Energía consumida dentro del sistema**

Esta ecuación puede ser aplicada a un equipo individual o a toda una planta

En la ecuación se pueden introducir algunas simplificaciones:

- No hay acumulación de energía dentro del sistema.
- No hay generación de energía dentro del sistema.
- No se consume energía dentro del sistema.

Si introducimos esas simplificaciones la ecuación anterior se reduce a:

Transferencia de energía a través de la frontera del sistema = **Transferencia de energía fuera de la frontera del sistema**

El principio que rige los balances de energía es la ley de conservación de la energía que establece que la energía no puede crearse ni destruirse (excepto en procesos nucleares).

Esta ley es también llamada primer principio de la termodinámica. En la más general de sus formas, la primera ley dice que la velocidad a la cual la energía (cinética + potencial + interna) es ingresada a un sistema por un fluido, más la velocidad a la cual ingresa energía en forma de calor, menos la velocidad a la cual la energía es transportada por el fluido fuera del sistema, menos la velocidad a la cual el sistema realiza trabajo sobre los alrededores, es igual a la velocidad a la cual la energía se acumula en el sistema.

$$\dot{m}_e \hat{E}_e(\hat{U}, \hat{E}_k, \hat{E}_p) - \dot{m}_s \hat{E}_s(\hat{U}, \hat{E}_k, \hat{E}_p) + \dot{Q} + \dot{W} = \frac{dm(\hat{U} + \hat{E}_k + \hat{E}_p)}{dt}$$

O, preferiblemente, a través de la siguiente ecuación, una vez que se han reordenado los términos de la ecuación anterior:

$$\dot{Q} + \dot{W} - \Delta(\dot{H} + \dot{E}_k + \dot{E}_p) = \Delta\dot{E}$$

El símbolo Δ es un operador de diferencia que significa el cambio de energía entre cada salida y cada entrada de masa del sistema.

Dónde:

Q, es el flujo de calor debido a los gradientes de temperatura.

W, es el trabajo intercambiado entre el fluido y un mecanismo instalado en el sistema.

ΔH, es la entalpía del sistema

ΔE_k, es la energía cinética del sistema

ΔE_p, es la energía potencial del sistema, y

ΔE, es la acumulación de energía del sistema

6.7. BALANCE DE ENERGÍA EN SISTEMAS ESTACIONARIOS

6.7.1. BALANCE DE ENERGÍA EN SISTEMAS CERRADOS A VOLUMEN CONSTANTE SIN REACCIÓN QUÍMICA

Un sistema será abierto o cerrado según la masa pueda o no atravesar los límites del mismo durante el período de tiempo en que se plantea el balance de energía. Por definición, un proceso batch o por lotes es cerrado mientras que un semibatch o un proceso continuo son abiertos.

El balance integral de un sistema cerrado debe ser planteado entre dos instantes de tiempo (por qué?). Como la energía no puede crearse ni destruirse, los términos de generación o consumo no tienen sentido, llegando a:

Acumulación = entrada - salida

Cuando planteamos los balances de masa en un sistema cerrado los términos de entrada y salida de materia se cancelaban ya que no había cruce de masa en las fronteras del sistema.

Sin embargo, en un sistema cerrado, la energía puede ser transferida en los límites del sistema como calor o trabajo, por lo tanto, los términos anteriores de entrada y salida no pueden eliminarse (sí se eliminan los términos de entrada/salida de energía transportada por el fluido dentro o fuera del sistema).

Por lo expuesto, el balance integral de energía de un sistema cerrado será:

Energía final del sistema - **Energía inicial del sistema** = **Energía neta transferida al sistema (entrada - salida)**

Ahora:

Energía inicial del sistema = $U_i + Ek_i + Ep_i$

Energía final del sistema = $U_f + Ek_f + EP_f$

Energía transferida = Q + W

Donde los subíndices i y f se refieren a los estados inicial o final del sistema, U, Ek, Ep, Q y W representan energía interna, energía cinética, energía potencial, calor transferido al sistema por los alrededores y trabajo realizado por los alrededores sobre el sistema.

Reagrupando llegamos a:

$$(U_f - U_i) + (Ek_f - Ek_i) + (Ep_f - Ep_i) = Q + W$$

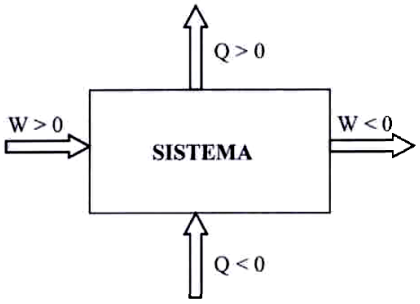
ó si empleamos el símbolo Δ para significar (final - inicial):

$$+\Delta Ek + \Delta Ep = Q + W$$

Esta última ecuación es conocida como la Primera Ley de la Termodinámica para sistemas cerrados. Para aplicar esta ecuación a un proceso cerrado deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones;

1. La energía interna de un sistema depende casi exclusivamente de su composición química, estado de agregación (sólido, líquido o gas) y de la temperatura del sistema material. Es independiente de la presión para gases ideales, y prácticamente independiente de la presión para líquidos y sólidos. Si no hay cambios de temperatura, ni cambios de fase ni reacción química en el sistema cerrado y si los cambios de presión son pequeños o menos de unas pocas atmósferas, entonces ΔU $\approx$ 0.
2. Si un sistema no se está acelerando (o retardando), ΔEk = 0. Si un sistema no está ascendiendo ni cayendo, entonces ΔEp = 0
3. Si un sistema o sus alrededores están a la misma temperatura o el sistema está perfectamente aislado, entonces Q = 0. Este proceso se denomina adiabático.
4. El trabajo efectuado por el sistema o sobre él, está acompañado de un movimiento de los límites o contorno del sistema contra una fuerza (por ejemplo el movimiento de un pistón o rotación de un eje o el paso de una corriente eléctrica o radiación en el contorno). Si no hay partes móviles, ni corrientes eléctricas, ni radiación en los límites del sistema, entonces tenemos W = 0.

   Para considerar los signos para el trabajo y el calor hay que tomar los siguientes criterios: Trabajo que ingresa al sistema es positivo y el que sale negativo. Calor que ingresa al sistema es negativo y el que sale es positivo.



6.7.2. BALANCE DE ENERGÍA EN SISTEMAS ABIERTOS SIN REACCIÓN QUÍMICA

Por definición de proceso abierto, en estos hay un flujo de materia que atraviesa los límites del mismo mientras el proceso se lleva a cabo. Por lo tanto, para que la masa ingrese al sistema es necesario efectuar un trabajo para empujar esta masa en el sistema y el sistema debe realizar un trabajo sobre los alrededores para que la masa pueda salir del sistema.

Ambos trabajos (tanto para ingresar la materia o que esta egrese) deben ser incluidos en el balance de energía, y la diferencia entre ambos es el trabajo de flujo. En realidad en estos sistemas, más que hablar de trabajo decimos velocidad de transferencia de energía como trabajo o trabajo/tiempo)

Trabajo de Flujo y Trabajo en el Eje

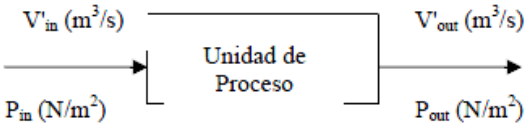
El trabajo neto realizado por el sistema sobre los alrededores puede ser escrito como:

$$W' = W'_s + W'_{fl}$$

dónde:

W'$_s$: es el trabajo en el eje o velocidad a la cual el sistema realiza trabajo sobre partes móviles del sistema (por ejemplo una bomba)

W'$_{fl}$: es el trabajo de flujo o velocidad a la cual el fluido realiza trabajo para salir del sistema menos la velocidad a la cual los alrededores realizan trabajo sobre el sistema para introducir el fluido en el proceso.



(Recuerde que por convención el trabajo que realiza el sistema es negativo). Para hallar una expresión para el cálculo del trabajo de flujo, consideremos el siguiente ejemplo simple de una única entrada y salida a un proceso.

Un fluido a una presión P_{in} (N/m^2) ingresa a una cañería a una velocidad volumétrica de V'$_{in}$ (m^3/s) y deja el proceso a una presión P_{out} (N/m^2) y a una velocidad volumétrica de V'$_{out}$ (m^3/s). Sobre el fluido que ingresa Al sistema, el fluido que está justo detrás suyo ha efectuado un trabajo a una velocidad:

$$W_{in(N.m/s)=P_{in}(N/m^2).V'_{in}(m^3/s)}$$

Mientras que que el fluido que abandona el sistema debe efectuar trabajo sobre los alrededores a una velocidad:

$$W_{out}(N.m/s) = P_{out}(N/m^2).V'_{out}(m^3/s)$$

La velocidad neta a la cual el trabajo es realizado por el sistema en la entrada y salida es:

$$W'_{fl} = P_{out}.V'_{out} - P_{in}V'_{in}$$

Si en el sistema ingresa o egresa más de una corriente, deben tenerse en cuenta todos los productos P.V' (cada corriente tiene su propio P.V').

Propiedades específicas y entalpía

Las propiedades de un material pueden ser intensivas o extensivas de acuerdo a que estas propiedades varíen o no según la cantidad de materia considerada. La masa, el número de moles, el volumen (o flujos másicos, molares o caudales en corrientes continuas), la energía cinética, potencial o interna (o velocidades de transporte de estas cantidades por una corriente continua) son propiedades extensivas mientras que la temperatura, presión y densidad son intensivas.

Una propiedad específica es una propiedad intensiva que se obtiene al dividir una propiedad extensiva (o su velocidad de flujo) por la masa total (o flujo másico) de material procesado. Ej. a) El volumen de un fluido es de 200 cm^3 y la masa total del mismo es de 200 g, entonces el volumen específico del fluido es 1 cm^3/g. b) una corriente transporta energía cinética a una velocidad de 300 J/min y el flujo másico es de 100 kg/min, entonces la energía cinética específica (E^oc) será 3 J/kg

Si a una dada temperatura y presión de operación, la energía interna del material es $\hat{U}$(J/kg), entonces la masa m(kg) de este material tendrá una energía interna (U):

$$U'(J) = m(kg).\hat{U}(J/kg)$$

En forma similar, una corriente continúa a una velocidad másica m'(kg/s) a la misma temperatura y presión del ejemplo anterior, transportará energía interna a una velocidad:

$$U'(J/s) = m'(kg/s).\hat{U}(J/kg)$$

Vale aclarar que igualmente hubiésemos obtenido propiedades específicas dividiendo por el número de moles o flujo molar en lugar de masa o flujo másico.

Entalpía específica: H = $\hat{U}$ + P.V donde P es la presión y $\hat{U}$ y V la energía interna específica y el volumen específico respectivamente.

Volviendo al balance de energía para un sistema abierto en estado estacionario, tenemos que la primera ley de la termodinámica tiene la forma:

Entrada = salida

(¿Por qué los términos de acumulación, generación y consumo se hacen cero?). "Entrada" significa la velocidad total de transporte de energía cinética, energía potencial y energía interna para todas las corrientes de entrada al sistema más la velocidad a la cual se le transfiere energía al sistema en forma de calor, más la velocidad a la cual los alrededores transfieren energía como trabajo al sistema, y "salida" es la velocidad total en que la energía es transportada por las corrientes de salida del proceso.

Si E'j representa la velocidad total de energía transportada por la corriente de entrada o salida j y Q' y W' se definen nuevamente como velocidad de entrada de calor al sistema y velocidad de producción de trabajo por los alrededores sobre el sistema, tenemos:

$$\text{Q' + W'+} \sum \text{E'j,}_{in} = \sum \text{E'j,}_{out}$$

Ctes. Entrada Ctes. Salida

$$\sum E'j_{,out} - \sum E'j_{,in} = Q' + W' \tag{6.6}$$

Ctes. Salida Ctes. Entrada

Si m'j, E'cj, E'pj y U'j son las velocidades de flujos másico, de energía cinética, energía potencial y energía interna de la corriente j, entonces la energía total transportada por esta corriente en la entrada o salida del sistema será:

$$\text{E'}_j = \text{U'}_j + \text{E'}_{cj} + \text{E'}_{pj}$$

$$\text{U'} = \text{m'}_j\, \hat{U}$$

$$\text{E'c}_j = \text{m'}_j.\text{u}_j^2/2$$

$$\text{E}_{pj} = \text{m'}_j.\text{g.z}_j$$

$$\text{E'}_j = \text{m'}_j\, (\hat{U}_j + .\text{u}_j^2/2 + \text{g z}_j)$$

Donde u_j es la velocidad de la corriente j y z_j es la altura de esta corriente j relativa al sistema de referencia en el cual $E_p = 0$.

El trabajo total realizado por el sistema sobre los alrededores es la suma del trabajo en el eje ($W_{S'}$) y el trabajo de flujo ($W_{fl'}$). Si V'_j es la velocidad volumétrica de flujo de la corriente j y P_j es la presión de esa corriente cuando cruza los límites del sistema, tenemos:

$$\text{W'}_{fl} = \sum \text{P}_j\text{V'}_j - \sum \text{P}_j\text{V'}_j$$

Ctes. Salida Ctes. Entrada

$$\text{V'}_j = \text{m'}_j.\text{V}_j$$

$$\text{W'= W'S} + \sum \text{m'}_j\text{P}_j\text{V}_j - \sum \text{m'}_j\text{P}_j\text{V}_j$$

Ctes. Salida Ctes. Entrada

Sustituyendo esta expresión en el balance total (Ec.6.6), y teniendo en cuenta que el trabajo definido en esta ecuación es el que realizan los alrededores sobre el sistema:

$$\sum m'_j[\hat{U}_j + P_jV_j + u_j^2/2 + gz_j] - \sum m'_j[\hat{U}_j + P_jV_j + u_j^2/2 + gz_j] = Q' + W'_S \tag{6.7}$$

Ctes. Salida Ctes. Entrada

(Recuerde que por convención W'$_S < 0$ en Ec.6.7)

La ecuación 6.7 puede usarse para todos los problemas de balances de energía en sistemas abiertos en estado estacionario. Sin embargo, es muy común agrupar los términos $\hat{U}_j$ + P$_j$V$_j$ en función de la entalpía específica y en estos términos, el balance se reduce a:

$$\sum m'_j[\hat{H}_j + u_j^2/2 + gz_j] - \sum m'_j[\hat{H}_j + u_j^2/2 + gz_j] = Q' + W'_S \tag{6.8}$$

Finalmente, usando nuevamente el símbolo Δ para denotar salida total - entrada total:

$$\Delta H' = \sum m'_j \hat{H}_j - \sum m'_j \hat{H}_j$$

Ctes. Salida Ctes. Entrada

$$\Delta E'c = \sum m'_j u_j^2/2 - \sum m'_j u_j^2/2$$

Ctes. Salida Ctes. Entrada

$$\Delta E'_p = \sum m'_j\ gz_j - \sum m'_j\ gz_j$$

Ctes. Salida Ctes. Entrada

Y en términos de estas cantidades, la Ec. 6.8 puede escribirse:

$$\Delta H' + \Delta E'_c + \Delta E'_p = Q' + W_S \tag{6.9}$$

La Ec.6.9 establece que en un sistema abierto en estado estacionario, la velocidad neta a la cual la energía es transferida a un sistema como calor y/o el trabajo en el eje (Q' + W'$_s$) es igual a la diferencia entre la velocidad a la cual las cantidades (entalpía + energía cinética + energía potencial) son transportadas fuera y dentro del sistema (ΔH' + ΔE'c + ΔE'p).

Si un proceso tiene una única corriente de entrada y una única corriente de salida, y por estar en estado estacionario m'$_{in}$ = m'$_{out}$ = m', entonces esta ecuación se simplifica ya que no es necesario utilizar sumatorias.

6.8. BALANCE DE ENERGÍA MECÁNICO - ECUACIÓN DE BERNOULLI

En los procesos químicos, las unidades tales como reactores, columnas de destilación, evaporadores, intercambiadores de calor, el trabajo en el eje y los cambios de energía cinética y potencial tienden a ser despreciables frente al calor intercambiado y los cambios de energía interna y entalpía. El balance de energía en estas unidades toman una forma muy sencilla: ΔU = Q (sistemas cerrados) y ΔH' = Q' (sistemas abiertos).

En otro importante tipo de operaciones, lo opuesto es válido (el calor transferido y los cambios de energía interna son mínimos comparados con los cambios de energía cinética, potencial y el trabajo en el eje). La mayoría de las operaciones de este tipo, involucra el transporte de fluidos desde o hasta tanques, reservorios o unidades de proceso. Los flujos de energía en estos casos se plantean en términos de energía mecánica (o balances de energía mecánica).

Si partimos del balance de energía para un sistema abierto en estado estacionario para un fluido incompresible que fluye a una velocidad másica m' y reemplazando el volumen específico por la inversa de la densidad del líquido (1/ ρ), la ecuación se puede escribir:

$$\Delta\ P/\rho + \Delta u^2/2 + g\ \Delta z + (\Delta\hat{U} - Q'/m'\ ) = W'_s/m'$$

El trabajo en el eje es el trabajo realizado por el sistema sobre las partes móviles de la línea (en realidad corresponde decir velocidad en que se transfiere trabajo o velocidad de producción de trabajo ya que es W' energía/tiempo).

En muchos casos sólo una pequeña cantidad de calor es transferida hacia o desde los alrededores, hay una variación muy pequeña de temperatura y además no hay cambios de fases ni ocurre reacción química alguna. Aún bajo estas

circunstancias, parte de la energía cinética o potencial es convertida en energía térmica como consecuencia de la fricción producida por el movimiento del fluido a través del sistema. En consecuencia, la cantidad ($\Delta\hat{U}$ - Q'/m') siempre tiene un valor positivo y se denomina a este término pérdidas por fricción y se lo simboliza por F, por lo que la ecuación anterior puede ser escrita:

$$\Delta P/\rho + \Delta u^2/2 + g\Delta z + F = W_s'/m'$$

Esta ecuación se conoce como balance de energía mecánica. Vale aclarar que la misma es válida sólo para fluidos incompresibles en estado estacionario.

Una forma simplificada del balance de energía mecánica se obtiene cuando no hay pérdidas por fricción (F = 0) y además no hay trabajo en el eje (o sea, no hay partes móviles) por lo que el balance de energía mecánica se reduce a la ecuación de Bernoulli que tiene la forma:

$$\Delta P/\rho + \Delta u^2/2 + g\Delta z = 0$$

6.9. COMO SE REALIZA UN BALANCE DE ENERGÍA

- Realizar el balance de masa
- Escribir el balance de energía apropiado y eliminar términos(o plantear directamente para sistemas cerrados o abiertos)
- Elegir el estado de referencia (fase, T, P) para cada especie
- Trazar los diagramas del estado inicial al final
- Encontrar o estimar los valores requeridos de U, H (ΔU, ΔH)
- Calcular trabajo, calor, interna, cinética y potencial si los hubiera
- Resolverlas ecuaciones planteadas

6.10. APLICACIONES

Problema 1

El agua fluye hacia una unidad de proceso a través de una tubería de 2 cm de DI a velocidad de 2.00 m^3/h. Calcule E_k para esta corriente en joule / segundo.

Solución

Primero calcule la velocidad lineal (que es igual a la velocidad de flujo volumétrico dividida entre el área de corte transversal de la tubería) y la velocidad del flujo másico del fluido:

$$Q = Av \Rightarrow v = Q/A$$

$$v = \frac{2m^3/h}{0,01^2\pi}\frac{1h}{3600s} = 1,77m/s$$

$$m = V\rho = \left(\frac{2m^3}{h}\right)\left(\frac{1000kg}{m^3}\right)\left(\frac{1h}{3600s}\right) = 0,556\ kg$$

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{(0,556\ kg)(1,77\ \frac{m}{s})^2}{2} = 0,871\ joule/s$$

Problema 2

El aire a 300°C y 130 kPa fluye a través de una tubería horizontal de 7 cm de DI a una velocidad de 42.0 m/s.

(a) Calcule E_k(W) suponiendo comportamiento ideal del gas.

(b) Si el aire se calienta a 400°C a presión constante, ¿qué valor tiene $\Delta E_k = E_k(400^oC) - E_k(300^oC)$?

(c) ¿Por qué sería incorrecto decir que la velocidad de transferencia de calor al gas en el inciso (b) debe ser igual a la velocidad de cambio de la energía cinética?

Solución

a) Determinaremos la masa del gas, usando las relaciones de los gases ideales:
Podemos usar la ecuación general de los gases para determinar la masa a las condiciones indicadas o podemos usar la relación siguiente:

$$m = \frac{V_1 P_1 T_2}{V_2 P_2 T_1} P M_{aire}$$

$$V_1 = Av = (0,035\ m/s)^2 \pi (42 \tfrac{m}{s}) = 0,162\ m^3/s$$

$$m = \frac{0,162\ m^3/s}{22.4\ L} \frac{1000\ L}{1\ m^3} \frac{130\ kPa}{101,3\ kPa} \frac{273\ K}{573\ K} (29\ g) = 127,9\ g/s$$

$$E_k = \frac{m\ v^2}{2} = \frac{(0,1279\ kg)(42 \frac{m}{s})^2}{2} = 112,8\ J/s(W)$$

b) Para las condiciones de 400°C determinaremos su nuevo volumen, sabiendo que la masa permanece constante, hacemos de la misma ecuación de masa despejando V_1

$$v_1 = \frac{mV_2}{PM_{aire}} \frac{P_2}{P_1} \frac{T_1}{T_2} = \frac{(127,9 \frac{g}{s})(22,4\ L)}{29\ g} \frac{101,3\ kPa}{130\ kPa} \frac{673\ K}{273\ K} \frac{1m^3}{1000\ L} = 0,19\ m^3/s$$

$$V_1 = A\ v$$

$$v = \frac{V_1}{A} = \frac{0,19\ m^3/s}{(0,035 m/s)^2 \pi} = 49,32\ m/s$$

$$E_k = \frac{m\ v^2}{2} = \frac{(0,1279\ kg)(49,32 \frac{m}{s})^2}{2} = 155,51\ J/s(W)$$

$$\Delta E_k = E_k(400^oC) - E_k(300^oC) = 155,51 - 112,80 = 42,8 J/s$$

c) Seria incorrecto decir que la velocidad de transferencia de calor al gas es igual a la velocidad de cambio de la energía cinética, porque algo del calor suministrado se utilizara para elevar la temperatura del gas de 300 °C a 400 °C. Mejor dicho incrementara la Energía Interna del gas.

Problema 3

Se bombea petróleo crudo a razón de 15.0 kg/s desde un puntó que se encuentra a 220 metros por debajo de la superficie terrestre hasta un punto que está 20 metros más arriba del nivel del suelo. Calcule la velocidad de incremento de energía potencial concomitante.

Solución

Los subíndices 1 y 2 denotarán el primer y el segundo puntos, respectivamente:

$$\Delta E_p = E_{p2} - E_{p1} = mg(z_2 - z_1)$$

$$\Delta E_p = \frac{15,0 kg}{s} \frac{9,81\ m}{s^2} \frac{1\ N}{1\ \frac{kgm}{s^2}} (20 - -(220)) m = 35300\ J/s$$

La respuesta también podría expresarse como 35300 W o 35,3 kW. Una bomba tendría que proporcionar por lo menos toda esta potencia para elevar el petróleo a la velocidad dada.

Problema 4

Suponga que vacía un galón de agua encima de un gato que está maullando a 10 pies debajo de la ventana de su recámara.

(a) ¿Cuánta energía potencial (ft-lbf) pierde el agua?

(b) ¿A qué velocidad viaja el agua (ft/s) justo antes del impacto?

Solución

a) Para determinar la masa usamos la formula m = V ρ

$$m = 1\ gal \frac{1\ ft^3}{7,4805\ gal} \frac{62,43\ lb}{1\ ft^3} = 8,35\ lb$$

$$\Delta E_p = 8,35\ lb_m \frac{32,174\ ft}{s^2} \frac{1\ lb_f}{32,174\ lb_m.ft/s^2}(-10-0)m = -83,46\ ft.lb_f$$

b) $E_k = \Delta E_p$

$$\frac{mv^2}{2} = m\ g(-\Delta z)$$

$$v = \sqrt{2g(-\Delta z)} = \sqrt{2(32,174\frac{ft}{s^2})(10\ ft)} = 25,37\ ft/s$$

Problema 5

Se suministra agua marina a razón de 100 kg/min y 20 °C de temperatura a un intercambiador de calor, por los tubos del intercambiador de calor circula una salmuera a razón de 50 kg/min y a una temperatura de - 2 °C, la cual abandona el intercambiador a 143 °C. ¿Cuál es la temperatura de salida del agua de mar?

Solución

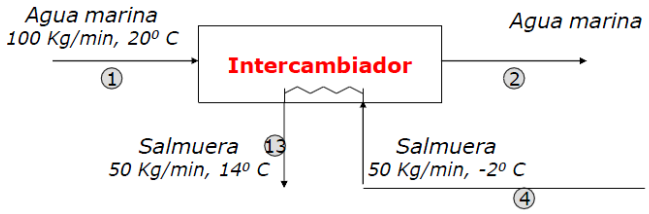
Consideraciones a tomar en cuenta:

Es un balance de energía sin cambio de fase.

No intercambia calor ni trabajo con el entorno.

No hay acumulación de energía en el sistema.

Los cambios en energía cinética y energía potencial del agua marina y de la salmuera al pasar por el intercambiador son despreciables.



La ecuación de balance es la siguiente:

$$\Delta H + \Delta E_c + \Delta E_p = Q + W_S$$

Por lo tanto la ecuación queda reducida a un balance entálpico:

$$\Delta H = 0$$

$$\sum m_i h_i - \sum m_j h_j = 0$$

Ingresan dos corrientes (1,4) y egresan dos corrientes (2,13)

$$m_1 h_1 + m_4 h_4 - m_2 h_2 - m_{13} h_{13} = 0$$

Pero $m_1 = m_2$ y $m_4 = m_{13}$, de donde:

$$m_1(h_1 - h_2) + m_4(h_4 - h_{13}) = 0$$

La entalpía específica de cada corriente es, $h_i = c_{P,i}\ (T_i - T_o)$

Considerando que el c_P de todas las corrientes es el mismo (independiente de la cantidad de sal y de la temperatura).

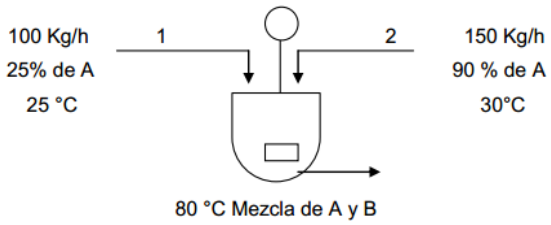
$$m_1 c_P(T_1 - T_2) + m_4 c_P(T_4 - T_{13}) = 0$$

$$(100\ \text{kg/min})\ c_P(20 - T_2) = -(50\ \text{kg/min})\ c_P\ (-2 - 14)$$

$$T_2 = 20 - 50*(14 - (-2)) / 100 = 12\ ^oC$$

Problema 6

Calcule el flujo de calor que se necesita quitar o añadir para que el siguiente proceso sea posible.



Compuesto	**Cp Cal/g°C**
A	0.8
B	0.4
MEZCLA	0.72 (%A /100) + 0.38 (%B /100)

El calor de solución se reporta a 25°C de acuerdo con esta ecuación:

$$\Delta Hsol = -2800 + 150(\%A / 100) - 800(\%A / 100)2\ \text{Kcal/Kg}$$

Solución

Primero resolveremos el balance de Masa

Balance de materia total $F_3 = F_1 + F_2 = 250$ Kg/h

Balance de materia de A $100(0,25) + 150(0,9) = 250\ W_{3A}$

$$W_{3A} = 0,64$$

Ahora resolveremos el balance de energía, considerando que no hay cambios de energía cinética ni potencial y que no se genera trabajo y no hay acumulación.

Balance de Energía $Q = F_3H_3 - F_1H_1 - F_2H_2$

El estado de referencia es de A y B puros a 25 °C

$F_1H_1 = (100 \times 0,25)\ (-2800 + 150(0,25) - 800(0,25)^2) = -70312.5$ Kcal/h

El C_p para la mezcla de A y B en F_2 se calcula mediante los datos de Mezcla:

C_p = 0,72 (90 /100) + 0,38 (10 /100) = 0,686

Como F_2 está a 30 °C debemos de agregarle a su entalpía de solución la diferencia con respecto a la temperatura referencial que es de 25 °C.

F_2H_2 = (150x0,90)(-2800 + 150(0,9) - 800(0,9)^2) + 150(0,686)(30 - 25) = -446740,5 Kcal

El F_3 está a 80°C por lo que debemos también encontrar el C_p para el calor sensible de la solución con respecto a la temperatura referencial que es de 25 °C

C_p = 0,72 (64 /100) + 0,38 (36 /100) = 0,597

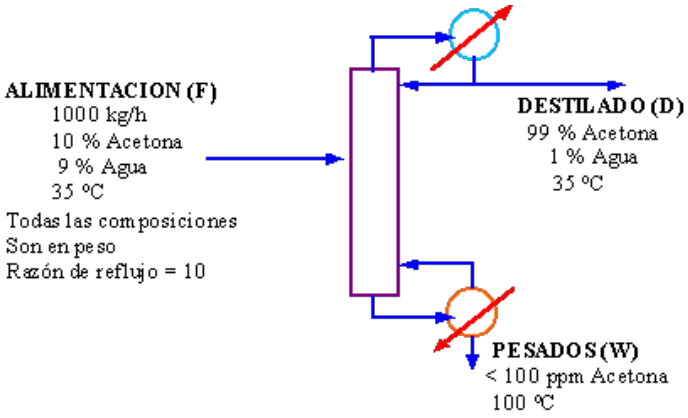
F_3H_3 = (250x0,64)(-2800 + 150(0,64) - 800(0,64)^2) + 150(0,597)(80- 5) = -476851.8 Kcal

Reemplazando valores en la ecuación general de Balance de energía tenemos:

Q = -476851.8 + 70312.5 + 446740.5 = 40201.2 Kcal/h **Calor que se añade**

Problema 7

Balance sin reacción química. Estimar las cantidades de vapor y agua requeridas para la columna de destilación mostrada en la figura.



En la planta se dispone de vapor seco saturado a 25 psig (276 kN/m^2), el agua de enfriamiento puede aumentar su temperatura en 30 °C. La columna opera a 1 bar

Solución

Balance de materiales

Es necesario hacer un balance de materiales para determinar los flujos de productos en el tope y el fondo.

Balance de acetona, despreciando las pérdidas de acetona en el fondo.

100 x 0,1 = D x 0,99

Destilado, D = 101 kg/h

Pesados, W = 1000 - 101 = 899 kg/h

Balance de energía

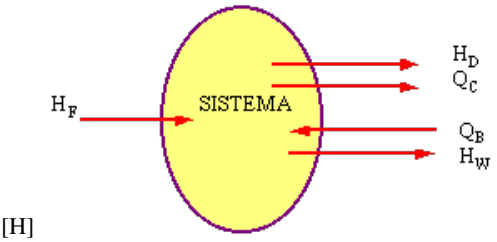
Las energías cinética y potencial de las corrientes del proceso son pequeñas y pueden despreciarse.

Tomando los límites del primer sistema que incluyan al hervidor y al condensador.

Entradas: calor que entra al hervidor Q_B + calor sensible de la alimentación H_F

Salidas: enfriamiento para el condensador Q_C + calor sensible de los productos del tope y el fondo $H_D + H_W$.

Las pérdidas de calor desde el sistema serán pequeñas si la columna y los intercambiadores están aislados convenientemente (típicamente menor a 5 por ciento) y será despreciado.



[H]

Bases: 25 °C, 1 hr

Capacidades caloríficas promedio:

Acetona 25 °C a 35 °C = 2,2 kJ/kg °K

Agua 25 °C a 100 °C = 4,2 kJ/kg °K

Capacidades caloríficas promedio de las corrientes:

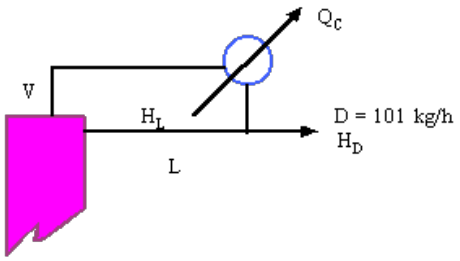
Alimentación, 10 por ciento de acetona = 0,1 x 2,2 + 0,9 x 4,2 = 4,00 kJ/kg oK

Tope, 99 por ciento de acetona, tomado como acetona, 2,2 kJ/kg. oK

Pesados, como agua, 4,2 kJ/kg oK

QC debe determinarse mediante un balance alrededor del condensador y hervidor.

Razón de reflujo



$$R = L/D = 10$$

$$L = 10 \times 101 = 1010 \text{ kg./h}$$

$$V = L + D = 1111 \text{ kg./h}$$

De los datos para la ebullición de una mezcla con 99 por ciento de acetona 1 por ciento de agua = 56.5 °C

Al estado estacionario: entradas = salidas

$$H_v = H_D + H_L + Q_C$$

$$Q_C = H_v - H_D - H_L$$

Asumiendo condensación completa

Entalpía del vapor H_V = calor latente + calor sensible

Aquí hay dos caminos para calcularla entalpía específica del vapor a su punto de ebullición.

(1) Calor latente de vaporización a la temperatura base + calor sensible para calentar el vapor hasta el punto de ebullición.

(2) Calor latente de vaporización al punto de ebullición + calor sensible para llevar el líquido al punto de ebullición.

Teniendo valores del calor latente de acetona y agua como funciones de la temperatura, se usará el segundo método.

Calor latente de acetona a 56,5 °C (330 °K) = 620 kJ/kg.

Calor latente del agua a 56,5 °C (330 °K) = 2500 kJ/kg.

Luego:

H_V = 1111 [(0.001 x 2500 + 0.99 x 620) + (56,5 - 25) 2,2] = 786 699 kJ/h. Las entalpías de los productos del tope y del reflujo serán cero, ya que ellos están a la temperatura base. Ambos son líquidos, y el reflujo estará a la misma temperatura del producto.

De aquí

$Q_C = H_V$ = 786 699 kJ/kg. (218,5 kW) Q_B es determinado por un balance sobre el sistema total

$$\text{Entrada} = \text{Salida}$$

$$Q_B + H_F = Q_C + H_D + H_W$$

H_F= 1000 x 4,00 (35 - 25) = 40 000 kJ/h

H_W = 899 x 4,2 (100 - 25) = 283 185 kJ/h

(El punto de ebullición de los productos es tomado como 100 °C)

de aquí:

$Q_B = Q_C + H_D + H_W - H_F$ = 786 699 + 283 185 + 0 - 40 000 = 1029 884 kJ/h (286,1 kW)

Q_B es suministrado por el vapor condensando

Calor latente del vapor = 2730 kJ/kg. a 275,8 kN/m^2

$$Vapor\ requerido = \frac{1029884}{2730} = 377,25\ kg/h$$

Q_C es removido por el agua de enfriamiento con un incremento en su temperatura de 30 °C

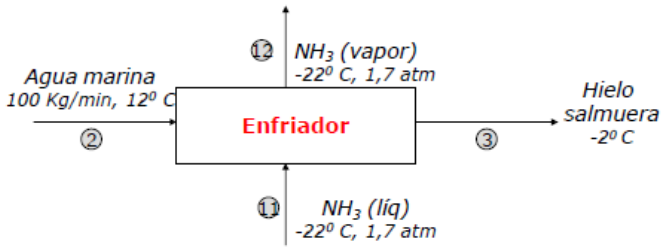
Q_B = flujo de agua x 30 x 4,2

$$\text{Flujo de Agua} = \frac{786699}{4,2x30} = 6244\ kg/h$$

Problema 8

Se suministra a un enfriador agua marina a razón de 100 kg/min y a una temperatura de 12 °C, mediante amoniaco líquido a - 22 °C y presión de 1,7 Atmósferas se procederá a enfriar y congelar parcialmente el agua marina hasta una temperatura de -2 °C, saliendo el amoniaco completamente como vapor del enfriador a la misma presión y temperatura del líquido.

¿Qué flujo de amoníaco es necesario para enfriar y parcialmente congelar el agua de mar? El hielo que se forma es el 53 por ciento de la corriente.



Solución

Base de Cálculo: 100 kg/min de agua marina de alimentación

Balance de masa

Hielo en 3 = 100 (0,53) = 53 kg/min

Agua en 3 = 100 - 53 = 47 kg/min

Analizando el sistema de enfriamiento observamos:

- No intercambia calor ni trabajo con el entorno
- No hay acumulación de energía en el sistema.
- Los cambios en energía cinética y energía potencial del agua marina y de la salmuera al pasar por el intercambiador son despreciables.
- Ingresan dos corrientes (2,11) y egresan dos corrientes (3,12)

Balance de Energía

La ecuación de balance es la siguiente:

$$\Delta H + \Delta E_c + \Delta E_p = Q + W_S$$

Por lo tanto la ecuación queda reducida a un balance entálpico:

$$\Delta H = 0$$

$$\sum m_i h_i - \sum m_j h_j = 0$$

$$m_2 h_2 + m_{11} h_{11} - m_3 h_3 - m_{12} h_{12} = 0$$

$$m_2(h_2 - h_3) + m_{11}(h_{11} - h_{12}) = 0$$

Δ $h_{amoníaco}$ = h_{12} - h_{11}

NH_3 (liq) $\Rightarrow$ NH_3(vapor) $\therefore$ ΔH = ΔH vaporización

Δ $h_{agua\ marina}$ = h_3 - h_2

Agua marina, 12 $^oC \rightarrow$ Hielo + salmuera, -2 ^oC

$\searrow$ Agua marina, -2 ^oC $\nearrow$

Cambio de Temperatura sin cambio de fase es calor sensible

Sin Cambio de Temperatura, cambio de fase es Calor latente

De tablas, para el NH_3, a T = -22 ^oC y P = 25 psi, el calor latente de vaporización, Δh_v = 574.9 Btu/lb (que convertidos son: T = -22 ^oC , P = 1,7 x 10^5Pa , Δh_v = 1336 kJ/kg)

Mientras que para el agua, el calor latente de fusión , Δh_f = 334 kJ/kg

Considerar que el C_P del agua marina y salmuera = 4,18 kJ/kg.^{o}C,

$$m_2(h_2 - h_3) + m_{11}(h_{11} - h_{12}) = 0$$

$$h_{11} - h_{12} = -\Delta h_v(NH_3, 22^oC, 25psi) = -1336\ kJ/kg$$

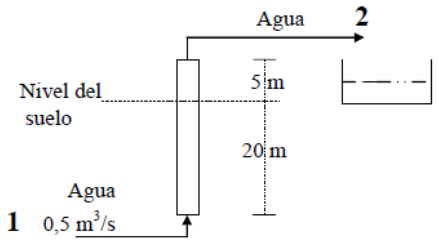
$$m_2(h_2 - h_3) = 0,53m_2(h_{ag.mar}, 12^oC - h_{hielo}, -2^oC) + 0,47m_2(h_{ag.mar}, 12^oC - h_{salm.}, -2^oC)$$

$$= 53 * (4,18 * [12 - (-2)] + 334) + 47 * (4,18 * [12 - (-2)]) = 23554\ kJ/min$$

Flujo de Amoniaco = m_{11} =23554 / 1336 = 17,6 kg/min

Problema 9

Desde un pozo subterráneo, a 20 metros por debajo del nivel del suelo, se bombea agua por una tubería hasta un tanque que se encuentra a 5 metros sobre el nivel del suelo, a una tasa de 0.5 m^3,s^{-1} (véase la figura). Asuma que no hay fricción del líquido en la tubería ni transferencia de calor entre el agua y el entorno. Calcular la potencia eléctrica requerida por la bomba, si la eficiencia de la misma es del 60 %.



Solución

Se trata de un sistema abierto, en estado estacionario. Asúmase, además, que la velocidad del agua durante el proceso de bombeo permanece constante (lo cual es una suposición bastante lógica si se desprecia el efecto de la fricción).

La ecuación de balance de energía. Es la de Balance Mecánico

$$Q + W = \Delta(H + E_p + E_k)$$

Se reduce a la siguiente expresión:

$$W = \Delta E_p$$

Dado que no hay transferencia de calor entre el sistema (el fluido) y el entorno (la tubería), se desprecian los cambios de entalpía, y la velocidad del agua permanece constante.

El cambio de energía potencial, por aumento de la elevación del líquido del punto 1 al 2, debe ser compensado por el trabajo eléctrico de la bomba.

Tómese como base de tiempo un (01) segundo. La densidad del agua es 1 g / cm^3 ó 10^3 kg / m^3. La masa de agua bombeada en un segundo es:

$$m = 0,5 m^3 x 10^3 \frac{kg}{m^3} = 500\ kg$$

El cambio en la energía potencial resulta:

$$\Delta E_p = E_{p2} - E_{p1} = m\ g\ h = 500\ kg x 9,81 \frac{m}{s^2} x(h_2 - h_1)m = 500 x 9,81 x(5 - (-20))J$$

$$\Delta E_p = 1,226 x 10^5 J$$

Como W = ΔE_p entonces: W = 1.226 x 10^5 J. Este valor corresponde al trabajo eléctrico de la bomba si la misma fuera 100 % eficiente. Pero solo el 60 % de su potencia es aprovechable. La potencia, que viene dada como trabajo por unidad de tiempo, será:

$$\text{Potencia} = 1,226 \text{ x } 10^5 \frac{J}{s} x \frac{100\,\%}{60\,\%} = 2,043 \text{ x } 10^5 \frac{J}{s} = 204,3 \text{ W}$$

Problema 10

El tanque de una poceta tiene una sección rectangular de dimensiones 20cm x 40cm y el nivel del agua está a una altura.

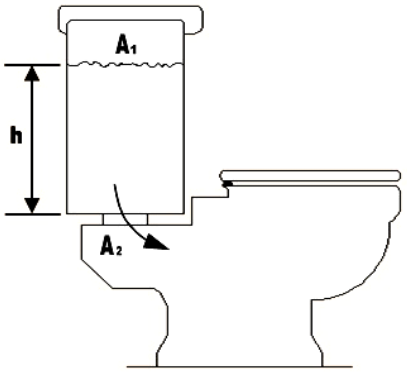
h = 20 cm por encima de la válvula de desagüe, la cual tiene un diámetro d_2 = 5 cm. Si al bajar la palanca, se abre la válvula:

a) ¿Cuál será la rapidez inicial de desagüe por esa válvula en función de la altura de agua remanente en el tanque?

b) ¿Cuál es la rapidez inicial de desagüe? No desprecie la velocidad en la superficie del tanque.

Solución

Aplicando la ecuación de Bernoulli



$$\frac{P_1}{\rho} + gh_1 + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + gh_2 + \frac{V_2^2}{2}$$

$$P_1 = P_2 = P_{atm}$$

$$V_2^2 - V_1^2 = 2gh$$

$$V_2 A_2 = V_1 A_1 \Rightarrow V_1 = V_2(A_2/A_1)$$

$$V_2^2 - \left[V_2(\frac{A_2}{A_1})\right]^2 = 2\ gh$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{2gh}{1-(\frac{A_2}{A_1})^2}}$$

Calculamos la rapidez

$$A_1 = (0,2)(0,4) \Rightarrow A_1 = 8x10^{-2}m^2$$

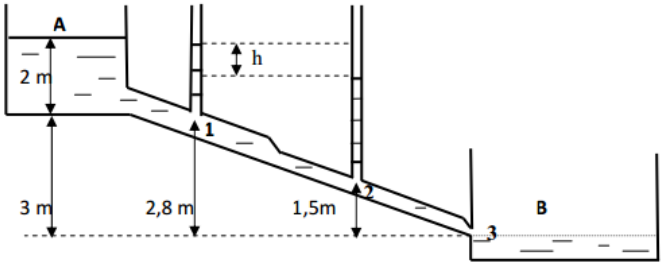
$$A_2 = \pi.r_2^2 = \pi.(0,025)^2 \Rightarrow A_2 = 1,96x10^{-3}m^2$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{2(9,8)(0,2)}{1-\left(\frac{1,96x10^{-3}}{8x10^{-2}}\right)^2}}$$

$$V_2 = 1,98\ m/s$$

Problema 11

Los depósitos A y B, de grandes dimensiones, están conectados por una tubería de sección variable. El nivel de agua en el depósito A es de 2m y el desnivel entre ambos depósitos es de 3 m. El radio en el tramo de tubería 1 es 3 cm, reduciéndose a la mitad en el punto 2 y a un tercio en el punto 3. Considere g=10m/s^2; z_1 = 2,8 m; z_2 = 1,5 m; z_3= 0 m y $P_3 = P_0$. Calcular:



a) Presión manométrica en el fondo del depósito A, expresada en pascales y m.c.a.

b) Velocidad con que vierte el agua en el depósito B (punto 3) y caudal expresado en l/s.

c) Velocidad en los puntos 1 y 2.

d) Representar la línea de altura total y línea de altura piezométrica.

e) Diferencia de altura h entre los piezómetros situados en los puntos 1 y 2.

Solución

a) La presión manométrica en el fondo del depósito coincide con la altura de agua del mismo.

$$P_A = P_M + P_B \Rightarrow P_M = P_A - P_B$$
$$\frac{P_A - P_B}{\rho g} = 2\ m.c.a$$
$$P_A - P_B = 2\rho g = 2(10\ m/s^2)(1000\ kg/m^3) = 2x10^4 Pa$$

b) Para obtener la velocidad en el punto 3, velocidad con el agua vierte al depósito B, se aplica la ecuación de Torricelli, considerando la diferencia de altura 5 metros. El caudal se obtiene aplicando la ecuación de continuidad.

$$v_3 = \sqrt{2\ g\ H} = \sqrt{2(10)(5)} = 10\ m/s$$
$$Q = v_3 A_3 = (10m/s)(\pi)(1m)^2 = 31,4\frac{m^3}{s} = 31400\ l/s$$

c) Aplicando la ecuación de continuidad, se obtienen las velocidades en los puntos 1 y 2.

$$v_1 A_1 \rho = v_2 A_2 \rho = v_3 A_3 \rho$$
$$v_1 3^2 \pi\rho = v_2 1.5^2 \pi\rho = (10m/s)1^2\pi\rho$$
$$v_1(9) = v_2(2.25) = (10m/s)$$
$$v_1 = \frac{10\frac{m}{s}}{9} = 1.11\ m/s$$
$$v_2 = \frac{10\frac{m}{s}}{2.25} = 4.44\ m/s$$

d) La línea de altura total se mantiene constante e igual a 5 m para todos los puntos; H = cte = 5 m. La línea de altura piezométrica se obtiene restando a la altura total la componente de la velocidad:

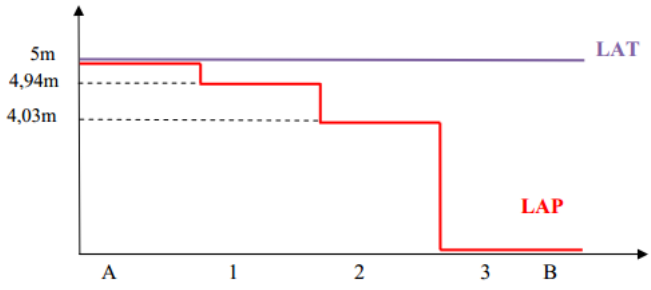
$$h_{pA} = H_A = 5m$$
$$h_{p1} = H_A - \frac{v_1^2}{2g} = 5 - \frac{(1,11)^2}{2(10)} = 4,94\ m$$
$$h_{p2} = H_A - \frac{v_2^2}{2g} = 5 - \frac{(4,44)^2}{2(10)} = 4,03\ m$$
$$h_{p3} = H_A - \frac{v_3^2}{2g} = 5 - \frac{(10)^2}{2(10)} = 0\ m$$

La altura piezométrica del punto 3 es nula ya que se ha considerado como plano de referencia la superficie libre del depósito B.

e) La diferencia de altura h entre los piezómetros situados en los puntos 1 y 2, se calcula por diferencia de altura piezométrica.

$$h = h_{p1} - h_{p2} = 0,91m$$

Representación de la Línea de Altura Total y Línea de Altura Piezométrica



Problema 12

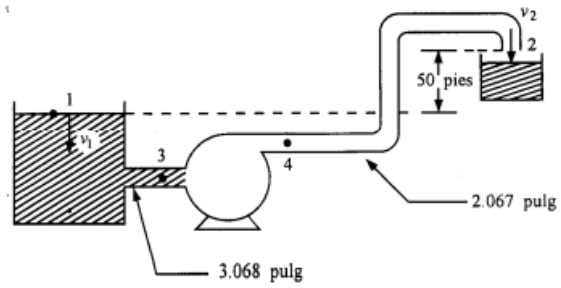
Una bomba que opera con un régimen de 69,1 gal/min extrae una solución líquida con densidad 114,8 lb_m/pie^3 de un tanque de almacenamiento que tiene una sección transversal considerable, por medio de una tubería de succión de 3,068 pulg de DI. La bomba descarga a través de una línea de 2,067 pulg de DI a un tanque elevado abierto. El extremo final de la línea de descarga está a 50 pies por encima del nivel del líquido en el tanque de alimentación. Las pérdidas por fricción en el sistema de tuberías son $\sum$F= 10,0 lb-pie fuerza / lb masa. ¿Qué presión debe desarrollar la bomba y cuál deberá ser su potencia con una eficiencia del 65 % (η = 0,65)? El flujo es turbulento.

Solución:

Primero se traza un diagrama de flujo del proceso (Fig. que esta a continuación). Se usará la ecuación de balance de energía mecánica. El término W_s en la ecuación se convierte en:

$$W_S = -\eta W_P$$

Donde: W_s= energía mecánica que la bomba suministra al fluido, esto es, trabajo mecánico neto, η = eficiencia fraccionaria y W_p = energía o trabajo axial suministrado a la bomba.



Con los datos de tablas de tubería se sabe que el área de sección transversal de la tubería de 3.068 pulg mide 0.05134 pie^2 y la correspondiente a la de 2.067 pulg, 0.0233 pie^2. La velocidad de flujo es:

$$\text{velocidad de flujo} = \left(69,1\frac{gal}{min}\right)\left(\frac{1\ min}{60\ s}\right)\left(\frac{1\ pie^3}{7,841\ gal}\right) = 0,1539\ pie^3/s$$

$$v_2 = \left(0,1539\frac{pie^3}{s}\right)\left(\frac{1}{0,0233\ pie^2}\right) = 6,61\ pie/s$$

Puesto que el tanque es muy grande, v_1=0. Por lo tanto, $v_1^2/2g_c$ = 0. La presión p_1 = 1 atm y p_2 = 1 atm. Además α = 1.0 ya que el flujo es turbulento. Por consiguiente:

$$\frac{p_1}{P} - \frac{p_2}{P} = 0$$

$$\frac{v_2^2}{2\ g_c} = \frac{(6,61)^2}{2(32,174)} = 0,679\ pie.lb_f/lb_m$$

Al usar el dato de referencia de z_1 = 0 se obtiene,

$$z_2\frac{g}{g_c} = (50,0)\frac{32,174}{32,174} = 50,0\frac{pie.lb_f}{lb_m}$$

Al aplicar la ecuación de balance de energía mecánica, despejando W_s y sustituyendo los valores conocidos:

$$W_s = z_1 \frac{g}{g_c} - z_2 \frac{g}{g_c} + \frac{v_1^2}{2\ g_c} - \frac{v_2^2}{2\ g_c} + \frac{p_1 - p_2}{\rho} - \sum F$$

$$W_s = 0 - 50 + 0 - 0,678 + 0 - 10 = -60,678 \frac{pie.lb_f}{lb_m}$$

Al Usar la ecuación W_S= - η W_P y despejando W_p

$$W_p = \frac{W_s}{\eta} = \frac{60,678}{0,65} \frac{pie.lb_f}{lb_m} = 93,35 \frac{pie.lb_f}{lb_m}$$

velocidad de flujo de masa = $\left(0,1539 \frac{pie^3}{s}\right)\left(114,8 \frac{lb_m}{pie^3}\right) = 17,65\ lb_m/s$

potencia de la bomba = $\left(17,65 \frac{lb_m}{s}\right)\left(93,3 \frac{pie.lb_f}{lb_m}\right)\left(\frac{1\ hp}{550\ pie. \frac{lb_f}{s}}\right) = 3,00hp$

Para calcular la presión a la que debe operar la bomba, la ecuación se adapta con respecto a la propia bomba entre los puntos 3 y 4 como lo muestra el diagrama,

$$v_3 = \left(0,1539 \frac{pie^3}{s}\right)\left(\frac{1}{0,05134 pie^2}\right) = 3,00\ pie/s$$

$$v_4 = v_2 = 6,61\ pie/s$$

Puesto que la diferencia de nivel entre z_3 y z_4 de la propia bomba es despreciable, puede rechazarse. Reescribiendo la ecuación anterior entre los puntos 3 y 4 y sustituyendo los valores conocidos ($\sum$F = 0 puesto que se trata del sistema de bombeo),

$$\frac{p_4 - p_3}{\rho} = z_3 \frac{g}{g_c} - z_4 \frac{g}{g_c} + \frac{v_3^2}{2\ g_c} - \frac{v_4^2}{2\ g_c} - W_s - \sum F$$

$$\frac{p_4 - p_3}{\rho} = 0 - 0 + \frac{3^2}{2(32,174)} - \frac{6,61^2}{2(32,174)} + 69,678 - 0 = 60,14 \frac{pie.lb_f}{lb_m}$$

$$p_4 - p_3 = \left(60,14 \frac{pie.lb_f}{lb_m}\right)\left(114,8 \frac{lb_m}{pie^3}\right)\left(\frac{1}{144 \frac{pulg^2}{pie^2}}\right) = 48,0\ lb_f/pulg^2 abs$$

Presión desarrollada por la bomba (331 kPa)

6.11. GRÁFICA DE HUMEDAD Y SU USO

6.11.1. DEFINICIÓN

En el capítulo IV ya vimos las tablas y las gráficas de humedad denominadas tablas psicométricas de vapor y diagrama psicométrico del agua, también allí se desarrolló la forma como se usa estos instrumentos, por lo que ya no vamos a repetir, sino cabe repasar esta información. Veremos a continuación las ecuaciones simplificadas usadas para la elaboración del diagrama psicométrico:

Humedad absoluta

$$Y = \left(\frac{18}{29}\right)\left(\frac{P_V}{P_T - P_V}\right) = 0,62\left(\frac{P_V}{P_T - P_V}\right)$$

Volumen húmedo

$$V_H = \left(\frac{1}{29} + \frac{Y}{28}\right)\frac{0,082T}{P}$$

P en atmósfera y T en K

Calor húmedo

$$C_H = 0,24 + 0,46Y$$

Entalpía específica (T = 0 °C)

$$H_H = (0,24 + 0,46Y) + 597,2Y$$

Temperatura húmeda

$$\frac{h_C}{K_G M_v \lambda_{Tbh}} \approx 0,5$$

Se puede entonces determinar T_{bh} de acuerdo a la ecuación psicrométrica.

$$P_{Tbh} - P_V = 0,5(T_{MG} - T_{bh})$$

El coeficiente h_C/k_y se denomina coeficiente psicrométrico y puede determinarse por la expresión:

$$\frac{h_C}{K_Y} = c(S_C/P_r)^{0,56}$$

Temperatura de saturación adiabática.- Es la temperatura alcanzada por una masa de gas cuando se pone en contacto con un líquido en condiciones adiabáticas. Se determina por medio de la expresión:

$$Y_S - Y = \frac{C}{\lambda_S}(T - T_S)$$

6.11.2. DIAGRAMA DE HUMEDAD Y DE ENTALPÍA PARA VAPOR DE AGUA Y AIRE

El diagrama lo podemos ver en la figura 6.1:

6.11.3. ACONDICIONAMIENTO DE AIRE

En el enfriamiento o calentamiento del aire, desde condiciones indeseables hasta condiciones que son adecuadas para el confort humano, se debe considerar la adición o remoción de dos tipos de calor: calor sensible y calor latente. A continuación, veremos algunos ejemplos de cambios de calor sensible y cambios de calor latente.

Enfriamiento Sensible

El término «cambio de calor sensible», se refiere a un cambio en calor que provocará un cambio en la temperatura del aire. Con frecuencia, al enfriar el aire seco y caliente del desierto, o al calentar aire helado, se requerirá tan sólo un cambio en el calor sensible del aire. Puesto que un cambio en el calor sensible del aire no afectará la cantidad de humedad de éste; dicho cambio puede graficarse en la carta psicométrica, paralelo a las líneas constantes de punto de rocío. Esto significa que el punto de rocío del aire, no cambiará mientras sea solamente calor sensible el que se agrega o se quita. Por otra parte, el peso total del aire en kg permanece constante, pero su volumen (m^3/kg) sí cambia, puesto que el aire se contrae al ser enfriado.

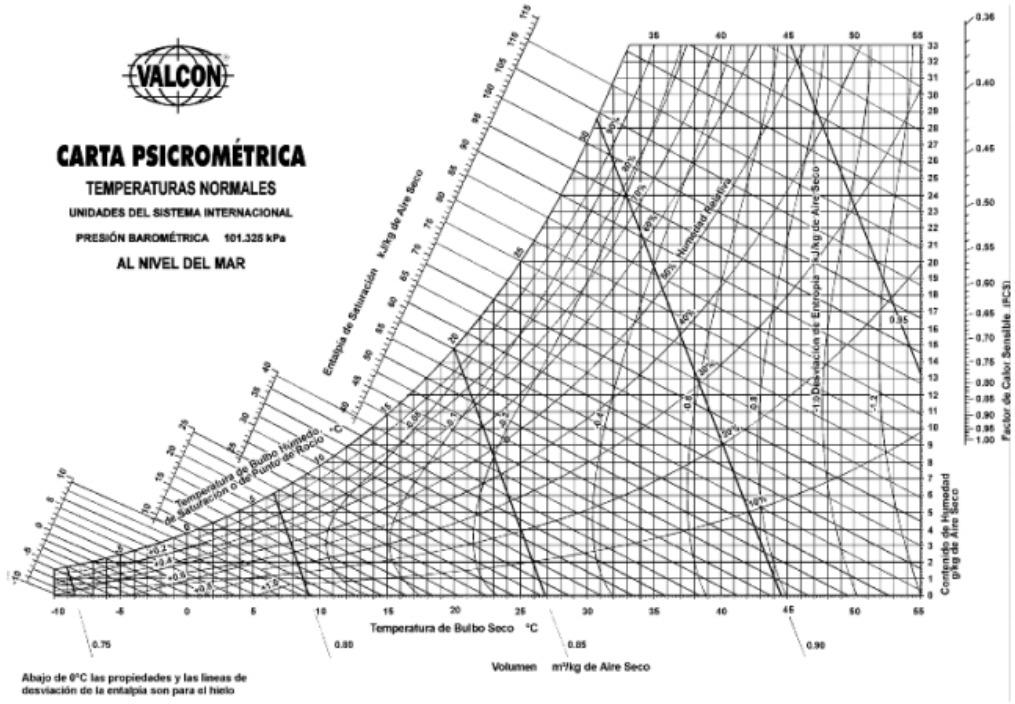


Figura 6.1: Carta psicrométrica

Veamos un ejemplo de enfriamiento sensible de aire. Si originalmente está a 43°C de bs, y 21°C de bh, y se quiere enfriarlo a 17°C de bs y 12°C de bh. Comparando las propiedades de la condición inicial (1), con las de la condición final (2), podemos ver que hemos aumentado la h_r del aire de aproximadamente 13 %, a aproximadamente 56 %, como se muestra en la figura que está a continuación, aunque no se ha cambiado el contenido de humedad del aire.

Esto es porque al enfriar el aire, se le reduce su capacidad de retención de humedad en saturación, y consecuentemente, se aumenta la relación de humedad en el aire, con la máxima que podría retener a esa temperatura de bs. Esta línea de enfriamiento sensible (1-2), es casi paralela a las líneas constantes de contenido de humedad, que son las mismas de la temperatura de punto de rocío; por lo que estos dos valores son constantes y no cambian durante el enfriamiento sensible. En este ejemplo, el contenido de humedad es de aproximadamente 6,4 g/kg de aire seco, y la temperatura de punto de rocío es de 8.2°C. También podemos ver que al enfriar el aire, se ha disminuido su volumen específico de aproximadamente 0,905 m^3 /kg, que tenía en el punto 1, a aproximadamente 0,835 m^3 /kg en el punto 2. Consecuentemente, al disminuir su volumen específico, aumenta su densidad.

Como es lógico, el aire con un cierto contenido de humedad, mientras más frío está es más denso. Al graficar el cambio de entalpía para este efecto de enfriamiento sensible, se puede ver que en la condición 1, contenía 61 kJ/kg (14,58 kcal/kg), mientras que en la condición 2 contiene 34,2 kJ/kg (8,17 kcal/kg). Si restamos la entalpía 2 de la entalpía 1, llegamos a un cambio total de entalpía de 6,41 kcal/kg. Por lo tanto, por cada kilogramo de aire que se enfríe de la condición inicial a la final, se deben quitar 6,41 kcal/kg. Este cambio de calor sensible se muestra en la figura 6.2 como h_s.

Cambios de Calor Latente y Sensible

Algunas veces, es deseable calcular los cambios de calor latente y de calor sensible, en las condiciones del aire según se muestra en la figura siguiente. Cuando se traza sobre la carta psicrométrica un cambio de calor sensible, el resultado es una línea horizontal, y el cambio de puro calor latente, es una línea vertical. La condición resultante en el ejemplo anterior, no es una línea horizontal ni vertical, sino que cae en medio de estas dos. Si trazamos una línea vertical paralela a las líneas de bs del punto 1, y trazamos una línea horizontal paralela a las líneas de punto de rocío del punto 2, las

tres líneas formarán un triángulo rectángulo. Las longitudes de las líneas vertical y horizontal, representarán los dos componentes del calor total: calor latente y calor sensible.

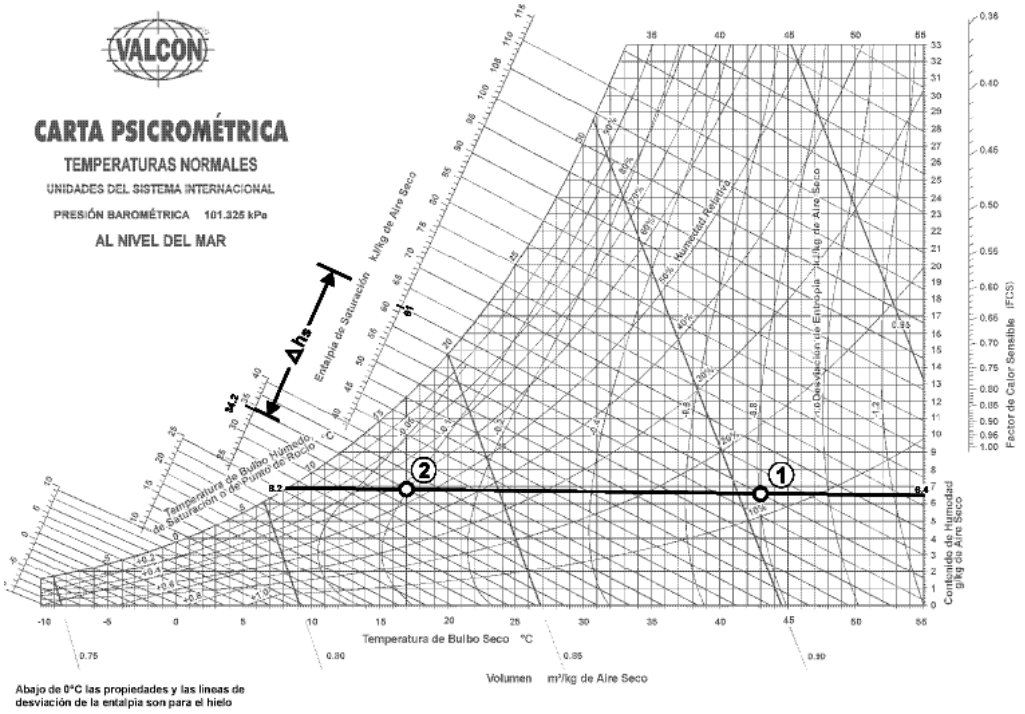


Figura 6.2: Carta psicrométrica

Si ahora trazamos una línea paralela a las líneas constantes de bh, partiendo de la intersección de las líneas vertical y horizontal, hasta la escala de entalpía, veremos que el calor total se divide en dos componentes. El componente más bajo en la escala, es el cambio de calor sensible y la parte alta, es el cambio de calor latente.

Encontramos, pues, que esta línea interseca la escala de entalpía 45 kJ/kg. Entonces, el cambio de calor sensible se saca restando el contenido de calor en el punto 2, que es 27 kJ/kg de los 45 kJ/kg, lo que nos da 18 kJ/kg (hs). El cambio de calor latente se encuentra restando los 45 kJ/kg del calor total en el punto 1, lo que nos da (57.5 - 45) 12.5 kJ/kg (Δ h), ver figura 6.3.

6.11.4. MÉTODOS DE HUMIDIFICACIÓN

Existen diferentes métodos por medio de los cuales se puede humidificar el aire. En la mayoría de los casos, la masa de aire se pone en contacto sea con líquidos, sólidos húmedos o con masas de aire húmedo. La mayoría de los métodos son simples, a excepción de la humidificación adiabática la cual requiere de condiciones adiabáticas (sin intercambio de calor con el medio ambiente).

6.11.4.1. Mezclado de masas de gases húmedos

Este método consiste en mezclar adiabáticamente masas de gases húmedos, los cuales tienen humedades diferentes. Las condiciones finales de la masa gaseosa resultante se pueden evaluar en función del estado inicial de las corrientes gaseosas. En el caso de la mezcla de dos masas de gases húmedos (A y B) las condiciones son: Y_A, Y_B; H_A, H_B; T_A, T_B y M_A, M_B. Las condiciones finales de la mezcla están dadas por Y_C, H_C, T_C Y M_C y las podemos cacular a través del establecimiento de un balance de materia y energía aplicado tanto a toda la masa y al vapor.

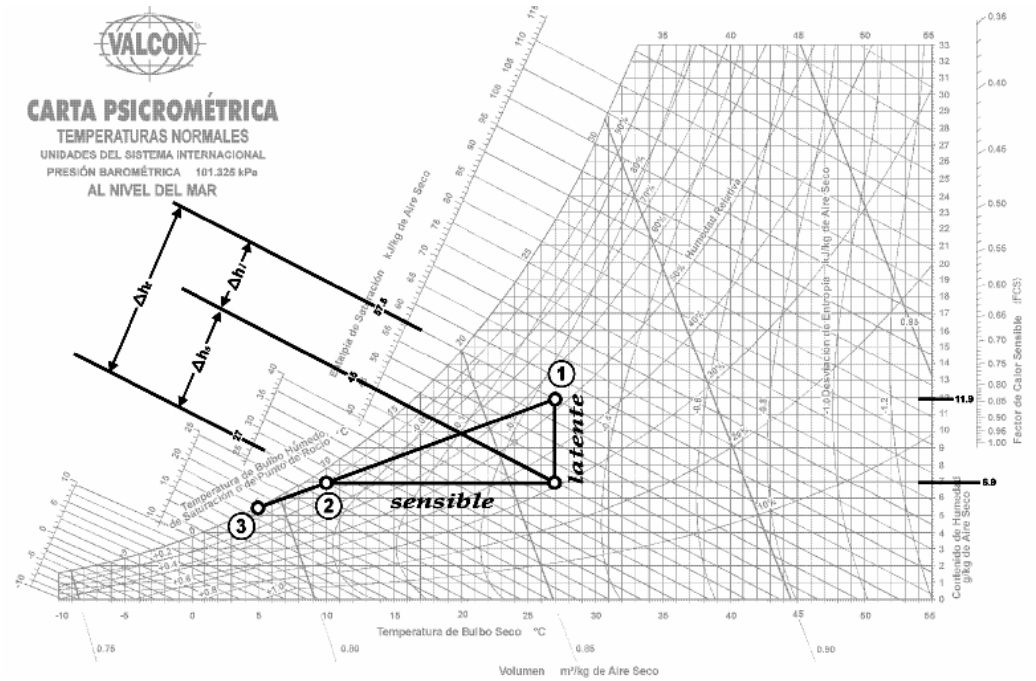


Figura 6.3: Carta psicrométrica

Balance de materia

$$G_A + G_B = G_C \quad (masa\ total, kgG + V) \tag{6.10}$$

$$G_{SA} + G_{SB} = G_{SC} \quad (masa\ vapor\ referida\ al\ vapor, KgG./h) \tag{6.11}$$

Balance de Humedad

$$G_{SA}Y_A + G_{SB}Y_B = G_{SC}Y_C \tag{6.12}$$

$$(kg_G/h)(kg_B/kg_G) = (kg_v/h)$$

Balance de energía o entalpía

$$G_{SA}H_A + G_{SB}H_B = G_{SC}h_C \tag{6.13}$$

Humedad

$$Y_C = \frac{G_AY_A + G_BY_B}{G_A + G_B} \tag{6.14}$$

Entalpía

$$H_C = \frac{G_AH_A + G_BH_B}{G_A + G_B} \tag{6.15}$$

Temperatura

$$T_C = \frac{G_AT_A + G_BT_B}{G_A + G_B} \tag{6.16}$$

Las condiciones de aire húmedo resultante se pueden encontrar sobre el diagrama psicrométrico, en la recta de unión de los dos puntos representativos de las masas mezcladas.

En la figura 6.4, el punto A representa la condición de una masa gaseosa y el punto B la de la otra masa gaseosa en contacto. Estos dos puntos se unen por medio de una línea recta. El punto C sobre la línea representa la condición final de la mezcla. La posición del punto C depende del porcentaje de cada masa gaseosa presente en la mezcla.

Mientras mayor sea A, más cerca estará C a B y más cercano estará de B si ocurriese lo contrario.

Con el objeto de mantener una temperatura estable en el hábitat es necesario que el equipo de enfriamiento este por debajo de este valor. Si el aire está a una temperatura superior, se requerirá más energía. Si el equipo de enfriamiento funcionara solamente con aire exterior, la potencia de refrigeración sería considerable para enfriarlo hasta la temperatura de acondicionamiento.

La mezcla de masas gaseosas podría ser interesante desde el punto de vista económico, ya que es posible mezclar el aire exterior con el aire de retorno. El aire resultante de esta mezcla tendrá una temperatura más baja que el aire exterior, economizando energía en la máquina de enfriamiento.

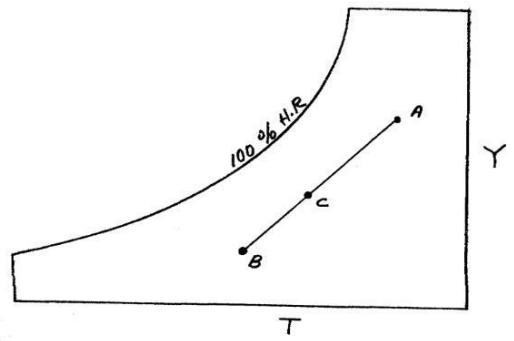


Figura 6.4: Representación de una mezcla de masas gaseosas

Existen casos en los cuales no se puede utilizar el aire de retorno, ya que siempre se requiere aire fresco. Este es el caso de algunas áreas en centros hospitalarios.

Si en espacio acondicionado no hay contaminación y no se afecta el bienestar se puede usar por un periodo determinado el aire de retorno, después es necesario renovarlo.

6.11.4.2. Adición de un vapor en condiciones de saturación

En este proceso a una masa de gas húmedo (Ga) en las condiciones Y_a , H_A , T_A, se le adiciona una masa de vapor saturado M_v con una entalpia H_v. Al realizar un balance de materia y energía, se obtienen las expresiones siguientes:

$$Y_M = Y_A + \frac{M_V}{G_A} \tag{6.17}$$

$$H_M = H_A + H_V(Y_M - Y_A) \tag{6.18}$$

En donde Y_M y H_M son la humedad y entalpia de la mezcla resultante.

Como en el caso anterior, este proceso se puede representar en un diagrama psicrométrico y las condiciones de la mezcla resultante se obtienen sobre la recta de unión de los puntos representativos del vapor saturado y el gas húmedo.

6.11.4.3. Adición de un líquido que se evapora totalmente en la masa gaseosa

La adición de un líquido provoca que la masa gaseosa disminuya su temperatura, ya que el aire cede su calor sensible al líquido para provocar su evaporación, por lo que se produce su enfriamiento. En el caso de la adición de vapor saturado existe un calentamiento de la masa gaseosa debido al calor sensible del vapor.

Es claro que el abatimiento de temperatura es mucho más rápido con el contacto con un líquido que con un vapor debido básicamente a la diferencia importante entre el calor latente de vaporización del líquido y el calor sensible del vapor.

En este caso, las relaciones para el cálculo de las condiciones finales son análogas a las del caso anterior, solo se substituyen las condiciones del vapor saturado por las del líquido.

$$Y_M = Y_A + \frac{M_L}{G_A} \tag{6.19}$$

$$H_M = H_A + H_C(Y_M - Y_A) \tag{6.20}$$

6.11.4.4. Adición de un líquido en cualquier condición, en donde sólo se evapora una parte

En este caso suceden dos procesos simultáneamente; la masa del aire GA que pasa de las condiciones Y_M, H_A , a las condiciones Y_{A2}, H_{A2} y la cantidad de líquido inicial M_{L1} se enfría de T_{L1} a T_{L2}. Si efectuaron un balance de masa.

$$G_A(Y_{A2} - Y_{A1}) = M_{L1} - M_{L2} \tag{6.21}$$

Del balance de energía se obtiene:

$$\frac{Y_{A2} - Y_{A1}}{H_{A2} - H_{A1}} = \frac{M_{L1} - M_{L2}}{M_{L1}H_{L1} - M_{L2}H_{L2}} \tag{6.22}$$

En donde H_A y H_L son las entalpías de la masa gaseosa y del líquido respectivamente.

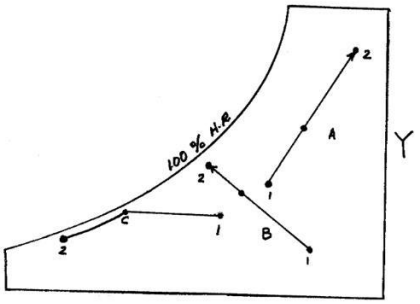


Figura 6.5: Procesos de adición de líquido

El proceso de adición del líquido puede variar en función de las condiciones del líquido. En la figura 6.5 están representados tres procesos de humidificación: con adición de agua caliente (A) con adición de agua fría (B) y con adición de agua muy fría (C).

6.11.4.5. Humidificación por contacto de una masa gaseosa con un sólido húmedo

Este es un proceso en donde el sólido transfiere humedad al aire, secando el sólido y humidificando el aire. En este proceso de secado el sólido se introduce en un secador a una temperatura T_{S1} con una humedad Y_{S1} y se obtiene a una temperatura T_S2 con una humedad Y_{S2}, (estas humedades se refieren al sólido seco). Siendo M_S la cantidad de sólido que entra y sale del secador, si la masa de aire G_A que entra al secador a T_{A1} con humedad Y_M sale a T_{A2} con una humedad Y_{A2} se obtiene de la figura 6.6 el balance de masa siguiente:

$$G_A(Y_{A2} - Y_{A1}) = M_S(Y_{S2} - Y_{S1}) \tag{6.23}$$

Si consideramos un proceso adiabático, el balance de energía es:

$$G_A(H_{A2} - H_{A1}) = M_S(H_{S2} - H_{S1}) \tag{6.24}$$

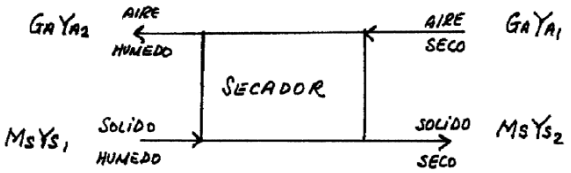


Figura 6.6: Diagrama de un secador

En donde H_{S2} y H_{S1} son la entalpia de entrada y salida del sólido (respecto a 0°) y definida por:

$$H_S = (C_S + Y_S C_L)T_S + H_0 \tag{6.25}$$

En donde C_S y C_L son los calores específicos del sólido seco y del líquido que acompaña al sólido respectivamente, T_S y Y_S la temperatura y humedad del sólido y H_O el calor integral de mezcla del sólido (referido a 0^oC).

Si el proceso no es adiabático es decir intercambia calor con el medio, el balance de energía es:

$$G_A = (H_{A2} - H_{A1}) = M_S(H_{S2} - H_{S1}) - q \tag{6.26}$$

Siendo (q) la cantidad de calor intercambiada.

6.11.4.6. Humidificación de una masa gaseosa por medio de un líquido que se encuentra a la temperatura de rocío de la masa gaseosa correspondiente a las condiciones de humedad de diseño.

En este proceso se requiere llevar a la masa gaseosa en el punto B a las condiciones de diseño Y_B a partir de las condiciones iniciales del punto A, con Y_A de acuerdo al diagrama de la figura 6.7. Para lograr este proceso se requiere poner en contacto la masa gaseosa con un líquido que se encuentra a la temperatura correspondiente al punto C. Para poder mantener el líquido bajo estas condiciones es necesario suministrar una cantidad de calor equivalente a la que absorberá la masa gaseosa en forma de calor latente al humidificarse. La masa gaseosa pasará de la condición A a C y después, fuera de contacto con el líquido se calentará de forma sensible para llevarlo a las condiciones deseadas del punto B. Este proceso se encuentra representado sobre el diagrama psicrométrico de la figura 6.7.

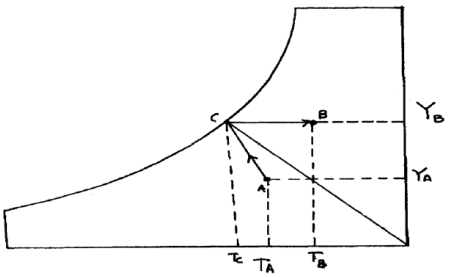


Figura 6.7: Procesos de humidificación de un gas en contacto con un líquido

6.11.4.7. Humidificación adiabática de una masa gaseosa en contacto con un líquido.

Este método de humidificación es el más empleado a nivel industrial. Este proceso consiste en el contacto de una masa gaseosa con un líquido para alcanzar las condiciones de saturación adiabática. El líquido que entra al humidificador se encuentra a la temperatura de saturación adiabática.

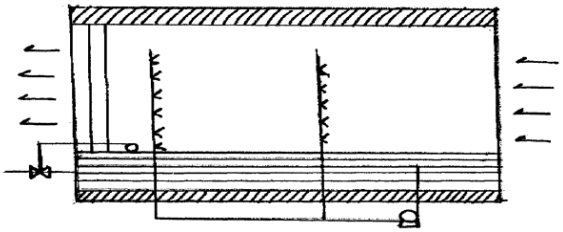


Figura 6.8: Humidificador adiabático

El líquido se circula constantemente y no recibe ni cede calor. Cuando la temperatura inicial del líquido es igual a la temperatura inicial de bulbo húmedo, la temperatura del líquido no cambiará durante el contacto con la masa gaseosa. La temperatura del líquido se mantendrá constante mientras que la temperatura del bulbo húmedo del gas se conserve. Además, como la temperatura del líquido está por debajo de la de bulbo seco, éste se enfría.

El calor latente requerido para la evaporación del agua, solo se puede obtener aprovechando el calor sensible que pierde el aire, de acuerdo a la disminución de la temperatura de bulbo seco. El contenido total de calor no cambia, aunque sí los valores parciales del calor latente y del calor sensible.

La humidificación del aire se realiza por medio de un rociador, en donde el agua se circula constantemente, de acuerdo al diagrama de la figura 6.8.

Si disponemos de una masa gaseosa en las condiciones de A y se desea llevarlo hasta las condiciones de D, de acuerdo a la figura 6.9. el proceso se realiza como sigue:

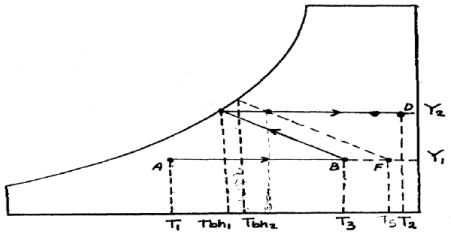


Figura 6.9: Representación de un proceso de humidificación adiabática.

1) El aire se somete a un calentamiento fuera de contacto del agua (segmento AB), hasta la temperatura de saturación adiabática (T_3) la cual corresponde a la temperatura de rocío del aire en las condiciones (D).

2) El aire caliente se introduce en el humidificador adiabático, en donde alcanza las condiciones de saturación al ponerse en contacto con el líquido, el cual se encuentra a una temperatura igual a la de saturación del aire. Una porción del líquido se transfiere al aire, y el resto pasa a la parte inferior del humidificador a la temperatura de bulbo húmedo del aire. Para asegurar la recirculación constante del líquido, éste se bombea hacia los rociadores, siempre a la temperatura húmeda.

   La relación entre la temperatura del aire y su humedad a lo largo del humidificador adiabático está dada por la ecuación.

$$Y_S - Y = \frac{C_H}{\lambda_S}(T - T_S) \tag{6.27}$$

3) El aire que sale por la parte alta del humidificador que tiene la humedad deseada (Y_2) en el punto D, se calienta fuera del contacto con el líquido (segmento C,D), hasta la temperatura final T_2.

   Sin embargo en la mayoría de los casos no se alcanza la saturación completa a la salida del humidificador, pero sale a la humedad Y (punto E). La temperatura a la salida T_4 a la T_{bh2} es más grande que la temperatura de rocío correspondiente al estado D. Para que el aire salga del humidificador en el punto E, deberá entrar en el mismo a una temperatura T_S (punto F) un poco superior a T_3 pero con una temperatura de bulbo húmedo igual que F.

   Para desarrollar el proceso de E a D, sólo se le aplica el calor necesario, fuera del contacto del líquido, a la salida por la parte alta del humidifícador.

   Si la temperatura de líquido no corresponde a la de bulbo húmedo de la masa gaseosa, la relación entre la temperatura del aire y su humedad en este humidificado está dada por:

$$T = \frac{(Y_S - Y)[\lambda + C(T_S - T_e)]}{C} + T_S \tag{6.28}$$

   En donde λ, es el calor de vaporización del líquido a la temperatura de entrada en el humidificador, T_S la de saturación de la masa gaseosa y T_0 la del líquido a la entrada. Si T_S es cercana a T_e, el valor del calor sensible c(T_s-T_e) es muy pequeño comparado con el calor latente y la ecuación (6.28) se simplifica y se convierte en la (6.29):

$$(Y_S - Y) = \frac{C}{\lambda_S}(T - T_S) \tag{6.29}$$

   Las relaciones anteriores son aplicables para el secado de sólidos, bajo las consideraciones de una operación adiabática y que el material por secar entra y sale del secador a la temperatura de saturación adiabática. Este proceso no es completamente isoentálpico, aunque la desviación es pequeña. Si desarrollamos un balance de energía en un humidificador adiabático:

$$H_e = H_S + (Y_2 - Y_1)H_L \tag{6.30}$$

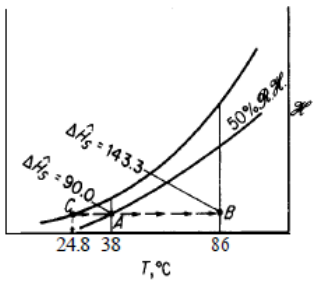
   En donde, H_e y H_s son las entalpías de entrada y salida y H_L las del líquido a la temperatura de entrada.

   La disminución de entalpía es:

$$H_e - H_S = (Y_2 - Y_1)H_L \tag{6.31}$$

Problema 1

Aire húmedo a 38°C y 48 % H_r se calienta en un horno a 86°C. ¿Cuánto calor es necesario agregar por metro cúbico de aire húmedo inicial, y cuál es el punto de rocío final del aire?



Solución

Los valores de entalpía son los siguientes (todos en kJ/kg de aire seco):

Punto	ΔH_{Sat}	δH	ΔH_{Real}
A	90,0	-0,5	89,5
B	143,3	-3,3	140,0

Además, en A el volumen del aire húmedo es de 0.91 m^3 /kg de aire seco. Por tanto, el calor agregado es (Q = ΔH) 140,0 - 89,5 = 50,5 kJ/kg de aire seco.

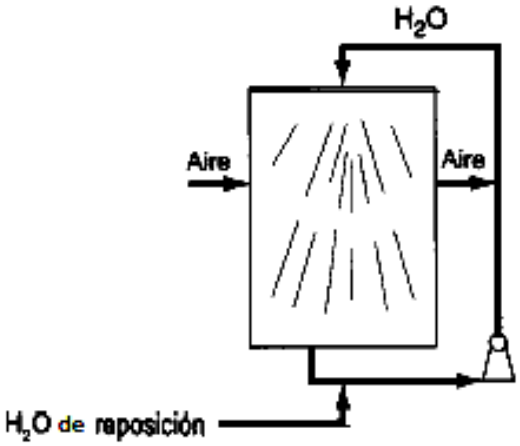
$$\frac{50,5\ kJ}{kg\ aire\ seco}\frac{1\ kh\ aire\ seco}{0,91\ m^3} = 55,5\frac{kJ}{m^3}\ de\ aire\ humedo\ inicial$$

Problema 2

Una forma de agregar humedad al aire es pasarlo por un rocío de agua o lavadores de aire. Vea la figura. Normalmente, el agua que se usa se recircula, no se desperdicia. Entonces, en el estado estacionario, el agua está a la temperatura de saturación adiabática, que es la misma que la temperatura de bulbo húmedo. El aire que pasa por el lavador se enfría y, si el tiempo de contacto entre el aire y el agua es lo bastante largo, el aire estará también a la temperatura de bulbo húmedo. Sin embargo, supondremos que el lavador es tan pequeño que el aire no llega a la temperatura de bulbo húmedo; en vez de ello, prevalecen las siguientes condiciones:

	Tbs(°C)	Tbh(°C)
Aire que entra:	40	22
Aire que sale:	27	

Determine la humedad agregada a cada kilogramo de aire seco.

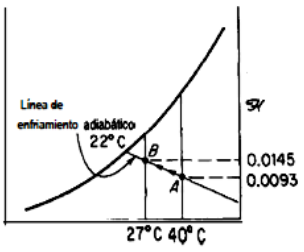


Solución

Se supone que todo el proceso es adiabático y, como se muestra en la figura psicrométrica, se lleva a cabo entre los puntos A y B a lo largo de la línea de enfriamiento adiabático. La temperatura de bulbo húmedo permanece constante en 22°C. Los valores de humedad son

	H(kg de H_2O/ kg aire seco)
B	0.0145
A	0.0093

Diferencia: $0.0052\ \frac{kg\ de\ H_2O}{kg\ aire\ seco}$ agregado

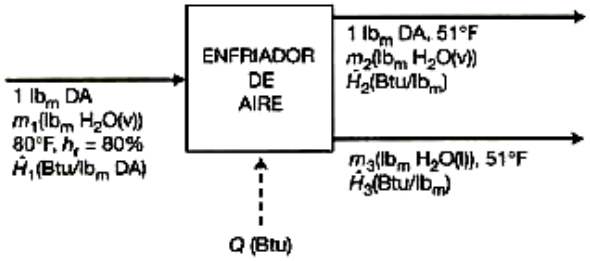


Problema 3 El aire a 80°F y 80 % de humedad relativa se enfría a 51°F a presión constante de 1 atm. Utilice el diagrama psicrométrico para calcular la fracción de agua que se condensa y la velocidad a la cual debe eliminarse calor para aportar 1000 ft^3/min de aire húmedo en las condiciones finales.

Solución

Base de cálculo: 1 lb_m de aire seco

El diagrama de flujo para el proceso aparece abajo. La transferencia de calor (Q) hacia la unidad de proceso se indica por convención; pero como el aire se enfría, sabemos que Q será negativo.



Análisis de los grados de libertad

7 incógnitas (m_1, m_2, m_3, H_1, H_2, H_3, Q)

- 1 balance de materia (el H_2O — el aire seco ya está balanceado en el diagrama)

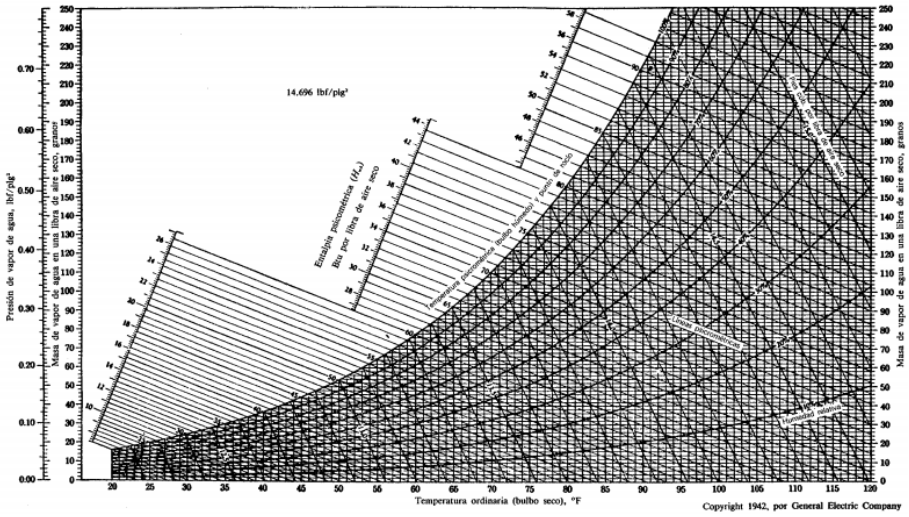
- 2 humedades absolutas del diagrama psicrométrico (para el aire de entrada y salida)

- 2 entalpías del diagrama psicrométrico (para el aire de entrada y salida)

- 1 entalpía del condensado (de la capacidad calorífica conocida del agua líquida)

- 1 balance de energía

= 0 grados de libertad



Punto 1: para 80°F y 80 % H_r de la gráfica obtenemos ha = 0,018 lb_m H_2O/lb_m de aire seco y H_1 = 38,8 Btu/ lb_m de aire seco.

$$m_1 = \frac{1,0\ lb_m\ Aire\ seco\ 0,018\ lb_m\ Agua}{lb_m\ de\ aire\ seco} = 0,018\ lb_m\ Agua$$

Punto 2: 51°F, saturado (100 % H_r) ha = 0,0079 lb_m H_2O/lbm de aire seco y H_2 = 20,9 Btu/ lb_m de aire seco.

$$m_1 = \frac{1,0\ lb_m\ Aire\ seco\ 0,0079\ lb_m\ Agua}{lb_m\ de\ aire\ seco} = 0,0079\ lb_m\ Agua$$

Balance de Agua

$$m_1 = m_2 + m_3$$

$$m_3 = 0.018 - 0.0079 = 0{,}010\ lb_m\ H_2O \text{ condensada}$$

$$\text{fracción de agua condensada} = \frac{0,01}{0,018} \text{ x } 100 = 55{,}5\ \%$$

Entalpia del condensado

Como la condición de referencia para el agua en la figura es el agua líquida a 32°F, debemos emplear la misma condición para calcular H_3

$$H_2O(l, 32^oF) \rightarrow H_2O(l, 51^oF)$$

$$\Delta H = H_3 = 1,0\frac{Btu}{lb_m.^oF}(51^oF - 37^oF) = 19,0\frac{Btu}{lb_m\ H_2O}$$

Balance de energía

El balance de energía del sistema abierto cuando Ws, ΔE_k y ΔE_p son iguales a cero es

$$Q = \Delta H = \sum_{salida} m_i H_i - \sum_{entrada} m_i H_i$$

(No hay puntos sobre las variables extensivas de esta ecuación porque la base de cálculo es una cantidad, no una velocidad de flujo.) A continuación se muestra la tabla de entalpías para el proceso. Como (1) las entalpías (H_i) de las corrientes de aire húmedo se obtienen a partir del diagrama psicrométrico en Btu/lb_m de aire seco, y (2) las unidades de masa de m_i y H_i deben cancelarse cuando ambas se multiplican en el balance de energía, los valores tabulados de m_i para estas corrientes deben estar en ib_m de aire seco.

Referencias: Aire seco (AS) (g, 0°F, 1 atm), H,0 (l,32°F, 1 atm)

Sustancia	$\mathbf{m}_{entrada}$	$\mathbf{H}_{entrada}$	$\mathbf{m}_{salida}$	$\mathbf{H}_{salida}$
Aire húmedo	1,0lb_m AS	38,8Btu/lb_m AS	1,000 lb_m AS	20,9 Btu/lb_m AS
H_20(l)	————	————	0,010 lb_m	19,0 Btu/lb_m

Por necesidad las referencias se eligieron como aquellas usadas para generar el diagrama psicrométrico. Sustituyendo los valores de la tabla en el balance de energía, se obtiene

$$Q = \Delta H = \frac{1lb_m AS\ 20,9\ Btu}{lb_m AS} + \frac{0,010\ lb_m H_2O 19\ Btu}{lb_m H_2O} - \frac{1lb_m AS\ 38,8\ Btu}{lb_m AS} = -17,7\ Btu$$

Para calcular el requerimiento de enfriamiento para 1000 ft^3/min de aire suministrado, primero es necesario determinar el volumen de este último que corresponde a la base asumida y modificar la escala del valor calculado de Q, a partir de la relación (1000 ft^3/min)/(V_{base}). Por el diagrama psicrométrico, para el aire húmedo saturado a 51°F

$$V_H = 13,0\ ft^3/lb_m\ AS$$

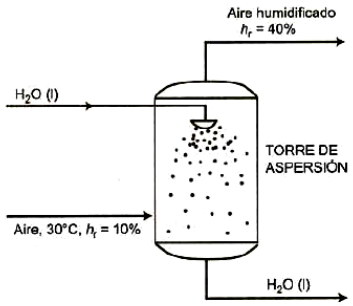
$$V_{base} = \frac{1,0\ lb_m\ AS\ 13,0\ ft^3}{lb_m\ AS} = 13,0\ ft^3$$

$$Q = \frac{-17,7\ Btu 1000\ ft^3/min}{13,0\ ft^3} = -1360\ Btu/min$$

6.12. PROBLEMAS DE APLICACIÓN

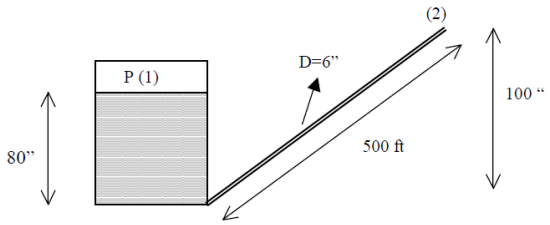
Problema 1.- Aire a 26°C con humedad relativa de 10 % se somete a humidificación adiabática. Utilice el diagrama psicrometrico para estimar la temperatura de saturación adiabática del aire. Si el aire de salida tiene una temperatura de bulbo seco de 14°C, determine su humedad absoluta, su humedad relativa y su entalpía específica.

Problema 2.- Una corriente de aire a 30°C y 10 % de humedad relativa se humidifica en una torre de aspersión adiabática que funciona a P ≈ 1 atm. El aire que emerge debe tener una humedad relativa de 40 %.

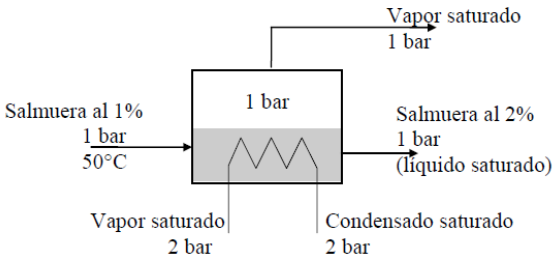


1. Determine la humedad absoluta y la temperatura de saturación adiabática del aire de entrada.
2. Use el diagrama psicrometrico para calcular (i) la velocidad a la cual se debe agregar agua para humidificar 1000 kg/h del aire de entrada, y (ii) la temperatura del aire de salida.

Problema 3.- Un aceite de gravedad específica 0,84 fluye desde un tanque A a través de una tubería de acero galvanizado de 500 ft de largo y diámetro nominal de 6" hasta un punto B a 100 plg de altura. Calcular la presión necesaria (en psig) en el recipiente A para lograr un flujo volumétrico de 0,45 ft^3/seg, si la pérdida por fricción en el sistema es de 1,9 lb_f.ft/lb. R: 1,33 psig.



Problema 4.- Un evaporador es un tipo especial de intercambiador de calor en el que se utiliza vapor de agua para calentar una solución, con el propósito de eliminar algo de solvente por evaporación. En el evaporador ilustrado,se alimenta una salmuera que contiene 1 % en peso de sal en agua, a una presión de 1 bar y 50°C. La salmuera de descarga contiene 2 % en peso de sal y está en forma de líquido saturad o a 1 bar. El agua evaporada corresponde a un vapor saturado a 1 bar. Si se utiliza vapor saturado a 2 bar como fuente de calor, y si el condensado producido se supone líquido saturado a 2 bar, calcule los kilogramos de vapor de 2 bar que se requieren por kilogramo de agua evaporada. Supóngase que la salmuera tiene las mismas propiedades del agua líquida. R: 1,25

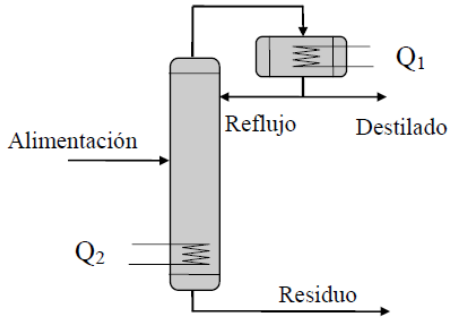


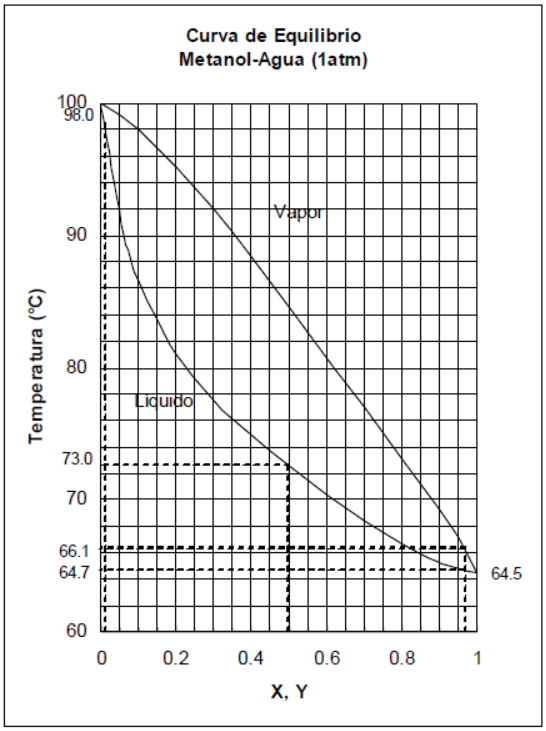
Problema 5.- En una columna de destilación se fracciona a la presión atmosférica una solución acuosa con 50 % de metanol, obteniéndose un destilado y un residuo con 95 % y 1 % molar de soluto respectivamente. Todas las corrientes en la unidad se hallan en las condiciones de saturación. A la columna se alimentan 215 mol/h, siendo la relación Reflujo/Alimentación = 1,042. Calcular:

a) El calor suministrado a la columna.

b) El calor removido en la condensación Dato: C_p (CH_3 OH) (líq.) = 0,601 cal/gr°C. Ver gráfico adjunto al final.

R: a) Q2 = 1,21 x 10^7 J/h b) Q1 = 1,19 x 10^7 J/h

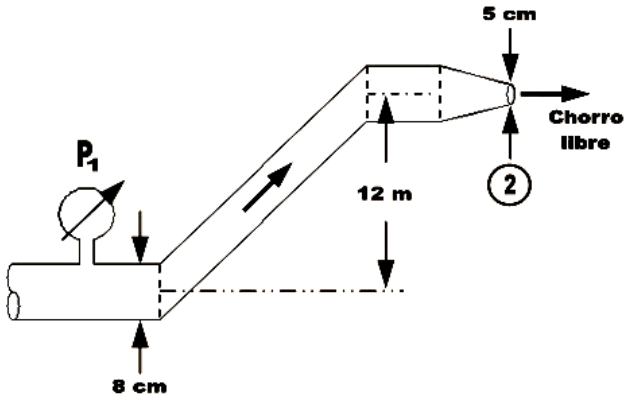




Problema 6.- Una corriente que contiene 50 % de benceno y 50 % de tolueno en masa a 60°C se alimenta a un evaporador de simple fase. El 60 % de la alimentación se vaporiza.

Analizando el vapor se encuentra que contiene 63,1 de benceno en masa. Las corrientes de líquido y vapor salen del equipo a 150°C. Calcular el requerimiento de calor para el proceso por kg de alimentación de líquido saturado. R: Q = 383,5 KJ/Kg

Problema 7.- En la figura, el fluido es agua y descarga libremente a la atmósfera. Para un flujo másico de 15 kg/s, determine la presión en el manómetro.



CAPÍTULO 7

BALANCE DE ENERGÍA EN SISTEMAS REACCIONANTES

OBJETIVOS

- Realizar Balance de Energía en Sistemas reaccionantes.
- Recordar conceptos de termoquímica, calor de formación, reacción y combustión.
- Resolver problemas de energía en sistemas multicomponentes.
- Realizar blances simultáneos de masa y energía.

7.1. DEFINICIÓN

En esta sección se consideran algunos aspectos básicos de la termoquímica, que ayudan a explicar los cambios energéticos (en forma de calor) en procesos en los que ocurre cambio químico. Hagamos la aplicación de estos conceptos a sistemas en que no se considera la contribución de la energía mecánica (variaciones de energía potencial y cinética despreciables) y que no intercambian trabajo con el medio.

Toda reacción química involucra desprendimiento o absorción de energía en forma de calor. Las reacciones químicas pueden llevarse a cabo a presión constante (en atmósfera abierta a presión atmosférica aproximadamente igual a 1 atm) o a volumen constante (el volumen del recipiente donde ocurre la reacción). Por lo general, las reacciones químicas ocurren a presión constante, por lo cual los cambios de calor experimentados se asocian a la variación de entalpía, es decir: Q = ΔH. Si la reacción ocurre a volumen constante, entonces Q = ΔU (aunque este caso es poco común).

7.2. PROPIEDADES DE LA ENTALPÍA

La entalpia, al igual que la energía interna, es una función de estado del sistema. Es decir, que ΔH y ΔU son las mismas para un cambio de estado dado, de una determinada sustancia, sin importar la trayectoria que siga la sustancia desde su estado inicial hasta su estado final. Solo importa el estado inicial y el estado final de la misma. Afortunadamente esto es así, pues aunque no es posible medir valores absolutos de entalpía en estados específicos, sí es posible determinar de manera experimental ΔH y ΔU para cambios de estado específicos.

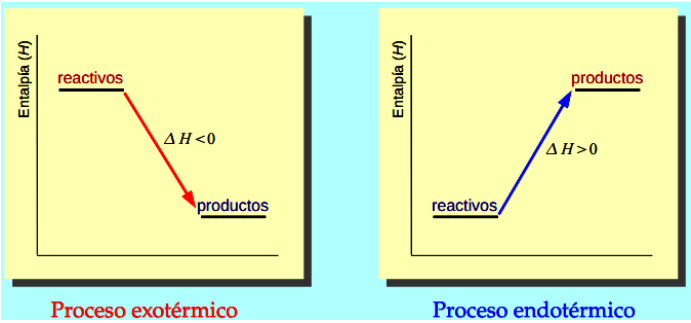
La entalpía ΔH es una magnitud extensiva: está asociada a la cantidad total de energía contenida en las sustancias que toman parte en el proceso. Suele utilizarse preferiblemente la entalpía específica, $\Delta\hat{H}$ en unidades de energía por unidad de masa, la cual cumple que: ΔH = m $\Delta\hat{H}$. Además, la entalpía es aditiva, lo que permite establecer ecuaciones en el balance de energía que pueden ser manipuladas algebraicamente para llegar a una solución.

Cuando en un proceso el valor de ΔH es negativo, se dice que el proceso es exotérmico o que desprende energía (en forma de calor). Si el valor de AH es positivo, se dice que el proceso es endotérmico, por lo que requiere absorción de energía del entorno. Por ejemplo, la reacción de combustión del carbono es una reacción exotérmica pues genera 393.51 kJ de energía por mol de carbono quemado.

$$C_{(S)} + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)} \qquad \Delta H^0_{298} = -393.51kJ$$

La reacción siguiente es un ejemplo de reacción endotérmica, donde se requiere de 687640 cal para producir un mol de butano. C_4H_{10}.

$$4CO_{2(g)} + 5H_2O_{(l)} \rightarrow C_4H_{10(g)} + 61/2O_{2(g)} \qquad \Delta H^0_{298} = 687640cal$$



Para aplicar la ecuación de balance entálpico es imprescindible establecer un estado de referencia o estado estándar para cada sustancia. El estado estándar de una sustancia (a una temperatura dada) es la forma más estable de la sustancia (a esa temperatura) a presión de 1 bar (antiguamente de 1 atm). Para el caso de los gases, además, debe considerarse de comportamiento ideal. Todos los cambios que experimenta una sustancia se pueden medir, entonces, respecto de este estado de referencia.

Debe notarse que el estado estándar no presupone una temperatura dada, la cual debe definirse posteriormente, pudiendo existir estados de referencia a diferentes temperaturas. Generalmente, se considera 25 ^{o}C (298,15 K) como un valor común de temperatura de referencia. La presión para el estado estándar actualmente se toma como 1 bar y anteriormente como 1 atm. Si los cálculos que se realizan no son demasiado exactos, pueden tomarse datos de tablas correspondientes a ambos estados.

Las magnitudes del estado de referencia se representan con un índice superior ^{o} (realmente el símbolo debe tener un trazo horizontal en el centro que se obvia por facilidad tipográfica). Por ejemplo, el estado estándar del etanol es en fase líquida (etanol puro) a una presión de 1 bar. Para el hidrógeno, es en fase gaseosa y puro a presión de 1 bar y comportamiento ideal. Para el carbono, es en estado de grafito puro a presión de 1 bar (variedad alotrópica más estable bajo estas condiciones).

Obsérvese que el valor ΔH descrito en las ecuaciones anteriores muestra un subíndice y un superíndice. Estos índices están relacionados con el estado de referencia de las sustancias analizadas. El subíndice está indicando la temperatura de referencia. 298,15 K ó 25 ^{o}C. y el círculo en la parte superior indica el estado estándar de presión y fase.

7.3. ENTALPÍA DE REACCIÓN, DE FORMACIÓN ESTÁNDAR, DE COMBUSTIÓN ESTÁNDAR

Antes de definir la entalpía de formación y la entalpía de combustión es necesario definir qué es la **entalpía estándar de reacción**. La entalpía estándar de reacción es la variación de entalpía del sistema cuando procede una unidad de reacción y todas las especies involucradas -tanto reactantes como productos- se encuentran en el estado estándar a una temperatura dada. Se representa como ΔH^0_R

La **entalpía estándar de formación** de una sustancia es el valor de ΔH^0_R - entalpía estándar de reacción - para la reacción de formación de 1 mol de la sustancia A a partir de sus elementos en sus formas de referencia. Se representa como ΔH^0_f[A]. Por ejemplo, en la reacción siguiente, el término $\Delta H^0_f[C_6H_{6(l)}]$ representa la entalpía estándar de formación del benceno, calculada a partir de los estados de referencia del carbono y del hidrógeno, a 1 atm de presión y 298,15 K. Esta reacción es una reacción endotérmica ($\Delta H^0_f[C_6H_6]$ es positivo). La temperatura utilizada debe ser especificada pues la entalpía variará con la temperatura.

$$6C_{(grafito)} + 3H_{2(gas\ ideal)} \rightarrow C_6H_{6(l)} \quad \Delta H^0_f[C_6H_6] = +48,66kJ$$

Las reacciones que vienen a continuación muestran ejemplos de reacciones de formación del carbonato de sodio, cloruro de hidrógeno y di sulfuro de carbono, respectivamente, a 1 atm de presión y 298,15 K de temperatura.

$$2Na_{(s)} + C_{(s)} + 3/2O_{(g)} \rightarrow Na_2CO_{3(s)} \quad \Delta H_f^0[Na_2CO_{3(s)}] = -1130,9\ kJ/mol\ Na_2C0_3$$
$$Cl_{2(g)} + H_{2(g)} \rightarrow 2HCl_{(g)} \quad \Delta H_f^0[HCl_{(g)}] = -92,31\ kJ/mol\ HCl$$
$$4C_{(S)} + S_{8(s)} \rightarrow 4CS_{2(l)} \quad \Delta H_f^0[CS_{2(l)}] = +87,9\ kJ/mol\ CS_2$$

Es evidente que según la definición, la entalpía de formación estándar de los elementos es cero. Ciertos elementos puros en sus formas más estables, como el $Na_{(s)}$, $H_{2(g)}$, $N_{2(g)}$, $O_{2(g)}$, $C_{(grafito)}$ y $Br_{2(l)}$, tienen entalpía de formación cero.

Si se invierte la reacción de formación del benceno se dice que el compuesto se descompone en sus elementos mediante una reacción exotérmica, liberando 48,66 kJ de calor por mol de benceno descompuesto.

En la literatura especializada pueden hallarse tablas de entalpías de formación de muchas sustancias, cuyos valores sirven de base para calcular la entalpía total de un proceso que se lleva a cabo a temperaturas diferentes de la temperatura estándar.

El **calor estándar de combustión** es una medida de la variación de entalpía asociada a la cantidad de calor que se desprende en una reacción cuando se lleva a cabo la combustión completa de 1 mol de sustancia, a presión de referencia y temperatura especificadas (por lo general, a 1 atm y 298,15 K). En consecuencia, las reacciones de combustión son siempre exotérmicas.

La combustión de una sustancia orgánica (solo carbono, oxígeno e hidrógeno) es completa cuando, en presencia de oxígeno suficiente, los únicos productos de la reacción son CO_2 en fase gaseosa y H_2O en fase líquida. Si se trata de una sustancia donde intervienen otros elementos, además del dióxido de carbono, en vez de agua se puede obtener algún compuesto formado por dicho elemento y el oxígeno. Si la combustión es incompleta, debido a la insuficiente presencia de oxígeno, además de agua y dióxido de carbono se pueden obtener otros subproductos como monóxido de carbono, CO, en fase gaseosa, carbono, hidrógeno e. inclusive, hidrocarburos no quemados.

La ecuación siguiente muestra la reacción de combustión completa de la naftalina. $C_{10}H_8$, mientras que la ecuación subsiguiente muestra la combustión incompleta del etano. C_2H_6.

$$C_{10}H_{8(s)} + 12O_{2(g)} \rightarrow 10CO_{2(g)} + 4H_2O_{(I)} \quad \Delta H_C^0 = -5157\ kJ/mol\ C_{10}H_8$$
$$C_2H_{6(g)} + 3O_{2(g)} \rightarrow C0_{2(g)} + CO_{(g)} + 3H_2O_{(l)}$$

Otros ejemplos de reacciones de combustión son la ecuación sigue en la que se libera 1075,2 kJ por mol de $CS_{2(l)}$ quemado, y la ecuación subsiguiente en la que se genera 1409,25 kJ de calor por mol de etanol quemado. Estos valores de entalpías de combustión han sido calculados a una presión de 1 atm y a 298,15 K.

$$CS_{2(l)} + 3O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)} + 2SO_{2(g)} \quad \Delta H_C = -1075,2\ kJ/mol\ CS_2$$
$$C_2H_5OH_{(g)} + 3O_{2(g)} \rightarrow 2CO_{2(g)} + 3H_2O_{(l)} \quad \Delta H_C = -1409,25\ kJ/mol\ C_2H_5OH$$

La entalpía de reacción estándar puede ser calculada a partir de las entalpías de formación estándar de las sustancias que intervienen en la reacción química. Como la entalpía es una función de estado y su variación no depende de la trayectoria descrita por la función, para calcular la variación de entalpía de una reacción puede utilizarse el camino alternativo que se desee, que no necesariamente se corresponde con lo que realmente sucede en la reacción.

Así, para hallar la entalpía estándar de un proceso ΔH_R^0, podría utilizarse el camino siguiente: pensar, en una primera etapa, en la descomposición de los reactivos en sus elementos. Luego, en una segunda etapa, pensar en la formación de los productos de la reacción a partir de los elementos obtenidos en el paso anterior. La variación de entalpía del proceso total, ΔH_R^0 sería igual a la variación correspondiente al primer proceso $\Delta H_{f(reactivos)}^0$, más la correspondiente al segundo $\Delta H_{f(productos)}^0$, Este principio se conoce como la **ley de Hess**: “Si un proceso transcurre en varias etapas o

pasos (incluso sólo hipotéticamente), la variación de entalpía del proceso global (neto) es la suma de las variaciones de entalpía de las etapas individuales".

Teniendo en cuenta que:

- En el primer proceso, los reactivos se descomponen en sus elementos en cantidades de sustancia iguales a sus coeficientes estequiométricos;
- En el segundo proceso se forman cantidades de sustancias de productos, a partir de sus elementos, iguales a sus coeficientes estequiométricos:
- Los coeficientes estequiométricos de los reactivos son negativos y los de los productos son positivos;

Se podrá demostrar que:

$$\Delta H_R^0 = \sum v_p \Delta H^0_{f(productos)} - \sum v_R \Delta H^0_{f(reactivos)}$$

Donde v es el coeficiente estequiométrico de la sustancia en la reacción.

Esta expresión permite calcular la entalpía estándar de una reacción a partir de los valores tabulados de las entalpías de formación estándar de las sustancias participantes en ella.

Ejemplo 1:

Determinar la entalpia de reacción estándar para la reacción química del bicarbonato de sodio, mostrada en la ecuación siguiente:

$$2NaHCO_{3(s)} \rightarrow Na_2CO_{3(s)} + H_2O_{(l)} + CO_{2(g)} \qquad \Delta H^{\circ} =$$

Solución:

Una primera forma de aplicar la ley de Hess para resolver este problema es combinando las ecuaciones químicas involucradas en la reacción anterior. Esto es:

(I) $Na_{(s)} + 1/2H_{2(g)} + C_{(s)} + 3/2O_{2(g)} \rightarrow NaHCO_{3(s)} \qquad \Delta H^0_f = -945,6\ kJ/mol\ NaHCO_3$

(II) $2Na_{(s)} + C_{(s)} + 3/2O_{2(g)} \rightarrow Na_2CO_{3(s)} \qquad \Delta H^0_f = -1130,9\ kJ/mol\ Na_2CO_3$

(III) $H_{2(g)} + 1/2O_{2(g)} \rightarrow H_2O_{(l)} \qquad \Delta H^0_f = -285,84\ kJ/mol\ H_2O$

(IV) $C_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)} \qquad \Delta H^0_f = -393,5\ kJ/mol\ CO_2$

Para obtener la ecuación inicial será necesario: invertir la ecuación (I), lo que cambia el signo de la función de entalpia, y multiplicarla por 2: dejar las ecuaciones (II), (III) y (IV) como están. Las reacciones involucradas quedan de la siguiente manera:

(V) $2NaHCO_{3(s)} \rightarrow 2Na_{(s)} + H_{2(g)} + 2C_{(s)} + 3O_{2(g)} \qquad \Delta H^0 = -2x(-945.6\ kJ)$

(VI) $2Na_{(s)} + C_{(s)} + 3/2O_{2(g)} \rightarrow Na_2CO_{3(s)} \qquad \Delta H^0_f = -1130,9\ kJ/mol\ Na_2CO_3$

(VII) $H_{2(g)} + 1/2O_{2(g)} \rightarrow H_2O_{(l)} \qquad \Delta H^0_f = -285,84\ kJ/mol\ H_2O$

(VIII) $C_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)} \qquad \Delta H^0_f = -393,5\ kJ/mol\ CO_2$

La suma algebraica de los términos de las ecuaciones (II) a (V) da como resultado lo siguiente:

$$2NaHCO_{3(s)} \rightarrow Na_2CO_{3(s)} + H_2O_{(l)} + CO_{2(g)}$$

La entalpia de la reacción es de manera equivalente, la suma algebraica de las entalpias de las ecuaciones (II) a (V):

$$\Delta H^{\circ} = -2x(-945,6) - 1130,9 - 285,84 - 393,5[kJ] = +80,96kJ$$

La segunda forma de resolver el problema es utilizando directamente la ecuación de ΔH_R^0 , para determinar la entalpia estándar de la reacción a partir de las entalpías de formación tabuladas de los productos y reactivos involucrados en la reacción inicial. Es decir:

$$\Delta H^{\circ} = 1x\Delta H_f^0[Na_2CO_{3(s)}] + 1\ x\ \Delta H_f^0[H_2O_{(l)}] + 1\ x\ \Delta H_f^0[CO_{2(g)}] - 2\ x\ \Delta H_f^0[NaHCO_{3(s)}]$$

De las tablas de entalpias de formación se extraen los valores requeridos para este cálculo, de manera que:

$$\Delta H^{\circ} = [1x(-1130,9) + 1x(-285,84) + 1lx(-393,5)] - [2x(-945,6)]kJ = +80,96kJ$$

Este resultado indica que la reacción es endotérmica, y que se requiere de 80,96 kJ de calor para descomponer un mol de bicarbonato de sodio.

Ejemplo 2:

La reacción de combustión del etanol está dada por la ecuación siguiente.

$$C_2H_5OH_{(g)} + 3O_{2(g)} \rightarrow 2CO_{2(g)} + 3H_2O_{(l)} \quad \Delta H_C = -1409,25\ kJ/mol\ C_2H_5OH$$

El calor de combustión es $\Delta H_C = -1409,25$ kJ/mol C_2H_5OH quemado. Determinar la entalpia estándar de formación del etanol.

Solución:

Supóngase que la entalpia de formación del etanol no puede conseguirse a partir de las tablas de entalpia. En tal caso, la misma se puede obtener formulando la ecuación de ΔH_R^0 para la reacción del etanol, y a partir de esta expresión, dado que se conoce la entalpia de la reacción (ΔH_C), se despeja el término a calcular.

$$\Delta H_C^0 = 2x\Delta H_f^0[CO_{2(g)}] + 3x\Delta H_f^0[H_2O(l)] - 1x\Delta H_f^0[C_2H_5OH_{(g)}] - 3x\Delta H_f^0[O_{2(g)}]$$

$$\Delta H_f^0[C_2H_5OH_{(g)}] = 2x\Delta H_f^0[CO_{2(g)}] + 3x\Delta H_f^0[H_2O(l)] - 3x\Delta H_f^0[O_{2(g)}] - \Delta H_C^0[kJ/mol]$$

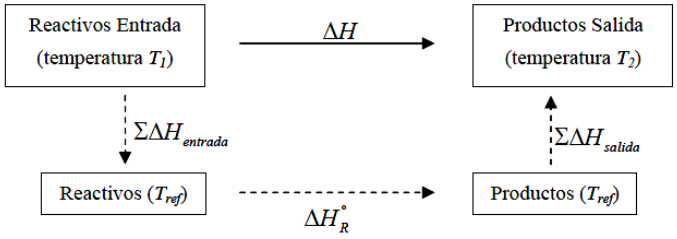
$$= 2x(-393,5) + 3x(-285,84) - 3x(0) - (-1409,25)[kJ/mol]$$

$$= -235,3kJ/molC_2H_5OH$$

7.4. ENTALPÍA DE REACCIÓN BAJO CONDICIONES ESTÁNDAR Y NO ESTÁNDAR

Aunque las condiciones estándares comunes para las reacciones están definidas para una presión de 1 atm (ó 1 bar) y 298,15 K (25°C), la mayoría de las veces las reacciones ocurren a otras temperaturas por lo cual hay que corregir los valores del calor. Recuérdese que la entalpia es una función de la temperatura: por lo tanto, si la temperatura varía también varía el valor de ΔH. En este texto, se considera, además, que se trabaja con componentes en una fase, por lo que se considera solamente la contribución del calor sensible (no se toma en cuenta el calor latente).

En la figura siguiente se muestra un esquema de cómo abordar el planteamiento matemático de este tipo de problemas. En la etapa inicial o en la entrada, se tiene cierta cantidad de componentes a una temperatura T1, los cuales tendrán al final o a la salida del proceso, una temperatura T_2. El balance entálpico, entonces, debe hacerse para la trayectoria que parte de la entrada y llega a la salida (flecha en trazo continuo).



Haciendo uso de las mediciones estándares disponibles en las tablas de termoquímica, la trayectoria teórica anterior puede ser cambiada siguiendo las flechas punteadas. Recordemos que esto es posible dado que la entalpia es una función de estado. Los pasos a seguir, para aplicar esta estrategia, son:

- Llevar los reactivos a la temperatura estándar o de referencia (25°C ó 298,15 K), calculando el calor necesario para esta operación:

$$\sum \Delta H_{entrada} = \sum \left(n \int_{T_1}^{T_{ref}=298k} C_p dT \right)$$

- Llevar a cabo la reacción química, a 298,15 K, tomando en cuenta las cantidades que reaccionan y que se forman en la misma, y calcular ΔH_R según la ecuación.

$$\Delta H_R^0 = \sum \Delta v_p \Delta H^0_{f(productos)} - \sum v_R \Delta H^0_{f(reactivos)})$$

- Llevar tanto los productos como los reactivos que sobraron desde la temperatura de referencia hasta la temperatura final de reacción T_2:

$$\sum \Delta H_{salida} = \sum \left(n \int_{T_{ref}=298k}^{T_2} C_p dT \right)$$

La entalpia total del proceso (visto como un sistema abierto) es:

$$\Delta H = -\sum \Delta H_{entrada} + \Delta H_R^0 + \sum \Delta H_{salida}$$

Reacomodando los términos de esta ecuación, se puede escribir una expresión equivalente de esta última ecuación en la forma siguiente:

$$\Delta H = \sum_{salida} n_j \Delta \hat{H}_j - \sum_{entrada} n_i \Delta \hat{H}_i \quad o \quad \Delta H = \sum_{salida} m_j \Delta \hat{H}_j - \sum_{entrada} m_i \Delta \hat{H}_i$$

En el cual:

$$\Delta \hat{H}_j = \Delta \hat{H}^0_{f,j} + \int_{T_{ref}}^{T^2} C_{p,j} dT \quad y \quad \Delta \hat{H}_i = \Delta \hat{H}^0_{f,i} + \int_{T_{ref}}^{T^1} C_{p,1} dT$$

El coeficiente n representa la cantidad de moles de cada componente, m es la cantidad másica (kg. g. libra) de cada componente, el subíndice i hace referencia a cada componente de la entrada y el subíndice j hace referencia a cada componente de la salida.

En un sistema cerrado, el balance entálpico se reduce a calcular:

$$\Delta U = \sum_{salida} n_j \Delta \hat{U}_j - \sum_{entrada} n_i \Delta \hat{U}_i \quad o \quad \Delta U = \sum_{salida} m_j \Delta \hat{U}_j - \sum_{entrada} m_i \Delta \hat{U}_i$$

Para resolver balances entálpicos, se puede seguir el siguiente conjunto de pasos:

- Llevar a cabo los cálculos de balance de materia necesarios.
- Definir cuáles son las variables desconocidas y todos los valores conocidos del proceso.
- Escribir y simplificar la ecuación de balance de energía, según las especificaciones del proceso en estudio (sistema cerrado o abierto, presencia de trabajo o no. y demás).
- Conocer los estados de referencia (fase, presión, temperatura) de los componentes involucrados en el proceso.
- Buscar las entalpías conocidas y tabuladas de los componentes que intervienen, así como las capacidades caloríficas respectivas (a volumen constante o a presión constante).

- Plantear la ecuación de ΔH, y resolver el balance entálpico. Para mostrar más claramente el procedimiento de resolución en este tipo de problemas, véanse los siguientes ejemplos.

Ejemplo 3:

En una unidad de enfriamiento se introducen 20,0 kmol/min de aire a 380°C con el objeto de bajar su temperatura hasta 110°C. Calcular la velocidad requerida de eliminación de calor, sabiendo que el proceso opera a presión constante.

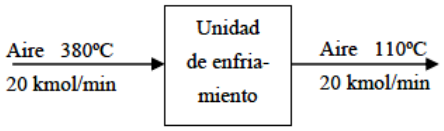
Solución:

En primer lugar, se trata de un sistema abierto. Se sabe que el aire tiene una composición molar de 21 % O_2 y 79 % N_2. Habrá que determinar las cantidades, en moles, de cada uno de estos gases (balance de materia), y también buscar las capacidades caloríficas de ambos, para el balance de energía.

En este proceso no ocurre reacción química, lo que supone una simplificación del método para hacer el balance de energía.

Asumamos como base de tiempo un (01) minuto. En consecuencia, todos los cálculos que se realicen serán obtenidos respecto de esta base de tiempo.

Balance de materia:



Moles de O_2 que entran a la unidad: 20,0 kmol x 0,21 = 4,2 kmol.

Moles de N_2 que entran a la unidad: 20,0 kmol x 0,79 = 15,8 kmol.

En la salida se tiene la misma composición del aire, dada por las cantidades calculadas anteriormente, puesto que no se lleva a cabo ninguna reacción que genere, consuma o transforme las sustancias involucradas.

Balance de energía:

En este ejemplo, la ecuación de balance de energía:

$$Q + W = \Delta(H + E_p + E_k)$$

Se reduce a: Q = ΔH. Es decir, que la variación de entalpia experimentada por el proceso, al disminuir la temperatura del aire, servirá para determinar la cantidad de calor que debe ser retirado del mismo.

Ahora bien, los componentes que entran al sistema están a una temperatura que no es la temperatura de referencia. Igualmente, los componentes a la salida tampoco están a la temperatura de referencia. Por ello, se descompone el cálculo de ΔH en dos partes: en primer lugar, el cálculo de las entalpías de los componentes que entran cuando su temperatura varía de 380°C a 25°C (temperatura de referencia): en segundo lugar, el cálculo de las entalpías de los componentes que salen cuando su temperatura varía de 25°C a 110°C. Para calcular ΔH se hace uso de las ecuaciones vistas anteriormente. De esta manera:

$$\Delta H = \left[moles\ O_2\ x\ \left(\Delta H^0_{fO_2} + \int_{25^oC}^{110^oC} C_{pO_2} dT\right) + moles\ N_2\ x\ \left(\Delta H^0_{fN_2} + \int_{25^oC}^{110^oC} C_{pN_2} dT\right)\right] \ ...$$
$$... - \left[moles\ O_2\ x\ \left(\Delta H^0_{fO_2} + \int_{25^oC}^{380^oC} C_{pO_2} dT\right) + moles\ N_2\ x\ \left(\Delta H^0_{fN_2} + \int_{25^oC}^{380^oC} C_{pN_2} dT\right)\right]$$

En este caso, la expresión anterior puede reescribirse como:

$$\Delta H = \left(moles\ O_2\ x\ \int_{380^oC}^{110^oC} C_{pO_2} dT + moles\ N_2\ x\ \int_{380^oC}^{110^oC} C_{pN_2} dT\right)$$

Tómese las capacidades caloríficas a presión constante, del oxígeno y del nitrógeno, como valores constantes e iguales a:

$$C_pO_2 = 0,0299\ kJ/(gmol.^oC)$$
$$C_pN_2 = 0,0292\ kJ/(gmol.^oC)$$
$$\Delta H = \left(4,2\ x\ 1000\ x\ \int_{380^oC}^{110^oC} 0,0299dT + 15,8\ x\ 1000\ x\ \int_{380^oC}^{110^oC} 0,0292dT\right)$$
$$= 4,2\ x\ 1000\ x\ 0,0299\ x\ (110-380) + 15,8\ x\ 1000\ x\ 0.0292\ x\ (110-380)[kJ]$$
$$\Delta H = -1,58\ x\ 10^5\ kJ$$

La velocidad a la que se elimina calor (pues el signo es negativo) es:

$$\dot{Q} = \Delta\dot{H} = -1,58\ x\ 10^5\ kJ/min$$

7.5. BALANCE DE ENERGÍA CON REACCIÓN QUÍMICA ÚNICA - FORMA ALTERNATIVA DE LA ECUACIÓN DE BALANCE

Problema 1

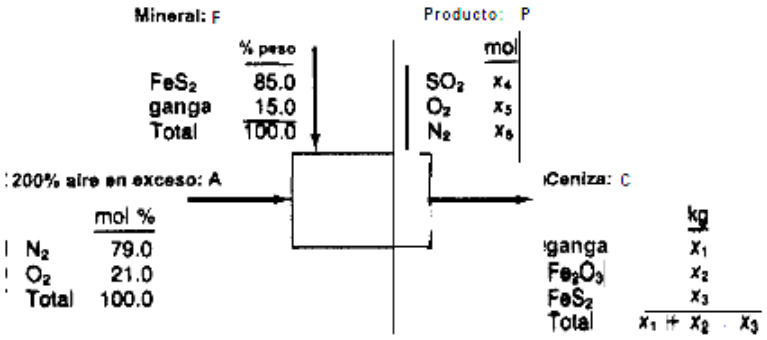
Un mineral de hierro (pirita) que contiene 85 % de FeS, y 15.0 % de ganga (tierra inerte, rocas, etc.), se tuesta con una cantidad de aire equivalente a un 200 % de aire en exceso según la reacción:

$$4FeS_2 + 11O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3 + 8SO_2$$

Con objeto de producir SO_2, Toda la ganga, junto con el Fe_2O_3 van a dar al producto de desecho sólido (ceniza) que tiene un análisis de 4.0 % de FeS_2. Determine la transferencia de calor por kilogramo de mineral necesaria para mantener la corriente de producto a 25°C si las corrientes de entrada están a 25°C.

Solución

Es preciso resolver el balance de materia del problema antes de determinar la transferencia de calor que es igual al calor de reacción estándar. Se trata de un proceso en estado estacionario con reacción; el sistema es el reactor.



El proceso es un sistema abierto en estado estacionario (véase la figura de abajo). El aire en exceso se calcula en base de la reacción del enunciado como si todo, el FeS_2 hubiera reaccionado para dar Fe_20_3, a pesar de que una parte del FeS_2 no lo hizo. Los pesos moleculares son Fe (55,85), Fe_2O_3 (159,70) y FeS_2 (120,0).

Base de cálculo: 100 kg de mineral de pirita

Hay seis incógnitas (incluido el N_2 en P) y podemos escribir cinco balances elementales; se da la fracción de FeS_2, así que el problema de balance de materia tiene una solución única. Usaremos cinco balances elementales, O_2 N_2 S_2 ganga y Fe, más la información relativa al FeS_2 para calcular los moles de SO_2, O_2 y N_2 en el producto gaseoso y los kg de ganga, Fe_2O_3 y FeS_2 en la ceniza.

El aire en exceso es:

Moles de FeS_2 = 85,0/120,0 = 0,7083 kg-mol

O_2 requerido = 0,7083 (11/4) = 1,9479 kg-mol

O_2 en exceso = 1,9479 (2,00) = 3,8958

O_2 total que entra = 5,8437 kg-mol

N_2 total que entra = 5,8437 (79/21) = 21,983 kg-mol

Los balances de masa de los elementos son:

	Entra	**Sale**
Ganga (kg):	15,0	= x_1
N_2 (kg mol):	21,983	= x_6
S (kg mol):	2(85,0/120,0)	= x_4 + (x_3/120,0)(2)
Fe (kg mol):	1(85,0/120,0)	= (x_2/159,70)2+(x_3/120,0)(1)
O_2 (kg mol):	5,8437	= x_4 + x_2 + (x_2/159,70)(1,5)

Además:

$$\frac{x_3}{x_1 + x_2 + x_3} = 0,4$$

La solución de estas ecuaciones es:

En P:

SO_2 = 1,368 kg mol

O_2 = 3,938

N_2 =21,983

En C:

Ganga = 15,0 kg

Fe_20_3 = 54,63 + 0,342 kg-mol

FeS_2 = 2,90 + 0,0242 kg-mol

Ahora usaremos el balance de energía para determinar la transferencia de calor. El balance de energía general se reduce a (ΔE = 0, ΔP = 0, ΔK = 0, W = 0) Q = ΔH. Como todos los reactivos y productos están a 25°C y 1 atm, escogeremos estas condiciones como estado de referencia, y con ello se harán cero todos los términos de "calor sensible" de la ecuación:

$$Q = \sum_{productos} n_i \Delta \hat{H}_i^0 - \sum_{reactivos} n_i \Delta \hat{H}_i^0$$

	Productos			Reactivos		
Comp.	$10^{-3}x$ g mol	ΔH_f^0 (kJ/g mol)	$n_i \Delta H_f^0$ (kJ)	$10^{-3}x$ g mol	ΔH_f^0 (kJ/g mol)	$n_i \Delta H_f^0$ (kJ)
FeS_2	0,0242	-177,9	-4,305	0,7083	-177,9	-126,007
Fe_2O_3	0,342	-822,156	-281,177	0	-822,156	0
N_2	21,9983	0	0	21,983	0	0
O_2	3,938	0	0	5,8437	0	0
SO_2	1,368	-296,90	-406,159	0	-296,90	0
		Total	-691,641			-126,007

Q = [-691.641 - (-126.007)](10^3) = -565.634 x 10^3 kJ/100 kg de mineral o bien

Q = -5.656 x 10^3kJ/kg de mineral

El signo negativo indica que se remueve calor del proceso.

Problema 2

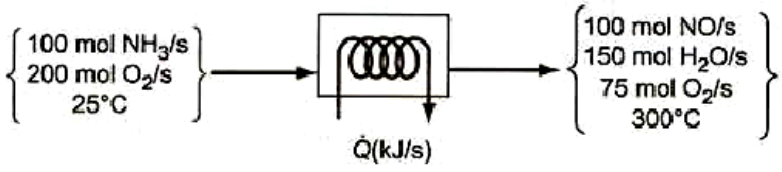
El calor de reacción estándar para la oxidación del amoniaco se da a continuación:

$$4\ NH_{3(g)} + 5\ O_{2(g)} \rightarrow 4\ NO_{(g)} + 6\ H_2O(v) : \Delta H_R^0 = -904{,}7\ kJ/mol$$

Cien mol de NH_3/s y 200 mol de O_2/s a 25°C se alimentan a un reactor donde el amoniaco se consume por completo. El gas producido emerge a 300°C. Calcule la velocidad a la cual se debe transferir calor hacia o desde el reactor, suponiendo que la operación se realiza a una presión aproximada de 1 atm.

Solución:

Base de Cálculo: las velocidades de alimentación dadas



(Verifique las velocidades de flujo del producto.) Como sólo se lleva a cabo una reacción y se conoce ΔH_R^0, usaremos el método de calor de reacción para efectuar el balance de energía, eligiendo como referencias las especies de reactivos y productos en los estados para los cuales se da el calor de reacción. La tabla de entalpia tiene la siguiente apariencia:

Referencias: $NH_{3(g)}$, $O_{2(g)}$, $NO_{(g)}$, $H_2O_{(v)}$ a 25°C y 1 atm

Sustancia	$\mathbf{n}_{entrada}$ **(mol/s)**	$\mathbf{H}_{entrada}$ **(kJ/mol)**	$\mathbf{n}_{salida}$ **(mol/s)**	$\mathbf{H}_{salida}$ **(kJ/mol)**
NH_3	100	0	—	—
O_2	200	0	75	H_1
NO	—	—	100	H_2
H_2O	—	—	150	H_3

Calcule las entalpías desconocidas

O_2(g. 300°C: de tabla H_1= - 8,470 kJ/mol (insertar el valor en la tabla de entalpia)

NO(g, 300°C): C_p =29,5x10^{-3} + 0,8188x10^{-5} - 0,2925x10^{-8} + 0,3652x10^{-12}kJ/mol°C

$H_2 = \int_{25}^{300}(C_p)dT$ H_2 = 8,453 (insertar en la tabla)

H_2O(v, 300°C): de la tabla H_3 = 9,570 kJ/mol (insertar en la tabla)

Cálculo de moles que intervienen en la reacción de NH_3, sabiendo que tenemos 100 moles y en la ecuación de reacción intervienen 4 entonces la cantidad de reacciones que tendríamos seria:

100 moles de NH_3/4 moles de NH_3 en la reacción = 25 moles de NH_3

Mediante la ecuación:

$$\Delta H = \Delta H_R^0 + \sum \Delta H_{salida} \sum \Delta H_{entrada}$$

De la tabla

$\Delta H = (25mol/s)(-904,7kJ/mol)+[(75)(8,470)+(100)(8,453)+(150)(9,570)]-[(100)(0)+(200)(0)]kJ/s = -19,700kJ/s$

Balance de energía

Para este sistema abierto,

$$\dot{Q} - \dot{W}_s = \Delta\dot{H} + \Delta\dot{E}_k + \Delta\dot{E}_p$$

$\dot{W}_s = 0$ (no hay partes móviles)

$\dot{E}_p = 0$ (unidad horizontal)

$\dot{E}_k = 0$ (despreciando los cambios de energía cinética)

$$\dot{Q} = \Delta\dot{H} = -19,700\ kW$$

Por lo tanto, 19,700 kW de calor deben transferirse del reactor para mantener la temperatura del producto a 300°C. Si se transfiriera menos calor, una cantidad mayor del calor de reacción pasaría a la mezcla de reacción y la temperatura de salida aumentaría.

7.6. BALANCE DE ENERGÍA CON ECUACIONES MÚLTIPLES

Problema 3

En un reactor continuo, se oxida metano en presencia de aire a fin de producir formaldehido. La reacción asociada a la producción del formaldehido es la ecuación.

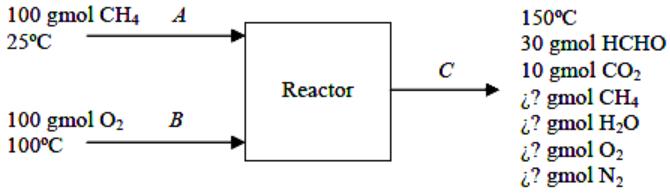
(1) Además, en el reactor se lleva a cabo la combustión del metano según la ecuación.

(2) En la cual se produce CO_2. Se alimentan 100 gmol/min de metano a 25°C con aire.

Suficiente para proveer 100 gmol de O_2 por minuto (a 100°C). La corriente de productos sale a 150°C. El proceso se lleva a cabo a 1 atm de presión (se puede asumir gases ideales). ¿A qué tasa (en kJ/min) debe extraerse calor del proceso, para que el mismo funcione apropiadamente? En el diagrama siguiente se da información de los flujos de entrada y de salida.

$$CH_{4(g)} + O_{2(g)} \rightarrow HCHO_{(g)} + H_2O_{(g)} \quad (7.1)$$

$$CH_{4(g)} + 2O_{3(g)} \rightarrow CO_{2(g)} + 2H_2O_{(g)} \quad (7.2)$$



Solución:

En primer lugar, se trata de un proceso en el que ocurren reacciones químicas. Hay que resolver el balance de materia, en un primer paso, para luego plantear el balance de energía y dar respuesta a la pregunta formulada en el enunciado. Tómese como base de tiempo un (01) minuto.

Balance de materia:

Las corrientes de entrada al reactor son: la corriente **A**, compuesta solo de metano que entra a razón de 100 gmol/min. y la corriente **B**, que corresponde a la alimentación de aire suficiente para proporcionar 100 gmol de O_2 por minuto.

La composición molar promedio del aire es 21 % mol O_2 y 79 % mol N_2. Las cantidades de aire y de nitrógeno requeridas son:

Moles de aire: 100 gmol/0,21 = 476 gmol.

Moles de N_2: 100 gmol (0.79)/(0,21) = 376 gmol.

La corriente de salida **C** se compone de los productos de las reacciones químicas: HCHO, CO_2 y H_2O, así como de los reactivos que sobran. Obsérvese bien que la reacción (1) produce 30 gmol HCHO, mientras que la reacción (2) produce 10 gmol CO_2, lo que permite determinar las cantidades utilizadas de reactivos así como el vapor de agua generado:

Moles de CH_4 que reaccionan en (1): 30 gmol HCHO (1 mol CH_4) / (1 mol de HCHO) = 30 gmol.

Moles de CH_4 que reaccionan en (2): 10 gmol CO_2 (1 mol CH_4) / (1 mol de CO_2) = 10 gmol.

Los moles totales de CH_4 que reaccionan son (30+10) gmol = 40 gmol. Este valor indica que la conversión en un paso del metano en el reactor es del 40 %. Ahora, se procede a determinar la composición de la corriente de salida:

$$C_{HCHO}\text{=30 gmol}$$

$$C_{CH2}= 10gmol$$

$$C_{H_2O} = 30\ gmol\ HCHO\ x\ \frac{1\ gmol\ O_2}{1\ gmol\ HCHO} + 10\ gmol\ CO_2\ x\ \frac{2\ gmol\ H_2O}{1\ gmol\ CO_2} = 50\ gmol$$

$$C_{CH4} = 100\ gmol - 40\ gmol = 60\ gmol$$

$$C_{O2} = 100\ gmol - \left(30\ gmol\ HCHO\ x\ \frac{1\ gmol\ O_2}{1\ gmol\ HCHO} + 10\ gmol\ CO_2\ x\ \frac{2\ gmol\ O_2}{1\ gmol\ CO_2}\right) = 50\ gmol$$

$$C_{N2} = 376\ gmol$$

Balance de energía:

Como se trata de un sistema abierto, en estado estacionario, donde W = 0, ΔE = 0 y ΔE_k es 0, la ecuación de balance de energía se reduce a: Q = ΔH. Para calcular la entalpia total, es necesario buscar en las tablas de entalpías de formación los valores correspondientes a las sustancias involucradas (en kJ/gmol), así como sus capacidades caloríficas (en kJ/gmol.^{o}C) que no se asumirán constantes en esta oportunidad.

Entalpía de las sustancias que entran al reactor

$$\Delta\hat{H}_{A,CH4} = \Delta\hat{H}^0_{fCH4} + \int_{25^oC}^{25^oC} C_{pCH4}dT = -74,85\frac{kJ}{mol} + 0 = -74,85\frac{kJ}{gmol}CH_4$$

$$\Delta\hat{H}_{B,O2} = \Delta\hat{H}^0_{fO2} + \int_{25^oC}^{100^oC} C_{pO2}dT = 0 + \int_{25^oC}^{100^oC} (29,10\ x\ 10^{-3} + 1,158\ x\ 10^{-5}T - 0,6075\ x\ 10^{-8}T^2$$
$$+ 1,311\ x\ 10^{-12}T^3)dT = 29,10\ x\ 10^{-3}(100-25) + \frac{1,158\ x\ 10^{-5}(100^2-25^2)}{2} - \frac{0,6076\ x\ 10^{-8}(100^3-25^3)}{3}$$
$$+ \frac{1,311\ x\ 10^{-12}(100^4-25^4)}{4} = +2,235\ kJ/gmol\ O_2$$

$$\Delta\hat{H}_{B,N2} = \Delta\hat{H}^0_{fN2} + \int_{25^oC}^{100^oC} C_{pN2}dT = 0 + \int_{25^oC}^{100^oC} (29,00\ x\ 10^{-3} + 0,2199\ x\ 10^{-5}T - 0,5723\ x\ 10^{-8}T^2$$
$$+ 2,871\ x\ 10^{-12}T^3)dT = 29,00\ x\ 10^{-3}(100-25) + \frac{0,2199\ x\ 10^{-5}(100^2-25^2)}{2} - \frac{0,5723\ x\ 10^{-8}(100^3-25^3)}{3}$$
$$+ \frac{2,871\ x\ 10^{-12}(100^4-25^4)}{4} = +2,187\ kJ/gmol\ N_2$$

Entalpía de las sustancias que salen del reactor

$$\Delta\hat{H}_{C,CH4} = \Delta\hat{H}^0_{fCH4} + \int_{25^oC}^{150^oC} C_{pCH4}dT = -74,85 + \int_{25^oC}^{150^oC} (34,31\ x\ 10^{-3} + 5,469\ x\ 10^{-5}T$$
$$+ 0,3661\ x\ 10^{-8}T^2 + 11\ x\ 10^{-12}T^3)dT = -74,85 + 34,31\ x\ 10^{-3}(150-25) + \frac{5,469\ x\ 10^{-5}(150^2-25^2)}{2}$$
$$- \frac{0,3661\ x\ 10^{-8}(150^3-25^3)}{3} + \frac{11\ x\ 10^{-12}(150^4-25^4)}{4} = -69,96\ kJ/gmol\ CH_4$$

$$\Delta\hat{H}_{C,HCHO} = \Delta\hat{H}^0_{fHCHO} + \int_{25^oC}^{150^oC} C_{pHCHO}dT = -115,90 + \int_{25^oC}^{150^oC} (34,28\ x\ 10^{-3} + 4,268\ x\ 10^{-5}T$$
$$-8,694\ x\ 10^{-12}T^3)dT = -115,90 + 34,28\ x\ 10^{-3}(150-25) + \frac{4,268\ x\ 10^{-5}(150^2-25^2)}{2} - \frac{8,694\ x\ 10^{-12}(150^4-25^4)}{4}$$
$$= -111,15\ kJ/gmol\ HCHO$$

Haciendo cálculos similares para los otros componentes, los cuales no se muestran en todo detalle en lo sucesivo, se obtienen los siguientes términos:

$$Delta\hat{H}_{C,CO2} = Delta\hat{H}_{fCO2} + \int_{25^oC}^{150^oC} C_{pCO2}dT = -393,50 + 4,99 = -388,51\frac{kJ}{gmol}CO_2$$

$$Delta\hat{H}_{C,H2O(v)} = Delta\hat{H}_{fH2O(v)} + \int_{25^oC}^{150^oC} C_{pH2O(v)}dT = -241,83 + 4,275 = -237,56\frac{kJ}{gmol}OH_2$$

$$Delta\hat{H}_{C,O2} = Delta\hat{H}_{fO2} + \int_{25^oC}^{150^oC} C_{pO2}dT = 0 + 3,775 = +3,775\frac{kJ}{gmol}O_2$$

$$Delta\hat{H}_{C,N2} = Delta\hat{H}_{fN2} + \int_{25^oC}^{150^oC} C_{pN2}dT = 0 + 3,66 = +3,66\frac{kJ}{gmol}N_2$$

La entalpia total del proceso, calculada a través de la ecuación

$$\Delta H = \sum_{salida} n_j \Delta \hat{H}_j - \sum_{entrada} n_i \Delta \hat{H}_i$$

Será: ΔH = [(60 gmol CH4)(-69.96 kJ/gmol CH_4) + (30 gmol HCHO)(-111.15 kJ/gmol HCHO) + (10 gmol CO_2)(-388.51 kJ/gmol CO_2) + (50 gmol H_2O)(-237,56 kJ/gmol H_2O) + (50 gmol 0_2)(3.775 kJ/gmol O_2) + (376 gmol N_2)(5.66 kJ/gmol N_2)] - [(100 gmol CH_4)(-74,85 kJ/gmol CH_4) + (100 gmol O_2)(2,235 kJ/gmol O_2) + (376 gmol N_2)(2,187 kJ/gmol N_2)] = -15292,1 kJ ≈ -1.53 x 10^4 kJ.

La cantidad de calor a extraer del proceso, para asegurar una buena operación del mismo, es de aproximadamente 1,53 x 10^4 kJ por minuto.

7.7. REACTOR ISOTÉRMICO - REACTOR ADIABÁTICO APLICACIONES

En los sistemas reactivos que hemos examinado hasta el momento se especificaban las condiciones de entrada y salida, y la alimentación de calor necesaria se podía determinar a partir de un balance de energía.

En otra clase importante de problemas se especifican las condiciones de entrada, la alimentación de calor y la composición del producto, y debe calcularse la temperatura de salida. Para resolver dichos problemas, debe evaluar las entalpias de los productos en relación con los estados de referencia elegidos en términos de la temperatura final desconocida, y sustituir después las expresiones resultantes en el balance de energía (Q= ΔH, o ΔH=0 para un reactor adiabático) para calcular T_{salida}.

Problema 4

Balance de energía para un reactor adiabático

La deshidrogenación del etanol para formar acetaldehído

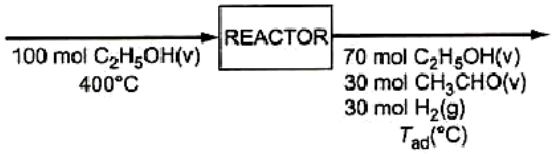
$$C_2H_5OH_{(v)} \rightarrow CH_3CHO_{(v)} + H_{2(g)}$$

Se lleva a cabo en un reactor adiabático continuo. Se alimenta vapor de etanol al reactor a 400°C, y se logra una conversión de 30 %. Calcule la temperatura del producto.

Solución

Base de Cálculo: 100 mol de alimentación

Los balances de materia conducen a la información que se incluye en el siguiente diagrama de flujo;



Como sólo ocurre una reacción, también hubiéramos podido elegir los reactivos y productos [$C_2H_5OH_{(v)}$, $CH_3CHO_{(v)}$, $H_{2(g)}$] o sus constituyentes elementales [$C_{(s)}$, $H_{3(g)}$, $O_{2(g)}$] como referencias para los cálculos de entalpia. Vamos a elegir la especie molecular.

Referencias: $C_2H_5OH_{(v)}$, $CH_3CHO_{(v)}$, $H_{2(g)}$ a 25°C y 1 atm

Sustancia	$\mathbf{n}_{entrada}$ **(mol)**	$\mathbf{H}_{entrada}$ **(kJ/mol)**	$\mathbf{n}_{salida}$ **(mol)**	$\mathbf{H}_{salida}$ **(kJ/mol)**
C_2H_5OH	100,0	H_1	70,0	H_2
CH_3CHO	—	—	30,0	H_3
H_2	—	—	30,0	H_4

El balance de energía para el sistema abierto, despreciando los cambios de energía tanto cinética como potencial y el trabajo de flecha e igualando Q = 0 para este reactor adiabático, es

$$\Delta H = n_r \Delta H_r^0 + \sum n_{salida} H_{salida} - \sum n_{entrada} H_{entrada} = 0$$

Cálculo del grado de avance de la reacción

Podríamos usar cualquier reactivo o producto como base para calcular n_r. Emplearemos el acetaldehído. Por la ecuación:

$$n_r = \frac{[(n_{CH3CHO})_{salida} - (n_{CH3CHO})_{entrada}]}{[v_{CH3CHO}]} = \frac{[30,0mol - 0mol]}{1} = 30,0\ mol$$

Cálculo del calor estándar de reacción

En función de los calores de formación obtenidas de tablas y usando la ecuación tenemos:

$$\Delta H_r^0 = \sum v_i \Delta H_f^0 = (-1)(\Delta H_f^0)_{C2H5OH(v)} + (1)(\Delta H_f^0)_{CH3CHO(v)} + (1)(\Delta H_f^0)_{H2(g)}$$
$$\Delta H_r^0 = [(-1)(-235,31) + (1)(-166,2) + (1)(0)]\ kJ/mol = 69,11\ kJ/mol$$

Cálculo de la entalpia de entrada

$$H_1 = \int_{25^oC}^{400^oC} (C_p)_{C2H5OH} = \int_{25^oC}^{400^oC} [61,34\ x\ 10^{-3}T + 15,72\ x\ 10^{-5}T^2 - 8,749\ x\ 10^{-8}T^3 + 19,83\ x\ 10^{-12}T^4]dT = 33,79\ kJ/mol$$

Cálculo de las entalpías de salida

Las capacidades caloríficas del vapor de etanol e hidrógeno se obtienen de tabla:

$$(C_p)_{CH3CHO} = (kJ/mol^oC) = 0,05048 + 1,326\ x\ 10^{-4}T - 8,050\ x\ 10^{-8}T^2 + 2,380\ x\ 10^{-11}T^3$$

Donde T está en ^{o}C. Para las tres especies en la corriente de producto.

$$H_i = \int_{25^oC}^{T_{ad}} C_{pi}(T)dT, \quad i = 1,2,3$$

Si se sustituyen las fórmulas de capacidad calorífica para las tres especies en esta expresión y se evalúan las integrales, los resultados son tres expresiones polinomiales de cuarto orden para $H_2(T_{ad})$, $H_3(T_{ad})$ y $H_4(T_{ad})_{C2H5OH}$:

C_2H_5OH :

$$H_2\left(\frac{kJ}{mol}\right) = 4,958\ x\ 10^{-12}T_{ad}^4 - 2,916\ x\ 10^{-8}T_{ad}^3 + 7,860\ x\ 10^{-5}T_{ad}^2 + 0,06134T_{ad} - 1,582$$

CH_3CHO:

$$H_3\left(\frac{kJ}{mol}\right) = 5,950\ x\ 10^{-12}T_{ad}^4 - 2,683\ x\ 10^{-8}T_{ad}^3 + 6,630\ x\ 10^{-5}T_{ad}^2 + 0,05048T_{ad} - 1,303$$

H_2:

$$H_4\left(\frac{kJ}{mol}\right) = -0,2175\ x\ 10^{-12}T_{ad}^4 + 0,1096\ x\ 10^{-8}T_{ad}^3 + 0,003825\ x\ 10^{-5}T_{ad}^2 + 0,02884T_{ad} - 0.7210$$

Despejando T_{ad} del balance de energía

$$\Delta H = n_r\Delta_r^0 + (70,0\ mol)H_2 + (30,0\ mol)H_3 - (30,0\ mol)H_4 - (100,o\ mol)H_1 = 0$$

Sustituyendo $n_r(= 30,0\ mol)$, $\Delta H_r^0(= -69,11\ kJ/mol)$, $H_1(= 33,79\ kJ/mol)$, y H_2 a H_4

$$\Delta H = 5,190\ x\ 10^{-12}T_{ad}^4 + 2,813\ x\ 10^{-6}T_{ad}^3 + 7,492\ x\ 10^{-3}T_{ad}^2 + 6,673T_{ad} - 1477 = 0$$

Esta ecuación puede resolverse por aproximaciones sucesivas o con un programa para resolver ecuaciones o una hoja de cálculo. La solución es:

$$T_{ad} = 185^oC$$

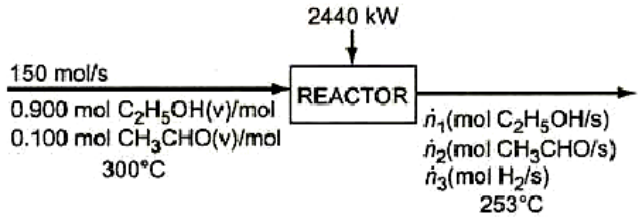
7.8. USO SIMULTÁNEO DE LOS BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA EN CONDICIONES ESTACIONARIAS

Ahora que el lector ha adquirido cierta experiencia en la realización de balances de energía, ha llegado el momento de aplicar estos conocimientos a problemas más complejos en los que intervienen balances tanto de materia como de energía. Ya hemos presentado algunos ejemplos sencillos de balances de materia y de energía combinados, como el cálculo de la temperatura de reacción adiabática, en los que un balance de materia estableció las bases para efectuar un balance de energía.

Ahora veremos cómo en algunos balances no es factible una resolución del balance de materia si no se hace simultáneamente el balance de energía.

Problema 5

La reacción de des hidrogenación del etanol del problema 4 se realiza introduciendo la alimentación a 300°C. La alimentación contiene 90.0 mol % de etanol y el balance de acetaldehído y entra al reactor a razón de 150 mol/s. Para evitar que la temperatura descienda demasiado y entonces la velocidad de reacción disminuya a Un nivel bajo inaceptable, se transfiere calor al reactor. Cuando la velocidad de adición de calor es 2440 kW, la temperatura de salida es 253°C. Calcule la fracción de conversión del etanol que se logra en el reactor.



$$C_2H_5OH \rightarrow CH_3CHO + H_2$$

Solución

El análisis de grados de libertad basado en balances de especies atómicas es el siguiente:

	3 variables marcadas desconocidas (n_1, n_2 y n_3)
—	2 balances de especies atómicas independientes (C y H)
—	1 balance de energía
=	0 grados de libertad

(Convénzase de que sólo hay dos balances atómicos independientes escribiendo los balances de C y O y observando que dan la misma ecuación.)

Balance de C

$$\frac{150\ mol}{s}\frac{0,900\ mol\ C_2H_5OH}{mol} + \frac{150\ mol}{s}\frac{0,100\ mol\ CH_3CHO}{mol}\frac{2\ mol\ C}{1\ mol\ CH_3CHO}$$
$$= \frac{n_1(mol\ C_2H_5OH)}{s}\frac{2\ mol\ C}{1\ mol\ C_2H_5OH} + \frac{n_2(mol\ CH_3CHO)}{s}\frac{2\ mol\ C}{1\ mol\ CH_3CHO}$$
$$n_1 + n_2 = 150\ mol/s \tag{7.3}$$

Balance de H

$$[(150)(0.900)(6) + (150)(0,100)(4)]\ mol\ H/s = 6n_1 + 4n_2 + 2n_3$$

$$3n_1 + 2n_2 + n_3 = 435\ mol\ H/s \tag{7.4}$$

Balance de energía

En el último ejemplo utilizamos especies moleculares como referencias para los cálculos de entalpia específica. Ahora usaremos las especies elementales ($C_{(s)}$, $H_{2(g)}$, $0_{2(g)}$] a 25°C y 1 atm. (Para una reacción única ambas opciones requieren un esfuerzo computacional casi igual.) El balance de energía despreciando el trabajo de flecha y los cambios de energía, cinética y potencial se transforma en

$$Q = \Delta H = \sum n_{salida} H_{salida} -_{entrada} H_{entrada}$$

El valor de Q es 2440 kJ/s y la expresión para ΔH es la de la ecuación de líneas arriba. Las entalpías específicas de las especies en la entrada y salida del proceso en relación con sus constituyentes elementales se calculan como

$$H_i = \Delta H^0_{fi} + \int_{25^oC}^{T} C_{pi}(T)dT$$

Donde T es 300°C en la entrada y 253°C en la salida. Tomando los calores estándar de formación de la tabla y las fórmulas para C_p de tablas y (para el vapor de acetaldehído) el ejemplo anterior, se pueden calcular los valores de H_i que se muestran en la tabla de entalpías de entrada-salida.

Referencias: $C_{(s)}$, $H_{2(g)}$, $O_{2(g)}$ a 25°C y 1 atm

Sustancia	$\mathbf{n}_{entrada}$ **(mol)**	$\mathbf{H}_{entrada}$ **(kJ/mol)**	$\mathbf{n}_{salida}$ **(mol)**	$\mathbf{H}_{salida}$ **(kJ/mol)**
C_2H_5OH	135	-212,19	n_1	-216,81
CH_3CHO	15	-147,07	n_2	-150,90
H_2	—	—	n_3	6,595

El balance de energía:

$(Q = \sum n_{salida} H_{salida} - \sum n_{entrada} H_{entrada})$ se transforma en:

$2440kJ/s = [-216,81n_1 - 150,90n_2 + 6.595n_3 - (135)(-212,19) - (15)(-147,07)]kJ/s$

$$216,81n_1 + 150,90n_2 - 6.595n_3 = 28,412kJ/s \tag{7.5}$$

Al resolver de manera simultánea las ecuaciones 7.3 a 7.5 se obtiene

n_1 = 92,0 mol C_2H_5OH/s

n_2 = 58,0 mol CH_3CHO/s

n_3 = 43,0 mol H_2/s

La fracción de conversión del Etanol es:

$$x = \frac{(n_C2H5OH)_{entrada} - (n_C2H5OH)_{salida}}{(n_C2H5OH)_{entrada}} = \frac{(135 - 92,0)\ mol/s}{135\ mol/s} = 0,319$$

7.9. PROBLEMAS DE APLICACIÓN

Problema 1.- El tricloroetileno, un solvente desengrasante de uso extenso en partes de maquinaria, se produce en una secuencia de reacción de dos pasos. Primero se clora el etileno para dar tetracloroetano. el cual se somete a deshidrocloración para formar tricloroetileno:

$$C_2H_{4(g)} + 2Cl_{2(g)} \rightarrow C_2H_2Cl_{4(I)} + H_{2(g)}: \quad \Delta H_r^0 = -385,76kJ/mol$$
$$C_2H_2Cl_{4(I)} \rightarrow C_2HCl_{3(l)} + HCl_{(g)}$$

El calor estándar de formación del tricloroetileno líquido es -276,2 kJ/mol.

(a) Aplique los datos dados y los calores de formación estándar tabulados del etileno y el cloruro de hidrógeno para calcular el calor estándar de formación del tetracloroetano y el calor estándar de la segunda reacción.

(b) Utilice la ley de Hess para calcular el calor estándar de la reacción

$$C_2H_{4(g)} + 2Cl_{2(g)} \rightarrow C_2HCl_{3(l)} + H_{2(g)} + HCl_{(g)}$$

(c) Si 300 mol/h de $C_2HCI_{3(l)}$ se producen en la reacción del inciso (b) y reactivos y productos están todos a 25°C y 1 atm, ¿cuánto calor se desprende o absorbe en el proceso? (Suponga que Q =ΔH).

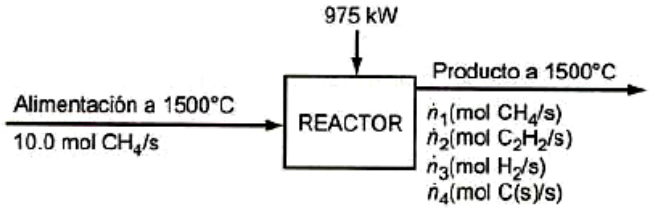
Problema 2.- Está verificando el rendimiento de un reactor donde se produce acetileno a partir de metano por la reacción

$$2CH_{4(g)} \rightarrow C_2H_{2(g)} + 3H_{2(g)}$$

La descomposición de acetileno es una reacción secundaria indeseable:

$$C_2H_{2(g)} \rightarrow 2C_{(s)} + H_{2(g)}$$

Se alimenta metano al reactor a 1500°C a velocidad de 10,0 mol CH_4/s. Se transfiere calor al reactor a velocidad de 975 kW. La temperatura del producto es 1500°C y la fracción de conversión de metano es 0,600. El diagrama de flujo del proceso y una tabla de entalpia se dan a continuación:



Sustancia	$\mathbf{n}_{entrada}$ **(mol)**	$\mathbf{H}_{entrada}$ **(kJ/mol)**	$\mathbf{n}_{salida}$ **(mol)**	$\mathbf{H}_{salida}$ **(kJ/mol)**
CH_4	10,0	41,65	n_1	H_1
C_2H_2	—	—	n_2	H_2
H_2	—	—	n_3	H_3
C	—	—	n_4	H_4

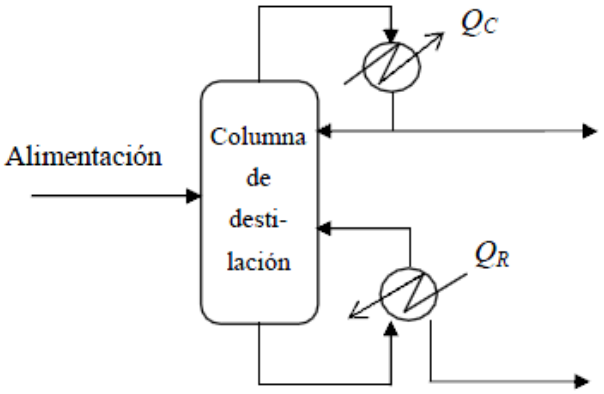
(a) Use las capacidades caloríficas que se dan a continuación para calcular la entalpia; escriba y resuelva los balances de materia y un balance de energía para determinar las velocidades de flujo de los componentes del producto y el rendimiento de acetileno (mol de C_2H_2 producido/mol de CH_4 consumido).

$$CH_{4(g)} : C_p \approx 0,079\ kJ/(mol - {}^oC)$$
$$C_2H_{2(g)} : C_p \approx 0,052\ kJ/(mol - {}^oC)$$
$$H_{2(g)} : C_p \approx 0,031\ kJ/(mol - {}^oC)$$
$$C_{(s)} : C_p \approx 0,022\ kJ/(mol - {}^oC)$$

Por ejemplo, la entalpia especifica del metano a 1500°C en relación con metano a 25°C es [0,079 kJ/(mol-°C)](1500°C - 25°C) = 116,5 kJ/mol.

(b) La eficiencia del reactor puede definirse como la proporción (rendimiento real de acetileno/rendimiento de acetileno sin reacción secundaria). ¿Cuál es la eficiencia del reactor en este proceso?.

Problema 3.- Una mezcla que contiene 46,0 % en peso de acetona (CH_3COCH_3), 27,0 % de ácido acético (CH_3COOH) y 27,0 % de anhídrido acético ($CH_3CO\text{-}O\text{-}OCCH_3$) se destila a presión atmosférica. La alimentación entra a una columna de destilación a T= 348 K y a una velocidad de 15000 kg/h. El destilado (que sale por el tope de la torre de destilación) es esencialmente acetona pura, y el producto de la parte inferior contiene 1.00 % de la acetona que entra a la columna. El vapor de salida del tope de la columna entra a un condensador a 329 K y sale como líquido a 303 K. La mitad del condensado se extrae del sistema en tanto que el resto se retoma como reflujo a la columna. El líquido que sale por la base de la torre va a un calentador de vapor, donde es parcialmente evaporado. La fracción vaporizada (3,20 % de acetona. 73,5 % de ácido y 23,0 % de anhídrido acético) vuelve a la columna a una temperatura de 398 K. y el líquido residual, también a 398 K y en equilibrio con el vapor, constituye el producto inferior o también llamado producto de cola de la torre. Determine: (a) las velocidades de flujo y las composiciones de los flujos de productos: (b) el calor que es necesario retirar en el condensador. Q_c (kJ/h).



Componente	**Cp**$_l$	**Cp**$_v$	ΔH_v
	[kJ(kg.K)]	[kJ(kg.K)]	[kJkg]
Acetona	2,30	0,459	521
Ácido Acético	2,18	0,688	407
Anhídrido Acético	?	0,751	?

CAPÍTULO 8

OTROS TIPOS DE BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA

OBJETIVOS

- Resolver balances de energía aplicando termoquimica de soluciones.
- Realizar balances de combustión y evaluar la temperatura de flama adiabática.
- Reconocer la importancia del uso del computador en la realización de balances.
- Obtener formulas de Procesos u Operaciones unitarias aplicando Balance de Materia o Energía.

8.1. BALANCE DE ENERGIA DE SOLUCIONES

Al plantear un balance de energía para un proceso que incluya formar, concentrar o diluir una solución para la cual no se pueda despreciar el calor de solución o de mezcla, prepare una tabla de entalpías de entrada y salida considerando a la solución como sustancia única y a los componentes puros a 25°C como estados de referencia. Para calcular la entalpia de la solución a la temperatura T $\neq$ 25°C, calcule primero su entalpia a 25°C basándose en los datos de calor de solución tabulados, y después sume el cambio de entalpia para el calentamiento o enfriamiento de la solución de 25°C a T. El cambio de entalpia para este último paso debe calcularse a partir de las capacidades de calor de solución tabuladas, si están disponibles [es decir, si aparecen en las pp. 2-184 y 2-185 del Manual de Perry]; de lo contrario, emplee la capacidad calorífica promedio determinada mediante la ecuación 8.3-13 para mezclas liquidas o la capacidad calorífica del solvente puro para soluciones diluidas.

El calor de mezclado específico ($\Delta H^0_{mezclado}$) (es decir, el cambio de entalpia por unidad de masa al mezclarse) se debe determinar experimentalmente, o puede obtenerse de resultados experimentales tabulados ajustados, una vez que están disponibles. Este tipo de cambio de energía recibe el nombre formal de **calor de disolución** cuando una sustancia se disuelve en otra: y también existe el opuesto del calor de disolución, el calor de separación, para una sustancia que se separa de una disolución.

Calor integral de disolución se define como la variación de entalpia que se produce al disolver una determinada cantidad de soluto en cierta cantidad de disolvente. La variación total de calor, por mol de soluto, cuando la disolución se ha completado, es el calor integral de disolución. El calor integral de disolución varía con el número de moles de disolvente en los que se ha disuelto el soluto.

Problema 1

El ácido clorhídrico se produce absorbiendo HCI gaseoso (cloruro de hidrógeno) en agua. Calcule el calor que debe transferirse a o desde una unidad de absorción, si se alimentan a ella $HCl_{(g)}$ a 100°C y $H_20_{(l)}$ a 25°C para producir 1000 kg/h de $HCl_{(ac)}$ al 20.0 % por peso a 40°C.

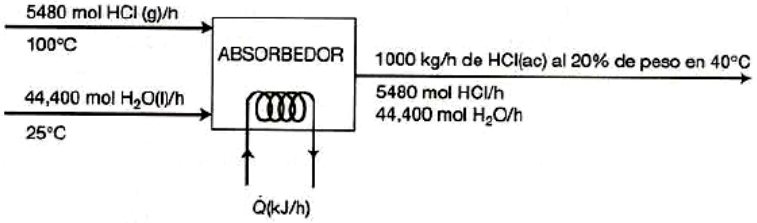
Solución

Es aconsejable determinar las cantidades molares o velocidades de flujo de los componentes de toda la alimentación y las soluciones producidas antes de dibujar y marcar el diagrama de flujo. En este caso,

1000 kg/h de $HCl_{(ac)}$ al 20.0 % por peso

$$n_{HCl} = \frac{1000\ kg}{h}\frac{0,200\ kg\ HCL}{kg}\frac{10^3\ mol}{36,5\ kg\ HCl} = 5480\ mol\ HCl/h$$

$$n_{H2O} = \frac{1000\ kg}{h}\frac{0,800\ kg\ HCL}{kg}\frac{10^3\ mol}{18,0\ kg\ H_2O} = 44400\ mol\ H_2/h$$



A continuación se muestra la tabla de entalpias para el proceso. Como siempre, se emplean los datos de propiedades físicas válidos a P = 1 atm y se desprecian los efectos sobre la entalpia de las diferencias de presión que puedan producirse durante el proceso. Observe que el valor de n para la solución de producto es la velocidad de flujo molar del soluto (HCI) más que el de la solución, pues la entalpia se determinará en kJ/mol de soluto.

Referencias: $HCI_{(g)}$, $H_20_{(l)}$ a 25°C y 1 atm

Sustancia	$\mathbf{n}_{entrada}$	$\mathbf{H}_{entrada}$	$\mathbf{N}_{salida}$	$\mathbf{H}_{salida}$
$HCl_{(g)}$	5480 mol HCI	H_1 (kJ/mol HCI)	—	—
H_2O_l	44400 mol H_2O	0		—
$HCI_{(ac)}$	—	—	5480 mol HCI	H_2(kJ/mol HCI)

Calcule H_1 y H_2

$$HCl(g, 25^oC) \rightarrow HCl(g, 100^oC)$$

$$H_1 = \Delta H = \int_{25^oC}^{100^oC} C_p dT$$

C_p para HCl (g) de tablas: 29,13 x 10^{-3}T-0,1341 x $10^{-5}T^2$ + 0,8715 x $10^{-8}T_3$-4,335 x $10^{-12}T^4$

$\Delta H_a = \Delta H_s$ =(25°C, r = 8.1) de tabla B - 11 (De Fogler): Calores Integrales de solución, Interpolando -67,4 kJ/mol HCl

Las capacidades caloríficas de las soluciones acuosas de ácido clorhídrico aparecen en la p. 2-184 del Manual de Perry como función de la fracción molar de HCl en la solución, que en nuestro problema es:

$$\frac{5480\ mol\ HCl/h}{(5480 + 44400)} = 0,110\ mol\ HCl/mol$$

Para esta fracción molar de la tabla le corresponde 0,73 kcal/kg.°C, por lo tanto:

$$C_p = \frac{0,73\ kcal}{kg.^oC}\frac{1000\ kg\ solución}{5480\ mol\ HCl}\frac{4,184\ kJ}{kcal} = 0,557\ kJ/mol\ HCl.^oC$$

$$\Delta H_b = \int_{25^oC}^{40^oC} C_p dT = 8,36\ kJ/mol\ HCl$$

$$H_2 = \Delta H_a - \Delta H_b = (-67,40 + 8,36)\ kJ/mol\ HCl\ =\ -59,0\ kJ/mol\ HCl$$

Balance de energía

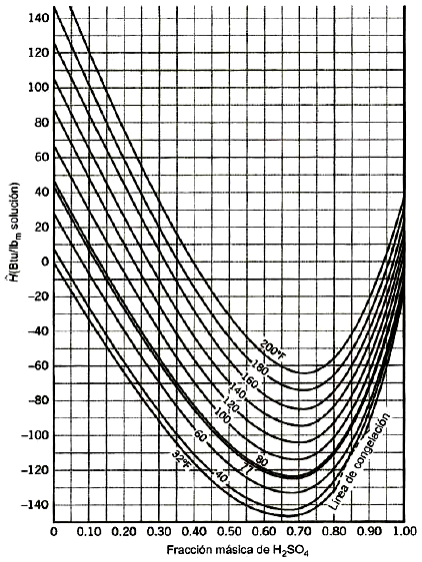
$$Q = \Delta H = \sum_{salida} n_i H_i - \sum_{entrada} n_i H_i$$

$$(5480 molHCI/h)(-59,0 kJ/molHCl) - (5480 molHCl/h)(2,178 kJ/molHCl) = 3,35X10^5 kJ/h$$

Es necesario que se transfiera calor del absorbedor a razón de 335,000 kJ/h para evitar que la temperatura del producto aumente por arriba de 40°C.

Diagramas de entalpia-concentración: fase líquida única

Los cálculos de balance de energía para sistemas de fase líquida que incluyen mezclas pueden resultar tediosos cuando los calores de mezcla son significativos. Para sistemas binarios (de dos componentes), estos cálculos pueden simplificarse mediante un diagrama de entalpia-concentración, que grafican una entalpia específica contra la fracción molar (o porcentaje molar) o la fracción másica (o porcentaje en peso) de un componente. La figura siguiente muestra el diagrama H-x para soluciones acuosas de ácido sulfúrico a diversas temperaturas. Las condiciones de referencia para las entalpías graficadas son el H_2SO_4 líquido puro a 77°F y el agua líquida a 32°F.

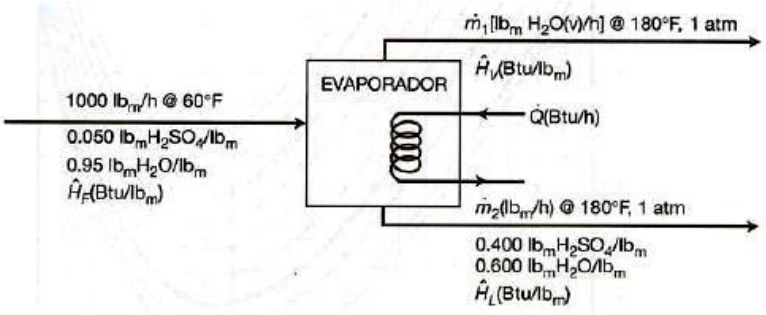


Problema 2

Concentración de una solución acuosa de H_2SO_4

Una solución al 5.0 % por peso de H_2SO_4 a 60°F se concentrará al 40.0 % por peso evaporando el agua. La solución concentrada y el vapor de agua emergen del evaporador a 180°F y 1 atm. Calcule la velocidad a la cual se debe transferir calor al evaporador para procesar 1000 lb$_m$/h de la solución de alimentación.

Base de Cálculo: 1000 lb$_m$/h de alimentación de solución al 5 %



Balance de H_2SO_4 $\quad (0{,}050)(1000)\ lb_m/h = 0{,}400\ m_2$

$$m_2 = 125\ lb_m/h$$

Balance total de masa $\quad 1000\ lb_m/h = m_1 + m_2$

$$m_1 = 875\ lb_m/h$$

Estado de referencia para el balance de energía H_2O(l, 32°F), H_2SO_4(l, 77°F)

Dé la figura Entalpía composición del H_2SO_4:

H_F= 10 Btu/lb$_m$ $\quad$ (5 % H_2SO_4 a 60°F)

H_L= -17 Btu/lb$_m$ $\quad$ (40 % H_2SO_4 a 180°F)

La entalpia del vapor de agua a 180°F y 1 atm en relación con agua líquida a 32°F puede obtenerse de las tablas de vapor del Manual de Perry como

$$H_V = 1138\ Btu/lb_m$$

Balance de energía

$$\begin{aligned} Q = \Delta H &= m_1 H_V + m_2 H_L - (1000 lb_m/h) H_F \\ &= [(875)(1138) + (125)(-17) - (1000)(10)] Btu/h \\ &= 984000 Btu/h \end{aligned}$$

Compare la facilidad de estos cálculos con los del ejemplo anterior. Contar con el diagrama de entalpia-concentración elimina la necesidad de todos los pasos hipotéticos de calentamiento, enfriamiento y mezcla isotérmica que se requerirían en forma normal para evaluar el cambio total de entalpia del proceso.

8.2. BALANCE DE ENERGÍA EN PROCESOS DE COMBUSTIÓN

La combustión es el proceso térmico de mayor interés práctico por su escala de utilización mundial, siendo a la vez muy fácil de realizar y muy difícil de estudiar. En este capítulo se describen los elementos fundamentales del proceso de combustión (combustibles, comburentes y productos de combustión), se estudia el balance de materia de las reacciones químicas de combustión (estequiometría) y el balance de energía y entropía en combustiones en régimen estacionario y a volumen constante.

El proceso de combustión es el más importante en ingeniería porque todavía hoy, aunque tiende a disminuir (96 % en 1975, 90 % en 1985, 80 % en 1995), la mayor parte de la producción mundial de energía se hace por combustión de petróleo, carbón y gas natural (combustibles fósiles). Además, no sólo es importante estudiar la combustión controlada de los recursos primarios usados en la producción de trabajo y calor, sino que también es preciso estudiar los procesos de combustión incontrolada (fuegos) para tratar de prevenirlos y luchar contra ellos; además, cada vez es más importante

analizar la combustión controlada de materiales de desecho (incineración), con el fin de minimizar la contaminación ambiental.

El balance de energía de la reacción de combustión tiene por objeto la determinación del calor de reacción. La reacción de combustión es exotérmica, es decir, desprende calor. Este calor desprendido es el calor de reacción, que depende no sólo de las sustancias reaccionantes, combustible y aire u oxígeno, sino también de sus estados. Este calor de reacción se expresa de diversas formas:

Q, cantidad total de calor, en J, kJ o MJ.

$\dot{Q}$, cantidad de calor por unidad de tiempo, en W o kW.

q, cantidad de calor desprendido por kg de combustible, en kJ/kg o MJ/kg.

$\bar{q}$, cantidad de calor desprendido por kmol de combustible, en kJ/kmol o MJ/kmol.

La reacción de combustión se puede indicar de forma simplificada como sigue:

$$1\ mol\ (combustible) + r_{ae}^{-}\ (aire)\ \rightarrow\ r_{\bar{h}h}\ (productos)$$

Siendo r_{ae}^{-} la relación de aire mínimo necesario para la reacción completa y $r_{\bar{h}h}$ la relación de humos húmedos, ambos en kmol/kmol de combustible.

Balance energético

Supongamos que la reacción de combustión se lleva a cabo en un reactor (sistema abierto) sin producción de trabajo (Fig. 8.1). Consideremos despreciables las variaciones de las energías cinética y potencial. El balance energético en estado estacionario es:

$$Q = H_{PR} - H_{SR} \tag{8.1}$$

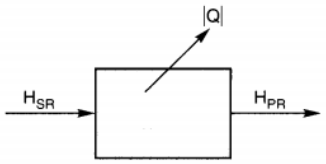


Figura 8.1: Reactor

Donde H_{PR} es la entalpía de todos los productos de la reacción y H_{SR} , la entalpía de todas las sustancias reaccionantes. El calor de reacción tiene signo termodinámico negativo; si se toma su valor absoluto:

$$|Q| = H_{SR} - H_{PR} \tag{8.2}$$

Expresando (8.1) por kmol de combustible:

$$\bar{q} = \bar{h}_{PR} - \bar{h}_{SR} \tag{8.3}$$

Para un compuesto gaseoso, su entalpía específica molar a la temperatura T y presión p viene dada por:

$$\bar{h}(T,p) = \bar{h_F^0} + \int_{T_0,P_0}^{T,p} c_p(T,p)dT \tag{8.4}$$

y si se considera la aproximación de gas ideal:

$$\bar{h}(T) = \bar{h}_F^0 + \int_{T_0}^{T} c_p(T)dT \tag{8.5}$$

Aquí, p_o y T_o son la presión (1 atm $\equiv$ 1,013 bar) y temperatura (25ºC $\equiv$ 298 K) del estado de referencia; $\bar{h}_f^0$ es la entalpía molar de formación del compuesto en el estado de referencia y constituye la entalpía de referencia del compuesto. Como se sabe, la entalpía de referencia es cero para los elementos en sus estados de agregación estables: O_2(g), H_2(g), N_2(g), C(s) y S(s). En la tabla 1 aparecen las entalpías de formación de algunas sustancias muy frecuentes en las reacciones de combustión.

Por tanto, sustituyendo en (8.3), el calor de reacción por kmol de combustible vendrá dado por:

$$\bar{q} = \sum_{j=1}^{m} n_j \left(\bar{h}_F^0 + \int_{T_0}^{T} c_p(T)dT \right)_j - \sum_{i=1}^{n} n_i \left(\bar{h}_F^0 + \int_{T_0}^{T} c_p(T)dT \right)_i \tag{8.6}$$

En esta ecuación, los subíndices j e i representan un componente genérico de los productos y de los reactivos, respectivamente; m es el número de productos y n, el de reactivos; n_j son los kmoles de producto j y n_i, los kmoles de reactivo i. Los términos integrales representan calor sensible de los productos y reactivos gaseosos; si se indican de forma más condensada con la notación $\bar{\Delta h}$, se tiene:

$$\bar{q} = \sum_{j=1}^{m} n_j \left(\bar{h}_F^0 + \bar{\Delta h} \right)_j - \sum_{i=1}^{n} n_i \left(\bar{h}_F^0 + \bar{\Delta h} \right)_i \tag{8.7}$$

Si consideramos que los productos se enfrían hasta la temperatura de referencia y las sustancias reaccionantes entran a la temperatura de referencia, los términos son nulos. Entonces, el calor de reacción se representa por $\bar{q^0}$ y se denomina entalpía de combustión y sigue siendo negativa. Así pues:

$$\bar{q^0} = \sum_{j=1}^{m} n_j \bar{h}_{F\,j}^0 - \sum_{i=1}^{n} n_i \bar{h}_{F\,i}^0 = \bar{h}_{PR}^0 - \bar{h}_{SR}^0 \tag{8.8}$$

El valor absoluto de la entalpía de combustión recibe el nombre de **poder calorífico del combustible**. Se distingue entre poder calorífico superior (PCS) y poder calorífico inferior (PCI), según que se produzca o no la condensación del vapor de agua de los humos.

La condensación del vapor de agua depende de la temperatura y de la concentración de éste en los humos. Para que se produzca tal condensación, se ha de alcanzar la llamada temperatura de rocío del vapor de agua en los humos. Es difícil establecer las condiciones de esta condensación, ya que, en cada caso, tendremos un gas soporte diferente. Nos referimos como gas soporte a los humos secos.

Esta temperatura de condensación del vapor de agua adquiere importancia en el tema de la recuperación energética de los humos. Si se alcanza esta temperatura, el vapor de agua condensará y disolverá, en mayor o menor proporción, algunos componentes de los humos, con lo cual el agua condensada puede ser ácida y de notable poder corrosivo.

La tabla siguiente facilita el poder calorífico de algunos combustibles.

Combustibles gaseosos	$P\bar{C}I$ **(MJ/kmol)**	$P\bar{C}S$ **(MJ/kmol)**
Hidrógeno	242,0	286,0
Metano	802,0	890,0
Etano	1.426,5	1.558,5
Propano	2.045,1	2.221,1
Butano	2.659,8	2.879,8
Etileno	1.313,0	1.401,0
Acetileno	1.254,8	1.298,8
Combustible líquidos y sólidos	**PCI (MJ/kg)**	**PCS (MJ/kg)**
Gasolina (*)	43,3	46,5
Gasóleo (*)	42,7	45,5
Fuel oil (*)	40,8	43,3
Antracita	35,1	35,9
Lignito	25,6	26,8
Madera seca	18,8	20,2
(*) Nota: Estos valores son sólo orientativos porque el valor exacto, en cada caso, depende de la composición del combustible		

Ejemplo: Determinar el poder calorífico superior e inferior de un combustible gaseoso cuya composición molar es: CH_4, 0,380; C_2H_4, 0,08; H_2, 0,48; CO_2, 0,02; N_2, 0,02; O_2, 0,02. Considérese la reacción estequiométrica y que el agua presente en los humos está en estado de vapor.

La tabla refleja los cálculos intermedios para el PCI, obteniéndose un resultado de 526,8 MJ/kmol. Para el PCS se considerará la entalpía de formación estándar del agua en estado líquido (Tabla 1); resulta un valor de 558,39 MJ/kmol.

Sustancias reaccionantes	n_1	$\bar{h}_f^0$ **MJ/kmol**	$n_1\bar{h}_f^0$
CH_4	0,38	-74,85	-28,44
C_2H_6	0,08	52,28	4,18
H_2	0,48	0	0
CO_2	0,02	-393,5	-7,87
N_2	0,02	0	0
O_2	0,02	0	0
aire	5,81	0	0
			$\sum$=-32,13

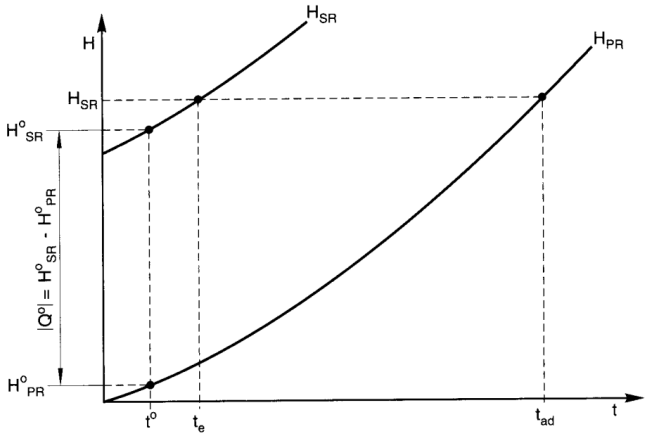
Productos de la combustión	n_1	$\bar{h}_f^0$ **MJ/kmol**	$n_1\bar{h}_f^0$
CO_2	0,56	-393,5	-220,4
H_2O	1,40	-241,8	-338,5
N_2	4,61	0	0
			$\sum$=-558,9

8.3. TEMPERATURA ADIABÁTICA DE FLAMA

Es la temperatura que alcanzarían los productos de la combustión si la reacción de combustión fuese adiabática. Cuando en la ec. (8.1) Q = 0 se tiene:

$$H_{PR} = H_{SR}$$

Aplicando esta condición se obtiene la temperatura adiabática. En la figura siguiente, se muestra de forma cualitativa la variación de la entalpía de las sustancias reaccionantes (SR) y productos (PR) frente a la temperatura.



Si hacemos $\bar{q}$ = 0 en (8.7) y consideremos la definición de $\bar{q^0}$ dada por (8.8), resulta:

$$\bar{q^0} = \sum_{i=1}^{n} n_i \Delta \bar{h_i} - \sum_{j=1}^{m} n_j \Delta \bar{h_j} \tag{8.9}$$

Tomando el poder calorífico del combustible se tiene:

$$\sum_{j=1}^{n} n_j \Delta \bar{h_j} = \sum_{i=1}^{n} n_j \Delta \bar{h_i} + |\bar{q^0}| \tag{8.10}$$

Esto es, en una combustión adiabática los productos adquieren un calor sensible igual al de los reactivos, a la temperatura de entrada, más el poder calorífico del combustible. Como a la temperatura de los productos el vapor de agua no condensa, será el PCI el calor que se emplea en elevar la temperatura desde el valor de entrada, t_e, hasta la temperatura adiabática, $t_a d$.

Esta ecuación la aplicaremos a la siguiente reacción generalizada de combustión estequiométrica con los componentes referidos a 1 kg de combustible:

1 kg (combustible) + r_{ae} (aire) = r_{hh} (productos)

Resulta:

$$r_{hh} \Delta h_{humos} = \Delta h_{comb} + r_{ae} \Delta h_{aire} + PCI \tag{8.11}$$

Las variaciones de entalpía específica serán ahora:

$$\Delta h_{comb} = \int_{t_0}^{t_e} c_{p,comb}(t) \tag{8.12}$$

$$\Delta h_{aire} = \int_{t_0}^{t_e} c_{p,aire}(t)$$
$$\Delta h_{humos} = \int_{t_0}^{t_e} c_{p,humos}(t)$$

Donde t_e es la temperatura de entrada de las sustancias reaccionantes, t_o la temperatura de referencia y t_{ad} la temperatura adiabática, todas ellas en ^{o}C.

Aceptando valores medios integrales para los calores específicos, podrá escribirse:

$$\Delta h_{comb} = c_{p,comb}(t_e - t_0) \tag{8.13}$$

$$\Delta h_{aire} = c_{p,aire}(t_e - t_0)$$
$$\Delta h_{humos} = c_{p,humos}(t_{ad} - t_0)$$

Sustituyendo queda:

$$r_{hh} C_{p,humos}(t_{ad} - t_0) = (c_{p,comb} + r_{ae} c_{p,aire})(t_e - t_0) + PCI \tag{8.14}$$

de donde se despeja t_{ad}:

$$t_{ad} = t_0 + \frac{(c_{p,comb} + r_{ae} c_{p,aire})(t_e - t_0) + PCI}{r_{hh} C_{p,humos}} \tag{8.15}$$

La temperatura adiabática, llamada también temperatura teórica de combustión, representa un límite que no se alcanza en la combustión real, ya que no tiene en cuenta las reacciones de disociación de los componentes de los humos. Estas reacciones se ven favorecidas por las altas temperaturas y consumen energía ya que son endotérmicas.

La ecuación (8.15) permite hacer algunas consideraciones:

- Si la combustión se realiza con exceso de aire debe sustituirse r_{ae} por r_{ar}, que será una cantidad mayor; $r_h h$ también será mayor y $t_a d$ descenderá. Este descenso será tanto mayor cuanto mayor sea el exceso de aire.

- Un aumento de la temperatura de entrada de los reactivos, p.e. del aire, provoca un aumento de la temperatura adiabática.

- Si la temperatura de entrada es próxima a la de referencia (25°C), la ecuación puede aproximarse a:

$$t_{ad} = t_0 + \frac{PCI}{r_{hh} c_{p,humos}} \tag{8.16}$$

Las ecuaciones (8.15) y (8.16) deben resolverse por tanteo o de forma iterativa para despejar la temperatura de combustión adiabática, ya que el calor específico de los humos depende de t_{ad}.

Para facilitar el cálculo de la temperatura adiabática, se suele usar tablas o gráficas que proporcionan, a diferentes temperaturas, los valores medios integrales de los calores específicos de los componentes más habituales de los humos. En la tabla siguiente se incluye algunos de estos valores. Los calores molares se expresan en kJ/(kmol ^{o}C) y son valores medios integrales entre 0 ^{o}C y t ^{o}C. Para su uso, las variables de las ecuaciones anteriores deben referirse a kmoles.

t(°C)	$\bar{c_p}N_2$ **(del aire)** **kJ/(kmol grad)**	$\bar{c_p}CO_2$ **kJ/(kmol grad)**	$\bar{c_p}H_2O$ **kJ/(kmol grad)**
1.000	31,22	49,57	38,58
1.500	32,39	52,55	41,48
1.800	32,91	53,88	43,00
1.900	33,11	54,27	43,46
2.000	33,27	54,62	43,92
2.100	33,40	54,98	44,33
2.200	33,53	55,26	44,76

El ejemplo siguiente puede servir para aplicar estas tablas.

Ejemplo. Determinar la temperatura adiabática de combustión completa del CH_4 con aire.

Solución:

$$CH_4 + 2\ O_2 \rightarrow CO_2 + 2\ H_2O \text{ PCI} = 802{,}0 \text{ MJ/kmol}$$

$$\Delta h_{CH4} = \int_{25^oC}^{T25^oC} (34,31\ x\ 10^{-3} + 5,469\ x\ 10^{-5}T + 0,3661\ x\ 10^{-8}T^2 - 11,0\ x\ 10^{-12}T^3)dT = 0$$

$$\Delta h_{aire} = \int_{25^oC}^{T25^oC} 2\ x\ (0,02910 + 1,158\ x\ 10^{-5}T - 0,6076\ x\ 10^{-8}T^2 + 1,311\ x\ 10^{-12}T^3) + 3,762\ x\ (0,02900 + 0,2199\ x\ 10^{-5}T + 0,5723\ x\ 10^{-8}T^2 - 2,871\ x\ 10^{-12}T^3)dT = 0$$

$$\Delta h_{humos} = \int_{25^oC}^{T_{ad}} 1\ x\ (0,03611 + 4,233\ x\ 10^{-5}T - 2,887\ x\ 10^{-8}T^2 + 7,464\ x\ 10^{-12}T^3) + 2\ x\ (0,03346 + 0,688\ x\ 10^{-5}T + 0,7604\ x\ 10^{-8}T^2 - 3,593\ x\ 10^{-12}T^3)dT$$

$$\Delta h_{humos} = \int_{25^oC}^{T_{ad}} (0,10303 + 5,609\ x\ 10^{-5}T - 1,3662\ x\ 10^{-8}T^2 + 0,278\ x\ 10^{-12}T^3)]dT$$

$$\Delta h_{humos} = 0,1030(T_{ad} - 25) + 2,8045(T_{ad}^2 - 25^2) - -0,4554(T_{ad}^3 - 25^3) + 0,0695(T_{ad}^4 - 25^4)$$

$$r_{hh}(0,1030(T_{ad} - 25) + 2,8045(T_{ad}^2 - 25^2) - -0,4554(T_{ad}^3 - 25^3) + 0,0695(T_{ad}^4 - 25^4))$$

$$= (0 + r_{ae}\ x\ 0)(t_e - T_0) + 802\ kJ/mol$$

$$r_{hh} = 3$$

Resolviendo por aproximaciones sucesivas tenemos que T_{ad} = 2060°C

Por otro lado, la figura 3 permite estimar de forma aproximada los valores medios integrales de los calores específicos de los humos y del aire, en kcal/(Nm^3 °C), en función del tipo de combustible, su PCI, el índice de exceso de aire y la temperatura. Para el cambio de unidades deben considerarse las equivalencias:

1 kcal = 4,186 kJ ; 1 kmol= 22,4 Nm^3.

Otro enfoque

Suponga que se queman en su totalidad n_f (mol/s) de una especie combustible con calor de combustión ΔH_C^0 con oxígeno puro o aire en un reactor adiabático continuo. Si los estados de referencia de la alimentación molecular y las especies de producto son los que se usaron para determinar ΔH_C^0 , el cambio de entalpia de la entrada a la salida se determina mediante la ecuación:

$$\Delta H = n_f H_C^0 + \sum_{salida} n_i H_i(T_{ad}) - \sum_{entrada} n_i H_i(T_{alimentacion})$$

Como el reactor es adiabático, Q = 0 en el balance de energía. Si el trabajo de flecha y los cambios de energías potencial y cinética (W s ΔE_P , ΔE_C) son despreciables en comparación con cada uno de los dos primeros términos de la expresión para ΔH, el balance de energía se simplifica a $\Delta H = 0$, lo cual a su vez conduce a

$$\sum_{salida} n_i H_i(T_{ad}) = \sum_{entrada} n_i H_i(T_{alimentacion}) - n_f H_C^0$$

De nuevo, los estados de referencia para determinar las entalpías específicas en esta ecuación deben ser aquellos utilizados para determinar el valor de ΔH_C^0. Si se emplean los calores de combustión de la tabla 2, los estados de referencia serían el combustible, los productos de combustión (incluyendo el agua líquida) y las especies inertes a 25°C y 1 atm. El combustible estaría en cualquier estado (sólido, líquido o gaseoso) especificado en la tabla.

Si las fórmulas polinomiales de tercer orden de capacidad calorífica de la tabla se usan para determinar $H_i(T_{ad})$ para cada especie de producto, la ecuación anterior se transforma en una ecuación polinomial de cuarto orden. Resolver esta ecuación para T_{ad} es fácil con un programa de hoja de cálculo o para resolver ecuaciones. El siguiente ejemplo ilustra el procedimiento.

Problema 3

Se quemará metanol líquido con 100 % de aire en exceso. El ingeniero que diseña el horno debe calcular la temperatura más alta que tendrán que soportar las paredes del horno para elegir un material de construcción adecuado. Haga este cálculo, suponiendo que el metanol se alimenta a 25°C y el aire entra a 100°C.

Solución:

Base de Cálculo: 1 mol de CH_3OH quemado

Suponga la combustión total.

Por la tabla,

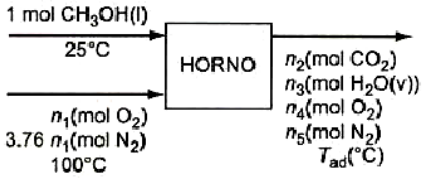
$$CH_3OH_{(l)} + 3/2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O_{(l)} \; \Delta H_c^0 = \text{-726,6 kJ/mol}$$

Cálculo de las cantidades de los componentes

$$(n_{O2})_{teorico} = 1,50 \; mol$$

$$n_1 = (2)(150 \; mol) = 3,00 \; mol \; O_2 \; alimentado$$

$$(3,76 \; mol \; N_2/mol \; O_2)(3,00 \; mol \; 0_2) = 11,28 \; mol \; N_2 \; alimentado$$



Los balances de materia dan:

n_2 = 1,00 mol CO_2

n_3 = - 2.00 mol H_2O

n_4 = 1,50 mol O_2

n_5 = 11,28 mol N_2

Cálculo de las entalpías de los componentes de la alimentación

Referencias: $CH_3OH_{(l)}$, O_2, N_2 a 25°C

CH_3OH (l, 25°C): H = 0

Aire (100°C): H = 2,191 kJ/mol (de tabla)

Evaluación del lado derecho de la ecuación de flama adiabática

$$-n_f\Delta H_C^0+\sum_{entrada} n_1H_1 = -(1,00\ mol\ CH_3OH)(-726.6\frac{kJ}{mol})+(1,00\ mol)(0\frac{kJ}{mol})+(14,28\ mol\ Aire(2,191\frac{kJ}{mol})) = 757,9\ kJ$$

Cálculo de la entalpia de la corriente de producto

Referencias: $CO_{2(g)}$. $O_{2(g)}$, $N_{2(g)}$ y H_2O(l) a 25°C. (Suponga que el agua es líquida, pues éste es el estado para el cual se conoce ΔH_C^0

De tablas, las capacidades caloríficas de los gases producidos en kJ/(mol,°C) en términos de T(°C) son:

$$(Cp)_{CO2} = 0,03611 + 4,233X10^{-5}T - 2,887X10^{-8}T^2 + 7,464X10^{-12}T^3$$
$$(Cp)_{H2O(g)} = 0,03346 + 0,688X10^{-5}T + 0,7604x10^{-8}T^2 - 3,593X10^{-12}T^3$$
$$(Cp)_{O2} = 0,02910 + 1,158X10^{-5}T - 0,6076X10^{-8}T^2 + 1,311X10^{-12}T^3$$
$$(Cp)_{N2} = 0,02900 + 0,2199X10^{-5}T + 0,5723X10^{-8}T^2 - 2,871X10^{-12}T^3$$

Podríamos integrar cada una de estas fórmulas desde la temperatura de referencia de 25°C hasta la $T_{(ad)}$ desconocida para obtener expresiones para cada $(H_i)_{salida}$, y después sustituirlas en $\sum_{salida} n_iH_i(T_{ad})$; sin embargo, podemos ahorrar algo del tiempo dedicado a los cálculos sumando antes de integrar. Sustituyendo los valores de n, calculados previamente y las capacidades caloríficas tabuladas, y recordando que para calcular $(H)_{H2O(g)}$ primero debemos vaporizar el líquido a 25°C (usando la ecuación ΔH_V(H_2O, 25°C) = 44,013 kJ/mol = 18,934 Btu/lb-mol, para A//v), obtenemos:

$$\sum n_iC_{pi} = 0,4378 + 9,826\ x\ 10^{-5}T + 4,178\ x\ 10^{-8}T^2 - 30,14\ x\ 10^{-12}T^3$$
$$\sum n_iH_i = n_3(\Delta H_v)_{H2O} + \int_{25^oC}^{T_{ad}}(\sum n_iC_{pi})dT$$
$$\sum n_iH_i = 88,026 + 0,4378T_{ad} + 4,913\ x\ 10^{-5}T_{ad}^2 + 1,393\ x\ 10^{-8}T_{ad}^3 - 7,535\ x\ 10^{-12}T_{ad}^4 - 11,845$$
$$\sum n_iH_i = 76,18 + 0,4378T_{ad} + 4,913\ x\ 10^{-5}T_{ad}^2 + 1,393\ x\ 10^{-8}T_{ad}^3 - 7,535\ x\ 10^{-12}T_{ad}^4$$

Balance de energía

De la ecuación de flama adiabática

$$\sum_{salida} n_i H_i(T_{ad}) = \sum_{entrada} n_i H_i(T_{alimentacion}) - n_f H_C^0 = 757,9\ kJ$$

$$7,535\ x\ 10^{-12} T_{ad}^4 + 1,393\ x\ 10^{-8} T_{ad}^3 - 4,913\ x\ 10^{-5} T_{ad}^2 - 0,4378 T_{ad} = 0$$

Esta ecuación cuartica puede resolverse con una hoja de cálculo, un programa para resolver ecuaciones o una calculadora programada para resolver ecuaciones polinomiales. La solución es:

$$T_{ad} = 1256^{o}C$$

8.4. USO DEL COMPUTADOR EN LA RESOLUCIÓN DE BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA

Si estudió todos los capítulos anteriores, sin duda estará consciente - quizá después de muchas dificultades- de que resolver los problemas de balances de materia y de energía a mano, inclusive para sistemas bastante sencillos, puede ser una tarea prolongada y tediosa. Imagine los cálculos que sería necesario realizar, por ejemplo, para toda una refinería de petróleo. Una alternativa es diseñar un algoritmo (un procedimiento sistemático) para hacer los cálculos y luego programar una computadora para instrumentarlos. Esta técnica, ahora bastante común y que se denomina elaboración de hojas de flujo), constituye el tema principal de este punto.

Para la resolución de Balances de materia y energía se encuentran una variedad de simuladores industriales, lenguajes de programación, y hojas de cálculo, entre algunos de ellos podemos mencionar:

El Aspen Plus, el Chemcad, Hy Sys, Super Pro, Visual Basic, Matlab, Fortran, Comsol, Fluent, etc. Sin embargo uno de los recursos más próximos con el que contamos en la actualidad es la Hoja de Cálculo Excel, cuyo manejo es muy generalizado y que sin embargo nos proporcionan facilidades muy complejas para poder llevar a cabo balances de masa y energía.

La hoja de cálculo puede aplicarse ventajosamente, entre otras, a tres clases de situaciones:

1. Manejo de fórmulas y correlaciones empíricas de expresión compleja.
2. Resolución de problemas que requieran procesos de integración difíciles o imposibles en modo simbólico.
3. Resolución de problemas que requieran métodos de aproximaciones sucesivas, “Métodos de tanteo”.

También es de gran utilidad su potencialidad, por el método de la matriz inversa, de resolver sistemas de ecuaciones lineales, en aplicaciones como balances de energía o materia, así como sus funciones económicas y de optimización de programas aplicable en cuestiones de economía de la empresa química, pero estas cuestiones no se analizan en este trabajo.

Algunos cálculos que se puede llevar a cabo es:

- Calculo de propiedades mediante correlaciones complejas
- Resolución de problemas que requieren integraciones complejas
- Casos en que aparecen ecuaciones diferenciales
- Resolución de métodos numéricos
- Casos en que aparecen integrales elípticas
- Problemas en los que debe recurrirse a métodos de ensayo y error o aproximaciones sucesivas, o en general a tanteos.

Ejemplo cálculo de la temperatura de una llama.

Calcúlese la temperatura teórica de llama producida al quemar completamente una mezcla de gases cuya composición en volumen es 20 % de CO, 40 % de H_2 y 4= % de N_2 con un 50 % de exceso de aire. Inicialmente combustible y comburente se encuentra a 25°C.

Los calores específicos en kcal (kmol K) se obtienen según:

$$c_p = a + bT + cT^2$$

C_p	a	b.10^2	c.10^5
H_2	6,424	0,1039	-0,7804
CO	6,480	0,1566	-2,387
N_2	6,529	0,1488	-22,271
O_2	6,732	0,1505	-1,791
H_2O (v)	6,970	0,3464	-4,833

Para el CO_2 c_p =18,036 - 4,474·10^{-5}T - 158,08 $T^{-0,5}$

Y los calores normales de combustión

De H_2 a $H_2O_{(v)}$ ΔH^0 = -57,8·10^3 kcal/kmol

De CO ΔH0=-67,63·10^3kcal/kmol

La solución de modo clásico significa establecer una base de cálculo, por ejemplo 100 kmol de combustible, efectuar el correspondiente balance de materia, establecer una temperatura de referencia y efectuar el balance entálpico, sabiendo que por definición la temperatura de llama se calcula para un proceso adiabático. Por no alargar se omiten los cálculos que conducen a la solución siguiente:

El Gas de combustión contiene

Componente Kmol

Componente	Kmol
CO	20
$H_2O_{(v)}$	40
O_2	15
N_2	169,3

El balance entálpico H_s - H_e + $\sum \Delta H_r$ = 0, siendo H_s entalpía de salida, H_s entalpia de entrada y $\sum \Delta H_r$ entalpía de reacción, conduce (s.e.u. o.) a la ecuación

-2,016·$10^{-5}$$T^3$+ 0,2061 T^2 + 1845,8 T - 6330 $T^{0,5}$ -41,233·10^5 = 0

su solución es realmente compleja sin embargo la aplicación de la utilidad “Solver” da una respuesta rápida; obteniéndose el resultado 2021,89658 K.

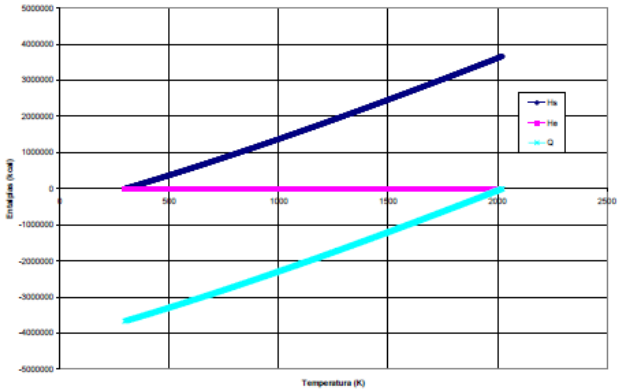
Es suficiente con introducir un valor cualquiera en una casilla, escribir la ecuación en función de esta casilla e imponer que la casilla ocupada por la fórmula tome el valor cero.

Puede evitarse la integración programando el balance entálpico instantáneo desarrollando este e imponiendo que al cabo de un determinado número de pasos, este sea nulo.

Obsérvese la concordancia entre ambos resultados

La fórmula informática básica es H=B12 + (F7*(18,036-0,00004474*A13 -158,08*A13(0,5)) + F6*($B6 + C6*A13 + D6*A13*A13) + F5*(B5 + C5*A13 + D5*A13*A13) + F4*(B4 + C4*A13 + D4*A13*A13))*B10

Véase también como las constantes así como las cantidades de reactivos y productos se han dejado como encabezamiento de la tabla, a fin de facilitar un posible cambio en las mismas, sin modificación sustancial del problema.



Microsoft Excel - ing1b

Archivo Edición Ver Insertar Formato Herramientas Datos Ventana ?

F12

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
4	N_2	6,529	0,001488	-2,27E-05	169,3	169,3			
5	O_2	6,732	0,001505	-1,79E-05	45	15			
6	H_2O (v)	6,97	0,003464	-4,88E-05	0	40			
7	CO_2				0	20			
8									
9	T0	dt							
10	298	0,5743679				Solución			
11	T	Hs	He	Hr	Q	2021,67808			
12	298	0	0	-3,665E+06	-3664600				
13	298,574368	1,02E+03	0	-3,665E+06	-3663577,34				
14	299,148736	2,05E+03	0	-3,665E+06	-3662554,46				
15	299,723104	3,07E+03	0	-3,665E+06	-3661531,36				
16	300,297472	4,09E+03	0	-3,665E+06	-3660508,03				
17	300,87184	5,12E+03	0	-3,665E+06	-3659484,48				
18	301,446207	6,14E+03	0	-3,665E+06	-3658460,7				
19	302,020575	7,16E+03	0	-3,665E+06	-3657436,7				
20	302,594943	8,19E+03	0	-3,665E+06	-3656412,48				
21	303,169311	9,21E+03	0	-3,665E+06	-3655388,03				
22	303,743679	1,02E+04	0	-3,665E+06	-3654363,36				
23	304,318047	1,13E+04	0	-3,665E+06	-3653338,47				
24	304,892415	1,23E+04	0	-3,665E+06	-3652313,35				
25	305,466783	1,33E+04	0	-3,665E+06	-3651288,02				
26	306,041151	1,43E+04	0	-3,665E+06	-3650262,46				

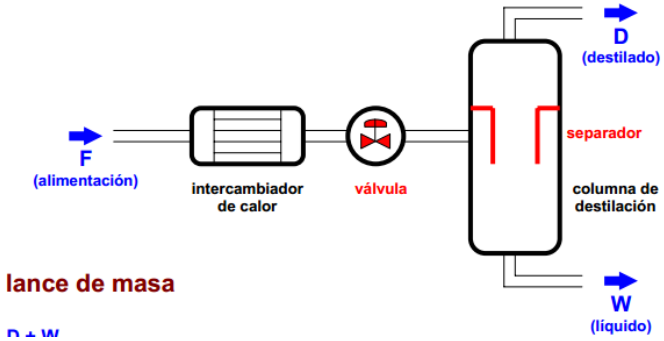
Hoja1 Hoja2 Gráfico1 Hoja3

Dibujo Autoformas

Listo NUM

8.5. OBTENCION DE FORMULAS DE LOS PROCESOS U OPERACIONES UNITARIAS PARTIENDO DEL BALANCE

Por ejemplo para el caso de la destilación, realizaremos un Balance de masa y compararemos con las formulas generadas en el estudio de la operación de destilación:



Balance de Masa

$$F = D + W \tag{8.17}$$

$$F.X_f = D.Y_d + W.X_w \tag{8.18}$$

D = q. F $\Rightarrow$ W = (1 - q). F q = cantidad de líquido que se vaporiza-Destilado obtenido

q = f (entalpía, calor entregado, Δ presión)

F. X_f = q. F. Y_d + (1 - q). F. X_w

Considerando que F es conocido e igual a la unidad, podemos resolver las ecuaciones (8.17) y (8.18), obteniendo D y W, así:

1. 1= D + W
2. 1. X_f = D. Y_d + W. X_w

$$D = \frac{x_f - x_w}{x_d - x_w}$$

$$W = \frac{x_d - x_f}{x_d - x_w}$$

Relacionando W/D, tenemos:

$$\frac{W}{D} = \frac{x_d - x_f}{x_f - x_w}$$

Si comparamos, con las ecuaciones generadas en la Operaciones Unitarias de destilación, veremos que la ecuación es:

$$\frac{L}{V} = \frac{y - x_0}{x_0 - x}$$

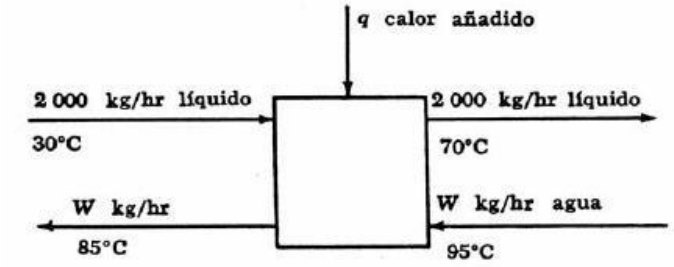
Donde: L=W, V=D, x_f=x_o, x_d =y y x_w =x

8.6. PROBLEMAS DE APLICACIÓN

Problema 1.- Un medio de fermentación líquido a 30 °C se bombea a velocidad de 2000 kg/hr a través de un calentador, donde su temperatura se eleva a 70°C bajo presión. El agua caliente de desperdicio usada para el calentamiento entra a 95 °C y sale a 85 °C. La capacidad calorífica promedio del medio de fermentación es 4.06 kJ/kg K, y la del agua, 4.21 kJ/kg K

Las corrientes de fermentación y de agua caliente están separadas por una superficie metálica a través de la cual se transfiere el calor y que impide la mezcla física de ambas. Establézcase un balance de calor completo para el sistema.

Calcúlense el flujo de agua y la cantidad de calor añadida al medio de fermentación, suponiendo que no hay pérdidas en el sistema. En la Figura se muestra el flujo del proceso.



Problema 2.- A un horno se alimenta un gas de coquería con la siguiente composición molar: H_2= 56 %; CH_4 =28 %; CO=10 %; $C0_2$=5 %; N_2=1 %. Se quema con un 50 % en exceso de aire. El gas se introduce a 50°C y el aire a 125°C.

a) Escriba y ajuste las reacciones de combustión

b) Calcule la composición de la corriente de salida del horno.

c) Calcule la máxima temperatura (temperatura adiabática) a que pueden salir los gases de combustión suponiendo que esta se completa.

Datos:

COMPUESTO	ENTALPÍA DE FORMACIÓN A 25°C kcal/mol
H4	-17.9
CO	-26.4
CO_2	-94.1
$H_20_{(v)}$	-57.8

COMPUESTO	CALORES MOLARES MEDIOS PARA EL INTERVALO 200-2000 Kcal/mol K
CH_4	21.2
CO	7.5
CO_2	12.9
O_2	8.35
N_2	8.05
H_2	7.6
$H_2O_{(v)}$	8.1

Problema 3.- Una corriente de 100 kg/h de propileno gaseoso, H_2C=H-CH_2, a 5 bares y 90 °C era calentada hasta una temperatura de 310 °C por medio de un serpentín que le suministraba el calor necesario para alcanzar dicha temperatura. Lamentablemente el sistema falló y se requiere en forma urgente evaluar la alternativa de usar otro equipo disponible que entrega 12 kW de calor. Determine la temperatura que alcanzaría el propileno con este último equipo y defina si recomienda su uso o no. indicando las consideraciones y cuidados que se deberían tener.

Problema 4.- 150 litros de etanol líquido, C_2H_5OH. a 70 °C y 130 litros de agua líquida a 27 °C se mezclan en un recipiente cerrado y bien aislado. Despreciando la evaporación y el calor que se puede producir al mezclar los componentes: (a) dibuje y etiquete un diagrama de flujo de éste proceso; (b) calcule la temperatura final de la mezcla. Utilice los siguientes datos:

Características	Etanol	Agua
Capacidad calorífica, Btu/lb-F	0,72	1,0
Densidad. kg/L	0,77	1,0

Problema 5.- El calor de solución del amoniaco en agua a 1 atm es:

$$\Delta H_S(25^oC \;\; r = 2molH_20/moINH_3) = -7822kJ/mol$$

Calcule el cambio de entalpia que acompaña a la solución de 400 mol de NH3 en 800 mol de agua a 25°C y 1 atm.

Problema 6.- Se disuelve hidróxido de sodio en suficiente agua para formar una solución de 20,0 mol %. Si el NaOH y el agua se encuentran en un inicio a 77°F (25°C). ¿Cuánto calor (Btu/lb de solución de producto) debe retirarse para que la solución también se encuentre a 77°F? Suponga que el proceso se desarrolla a presión constante, de modo que Q = ΔH y utilice tablas para evaluar ΔH_S.

Problema 7.- Una solución de ácido sulfúrico está marcada como 8N (donde 1N = 1 gequivalente/L y 1 mol de H_2SO_4 contiene 2 g-equivalentes). La gravedad especifica de la solución es 1,230, y su capacidad calorífica es 3,00 J/(g-°C). Calcule la entalpia específica de esta solución (en kJ/mol H_2SO_4) a 60°C, en relación con H_2O pura y una solución muy diluida a 25°C.

Problema 8.- Se carga un horno vertical con piedra caliza pura, $CaCO_3$, y coque también puro (carbono), ambos a 25°C. Por el fondo del horno se introduce aire seco, que proporciona el calor necesario para la descomposición del carbonato, mediante la combustión del carbono hasta CO_2. Por el fondo del horno se descarga cal viva, CaO, a 950°C, que contiene 5 % de carbono y 1 % de $CaCO_3$. Los gases del horno se descargan por la parte superior a 600°C y contienen únicamente CO_2 y N_2.

Supóngase que pueden despreciarse las pérdidas. Las reacciones son:

$$CaCO_3(s) \rightarrow CaO(s) + CO_2(g)$$
$$C(s) + O_2(g) \rightarrow CO_2(g)$$

Sabiendo que

ΔH°f $CaCO_3$(s) = -289,5 kcal/gmol

ΔH°f CaO(s) = -151,7 kcal/gmol

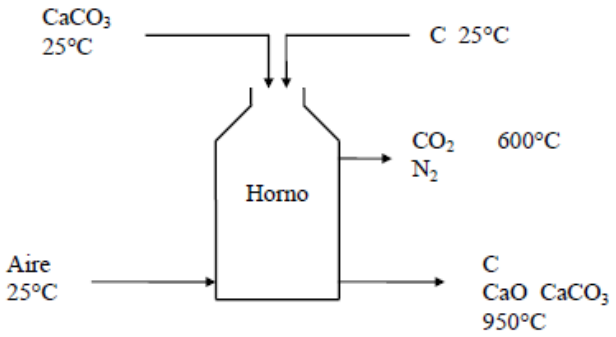
ΔH°f CO_2(g) = -94,052 kcal/gmol

Capacidades caloríficas molares promedio constantes	**(cal/gmol.K)**
CaO (s)	13,7
CO_2 (g)	12,2
N_2(g)	7,5
$CaC0_3$(s)	28,0
O_2(g)	8,0
C(s)	4,6

a) Calcule los calores de reacción a 25°C.

b) Construya una tabla de grados de libertad para el problema. Determine si pueden desacoplarse los balances de materia y energía.

c) Calcule la proporción de $CaCO_3$ a C en la alimentación.



R: a) 43,748 kcal/mol; -94,052 kcal/mol c) 1,119

8.7. ALGUNAS TABLAS

Tabla 8.1: Calor de formación, ΔH of (kcal/mol)

Sustancia	$\Delta H^{o}{}_{f}(kcal/mol)$	**Sustancia**	$\Delta H^{o}{}_{f}(kcal/mol)$
C (g)	170,890	H (g)	52,100
C (c, diamante)	0,450	H_2 (g)	0,000
C (c, grafito)	0,000	H_2O (g)	-57,798
CO (g)	-26,420	H_2O (l)	-68,320
CO_2 (g)	-94,054	H_2O_2 (g)	-31,830
CH_4 (g)	-17,895	H_2O_2 (l)	-44,840
C_2H_6 (g)	-20,236	I (g)	25,633
C_3H_8 (g)	-24,820	I_2 (c)	0,000
C_4H_{10} (g)	-29,812	N (g)	113,000
i C_4H_{10} (g)	-31,452	NH_3 (g)	-10,970
C_5H_{12} (g)	-35,000	N_2 (g)	0,000
C_6H_6 (g)	19,820	NO	21,580
C_7H_8 (g)	11,950	NO_2	7,910
CH_2O (g)	-27,700	N_2O_3	17,000
CH_3OH(g)	-48,080	Na (g)	25,755
CH_3OH(l)	-57,020	Na (c)	0,000
C_2H_2 (g)	54,190	O (g)	59,559
C_2H_4 (g)	12,540	O_2 (g)	0,000
Cl (g)	28,922	O_3 (g)	34,200
Cl_2 (g)	0,000	S	66,680
HCl (g)	-22,063	SO_2 (g)	-70,947
HCN (g)	32,300	SO_3 (g)	-94,590
F_2 (g)	0,000	H_2S (g)	-4,880

Tabla 8.2: Calor específico, Cp (cal/ mol K). (Cp (m^2/ seg^2 K = J/ kg K) = Cp (cal/ mol K) * 4184 J/ cal.)

T (K)	**O_2(g)**	**H_2(g)**	**N_2(g)**	**O(g)**	**H(g)**	**N(g)**	**$C_{(s,grafito)}$**
298,15	7,017	6,892	6,960	5,2364	4,968	4,968	2,066
300	7,019	6,895	6,961	5,2338	4,968	4,968	2,083
400	7,194	6,974	6,991	5,1341	4,968	4,968	2,851
500	7,429	6,993	7,070	5,0802	4,968	4,968	3,496
600	7,670	7,008	7,197	5,0486	4,968	4,968	4,030
700	7,885	7,035	7,351	5,0284	4,968	4,968	4.430
800	78,064	7,078	7,512	5,0150	4,968	4,968	4,75
900	8,212	7,139	7,671	5,0055	4,968	4,968	4,98
1000	8,335	7,217	7,816	4,9988	4,968	4,968	5,14
1100	8,449	7,308	7,947	4,9936	4,968	4,968	5,27
1200	8,530	7,404	8,063	4,9894	4,968	4,968	5,42
1300	8,608	7,505	8,165	4,9864	4,968	4,968	5,57
1400	8,676	7,610	8,253	4,9838	4,968	4,968	5,67
1500	8,739	7,713	8,33	4,9819	4,968	4,968	5,76
1600	8,801	7,814	8,399	4,9805	4,968	4,968	5,83
1700	8,859	7,911	8,459	4,9792	4,968	4,9681	5,90
1800	8,917	8,004	8,512	4,9784	4,968	4,9683	5,95
1900	8,974	8,092	8,56	4,9778	4,968	4,9685	6,00
2000	9,030	8,175	8,602	4,9776	4,968	4,9690	6,05
2100	9,085	8,254	8,64	4,9778	4,968	4,9697	6,10
2200	9,140	8,328	8,674	4,9784	4,968	4,9708	6,14
2300	9,195	8,398	8,705	4,9796	4,968	4,9724	6,18
2400	9,249	8,464	8,733	4,9812	4,968	4,9746	6,22
2500	9,302	8,526	8,759	4,9834	4,968	4,9777	6,26
2750	9,431	8,667	8,815	4,9917	4,968	4,9990	6,34
3000	9,552	8,791	8,861	5,0041	4,968	5,0108	6,42
3250	9,663	8,899	8,9	5,0207	4,968	5,0426	6,50
3500	9,763	8,993	8,934	5,0411	4,968	5,0866	6,57
3750	9,853	9,076	8,963	5,0649	4,968	5,1437	6,64
4000	9,933	9,151	8,989	5,0914	4,968	5,2143	6,72
4250	10,003	9,220	9,013	5,1199	4,968	5,2977	
4500	10,063	9,282	9,035	5,1495	4,968	5,3927	
4750	10,115	9,338	9,056	5,1799	4,968	5,4977	
5000	10,157	9,389	9,076	5,2101	4,968	5,6109	

Tabla 8.3: Calor específico, Cp (cal/ mol K)

T (K)	**C(g)**	**CO(g)**	**NO(g)**	**H_2O(g)**	**CO_2(g)**
298,15	4,9803	6,965	7,137	8,025	8,874
300	4,9801	6,965	7,134	8,026	8,894
400	4,9747	7,013	7,162	8,185	9,871
500	4,9723	7,120	7,289	8,415	10,662
600	4,9709	7,276	7,468	8,677	11,311
700	4,9701	7,451	4,657	8,959	11,849
800	4,9697	7,624	7,833	9,254	12,300
900	4,9693	7,787	7,990	9,559	12,678
1000	4,9691	7,932	8,126	9,861	12,995
1100	4,9691	8,058	8,243	10,145	13,260
1200	4,9697	8,167	8,342	10,413	13,490
1300	4,9705	8,265	8,426	10,668	13,680
1400	4,9725	8,349	8,498	10,909	13,850
1500	4,9747	8,419	8,560	11,134	13,990
1600	4,9783	8,481	8,614	11,340	14,100
1700	4,9835	8,536	8,660	11,530	14,200
1800	4,9899	8,585	8,702	11,710	14,300
1900	4,9880	8,627	8,738	11,870	14,400
2000	5,0075	8,665	8,771	12,010	14,500
2100	5,0189	8,699	8,801	12,140	14,600
2200	5,0316	8,730	8,828	12,260	14,600
2300	5,0455	8,758	8,852	12,370	14,700
2400	5,0607	8,784	8,874	12,470	14,800
2500	5,0769	8,806	8,895	12,560	14,800
2750	5,1208	8,856	8,941	12,800	14,900
3000	5,1677	8,898	8,981	12,900	15,000
3250	5,2150	8,933	9,017	13,100	15,100
3500	5,2610	8,963	9,049	13,200	15,200
3750	5,3043	8,990	9,079	13,200	15,300
4000	5,3442	9,015	9,107	13,3	15,3
4250	5,38	9,038	9,133	13,4	15,4
4500	5,4115	9,059	9,158	13,4	15,5
4750	5,6375	9,078	9,183	13,5	15,5
5000	5,9351	9,096	9,208	13,5	15,6

BIBLIOGRAFÍA

1. A. VALIENTE BARDARES - R. PRIMO T. “Problemas de balance de materia y Energía·”. Edit Alhambra - 1990
2. CRIS A. CLAUSEN, Fundamentos de la Química industrial, Editorial Limusa, 1989.
3. DAVID HIMMENBLAU, Principios y Cálculos Básicos de Ingeniería Química, Editorial Reverte, 1990.
4. EDWARD THOMPSON, Introducción a la ingeniería Química, editorial Mc Graw Hill Book 1992.
5. GV. RECLATTIS DANIEL Balance de material y energía, Nueva editorial Internacional 1994.
6. HENLEY - ROSEN, Cálculos básicos de Balance de Materia y Energía, Editorial Reverte, 1988.
7. HOUGEN, WATSON, RAGATZ, Principios de los Procesos Químicos, Tomo I Editorial REVERTE, 1988.
8. RICHARD FELDER, Principios básicos de los Procesos Químicos, Editorial El Manual Moderno, 1990.
9. WARREN K. LEWIS, Industria Stoichemestry - Editorial Mc Graw Hill Book, 1994

ANEXO : DEFINICIONES MODERNAS DE TIEMPO, MASA Y LONGITUD

DEFINICIÓN DE TIEMPO

La medición del tiempo es un parámetro muy importante que influye en diversos procesos como sistemas de telecomunicaciones, navegación, generación y distribución de energía eléctrica, física, metrología y otras actividades. Para efectos de sincronía es necesaria la generación de escalas de tiempo que sirvan como referencia común y accesible para las mediciones que permitan identificar el momento en que ocurren los eventos.

La unidad de tiempo del Sistema Internacional (SI) de unidades es el segundo, el cual se define actualmente como la duración de 9 192 631 770 (nueve mil ciento noventa y dos millones seiscientos treinta y un mil setecientos setenta) periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de Cesio 133. En su reunión de 1997, el CIPM confirmó que esta definición se refiere a un átomo de cesio en reposo, a una temperatura de 0 K.

La definición propuesta para entrar en vigencia a partir del año 2018 es la siguiente: El segundo, símbolo s, es la unidad de tiempo del SI. Se define asignando el valor numérico fijo de 9 192 631 770 cuando se expresa en Hertz (que es igual a s^{-1}) a la frecuencia del cesio Cv_{Cs}, correspondiente a la frecuencia de transición hiperfina en el estado fundamental no perturbado del átomo de Cesio 133.

DEFINICIÓN DE MASA

En la actualidad el Sistema Internacional (SI) reconoce como una de las magnitudes base a la masa.

Desde la primera Conferencia general de pesas y medidas en 1889, el prototipo internacional del kilogramo es una masa de 1 kg de platino iridio que materializa la unidad de masa, actualmente se encuentra en Francia. A partir del prototipo internacional se ha dado respaldo (Trazabilidad) a los patrones de masa de los diferentes países del mundo por medio de calibraciones.

La definición de masa en la actualidad y los cambios que se aproximan con la nueva definición de masa en base a una constante natural (constante de Planck) va a aportar un gran avance en la comunidad científica y los diferentes sectores de la industria. Siendo actualmente de gran impacto e interés para la metrología.

La nueva definición del kilogramo se espera adoptar la nueva definición de la siguiente manera:

"El kilogramo, símbolo kg, es la unidad de masa del SI. Se define asignando el valor numérico fijo de 6,626 070 040 10^{-34} a la constante de Planck h cuando ésta se expresa en la unidad J.s , que es igual a $kg.m^2.s^{-1}$, donde el metro y el segundo están definidos en términos de c y ΔCs."

Esta definición implica la relación exacta h = 6,626 070 040 10^{-34} $kg.m^2.s^{-1}$.

Invirtiendo esta relación se obtiene una expresión exacta para el kilogramo en términos de las tres constantes de definición: h ; Δ_{Cs} ; c:

$$1\ kg = \left(\frac{h}{6,626070040\ x\ 10^{-34}}\right) m^{-2}.s = 1,475521...x10^{40}\,\frac{h\Delta v_{Cs}}{c^2}$$

El efecto de esta definición es definir la unidad kg. $m^1.s^{-1}$ (la unidad de las magnitudes físicas acción y momento angular). Junto con las definiciones del segundo y el metro, esto conduce a una definición de la unidad de masa expresada en términos del valor de la constante de Planck h.

La definición anterior del kilogramo fijaba el valor de la masa del prototipo internacional del kilogramo, m(K), igual a un kilogramo exactamente, y el valor de la constante de Planck h tenía que determinarse experimentalmente. La presente definición fija el valor de h exactamente, y la masa del prototipo internacional del kilogramo ahora tiene que ser determinada experimentalmente.

DEFINICIÓN DE LONGITUD

Lazos Martínez y López Romero (2010), en "Las Definiciones de Medida en su nueva Etapa" mencionan que la unidad de medida de longitud tiene sus antecedentes en las ideas discutidas en Francia en 1795 al considerarlo como la diezmillonésima parte de un cuadrante del meridiano terrestre, en la cual es notable la referencia al tamaño del planeta, probablemente considerando como un "invariante". Esta definición se realizó mediante un artefacto de platino depositado en los Archives de la Republique en 1799, cuya longitud fue contrastada contra la longitud del segmento del meridiano que pasa por Dunkerke y Barcelona. Este artefacto dio a lugar a la primera definición adoptada en el marco del Tratado del Metro indicando que el prototipo internacional del metro era la distancia existente entre dos trazos marcados en una barra de iridio y platino al 10 % a la temperatura de fusión del hielo (0°C) representaba al metro como unidad de longitud (1ª CGPM 1897 – Conferencia General de Pesas y Medida).

La definición vigente, aprobada en 1983, del metro, símbolo m, se da como la longitud del trayecto recorrido por la luz en el vacío durante un intervalo de tiempo de 1/299 792 458 de segundo.

La nueva definición del metro a adoptarse en el año 2018 es la siguiente:

"El metro, m, es la unidad de longitud del SI. Se define asignando el valor numérico fijo de 299 792 458 a la velocidad de la luz en el vacío c cuando ésta se expresa en la unidad m s^{-1}, donde el segundo es definido en términos de la frecuencia del cesio Δ_{Cs}".

Esta definición implica la relación exacta c = 299 792 458 m.s^{-1}. Invirtiendo esta relación se obtiene una expresión exacta para el metro en términos de las constantes de definición c; Δ_{Cs} [1:

$$1m + \left(\frac{c}{299\ 792\ 458}\right) s = 30,663318... \frac{c}{\Delta_{Cs}}$$

El efecto de esta definición es que un metro es la longitud del camino recorrido por la luz en el vacío durante un intervalo de tiempo de 1/299 792 458 segundos.

REFERENCIAS

- Hacia una nueva definición de la unidad del tiempo del SI. J.M. Lopez, E. de Carlos, C.A. Ortiz y R. Gutierrez (CENAM y CINVESTAK). Memorias del simposio de metrología 2016 – CENAM.
- Draft of the Ninth SI Brochure del 11 de diciembre del 2015.
- PTB mitteilungen, "Edición especial – Experimentos para el Nuevo SI, el Sistema Internacional de Unidades". Berlin, E2016. 126, pp. 63–85, junio 2016.
- E-medida. Revista Española de Metrologia, España, vol.6- n°12. noviembre 2017, pp.11–18. Taylor, B. N. Mohr, P. J. (1999). On the redefinition of the kilogram.Metrologia, 36(1), 63-64. www.bipm.fr/utils/common/ pdf/C-CEM24.pdf.
- Draft of the Ninth SI Brochure, 10 November 2016. Bureau International des Poids et Mesures – BIPM. Sèvres Cedex Lazos Martínez y López Romero (2010) Las Definiciones de Medida en su nueva Etapa.
  https://www.cenam.mx/sm2010/info/pviernes/sm2010-vp01d.pdf
- PTB mitteilungen. Edición especial – Experimentos para el Nuevo SI, el Sistema Internacional de Unidades, Interferometría – ¿cómo le extraigo una longitud a la luz? René Schödel. Berlín, E2016. 126, pp. 35–52, junio 2016.
  https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/publikationen/ptb_mitteilungen/mitt2016/Heft2/Experimentos_para_el_nuevo_SI.pdf
- Prieto, E. Breve Historia de la Metrología
  http://www.cem.es/sites/default/files/historia.pdf
- e-medida Revista Española de Metrología, (febrero 2012)
  http://servicios.mpr.es/VisorPublicaciones/visordocumentosicopo.aspx?NIPO=074120010&SUBNIPO=0001
- Gilberto José Rafael Cárdenas Núñez. ¿Existe aún la industria manufacturera en el Perú?. N° 11, pp. 11-32
  http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/econo/article/viewFile/9005/7833

Este libro se *terminò de imprimir* en el mes de —-,
en la Editorial Universitaria de la Universidad Nacional de
San Agustín de Arequipa Calle Paucarpata, Puerta 5,
Área de ingenierías