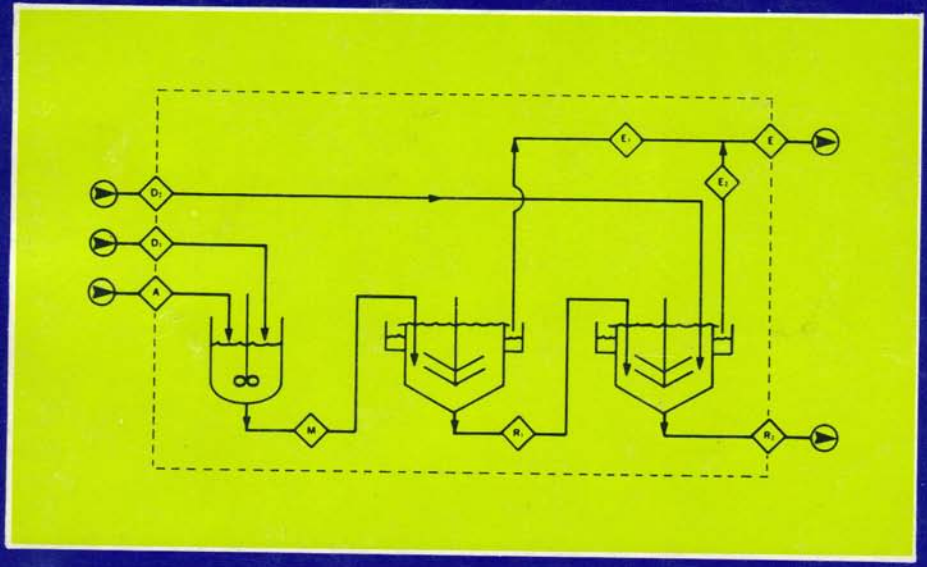
PROBLEMAS DE BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA

Antonio Valiente Barderas
Rudi Primo Tlacatzin Stivalet



UNIVERSIDAD

PROBLEMAS DE BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA

PROBLEMAS DE BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA

ANTONIO VALIENTE
RUDI PRIMO TLACATZIN STIVALET

Profesores de la Facultad de Química,
Universidad Nacional Atónoma de México

Alhambra Mexicana

PRIMERA EDICIÓN, 1991

© EDITORIAL ALHAMBRA MEXICANA, S.A. DE C.V
Amores 2027
03100 México, D.F.

CNIEM 1031

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni
parte de esta publicación pueden reproducirse,
registrarse o transmitirse, por un sistema de recuperación
de información, en ninguna forma ni por ningún medio,
sea electrónico, mecánico, fotoquímico, magnético
o electroóptico, por fotocopia, grabación o cualquier otro,
sin permiso previo por escrito del editor.
El préstamo, alquiler o cualquier otra forma de cesión
de uso de este ejemplar requerirá también la autorización
del editor o de sus representantes.

ISBN 968 444 109 6

Composición tipográfica, formación y cubierta: Fotodiseño, S.A. de C.V.

Impreso en México — Printed in Mexico

a Silvia q.e.p.d.

PRÓLOGO

De acuerdo con la opinión de la mayoría de los químicos, ingenieros e ingenieros en alimentos, el conocimiento más directamente relacionado con la práctica profesional es el de la estequiometría o los balances de materia y energía.

Estos conocimientos se imparten durante los primeros semestres de las carreras en las profesiones antes mencionadas y en las relacionadas con ellas pues son los pilares sobre los que se asientan los demás conocimientos que deberán adquirir.

Hay bastantes obras dedicadas a la enseñanza de los balances de materia y energía; sin embargo en ellas es notable la ausencia de una adecuada metodología para la resolución de los problemas, pues en la mayor parte de los textos ésta parece estar basada en la intuición al ser presentada sin orden o sin una secuencia que lleve gradualmente a los resultados. Esta obra es el resultado de la experiencia acumulada durante 10 años de impartir las cátedras de balances de materia y de energía o de estequiometría, utilizando como base los libros Problemas de Balances de Materia y Problemas de Balances de Energía *publicados anteriormente por Editorial Alhambra.*

Durante ese tiempo nos dimos cuenta que la mejor forma de impartir esos conocimientos es mediante la presentación simultánea de los balances de materia y de energía, en vez de hacerlo en una forma fracturada, es decir; presentando primero los balances de materia y luego los de energía.

El método presentado en esta obra es integrador de los conocimientos. Por otro lado, seguimos utilizando la metodología ariginal de las obras anteriores para la resolución de problemas, la cual consta de cuatro etapas: traducción, planteamiento, cálculo y presentación de resultado. Esta metodología ha probado ser muy adecuada para la resolución de problemas y ha sido utilizada ampliamente por los autores y muchos profesores, tanto en los cursos de balances como en otros relacionados con la enseñanza de las profesiones de las áreas química y física.

La obra está pensada como el complemento de una clase teórica; es por ello que solamente se plantea la teoría necesaria para la resolución de los problemas presentados y contiene gran número de apéndices y tablas que lo hacen autosuficiente y muy útil tanto para estudiantes como para los profesionales de la ingeniería y de la química.

La obra contiene una gran cantidad de problemas resueltos, así como también de problemas propuestos con sus respuestas. El sistema de unidades preferentemente utilizado es el MKS de ingeniería, pero se utiliza también el sistema SI y el inglés para familiarizar al estudiante con todos los sistemas empleados en la práctica profesional.

En esta nueva obra hemos querido verter toda nuestra experiencia acumulada, así como los consejos que nos hicieron llegar los catedráticos, estudiantes y profesionales que en numerosas universidades y tecnológicos de México, Latinoamérica, España y los E.U.A. utilizaron nuestras obras. A todos ellos nuestra gratitud y el deseo de que esta nueva edición sea de su agrado.

Los autores
octubre 1990

CONTENIDO

1 Introducción 1
Objetivos 3
Ingeniería química 3
Campo de la ingeniería química 3
Balances de materia y energía 7
Diagramas de flujo 7
Diagramas de bloque 8
Diagramas con equipos 8
Simbología utilizada 9
Diagramas de instrumentación 20
Combinación de equipos para formar procesos 21
Nomenclatura 22
Combinación de los diagramas de equipo y nomenclatura 24
Operaciones unitarias 25
Procesos unitarios 25
Resolución de problemas 26
Problemas resueltos 28
Problemas propuestos 37

2 Variables 47
Objetivos 49
Unidades y sistemas 49
Conversión de unidades 51
Congruencia de una relación matemática 51
Variables relacionadas con la materia 52
Transformación de la energía 65
Transmisión de la energía 66
Ley de la conservación de la energía 66
Procesos 67
Problemas resueltos 69
Problemas propuestos 95

3 Balances de materia y energía, generalidades 105
Objetivos 107
Breve resumen teórico 107
Balances simples de masa 109
Mezclado 109
Separación 110

Contacto a contracorriente 110
Contacto en paralelo 111
Balances con recirculación 111
Balances con derivación 112
Balances usando el equilibrio físico 113
Balances con reacción química 114
La ecuación química; estequiometría 114
Balances en régimen no permanente 117
Balances de energía 117
Problemas resueltos 119
Problemas propuestos 156

4 Balances de materia y energía en equipos para transferir calor 163
Objetivos 165
Breve introducción teórica 165
Equipos utilizados 165
Balances de energía 166
Vapor de agua 172
Problemas resueltos 174
Problemas propuestos 191

5 Balances de materia y energía en mezclado y evaporación 197
Objetivos 199
Flujo de fluidos 199
Equipos en uso 199
Mezclado 201
Equipos empleados 201
Balances de masas en flujos de fluidos 202
Balances de masa en mezclado 203
Balances de energía en mezclado 204
Regla de la palanca 207
Diagramas triangulares 208
Gases y mezcla de gases 211
Evaporación 215
Balances en un evaporador 216
Problemas resueltos 219
Problemas propuestos 268

6 Balances en las operaciones unitarias de extracción líquido-líquido, lixiviación y cristalización 277
Objetivos 279
Extracción sólido-líquido 279
Equipos utilizados 279
Balances de materia 282
Extracción líquido-líquido 287
Equilibrio 287
Equipos 289
Balances de materia 290

Cristalización 292
Aparatos 292
Equilibrio 293
Balances de materia 294
Problemas resueltos 295
Problemas propuestas 331

7 Balances de materia y energía en la operación unitaria de destilación 340
Objetivos 343
Breve introducción teórica 343
Temperatura de ebullición de soluciones líquidas ideales 346
Equilibrio vapor-líquido 346
Diagramas de equilibrio para mezclas binarias ideales 353
Diagramas de entalpía-concentración 354
Balances en rectificadores 356
Problemas resueltos 357
Problemas propuestos 399

8 Balances en operaciones aire-agua 411
Objetivos 413
Equilibrio entre un líquido y un gas insoluble en el líquido 413
Acondicionamiento de aire 419
Secado 420
Enfriamiento de agua 421
Problemas resueltos 422
Problemas propuestos 468

9 Balances de balances de materia y energía en reacciones químicas 479
Objetivos 481
Reacciones químicas 481
Clasificación de reacciones 481
Reactivo limitante 482
Rendimiento 482
Reactivo en exceso 482
Reactores 483
Balances 483
La reacción química y la energía 484
Calor estandar de reacción 486
Calores de formación 486
Calores de combustión 487
Calores de reacción a una temperatura diferente de la estandar 488
Reacciones adiabáticas 489
Calores de reacción a volumen constante 491
Poder calorífico de aceites combustibles, carbones y madera 492
Problemas resueltos 493
Problemas propuestos 552

Apéndices 565
Apéndice I: Conversiones más comunes 567
Apéndice II: Pesos atómicos internacionales (1961) 570
Apéndice III: Propiedades críticas 571
Apéndice IV: Constantes de Van der Waals 572
Apéndice V: 573
Apéndice VI: Propiedades de algunos compuestos orgánicos 574
Apéndice VII: Punto de fusión, calor latente de fusión, punto de ebullición y calor latente de vaporización de algunas sustancias 575
Apéndice VIII: Presión de vapor del agua en mm de Hg 576
Apéndice IX: Capacidad calorífica a presión constante de algunos gases 577
Apéndice X: Calores específicos promedio de algunos gases en función de la temperatura 578
Apéndice XI: Capacidad calorífica molar promedio a presión constante de algunos gases orgánicos 579
Apéndice XII: Capacidades caloríficas de disoluciones acuosas a 20°C 580
Apéndice XIII: Capacidad calorífica de algunos compuestos y elementos sólidos . 581
Apéndice XIV: Calores específicos de gases y vapores 582
Apéndice XV: Calores latentes de vaporización 584
Apéndice XVI: Calores específicos de líquidos 586
Apéndice XVII: Entalpías del vapor de agua saturado 588
Apéndice XVIII: Entalpías del vapor sobre calentado Kcal/kg 589
Apéndice XIX: Diagrama de Mollier para el agua 590
Apéndice XX: Calores integrales de disolución a 25°C 591
Apéndice XXI: Calores integrales de disolución a 25°C 592
Apéndice XXII: Capacidad calorífica de las disoluciones de ácido sulfúrico 593
Apéndice XXIII: Calores de disolución del ácido sulfúrico 594
Apéndice XXIV: Diagrama entalpía-concentración para las disoluciones acuosas de ácido clorhídrico 595
Apéndice XXV: Diagrama entalpía-concentración para las disoluciones acuosas de ácido sulfúrico a una atmósfera 596
Apéndice XXVI: Diagrama entalpía-concentración para las disoluciones de hidróxido sódico 597
Apéndice XXVII: Constantes de Antoine 598
Apéndice XXVIII: Diagrama de presión de vapor de Cox 599
Apéndice XXIX: Diagrama de Dühring para las disoluciones de NaCl 600
Apéndice XXX: Diagrama de Dühring para las disoluciones de NaOH 601
Apéndice XXXI: Diagrama de Dühring para las disoluciones de H_2SO_4 602
Apéndice XXXII: Constantes de equilibrio 603
Apéndice XXXIII: Diagrama psicrométrico 604
Apéndice XXXIV: Carta psicrométrica a 586 mm Hg 605
Apéndice XXXV: 606
Apéndice XXXVI: Entalpías de formación de algunos compuestos a 25°C 607
Apéndice XXXVII: Calores de combustión 611
Apéndice XXXVIII: Densidad del agua 613
Apéndice XXXIX: Densidades de líquidos en función de la temperatura. Valores de (X, Y) 614

Nomenclatura usada en esta obra 617
Para indicar propiedades de la materia 619
Para indicar flujos 620
Para indicar concentraciones 620
En balances de energía 621
Uso de la nomenclatura en relación con la simbología 622
Operaciones con la nomenclatura usada 623
Bibliografía 624

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

OBJETIVOS

Al finalizar la lectura de este capítulo, el lector: **a)** Conocerá los distintos diagramas de flujo y la simbología usada en ingeniería química. **b)** Será capaz de aplicar los símbolos a los procesos químicos. **c)** Será capaz de interpretar los procesos presentados en un diagrama de flujo de ingeniería química.

INGENIERIA QUIMICA

La ingeniería química es la rama de la Ingeniería que estudia las transformaciones físicas y químicas a que se someten las materias primas para obtener productos y servicios útiles al hombre; estudia también la forma en que se pueden elaborar esas transformaciones mediante un proceso de transformación eficiente, así como el diseño y la especificación de los equipos y aparatos con los cuales pueden llevarse a cabo esas transformaciones, y la mejor manera de manejarlos y controlarlos.

Para esto, la ingeniería química se basa en los conocimientos que aportan la Física, la Química, las Matemáticas y en especial la Fisicoquímica. La toma de decisiones, sin embargo, requiere además la utilización de conocimientos humanísticos, de gerencia, economía y administración, para que la realización de estudios previos de factibilidad económica conduzcan a la consecución de soluciones óptimas no sólo desde el punto de vista técnico, sino también socioeconómico.

CAMPO DE LA INGENIERIA QUIMICA

Durante la planeación de un proceso de manufactura el ingeniero químico, junto con otros ingenieros y cientificos, debe: definir los problemas, determinar el objetivo, considerar las limitaciones de tiempo, materiales y costo, y en consecuencia, diseñar y desarrollar la planta de proceso.

Una vez instalado el equipo de proceso, el ingeniero químico permanece con frecuencia en la planta para supervisar y administrar la operación, así

como para asegurar el control de calidad y el mantenimiento de la producción. Otros ingenieros químicos se ocupan de futuros aumentos en capacidad y la incorporación a la planta de nuevos equipos y procesos.

Debido a su preparación, los ingenieros químicos resultan de mucho valor en el mercado de la venta de equipo, plantas y productos terminados.

A continuación reproducimos, para completar lo antes expuesto, las atribuciones profesionales del ingeniero químico que fueron aprobadas en el IV Congreso Interamericano de Ingeniería Química, realizado en Buenos Aires en 1969 y que son las siguientes:

1. Investigación en el dominio de las ciencias de la ingeniería química y de sus tecnologías de aplicación.

2. Diseño, cálculo y montaje de equipo e instalaciones para las industrias de proceso.

3. Manejo y control de la producción en plantas e industrias de proceso.

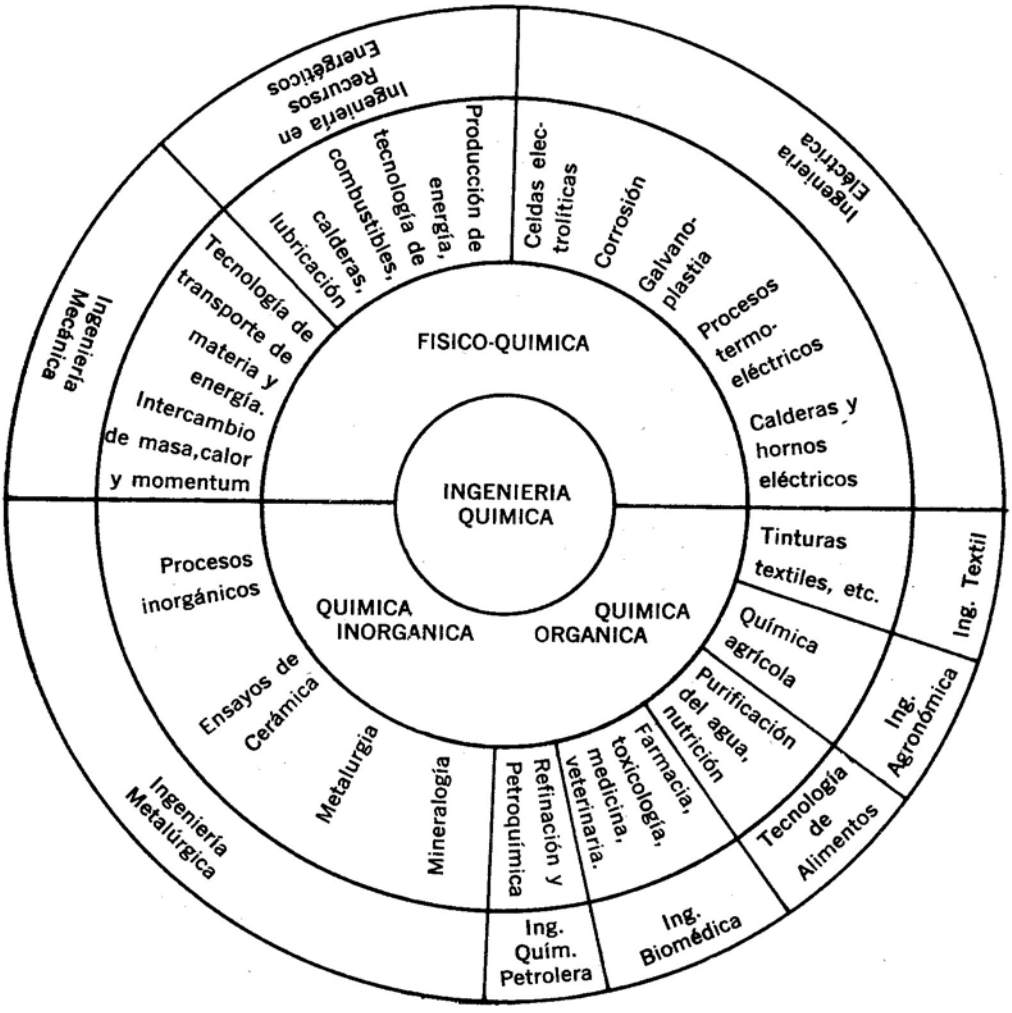
4. Asesoramiento técnico en la venta de equipos para las industrias de proceso y de productos para las mismas.

5. Administración de empresas en la industria de proceso.

6. Planificación y desarrollo de las industrias de proceso.

7. Enseñanza de las ciencias de la ingeniería química y de sus tecnologías de aplicación.

Relación que guarda la ingeniería química con otras ingenierías.



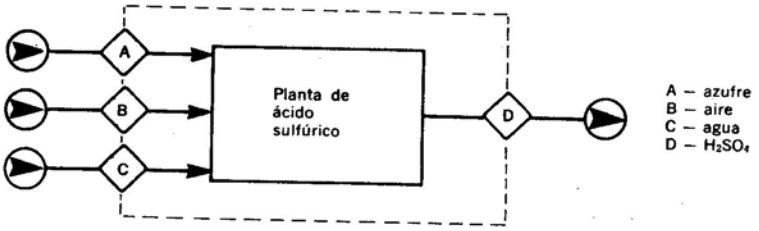
Fuente: E. Martínez Sáenz y V. Mayagoitia. **Estudios de especialización y grado en ingeniería química.** CONACYT. México, 1976.

b) Diagramas con equipo.

c) Diagramas de instrumentación.

DIAGRAMAS DE BLOQUE

En ellos se presenta el proceso o las diferentes partes de un proceso por medio de cajas o rectángulos que tienen entradas y salidas. Sobre el rectángulo se suele poner la indicación de lo que representa el rectángulo, mientras que sobre las líneas que representan corrientes de entrada o salida se indica la naturaleza de estas corrientes (sustancia, flujo, temperatura, presión, concentración, etc.).



DIAGRAMAS CON EQUIPOS

En éstos se muestran las interrelaciones entre los equipos mayores por medio de líneas de unión. Para representar los equipos se usan símbolos que recuerdan el equipo o los equipos usados. Las propiedades físicas, las cantidades, temperatura y las presiones de los materiales son parte importante de estos diagramas. Estos valores se indican en tres formas: poniendo sobre cada línea los datos, identificando cada línea con un número que se refiere a una lista sobre el diagrama o mostrando todo en una hoja de tabulación. Estos dibujos se usan por las siguientes razones fundamentales:

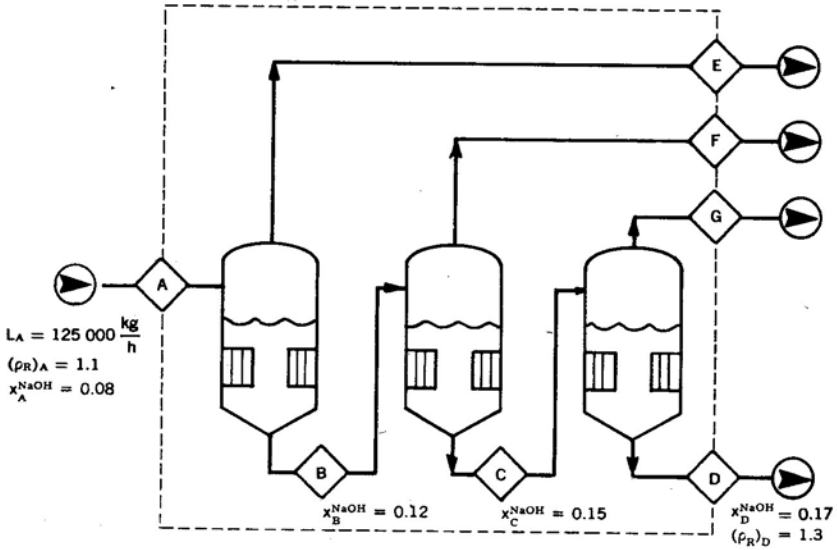
1) Ayudar en el diseño y en el acomodamiento de la planta.

2) Dar una idea clara del proceso o de una planta.

3) Ayudar en el dimensionamiento del equipo.

4) Servir como medio de enseñanza e instrucción del personal relacionado con el proceso o con el equipo.

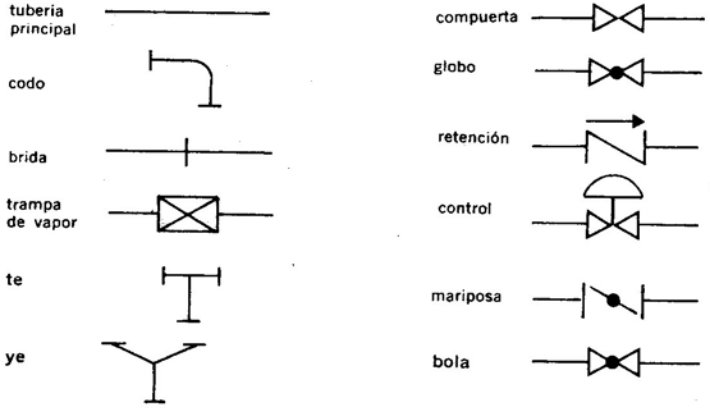
5) Ayudar a la resolución de los balances de materia y energía.



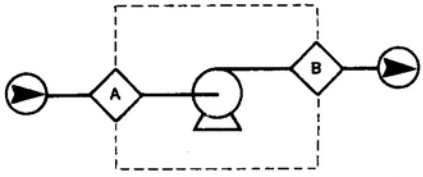
En el diagrama anterior se muestra una operación de evaporación de una solución de NaOH con objeto de concentrar el soluto. La evaporación se lleva a cabo en tres evaporadores conectados en serie. Al primer evaporador se introducen 125 000 kg/h de solución, con una densidad de 1.1 y una concentración de NaOH del 8% en peso. La **concentración final** de la **solución** será del 17% con una densidad de 1.3. Para efectuar esto se debe evaporar agua que sale de los equipos con las corrientes E, F y G.

SIMBOLOGIA UTILIZADA

VALVULAS Y CONEXIONES

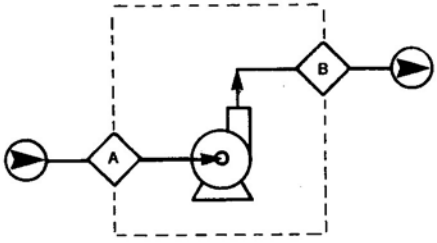


MANEJO DE FLUIDOS



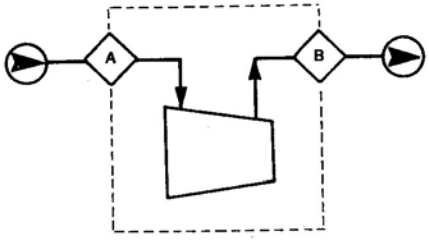
A — líquido a baja presión
B — líquido a alta presión

BOMBA CENTRIFUGA



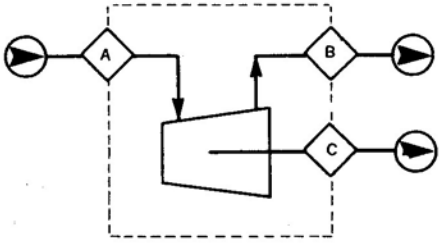
A — gas a baja presión
B — gas a mediana presión

SOPLADOR, O VENTILADOR



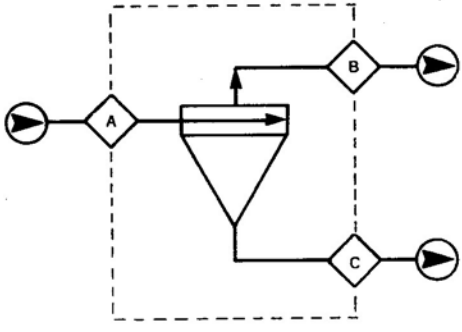
A — gas a baja presión
B — gas a alta presión

COMPRESOR



A — gas, o vapor, a alta presión
B — gas, o vapor, a baja presión
C — energía mecánica

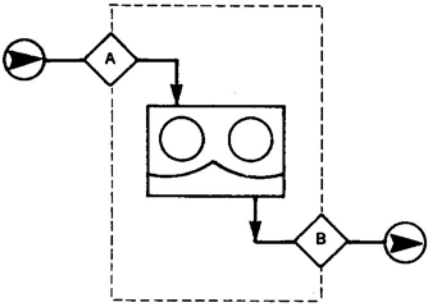
TURBINA



A — gas con polvos
B — gas limpio
C — polvos asentados

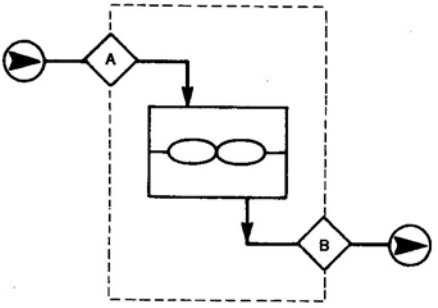
CICLON

MEZCLADORES



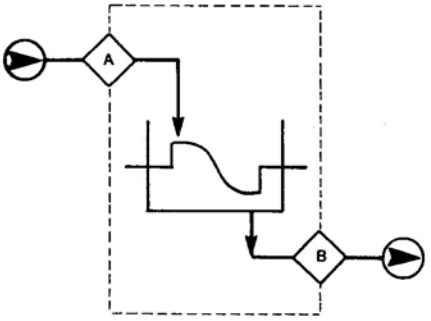
A — substancias
B — mezcla

MEZCLADOR DE RODILLOS



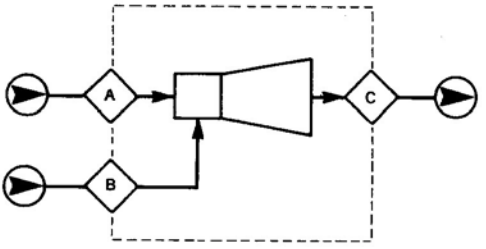
A — substancias
B — mezcla

MEZCLADOR DE BANDA



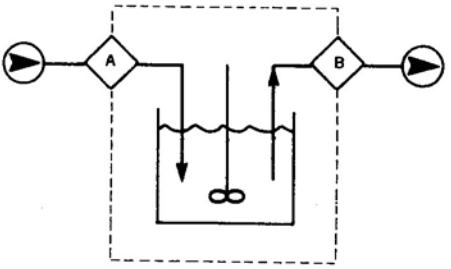
A — substancias
B — mezcla

MEZCLADOR DE HOJAS SIGMA



A — gas
B — gas
C — mezcla

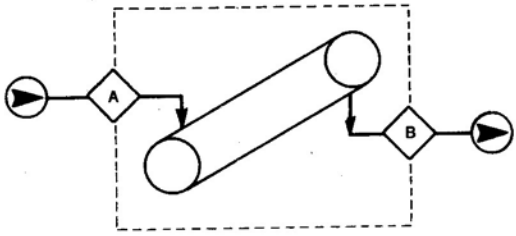
MEZCLADOR DE VENTURI



A — substancias
B — mezcla

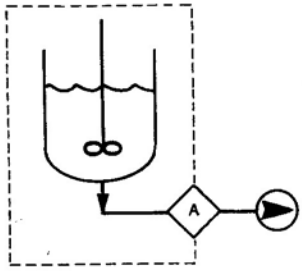
MEZCLADOR POR AGITACION

TRANSPORTADORES DE SOLIDOS Y ALMACENAJE DE SUSTANCIAS



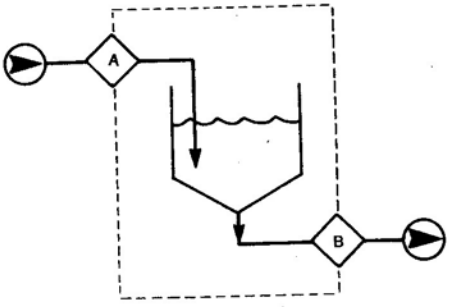
A — sólido entrante
B — sólido saliente

TRANSPORTADOR DE BANDA



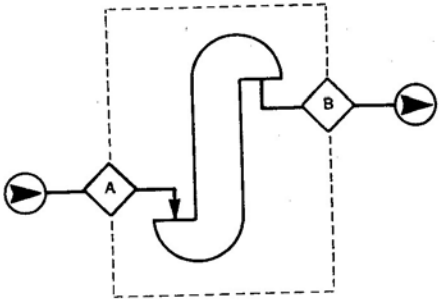
A — líquido saliente

TANQUE AGITADO



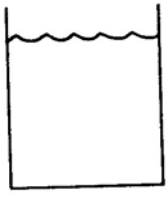
A — sólido entrante
B — sólido saliente

TANQUE DE FONDO CONICO

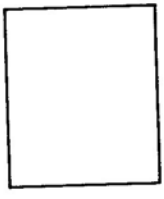


A — sólido entrante
B — sólido saliente

ELEVADOR DE CANGILONES



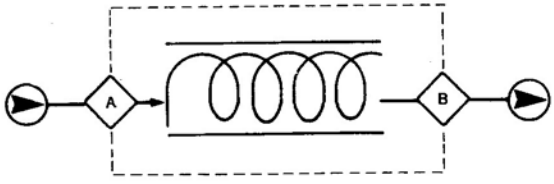
TANQUE ABIERTO



TANQUE CERRADO



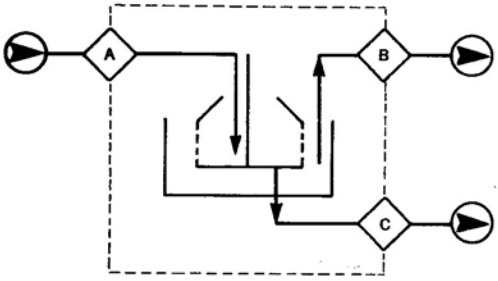
SOLIDOS APILADOS



A — sólido entrante
B — sólido saliente

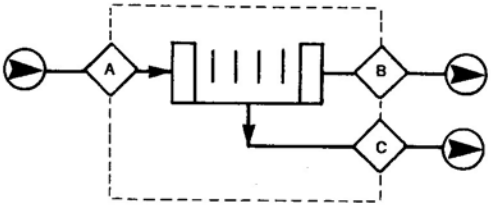
GUSANO

SEPARADORES MECANICOS



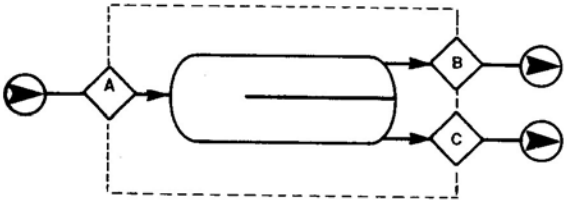
A — líquido con cristales en suspensión
B — líquido claro
C — cristales

CENTRIFUGA



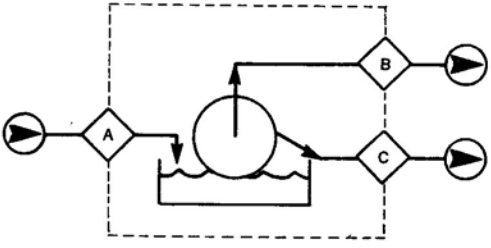
A — líquido con sólidos en suspensión
B — líquido claro
C — sólidos

FILTRO PRENSA



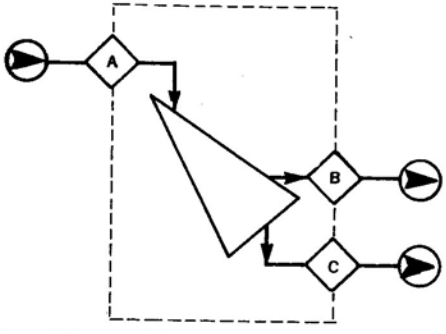
A — mezcla
B — líquido ligero
C — líquido pesado

DECANTADOR



A — lodos
B — líquido claro
C — sólidos

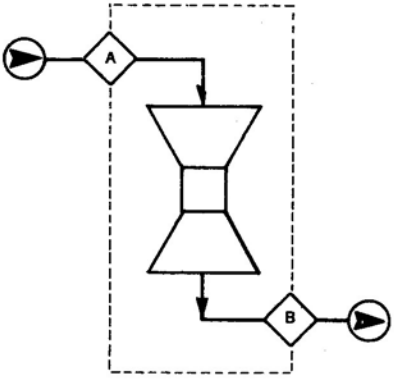
FILTRO ROTATORIO



A — sólidos mezclados
B — sólidos gruesos
C — sólidos finos

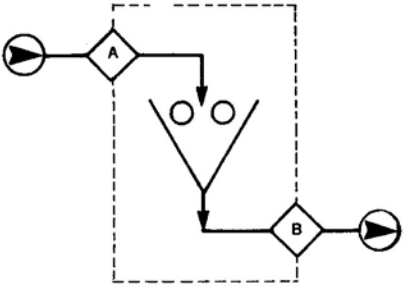
MALLA CLASIFICADORA

REDUCTORES DE TAMAÑO



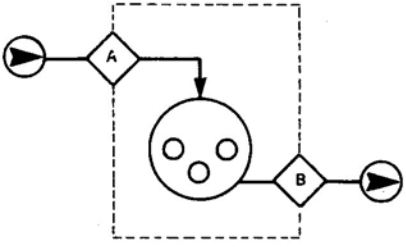
A — sólido grueso
B — sólido fino

TRITURADOR VERTICAL



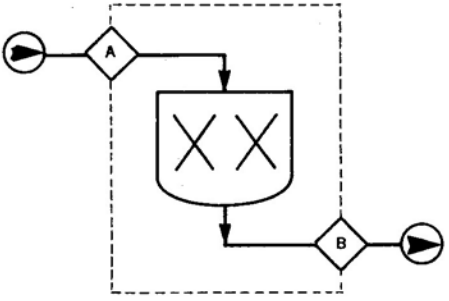
A — sólido grueso
B — sólido fino

TRITURADOR DE RODILLOS



A — sólido grueso
B — sólido fino

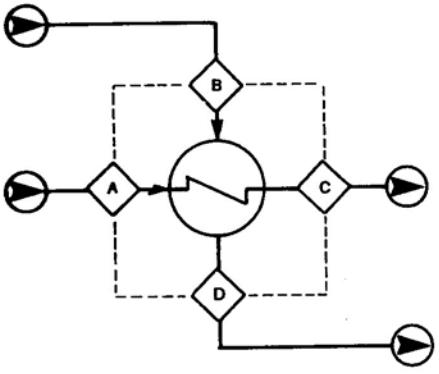
MOLINO DE BOLAS



A — sólido grueso
B — sólido fino

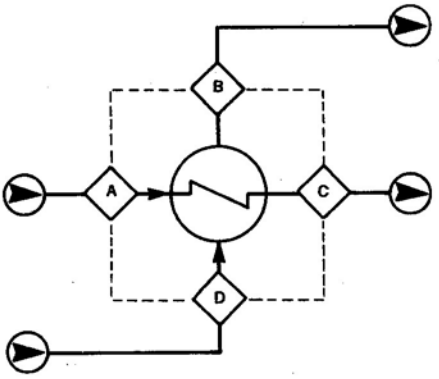
MOLINO DE ENGRANES

TRANSFERENCIA DE CALOR



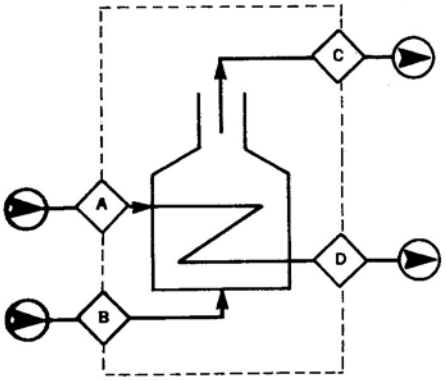
A — fluido frío
B — fluido caliente
C — fluido calentado
D — fluido enfriado

CAMBIADOR DE CALOR (CALENTADOR)



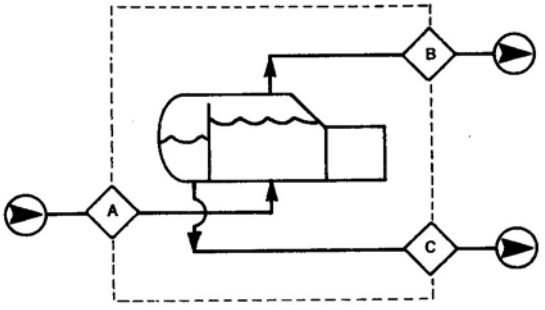
A — fluido caliente
B — fluido calentado
C — fluido enfriado
D — fluido frío

CAMBIADOR DE CALOR (ENFRIADOR)



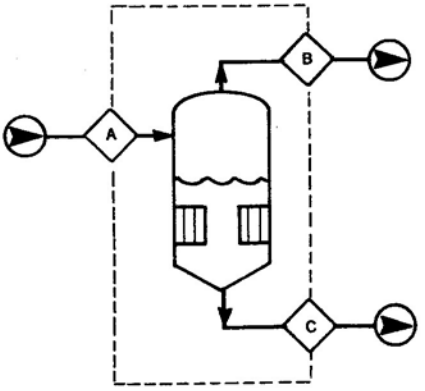
A — fluido frío
B — combustible
C — gases de combustión
D — fluido caliente

CALENTADOR A FUEGO DIRECTO



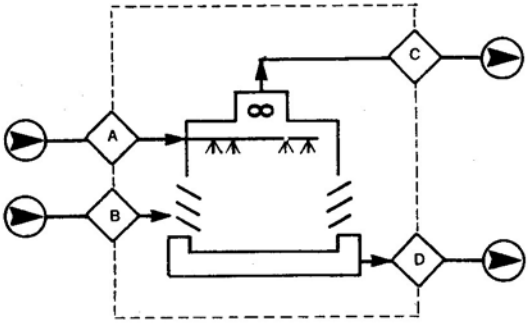
A — líquido entrante
B — vapores
C — productos del fondo

REHERVIDOR (CALDERIN)



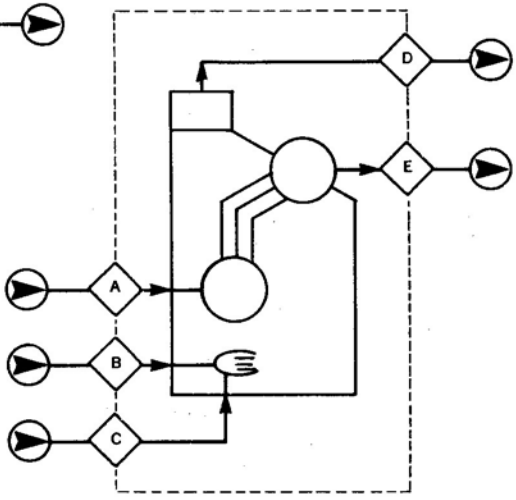
A — solución diluída
B — vapor
C — solución concentrada

EVAPORADOR



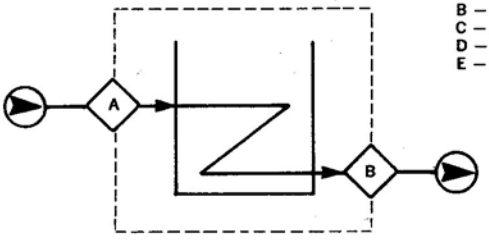
A — agua caliente
B — aire ambiente
C — aire caliente
D — agua fría

TORRE DE ENFRIAMIENTO DE AGUA



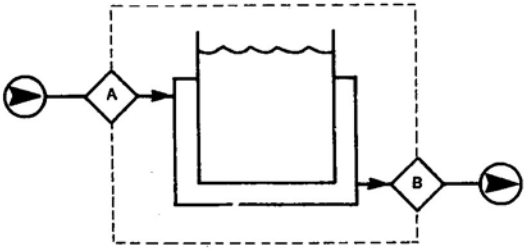
A — agua
B — combustible
C — aire
D — gases de combustión
E — vapor

CALDERA



A — medio calentante caliente
B — medio calentante frío

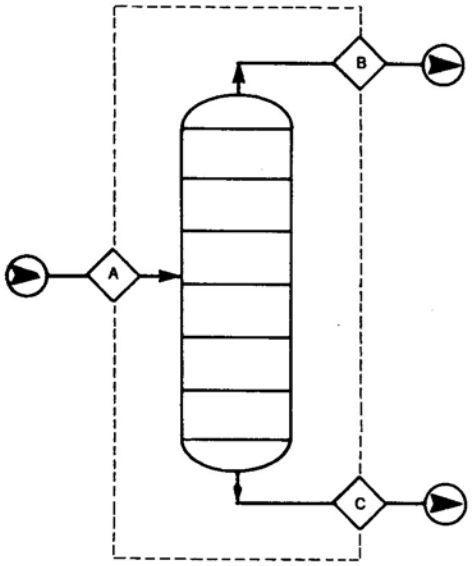
TANQUE CALENTADO CON SERPENTIN



A — medio calentante caliente
B — medio calentante frío

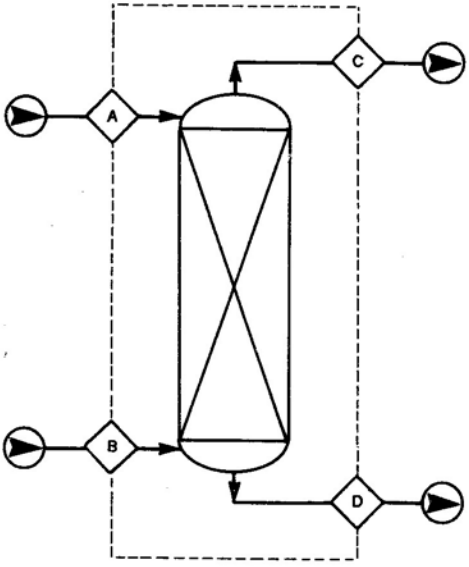
TANQUE CALENTADO CON CHAQUETA

TRANSFERENCIA DE MASA



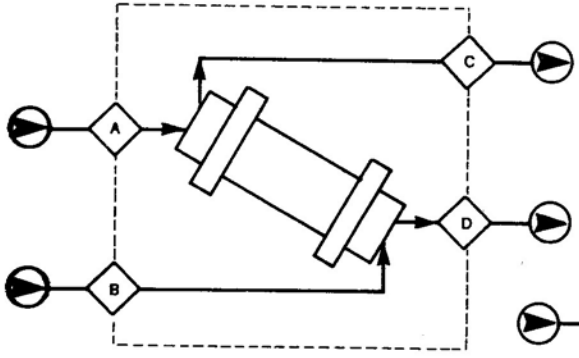
A — alimentación
B — producto del domo
C — producto de la base (o fondos)

TORRE DE PLATOS



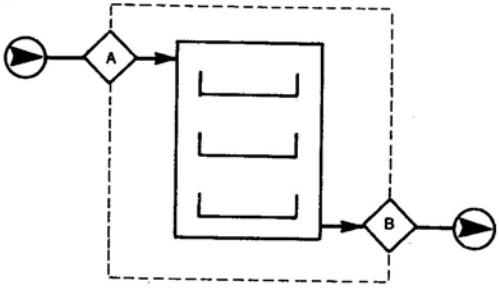
A — líquido entrante
B — gases entrantes
C — gases salientes
D — líquido saliente

COLUMNA EMPACADA



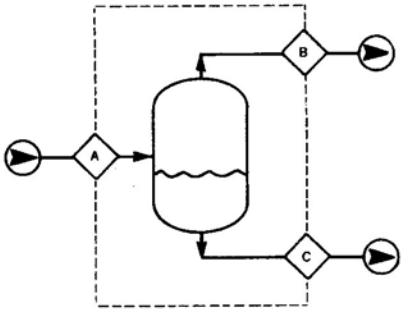
A — sólido húmedo
B — aire caliente
C — aire frío
D — sólido seco

SECADOR ROTATORIO (O CALCINADOR)



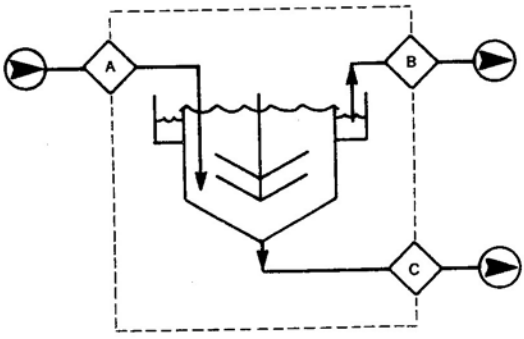
A — sólidos húmedos
B — sólidos secos

SECADOR DE CHAROLAS (BANDEJAS)



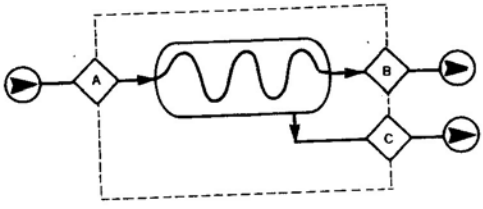
A — mezcla
B — vapores
C — líquido

TANQUE SEPARADOR VERTICAL



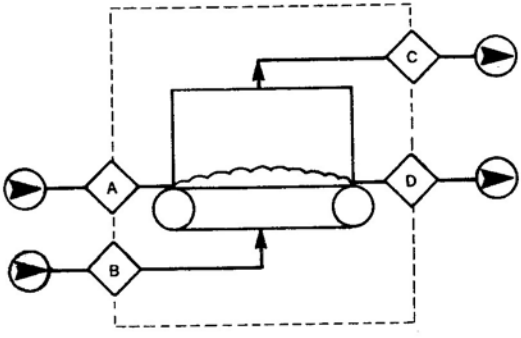
A — líquido con sólido en suspensión
B — líquido claro
C — lodos

ASENTADOR, SEDIMENTADOR, O ESPESADOR



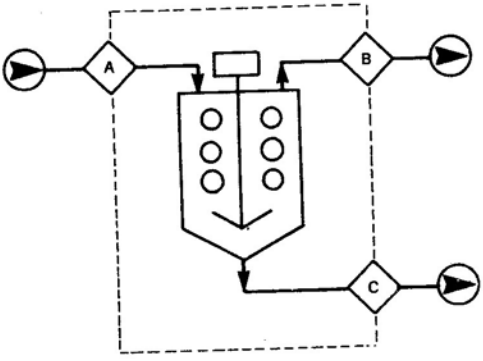
A — solución saturada
B — aguas madres
C — cristales

CRISTALIZADOR



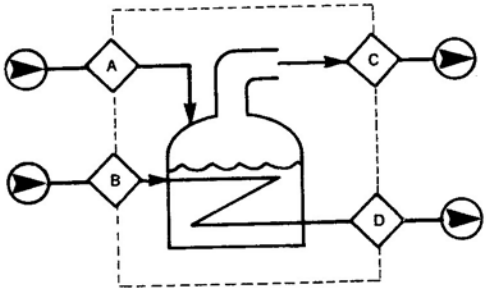
A — sólido húmedo
B — aire caliente
C — aire frío y saturado
D — sólido seco

SECADOR DE BANDA



A — solución saturada
B — aguas madres
C — cristales

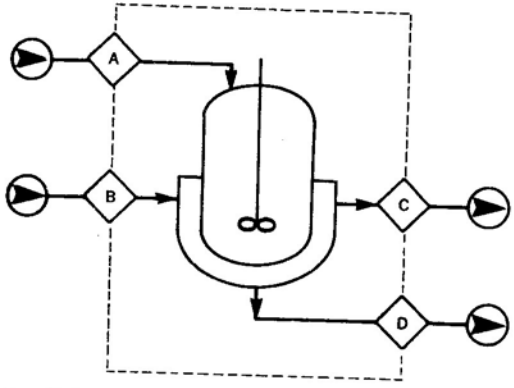
CRISTALIZADOR CON ENFRIAMIENTO



A — mezcla (carga)
B — vapor
C — destilado
D — condensado

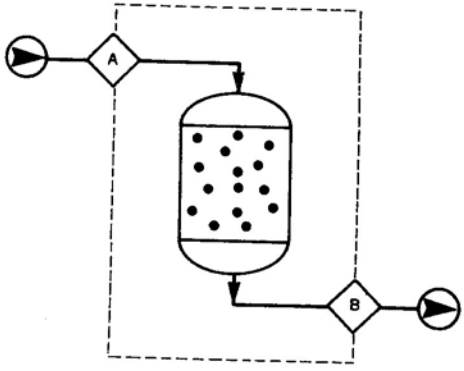
ALAMBIQUE

REACTORES



A — reactivos
B — medio calentante entrante
C — medio calentante saliente
D — productos

REACTOR AGITADO CON CHAQUETA
DE CALENTAMIENTO (O ENFRIAMIENTO)

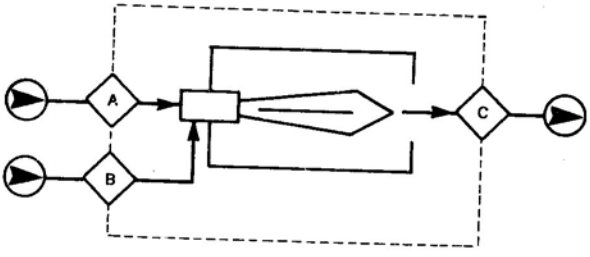


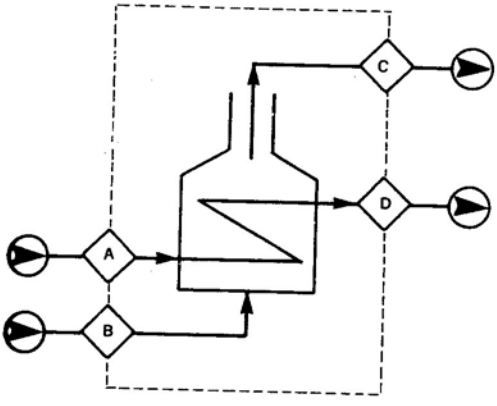
A — reactivos
B — productos

CAMARA CATALITICA

A — combustible
B — aire
C — gases de combustión

QUEMADOR DE ACEITE O GAS





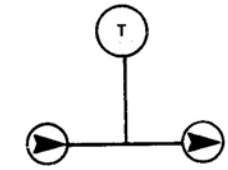
A — reactivos
B — combustible
C — gases de combustión
D — productos

REACTOR TUBULAR

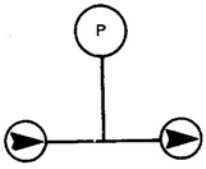
DIAGRAMAS DE INSTRUMENTACION

Son útiles para determinar los requerimientcs para el control y la instrumentación en una planta.

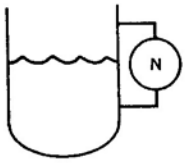
Los principales símbolos son:



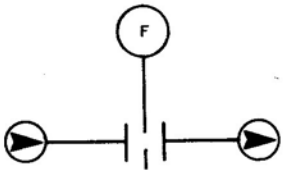
MEDIDOR DE TEMPERATURA



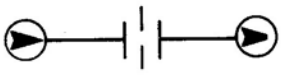
MEDIDOR DE PRESION



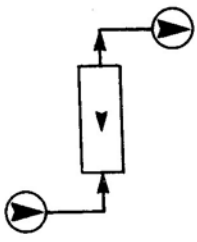
MEDIDOR DE NIVEL



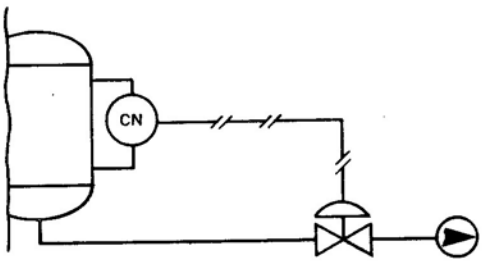
MEDIDOR DE FLUJO



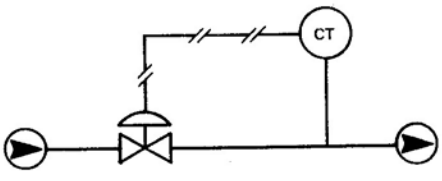
PLACA DE ORIFICIO



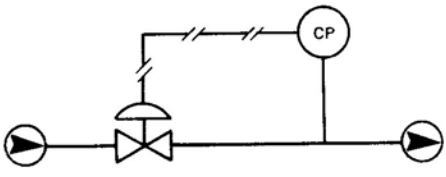
ROTAMETRO



CONTROLADOR DE NIVEL



CONTROLADOR DE TEMPERATURA

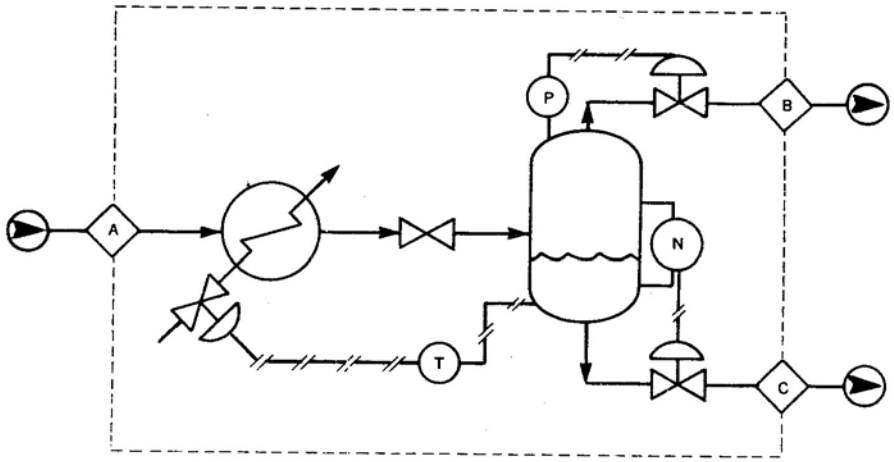


CONTROLADOR DE PRESION

Aplicación de diagramas de instrumentación.

En el siguiente diagrama se muestra un **proceso de "flasheo"**, que consiste en volatilizar parte de una mezcla líquida agregándole calor; la mezcla se debe mandar a un tanque separador, el cual presenta un área de flujo lo suficientemente grande como para que se separe la mezcla de líquido y vapor.

Los productos, vapor y líquidos, que se extraen del tanque están en equilibrio, o sea, se encuentran a la misma presión y temperatura. La temperatura del tambor se mantiene constante por una válvula que controla el flujo de vapores salientes del tanque; el flujo de líquido se controla con una válvula controladora de nivel.



A — alimentación líquida
B — producto vapor
C — producto líquido

COMBINACION DE EQUIPOS PARA FORMAR PROCESOS

Los símbolos anteriores se pueden combinar y de esa manera representar procesos químicos, por ejemplo: en la manufactura de mononitrotolueno se emplean como materias primas el ácido nítrico, el ácido sulfúrico y el tolueno. Los ácidos se bombean hasta un mezclador vénturi en donde se introduce también el ácido proveniente del nitrador. La mezcla de ácidos se introduce al nitrador en donde se alimenta el tolueno. El nitrador es un tanque cerrado, enfriado por serpentín y agitado. Se usa la palabra agua en el serpentín para indicar que es el medio enfriante. La mezcla fluye por gravedad hasta un segundo nitrador y luego a un decantador.

Parte del ácido obtenido en el decantador se recircula y el resto se manda a una planta de concentración que no se muestra en el diagrama. Los mononitrotoluenos están contaminados con ácido, por lo que se lavan en 3 etapas: con agua, con solución de carbonato de sodio y con agua. Los lavados se decantan por medio de tanques decantadores, aprovechando la diferencia de densidades entre el mononitrotolueno y el agua.

Los mononitrotoluenos se almacenan en un tanque y de allí se llevan a una columna de platos que opera a régimen no permanente. La primera porción de destilados o cabezas se quitan, pues allí se encuentran las parafinas; la siguiente fracción, que es una mezcla de orto, meta y para mononitrotolueno, se recolecta en tanques. La operación intermitente de la columna de platos se muestra por medio de dos tanques y dos válvulas colocadas en la línea de alambique al condensador. Los tres isómeros se mandan desde el tanque almacenador a una columna de destilación continua del tipo empacada. Del fondo de esta columna se extrae una mezcla de **meta** y **para** nitrotolueno y por el domo se extrae el **orto.**

La mezcla de **meta** y **para** tolueno se enfría, se manda a un cristalizador y se separa con una centrífuga. (Ver página 23).

NOMENCLATURA

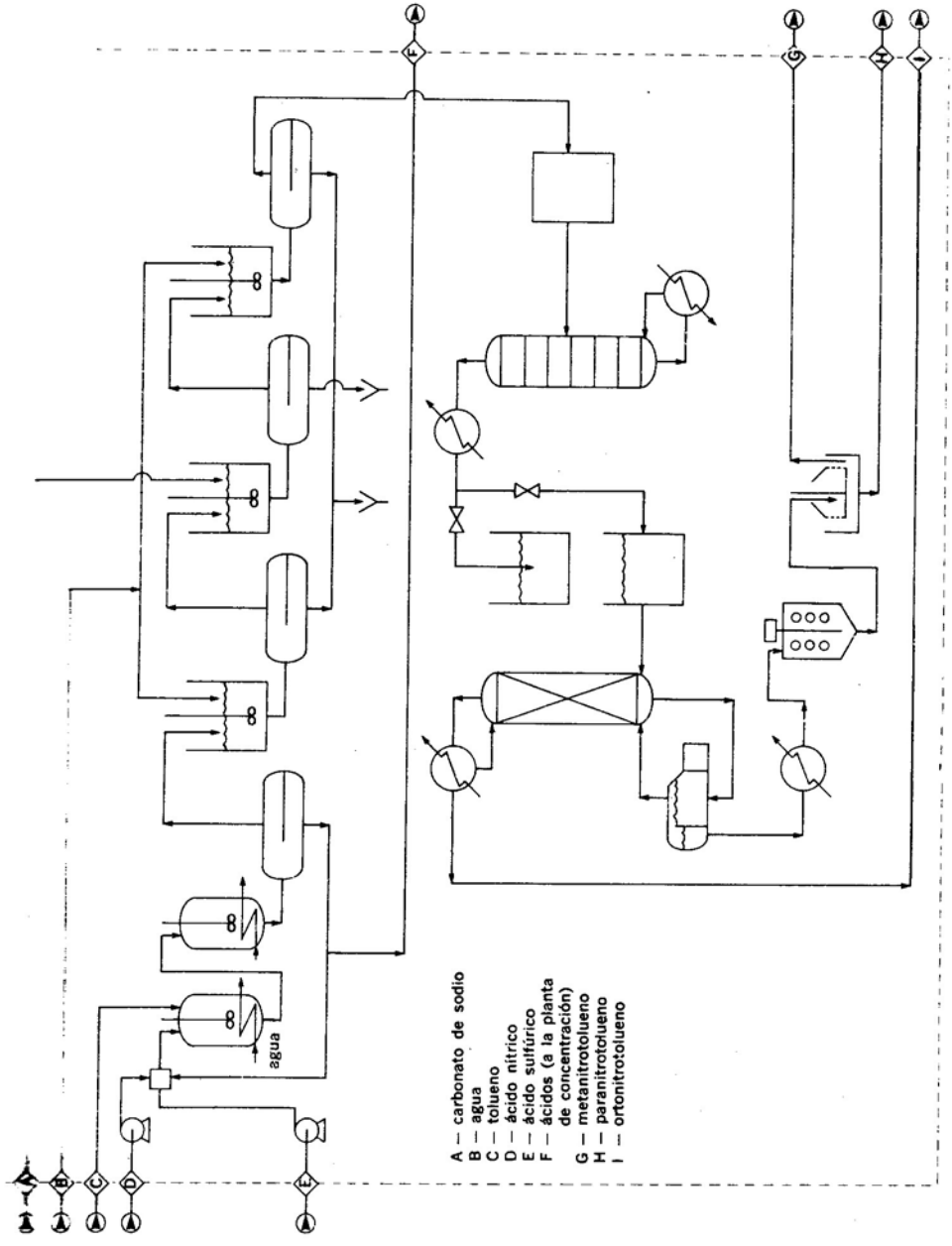
Las propiedades serán designadas por medio de letras latinas o griegas. En ocasiones se usará la misma letra para designar diferentes propiedades volumétricas, una flechita sobre la letra cuando se quiera indicar la idea de fuerza y una tilde para cantidades molares:

$\underset{\rightarrow}{L}$ flujo másico de líquido
$\widetilde{L}$ flujo molar de líquido
Ca flujo volumétrico de líquido = Caudal
ρ densidad absoluta
Pe peso específico
$\underset{\rightarrow}{H}$ entalpia
$\widetilde{H}$ entalpia molar

La nomenclatura para designar a las diferentes propiedades se irán dando en los capítulos siguientes.

Nomenclatura para corrientes y componentes en las corrientes.

Las corrientes se identificarán con una letra mayúscula o un número y se colocarán como subíndices de las propiedades o de los flujos. Las sus-


A — carbonato de sodio
B — agua
C — tolueno
D — ácido nítrico
E — ácido sulfúrico
F — ácidos (a la planta de concentración)
G — metanitrotolueno
H — paranitrotolueno
I — ortonitrotolueno
agua

tancias se identificarán con letra o con letras mayúsculas o con su símbolo químico y se colocarán como superíndices de las propiedades o flujos, tal y como sigue:

L_A = flujo másico de la corriente A líquida

$L_A^{H_2O}$ = flujo másico de agua en la corriente A

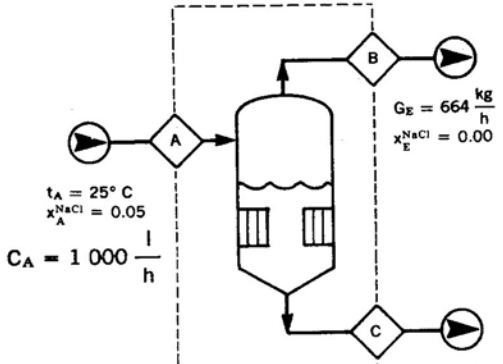
T_1 = temperatura de la corriente 1

$\tilde{y}_3^{aire}$ = concentración molar de aire en la corriente 3

En general,

L se referirá a flujos líquidos
G se referirá a flujos gaseosos
S se referirá a flujos de sólidos
M se referirá a flujos de mezclas
X se referirá a concentraciones en fase líquida
Y concentraciones en fase gaseosa
W concentraciones en fase sólida
Z concentraciones de mezclas
(véase capítulo II).

COMBINACION DE LOS DIAGRAMAS DE EQUIPO Y NOMENCLATURA

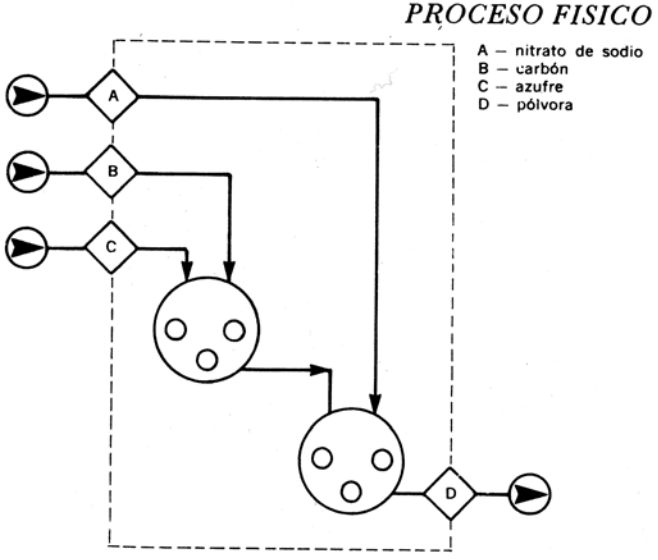


El diagrama anterior muestra que la corriente tiene un caudal de 1 000 l/h a 25 °C y con una concentración de sal del 5%. Esta corriente entra a un evaporador para concentrar la sal. Del evaporador sale una solución concentrada con el 15% de sal y a 80 °C, y 664 kg por hora de agua en forma gaseosa.

Tipos de procesos.

Los diagramas de flujo hasta aquí mencionados sirven tanto para representar procesos físicos como procesos químicos.

Muchos procesos utilizados en la industria química son en realidad procesos físicos (no hay reacciones químicas), pues sólo requieren de operaciones tales como molienda, evaporación, separación, cristalizaciones, etc.; sin embargo, son más comunes aquellos procesos que tienen tanto operaciones físicas como químicas.



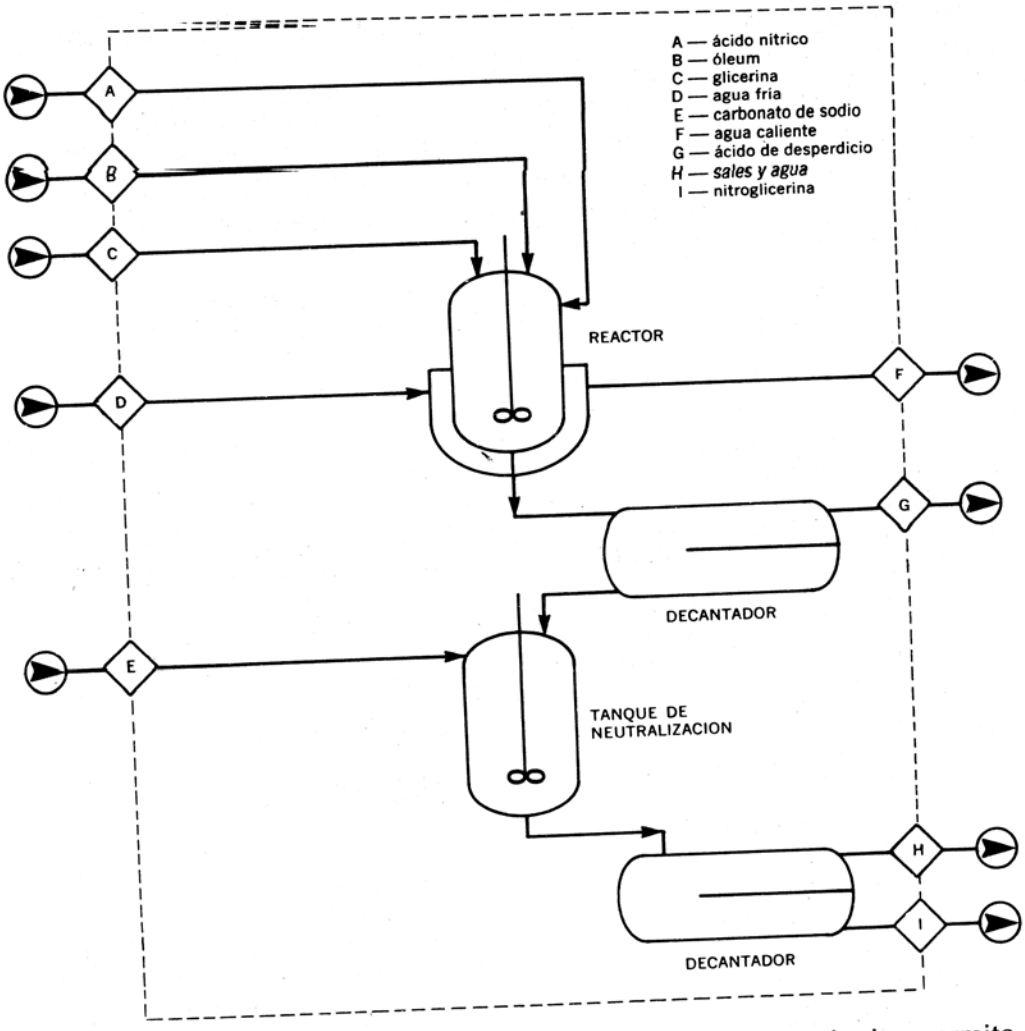
OPERACIONES UNITARIAS

Como se dijo con anterioridad, muchos procesos de la industria química consisten en procesos físicos, los cuales se pueden agrupar en una serie no muy grande de operaciones llamadas unitarias, entre las que se encuentran el secado, la evaporación, la filtración y la humidificación. Todas ellas tienen como característica el que los materiales no sufren cambios químicos, aunque sí físicos, tales como de estado, concentración, presión y temperatura.

PROCESOS UNITARIOS

Aquellos procesos que requieren de una o más operaciones con reacciones químicas se llaman procesos unitarios, por ejemplo, nitración, combustión, polimerización, etc.

PROCESO QUIMICO

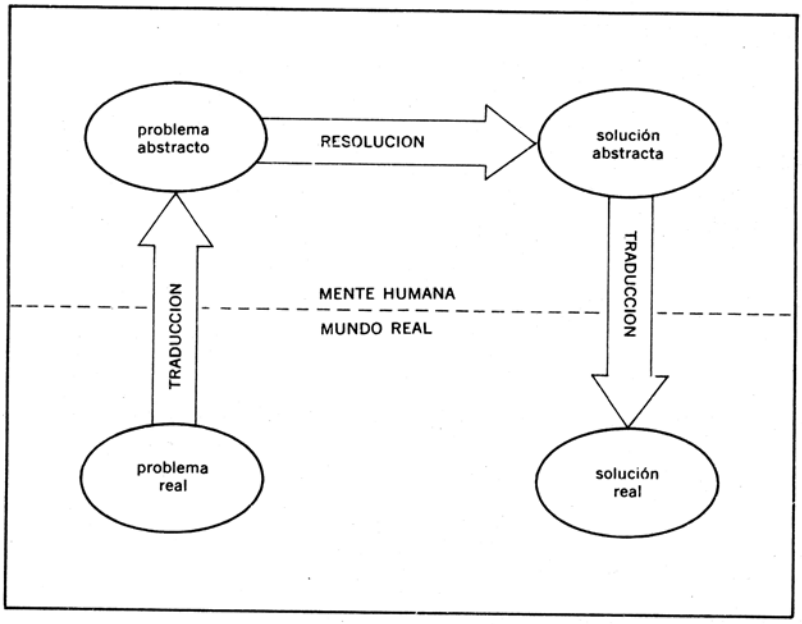


La combinación de procesos unitarios y operaciones unitarias permite la formación de cualquier planta química o proceso químico.

RESOLUCION DE PROBLEMAS

Los problemas con los que tiene que trabajar el ingeniero químico se presentan en el mundo real y se refieren casi siempre a las necesidades de producir más y mejores servicios o productos. Sin embargo, para resolver estos problemas debe trasladar los requerimientos del mundo exterior

al mundo de la mente y allí, con ayuda de las matemáticas, física y química o su combinación encontrar la respuesta que debe después traducirse nuevamente a términos usados en el mundo real (reactivos, productos, energía, equipo, etc.).



En la resolución de problemas se seguirá una secuencia similar. En primer término se tendrá un enunciado, que resume los requerimientos de algún problema real (en general, llegar al planteamiento de un enunciado en el que se indica claramente cuál es el problema que debe resolverse, es una tarea nada fácil cuando se trabaja en una planta o en un bufete de diseño).

Después del enunciado, la primera fase de la resolución será traducir el enunciado al lenguaje usado en ingeniería química, es decir, construir un diagrama de flujo, colocar los datos conocidos en las diferentes líneas de flujo y tratar de presentar en forma matemática la pregunta o preguntas que se esperan sean contestadas por medio de la resolución. Inmediatamente se procederá a la resolución usando los conocimientos matemáticos, físicos o químicos a nuestro alcance y planteando ecuaciones matemáticas que nos lleven a una solución. En esta fase se evitará el uso de números y se trabajará únicamente con ecuaciones algebraicas y diferenciales. Cuando ha sido posible plantear el resultado de esta manera, es fácil sustituir las variables algebraicas por los datos numéricos y así

obtener el resultado, el cual por último deberá traducirse al mundo real, o sea, presentarse en forma escrita indicando los resultados y requerimientos con palabras y números.

Secuencia en la resolución de problemas:

Enunciado del problema

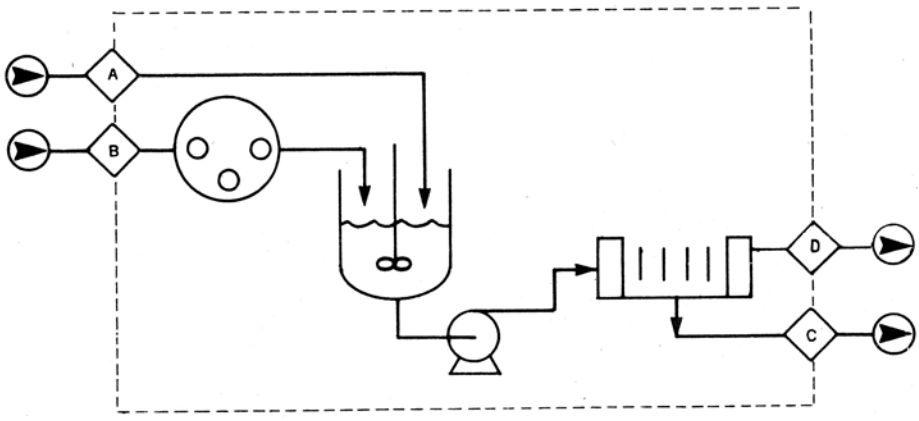
Resolución

1. Traducción
2. Planteamiento
3. Sustitución y cálculos
4. Resultados

PROBLEMAS RESUELTOS

Problema 1.1

¿Qué sucede con los materiales que se procesan en el siguiente diagrama?



En el proceso anterior, una substancia que debe ser sólida se introduce a un molino de bolas, para reducir de tamaño las partículas; luego se mete a un tanque en donde se disuelve algo con un líquido; de allí la solución se bombea a un filtro prensa de donde se separan los sólidos no disueltos de la solución.

Problema 1.2

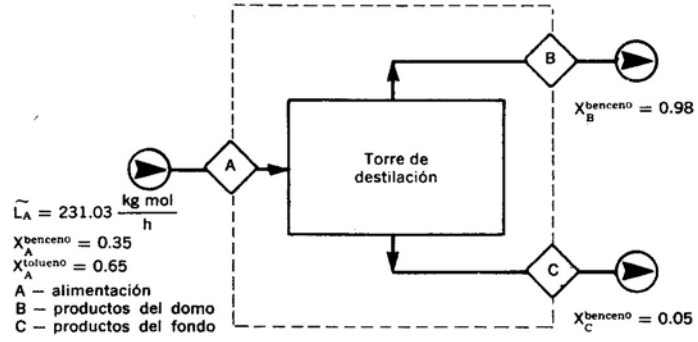
Se tiene una corriente de 231.03 kg mol/h de una mezcla de benceno y tolueno, con un análisis de 35% en peso de benceno y 65% en peso

de tolueno. Se desea someter esta corriente a fraccionamiento por destilación continua para obtener una recuperación del 98% de benceno en el producto del domo y una concentración del 95% de tolueno en el producto de la base de la torre. Todos los % en peso.

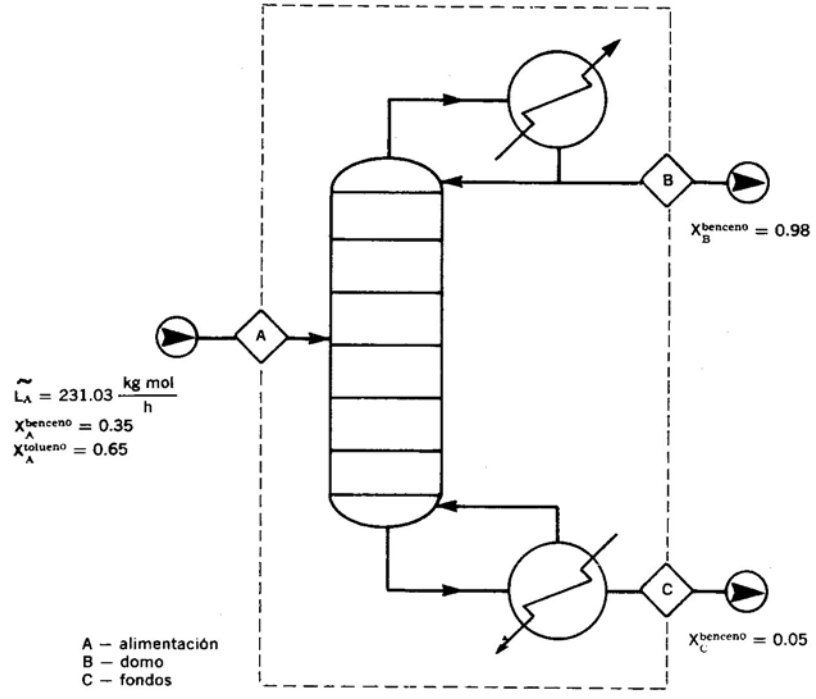
Exprese lo anterior por medio de un: **a)** diagrama de bloques, **b)** diagrama de equipo.

1. Traducción

1.a Diagrama de bloques



1.b Diagrama de equipos



Problema 1.3

Para la fabricación del ácido sulfúrico por medio del método de contacto se parte de la pirita FeS_2 que después se tritura y se somete a tostación:

$$4\ FeS_2 + 11\ O_2 \rightarrow 2\ Fe_2O_3 + 8\ SO_2$$

El SO_2 obtenido se pasa a un purificador, pues lleva arsénico y otros materiales que envenenan el catalizador disminuyendo su eficacia; a continuación pasa al reactor catalítico mezclado con aire, con lo que se oxida a SO_3.

$$2\ SO_2 + O_2 \rightarrow 2\ SO_3$$

El SO_3 producido se mete a una torre de absorción en donde se pone en contacto con H_2SO_4 diluido, con lo que se produce la siguiente reacción:

$$SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$$

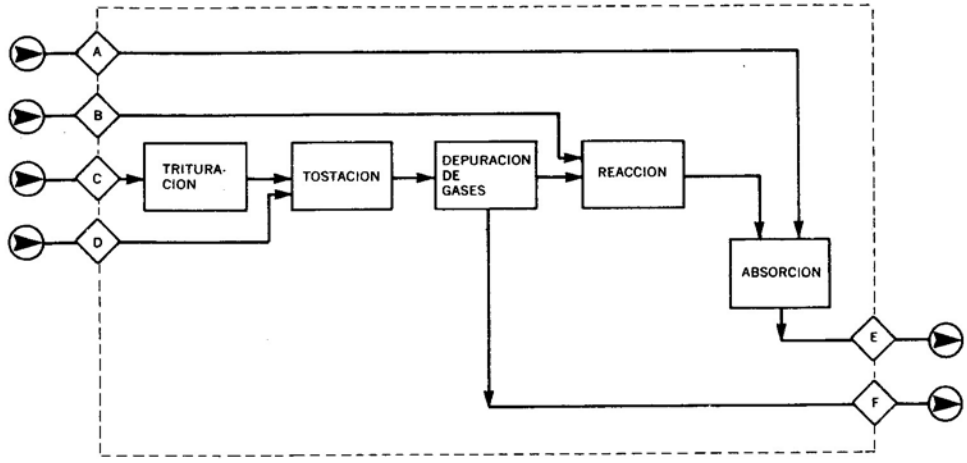
a) Haga un diagrama de bloques del proceso.

b) Indique las posibles operaciones unitarias empleadas y los procesos unitarios utilizados.

Solución.

1. Traducción

1.1 Diagrama de bloques



A — ácido sulfúrico diluido
B — aire
C — pirita
D — aire
E — ácido sulfúrico concentrado
F — polvos

2. Operaciones

Las operaciones unitarias pueden ser:

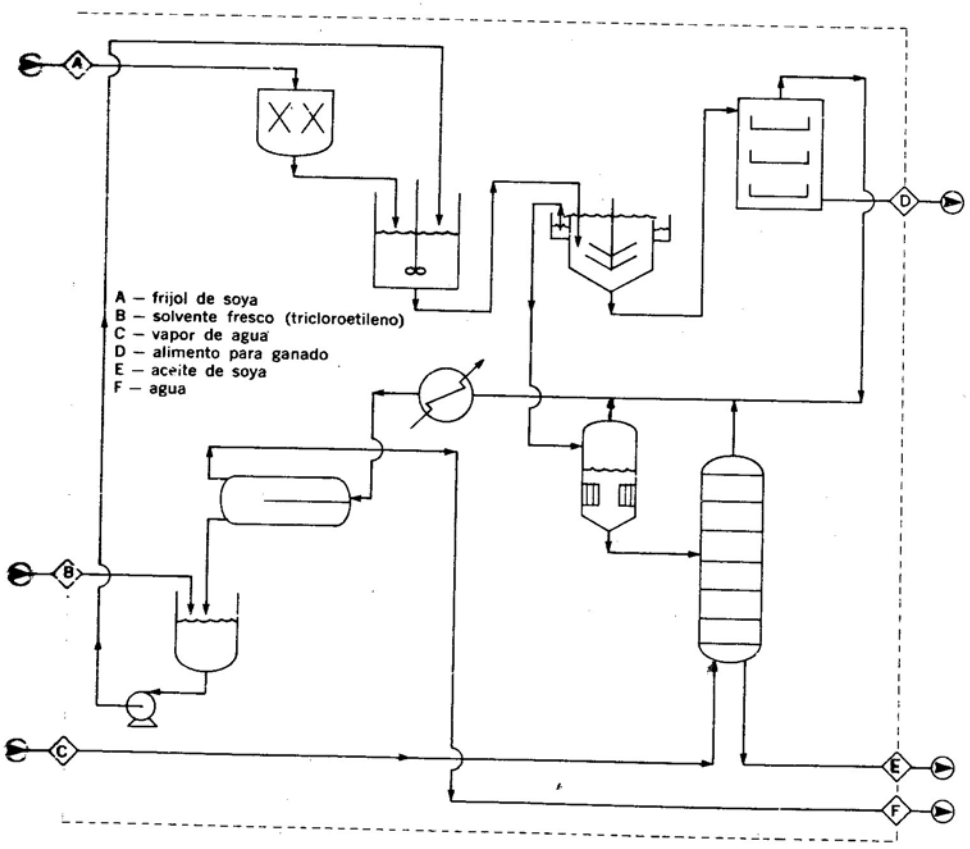
Trituración
Separación de polvos
Absorción.
Transferencia de calor (para aprovechar el calor de las reacciones)

2.1 Procesos

Oxidaciones
Absorción con reacción química

Problema 1.4

Haga una descripción del siguiente proceso:



1. Descripción

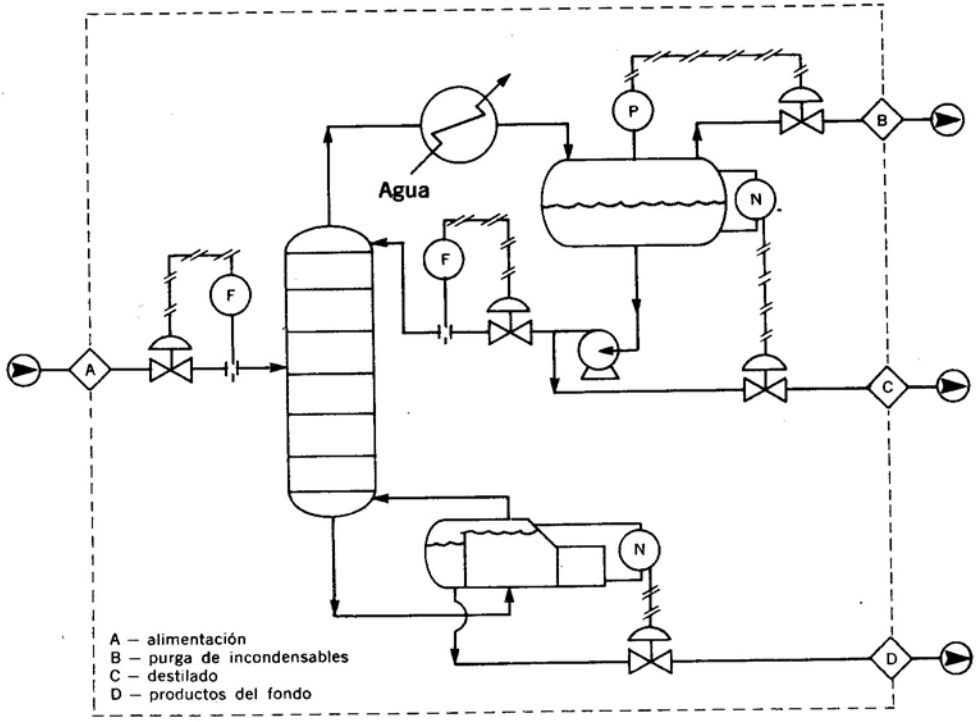
Para la fabricación del aceite de soya se parte del frijol soya, el cual después de molido se pasa a un extractor en donde se trata con tricloroetileno. Los productos del extractor se pasan a un asentador; en éste el líquido sobrenadante se pasa a un evaporador y los sólidos a un secador. El sólido resultante se vende como alimento para ganado.

En el evaporador se concentra la solución de aceite de soya; luego de concentrarse, la solución se manda a una columna de destilación de platos. Por el fondo de la columna entra vapor vivo que sirve como medio de calentamiento y de separación del aceite de soya del solvente. Por el domo de la columna sale el vapor de agua más el tricloroetileno, mientras que por el fondo se obtiene el aceite de soya líquido.

Los vapores salientes de la columna de destilación se unen a los salientes del evaporador y del secador, se enfrían con agua en un condensador y se mandan a un decantador, en donde por diferencia de densidades se separa el agua del tricloroetileno. Este último se mezcla con solvente fresco y se manda al extractor para cerrar el ciclo.

Problema 1.5

Indique qué sucede en el siguiente diagrama:



1. Discusión.

En el diagrama anterior se muestra una columna de destilación de platos. La columna cuenta con un rehervidor en donde se vaporiza parte del líquido que sale del fondo de la misma y parte sale como productos del fondo. El flujo del fondo se controla con un controlador de nivel.

En la parte superior de la columna se cuenta con un condensador total, operado por agua. El líquido condensado pasa a un acumulador de reflujo en donde un controlador de presión fija la presión interna a través de una válvula de venteo. El nivel del líquido en el acumulador se fija por medio de un controlador de nivel, el cual se conecta a una válvula que permite la salida de destilados.

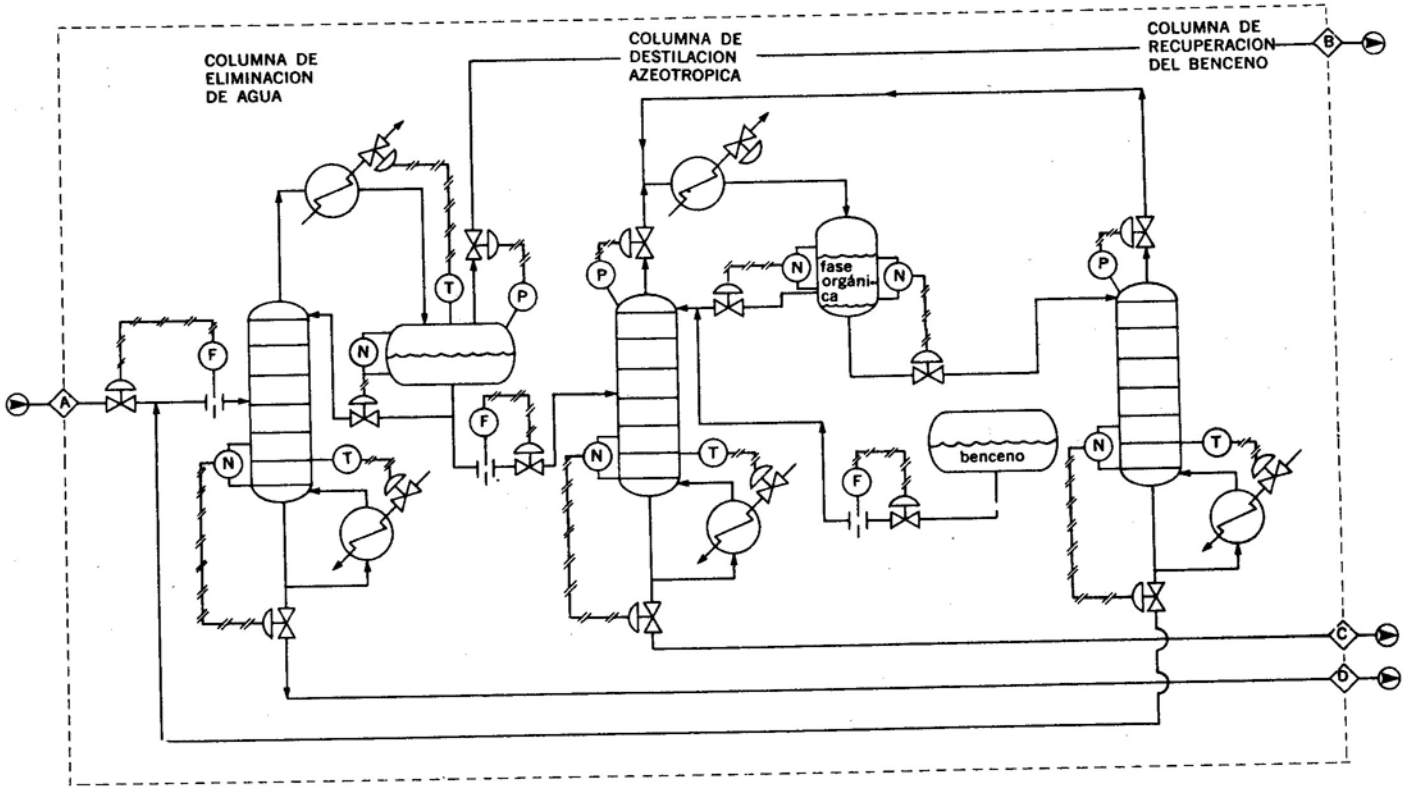
Parte del líquido destilado se manda de nuevo a la columna de destilación como reflujo. El flujo de esta corriente se controla con un medidor controlador de flujo. Este mismo tipo de dispositivo se usa para controlar el flujo de alimentación entrante a la columna.

Problema 1.6

Proceso para la obtención de alcohol absoluto.

Para producir alcohol absoluto a partir de una mezcla de alcohol y agua se debe usar la destilación azeotrópica con benceno usando tres columnas. En el proceso, la primera columna sirve para eliminar el agua presente en la alimentación y alcanzar la composición azeotrópica de 89% en mol de alcohol o 95.38% en peso. En la segunda columna se lleva a cabo la destilación azeotrópica del etanol en presencia de benceno y en la tercera se recupera el benceno de la mezcla azeotrópica. El grado de recuperación y la pureza del etanol producido dependerán del valor especificado para las variables seleccionadas para el control.

Las variables que se seleccionan para controlar la operación del proceso a régimen permanente son: los gastos de alimentación de la mezcla etanol-agua y de benceno; el gasto de alimentación a la columna de destilación azeotrópica; la presión en las tres columnas; la temperatura en cada columna y la de los recipientes de reflujo. También es necesario controlar los niveles de líquido en los fondos de las columnas y en los tanques de reflujo, pero los valores seleccionados no afectan el sistema en las condiciones previstas.

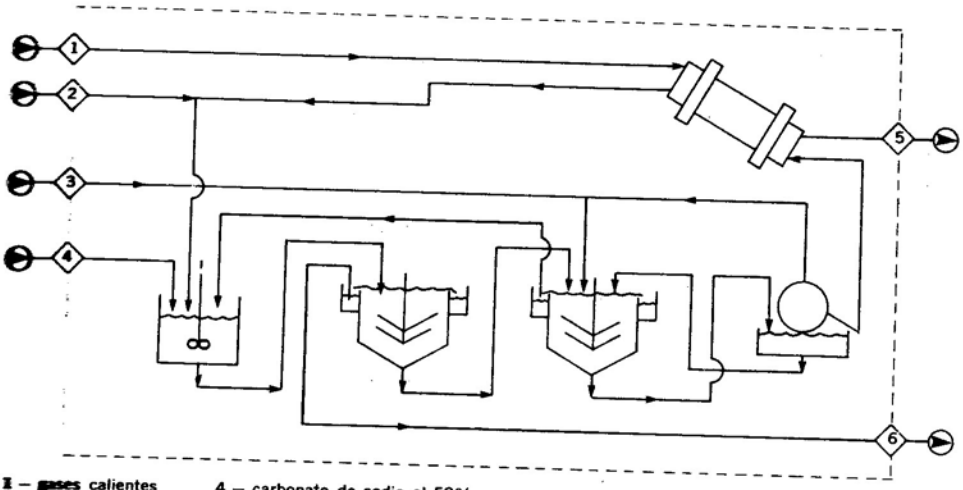


A – etanol con agua
B – purga de incondensables
C – etanol 100%
D – agua

Fuente: Giral et al. **Ingeniería de procesos.** Alhambra, 1979, México.

Problema 1.7

Describa con palabras cómo se lleva a cabo el siguiente proceso. ¿Cuál o cuáles reacciones químicas ocurren en el proceso?



1 – gases calientes
2 – cal
3 – agua caliente
4 – carbonato de sodio al 58%
5 – gases fríos
6 – sosa cáustica al 11%

1. Descripción del proceso

El diagrama de flujo describe el proceso de fabricación de sosa cáustica a partir de carbonato de sodio al 58%. La solución de carbonato junto con la cal se mete a un tanque agitado en donde se lleva a cabo la caustificación. Los productos de la caustificación se mandan a un espesador, donde se sedimenta el carbonato de calcio. El líquido sobrenadante está formado por una solución de NaOH al 11% en peso. Los sólidos del primer asentador o espesador se mandan a un segundo asentador y se mezclan con solución procedente del filtro y con agua caliente. La solución sobrenadante se manda al tanque caustificador y los sólidos a un filtro rotatorio. En el filtro, los sólidos se lavan con agua caliente y luego se mandan a un horno rotatorio, donde el carbonato se pasa a cal al ponerse en contacto con gases calientes de combustión.

La cal saliente del horno se mezcla con cal fresca para volverse a introducir al proceso.

2. Reacciones químicas.

En el caustificador

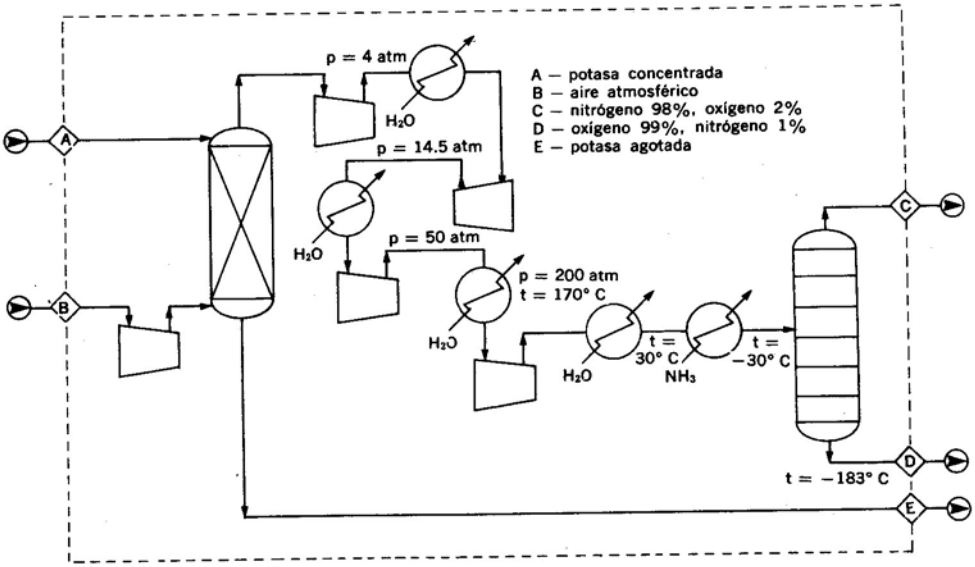
$$CaO + H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2$$
$$Na_2CO_3 + Ca(OH)_2 \longrightarrow 2\,NaOH + CaCO_3$$

En el horno

$$CaCO_3 \xrightarrow{\Delta} CaO + CO_2$$

Problema 1.8

Para producir oxígeno se utiliza el siguiente proceso:



Describa el proceso presentado. ¿Cómo se logra la temperatura en el fondo de la columna?

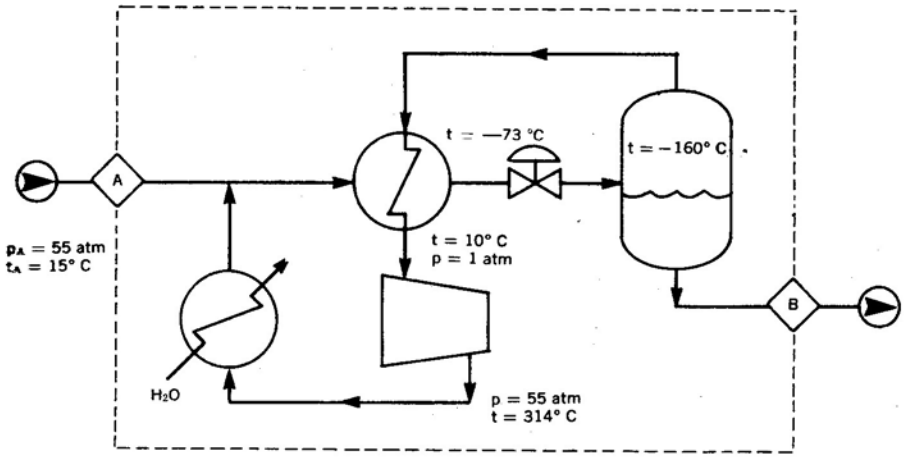
1. Descripción del proceso

La materia prima para la producción de oxígeno es el aire, el cual se manda por medio de una compresora a una torre empacada con potasa cáustica sólida para eliminar el CO_2 y el agua. El aire, libre de CO_2 y agua, se pasa a un proceso de compresión en cuatro etapas. En la primera se comprime hasta 4 atm. Como el aire sale caliente se lo enfría con agua en un cambiador de calor y se comprime hasta 50 atm, y por último se enfría y comprime hasta 200 atm. El aire saliente del cuarto compresor está a 200 atm y 170 °C, por lo que se enfría con agua hasta 30 °C. Para bajar más la temperatura del aire se enfría éste con amoniaco hasta — 30 °C y de allí el aire sale a una torre de destilación con platos en donde se separa el oxígeno líquido por la base y el nitrógeno por el domo.

2. La temperatura se baja hasta — 183 °C debido a que el aire se deja expander adiabáticamente desde una presión de 200 atm hasta 1 atm.

Problema 1.9

Para licuar metano se utiliza el método Linde. De acuerdo con el diagrama que se presenta a continuación, indique en qué consiste dicho proceso.



A – metano gaseoso
B – metano líquido

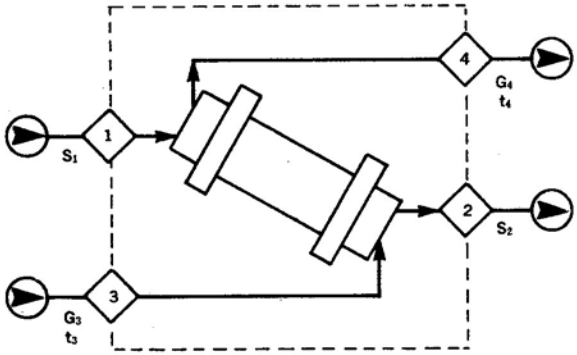
1. Descripción del proceso

De acuerdo con el diagrama de flujo, el metano gaseoso que está a 55 atm y 15 °C se introduce al proceso, en donde se mezcla con metano recirculado. La corriente gaseosa se pasa a un cambiador de calor, de donde sale a — 73 °C. Posteriormente, el gas se expande adiabáticamente hasta 1 atm, con lo cual parte del gas se licúa, separándose en un recipiente de separación de la fase gaseosa que sale a — 160 °C. El gas frío sirve para enfriar al gas entrante al proceso. El gas saliente del cambiador (10 °C y 1 atm) se mete a una compresora, de donde sale a 55 atm y 314 °C. Este gas se enfría y mezcla con el gas nuevo y se repite el proceso.

PROBLEMAS PROPUESTOS

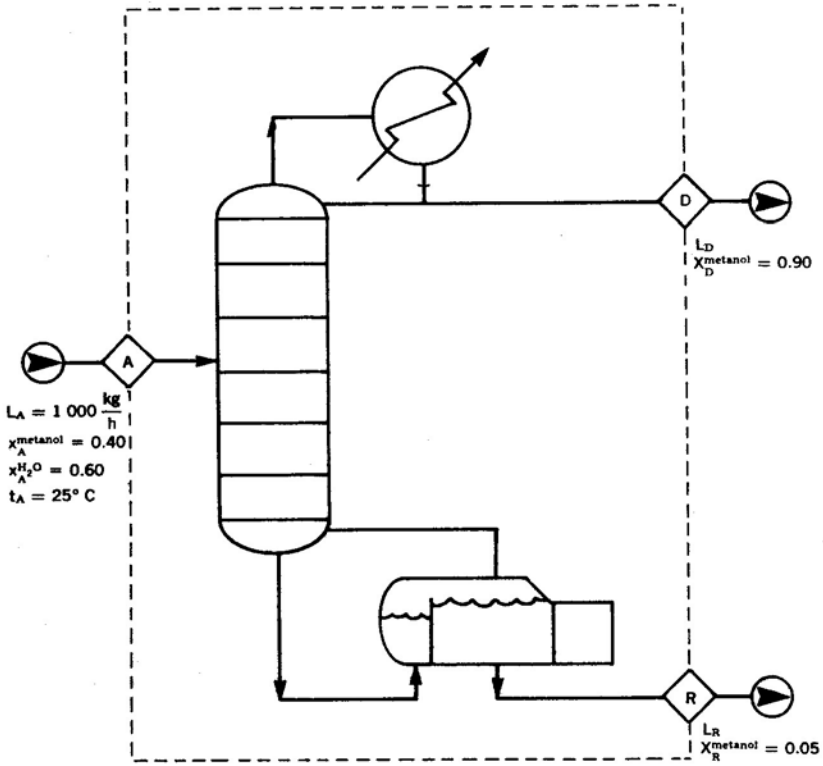
Problema 1.10

En el siguiente diagrama que muestra un secador rotatorio, indique lo que significa: **a)** G_4; **b)** S_1; **c)** t_3.



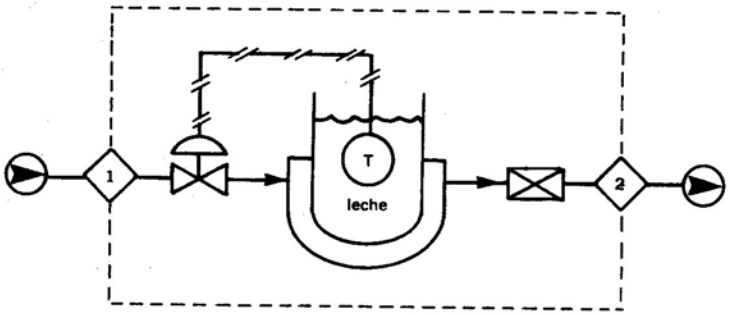
Problema 1.11

¿Qué sucede en el siguiente proceso?



Problema 1.12

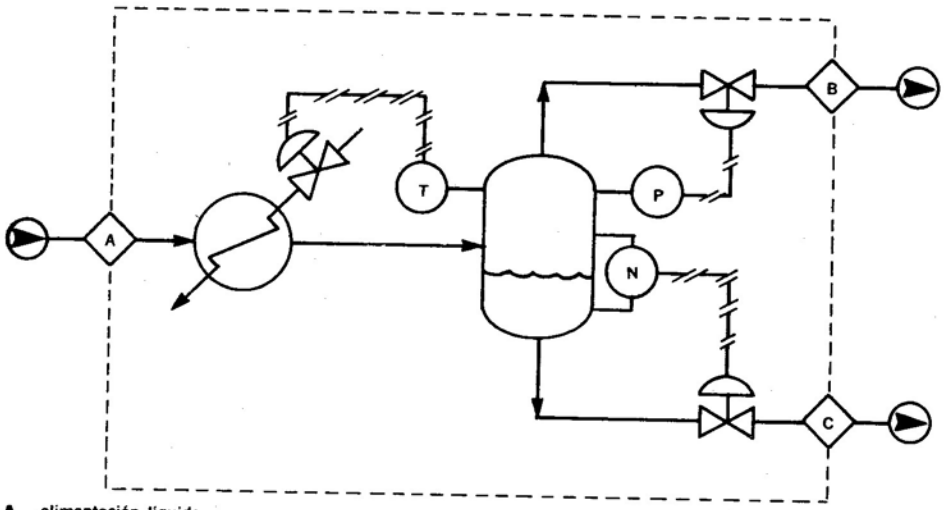
En la pasteurización automática de la leche por calentamiento con vapor de agua se usa el siguiente equipo. Indique en qué consiste el proceso.



1 — vapor
2 — condensado

Problema 1.13

En la destilación instantánea o "flash" se utiliza el siguiente equipo. Indique qué sucede y cómo se controla el proceso.



A — alimentación líquida
B — vapores
C — líquido

Problema 1.14

En la manufactura de ácido nítrico se usa nitrato de sodio y ácido sulfúrico. Si se requiere un gran rendimiento de HNO_3 se debe secar primero el nitrato en un secador rotatorio. El nitrato secado y el ácido se cargan en una retorta caliente (reactor), la cual se calienta por fuego directo. Los vapores

nítricos disociados se destilan y pasan a un condensador. El ácido condensado pasa a un enfriador y se obtiene como ácido concentrado o diluido (dependiendo del estado de la destilación). El ácido diluido contiene óxidos de nitrógeno y se pasa a un tanque en donde se eliminan éstos con aire. Los productos de la disociación pasan al condensador y luego a una serie de torres en donde se absorben con agua. El resultado es la generación de más ácido diluido. Al final del proceso de absorción se emplea un equipo para producir vacío (por lo general un eyector con vapor). El producto gaseoso saliente de las torres de absorción se descarga en el aire. El agua en las torres se recircula y mezcla con aire para ayudar a la oxidación y recuperación de los óxidos del nitrógeno.

Reacciones:

$$NaNO_3 + H_2SO_4 \rightarrow NaHSO_4 + HNO_3$$
$$2\,NO + O_2 \rightarrow 2\,NO_2$$
$$3\,NO_2 + H_2O \rightarrow 2\,HNO_3 + NO$$

a) Haga un diagrama de bloques del proceso.

b) Haga un diagrama de equipos del proceso.

Problema 1.15

Para la manufactura de cierto producto se parte de las materias primas A y B. Las materias primas se disuelven por separado en agua; luego se mezclan y se hacen reaccionar en un reactor agitado. La suspensión de los cristales producidos se centrifuga, se lava con ácido sulfúrico y se seca.

Indique el proceso anterior usando: **a)** un diagrama de bloques; **b)** un diagrama de equipo.

Problema 1.16

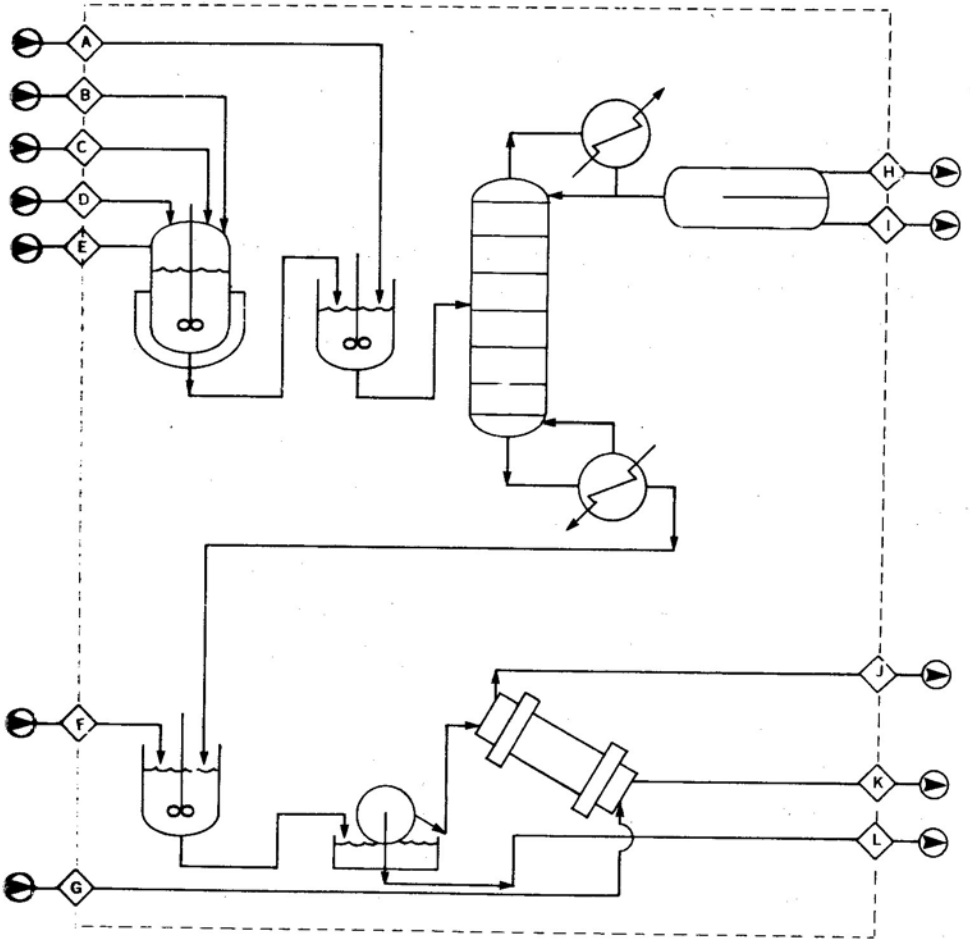
Para la manufactura de la sosa caústica por el proceso electrolítico, se disuelve la sal para formar una salmuera libre de Mg, Ca y Fe al tratarla con Na_2CO_3 y $Ca(OH)_2$. El precipitado se deja asentar, la salmuera purificada se calienta y se manda a las celdas electrolíticas. En estas celdas se produce en el cátodo una solución en la cual 1/3 de la sal se ha convertido en hidróxido y una cantidad de hidrógeno equivalente a la sosa formada. En el ánodo se libera Cl_2. El líquido de la celda se concentra hasta 50% de NaOH en un evaporador de múltiple efecto. En esta fase la mayor parte del NaCl no convertido se separa, se lava de NaOH y se manda a los tanques de disolución. Si contiene algo de NaOH puede reemplazar al $Ca(OH)_2$ en la purificación. La solución al 50% se enfría para que se precipite más NaCl. La mayor parte de la solución al 50% se vende y el resto se concentra hasta

70 ó 75% en un evaporador calentado a fuego directo. La mayor cantidad de la solución del 75% va a recipientes de fusión, donde se convierte en escamas o sólido granulado.

Indique el proceso anterior en diagramas de bloques y señale las reacciones que se llevan a cabo.

Problema 1.17

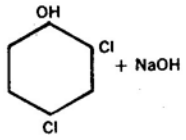
El plaguicida 2-4-D se produce con el proceso ilustrado a continuación:

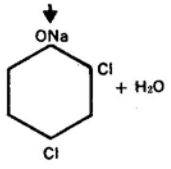


A – ácido clorhídrico al 30%
B – sosa cáustica al 50%
C – ácido monocloroacético
D – 2,4 diclorofenol
E – agua
F – ácido clorhídrico al 10%, 30% en exceso
G – aire a 60° C
H – agua
I – 2,4 diclorofenol
J – aire húmedo
K – producto 2-4-D, 1% humedad
L – aguas residuales

Las reacciones del proceso son:

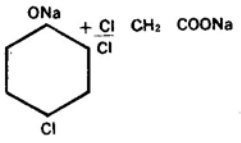
1)

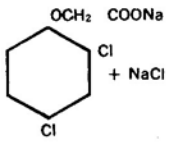




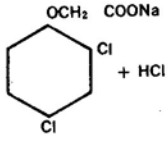
2) $Cl\ CH_2\ COOH + NaOH \longrightarrow Cl\ CH_2\ COONa + H_2O$

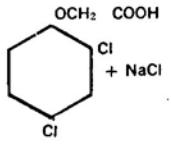
3)





4)

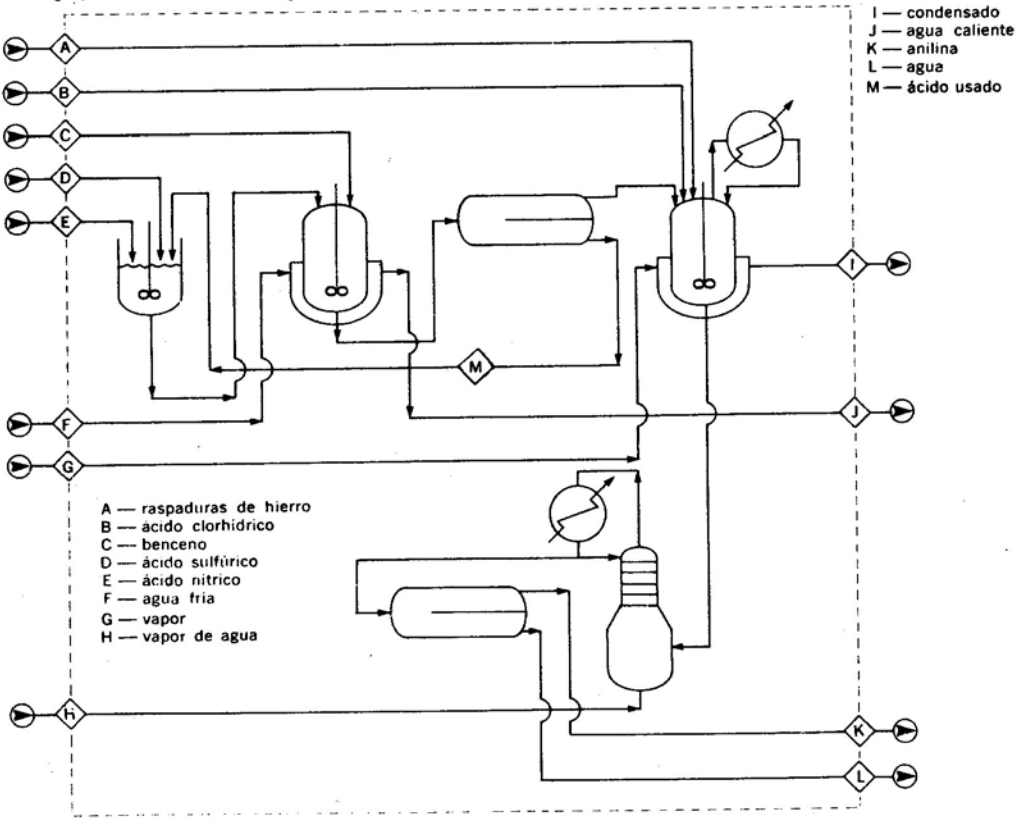




Explique en qué consiste el proceso descrito.

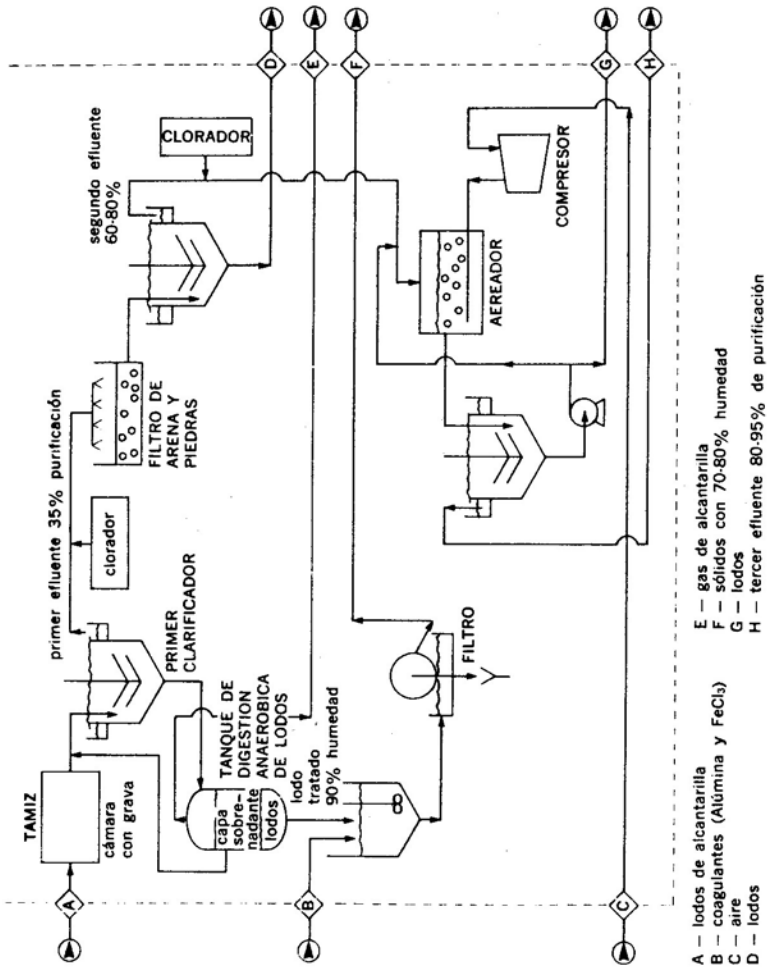
Problema 1.18

Haga una descripción del siguiente proceso usado para fabricar anilina. ¿Qué reacciones químicas se llevan a cabo?



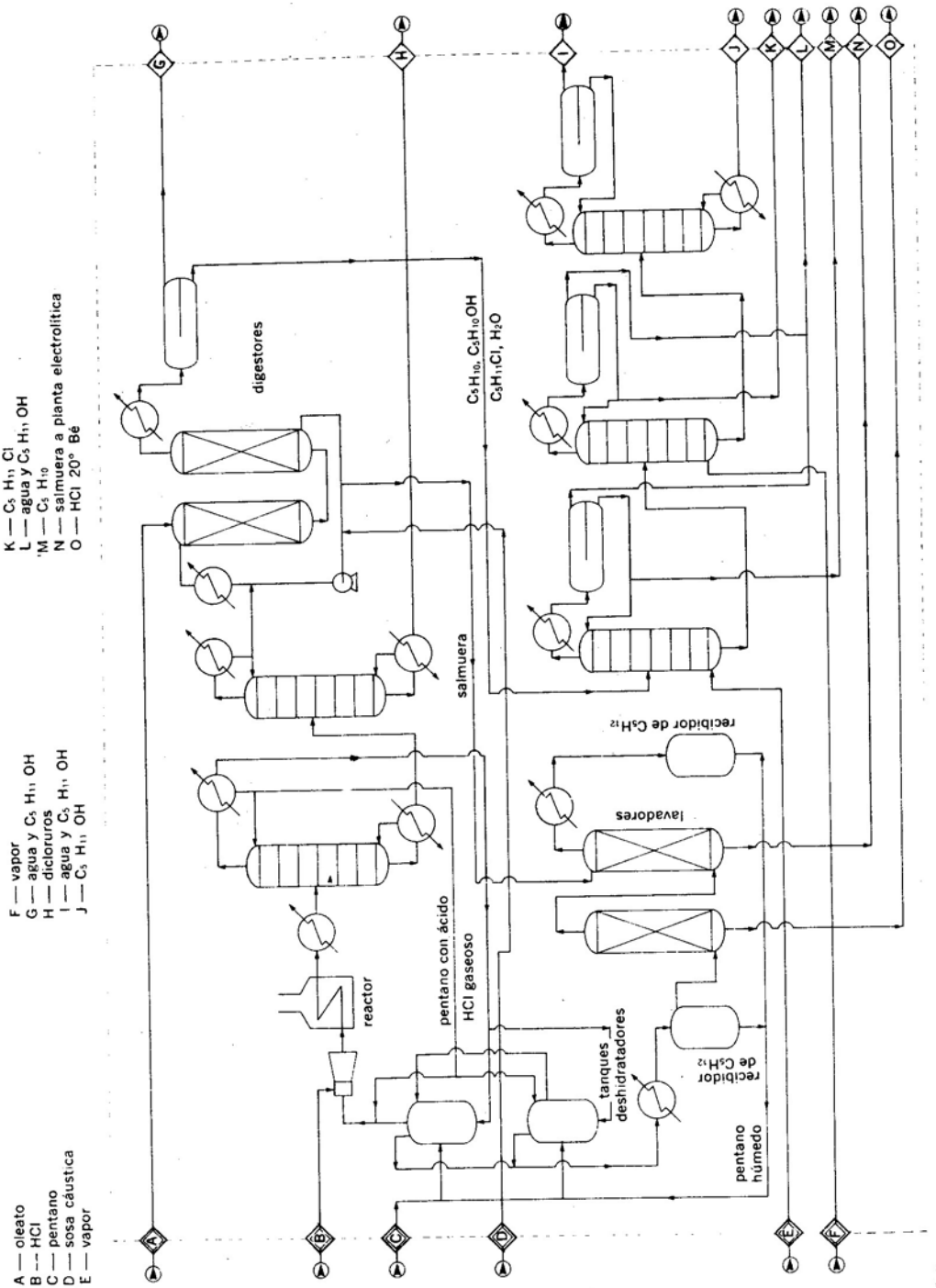
Problema 1.19

Describa el siguiente proceso:



Problema 1.20

Describa el siguiente proceso empleado para fabricar pentanol o alcohol amílico:



Reacciones en el reactor

$$C_5H_{12} + Cl_2 \longrightarrow C_5H_{11}Cl + HCl$$

$$C_5H_{12} + 2\,Cl_2 \longrightarrow C_5H_{10}Cl_2 + 2\,HCl$$

$$C_5H_{11}Cl \longrightarrow C_5H_{10} + HCl$$

$$C_5H_{10} + Cl_2 \longrightarrow C_5H_{10}Cl_2$$

Reacción en el digestor

$$C_5H_{11}Cl + NaOH \longrightarrow C_5H_{11}OH + NaCl$$

CAPÍTULO 2

VARIABLES

OBJETIVOS

Al finalizar este capítulo el lector: **a)** Conocerá las principales variables usadas en ingeniería química. **b)** Conocerá los principales sistemas de unidades usados en ingeniería química. **c)** Será capaz de transformar el valor de las variables de un sistema de unidades a otro. **d)** El lector, al terminar de leer este capítulo será capaz de calcular la equivalencia entre las diversas formas de energía. **e)** Podrá también hacer conversiones entre las diferentes unidades empleadas para medir la energía.

En los procesos industriales se emplean materias primas, servicios (agua, vapor, combustibles, etc.), materiales en proceso y productos. Todo ello se maneja en forma de corrientes, cada una debidamente identificada, y además caracterizada por variables extensivas (dependientes de la cantidad) y por variables intensivas (independientes de la cantidad de materia).

Las variables fundamentales suelen llamarse dimensiones básicas. Estas son la masa (cantidad de materia que contiene un cuerpo), el espacio, el tiempo y la temperatura; cada una de éstas se puede representar por símbolos, de manera que el espacio puede representarse por L, la masa por M, el tiempo por θ y la temperatura por T. Estas son las llamadas magnitudes físicas.

Lo anterior permite que al analizarse las variables derivadas se puedan descomponer en sus dimensiones básicas. Así, masa $= M$, volumen $= L^3$, aceleración $= L/\theta^2$.

UNIDADES Y SISTEMAS

Cualquiera que sea la naturaleza de una cantidad física, se emplea para medirla otra cantidad fija de la misma especie, a la que se llama unidad.

UNIDADES BASICAS Y SISTEMAS EMPLEADOS EN INGENIERIA QUIMICA

SISTEMA	LONGITUD	MASA	TIEMPO	FUERZA	ENERGIA	POTENCIA
CGS	centímetro cm	gramo g	segundo seg	dina dyn	ergio erg	ergio/segundo
MKS absoluto (sistema SI)	metro m	kilogramo kg	segundo seg	newton N	julio J	vatio W
MKS gravitacional	metro m	geokilo	segundo seg	kilogramo fuerza $\overrightarrow{kg}$	kilogramo metro $\overrightarrow{kgm}$	kilográmetro segundo $\frac{\overrightarrow{kgm}}{seg}$
MKS ingeniería	metro m	kilogramo kg	segundo seg	kilogramo fuerza $\overrightarrow{kg}$	kilovatio-hora kw-h	caballo de vapor c.v.
Inglés absoluto	pie ft	libra lb	segundo seg	poundal	poundal-pie	$\frac{\text{poundal-pie}}{\text{segundo}}$
Inglés de ingeniería	pie ft	libra lb	segundo seg	libra-fuerza $\overrightarrow{lb}$	pie-libra $\overrightarrow{ft\text{-}lb}$	Horse-power Hp
Inglés gravitacional	pie ft	slug	segundo seg	libra-fuerza $\overrightarrow{lb}$	pie-libra $\overrightarrow{ft\text{-}lb}$	$\frac{\text{pie-libra}}{\text{segundo}}$ $\frac{\overrightarrow{ft\text{-}lb}}{seg}$

Los sistemas de medida que tienen como base las unidades fundamentales de longitud, masa y tiempo llevan el nombre de sistemas absolutos.

Los sistemas cuyas unidades fundamentales son la longitud, la fuerza y el tiempo reciben el nombre de gravitacionales.

Se dice que tal cantidad medida es tantas veces igual a la unidad, llamándose medición al proceso que consiste en averiguar cuántas veces está contenida la unidad en una cantidad dada. Un conjunto de unidades de medición se llama sistema.

Otra unidad que se suele considerar básica es el mol. El mol es la cantidad de sustancia de un sistema que contiene un número de moléculas, iones, átomos igual al número de átomos que hay en 12 gramos de carbono. (También suele recibir el nombre de gramo mol.) La cantidad de sustancia contenida en un mol se indica en unidades de masa, y se obtiene expresando en gramos, o cualquier otra unidad de masa, el peso molecular o peso atómico de dicha sustancia.

CONVERSION DE UNIDADES

En ingeniería química es frecuente encontrar datos expresados en diversas fuentes con los más disímbolos sistemas; por ello es importante que el ingeniero químico tenga una metodología adecuada para transformar las unidades de un sistema a otro. Para hacer conversiones se parte del principio de que, en álgebra, multiplicar por 1 no afecta al resultado.

$$A\,(B/A) = B \qquad\qquad B\,(C/B) = C$$

$$30\text{ ft}\,(0.0305\text{ m}/1\text{ ft}) = 9.15\text{ m}$$

Por tanto, al hacer una transformación lo que se requiere es multiplicar tantas veces por uno como transformaciones se requieran. Para estas transformaciones se parte de la equivalencia entre las unidades base y la deseada (véase Apéndice I para las conversiones más usadas).

CONGRUENCIA DE UNA RELACION MATEMATICA

Cualquier igualdad matemática válida requiere que ambos términos sean congruentes dimensionalmente, es decir, que cuando se sustituyan las literales de la ecuación matemática por las dimensiones correspondientes (masa, longitud, tiempo, temperatura) ambos términos de la ecuación tengan las mismas dimensiones.

Una ecuación puede ser dimensionalmente correcta, pero no ser correcta en cuanto al tipo de unidades que se emplean para medir las diferentes dimensiones, por lo que es necesario asegurarse de que se emplea el mismo tipo de sistemas de unidades en los dos lados de la ecuación. Cuando no se tiene lo anterior se deberán usar factores de conversión para lograr la igualdad.

VARIABLES RELACIONADAS CON LA MATERIA

En la industria química se debe tener estricto control sobre la cantidad de materia que se maneja en los procesos; este control se lleva a cabo midiendo los gastos, o sea, la cantidad de materia que pasa por un punto o que se procesa por unidad de tiempo.

El gasto se puede expresar como:

Gasto másico

Gasto volumétrico

Gasto molar

Las dimensiones correspondientes a cada caso son:

$$\text{Gasto másico} = \text{masa/tiempo} = M/\theta$$

$$\text{Gasto volumétrico} = \text{volumen/tiempo} = L^3/\theta = \text{caudal}$$

$$\text{Gasto molar} = \text{moles/tiempo} = M/\theta$$

• Además de esto se puede utilizar el gasto para medir gases, líquidos, sólidos o mezclas, por lo que en este libro se ha creído conveniente identificar cada uno de los casos con literales especiales, a saber:

	Gasto másico	Gasto volumétrico	Gasto molar
De gases	G	Ca	$\tilde{G}$
De líquidos	L	Ca	$\tilde{L}$
De sólidos	S	Ca	$\tilde{S}$
De mezclas	M	Ca	$\tilde{M}$

Composición

La composición es una variable intensiva que generalmente se expresa como la concentración de los diferentes componentes de una mezcla. Esta concentración se puede expresar de muy diferentes maneras, a saber:

Concentración masa

Masa de un compuesto por unidad de volumen de solución.

$$C^i = \text{masa del componente i/volumen} = M/L^3$$

Cuando se tiene un solo componente esta concentración es la densidad absoluta.

Concentración molar

Es el número de moles de un compuesto por unidad de volumen de solución.

$$\tilde{C}^i = C^i/PM_i = \text{concentración masa de i/peso molar de i} = M/L^3$$

Fracción masa

Masa de una sustancia dividida entre la masa total de una solución.

$$x^i = \text{masa de i/masa total} = M/M \text{ adimensional}$$

$$x^i = \frac{\tilde{x}^i\, PM_i}{\tilde{x}_a\, PM_a + \tilde{x}_b\, PM_b + \ldots + \tilde{x}_i\, PM_i}$$

Fracción mol

Número de moles de una sustancia dividida entre el número total de moles en la solución.

$$\tilde{x}^i = \text{moles de i/moles totales} = M/M \text{ adimensional}$$

$$\tilde{x}^i = \frac{x^i/PM_i}{\frac{x_a}{PM_a} + \frac{x_b}{PM_b} + \ldots \frac{x_i}{PM_i}}$$

Relación masa

Masa de una sustancia dividida entre la masa total de una mezcla, menos la masa de la sustancia.

X^i = masa del componente i/masa de la mezcla sin componente i $= M/M$ adimensional

$$X^i = \frac{x^i}{1 - x^i} \qquad ; \qquad x^i = \frac{X^i}{1 + X^i}$$

Relación mol

$$\tilde{X}^i = \text{moles del componente i/moles de la mezcla sin i}$$

Porciento en volumen

Volumen de una sustancia entre el volumen total.

$$\%\text{ en volumen} = (v^i/v_T)\ 100$$

Molaridad

Número de moles de una sustancia contenidos en un litro de solución.

$$\text{Molaridad} = \text{gramos mol de i/litro de solución}$$

Molalidad

Es el número de g mol de una sustancia contenidos en 1 000 g de disolvente.

$$\text{Molalidad} = \text{g mol de i/1 000 g de disolvente}$$

Normalidad

Es el número de gramos equivalentes de una sustancia contenidos en un litro de solución.

$$\text{Normalidad} = \text{equivalentes gramos de i/litro de solución}$$

Densidad

La densidad es una variable intensiva que relaciona la masa con el volumen de un cuerpo. Se usa ampliamente en las plantas químicas como una manera fácil de obtener la concentración y pureza de las corrientes. Hay diferentes formas de indicar la densidad, entre ellas:

Densidad absoluta

Es la cantidad de masa contenida en la unidad de volumen de una sustancia.

$$\rho = \text{masa/volumen} = M/L^3$$

Densidad relativa

Es la relación de la densidad de una sustancia con la densidad de una sustancia tomada como referencia. La sustancia de referencia en el caso de sólidos y líquidos suele ser el agua; en los gases se toma al aire.

ρ_R = masa de la unidad de volumen de una sustancia/masa de la unidad de volumen del agua

$$\rho_R = \rho^i/\rho^{H_2O} = [ML^{-3}]/[ML^{-3}] = \text{adimensional}$$

Debido a que la densidad de una sustancia y la del agua se afectan con la temperatura, pero no en el mismo grado, es necesario especificar la temperatura cuando se habla de densidad relativa. Así 0.7 60 °F/60 °F significa que la densidad relativa de la sustancia es 0.7 cuando tanto la densidad de esa sustancia como la del agua se midieron a 60 °F.

Peso específico

Se define como el peso de la unidad de volumen de una sustancia.

$$\text{Pe} = \text{peso/volumen} = [ML\theta^{-2}]/[L^3] = ML^{-2}\theta^{-2}$$

Densidad en grados Baumé

Es una escala muy usada para medir líquidos usando densímetros. Hay dos escalas; una para líquidos más ligeros que el agua y otra para líquidos más pesados.

Para líquidos más ligeros

$$°\text{Be} = (140/\rho_R) - 130$$

Para líquidos más pesados

$$°\text{Be} = 145 - (145/\rho_R) \qquad \rho_R \text{ a } 60\ °\text{F}/60\ °\text{F}$$

Densidad en grados API

Es la escala más usada para medir la densidad relativa de los productos derivados del petróleo. Se usa solamente para medir líquidos más ligeros que el agua.

$$°\text{API} = 141.5/\rho_R - 131.5 \qquad \rho_R \text{ a } 60\ °\text{F}/60\ °\text{F}$$

VARIABLES RELACIONADAS CON LA ENERGIA

Fuerza

Es todo aquello capaz de modificar el estado de inercia de un cuerpo.

$$\text{F} = \text{(masa) (aceleración)}$$
$$\text{F} = [M]\ [L\theta^{-2}]$$

Peso

Es la fuerza con la cual la Tierra atrae los cuerpos en dirección vertical y descendente.

$$\text{Peso} = [M]\ [L\theta^{-2}]$$

Trabajo

Es el producto de la fuerza por la distancia.

$$\tau = \text{(fuerza) (distancia)}$$
$$\tau = [ML\theta^{-2}]\,[L] = ML^2\theta^{-2}$$

Energía

Es la capacidad para producir trabajo.

$$\text{Energía} = \text{Trabajo} = ML^2\theta^{-2}$$

Potencia

Es la cantidad de energía o trabajo proporcionada en la unidad de tiempo.

$$\mathcal{P} = \tau/\theta = \text{trabajo/tiempo} = ML^2\theta^{-2}/\theta = ML^2\theta^{-3}$$

Las unidades más frecuentes de la potencia son:

MKS absoluto vatio = julio/segundo
MKS gravitacional = $\overrightarrow{\text{kg}}$ m/segundo
Inglés de ingeniería Hp = 550 pie $\overrightarrow{\text{libra}}$/segundo

Presión

Es la variable intensiva definida como la fuerza ejercida sobre la unidad de área.

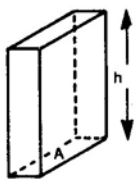
Presión = Fuerza/Area transversal a la dirección de la fuerza aplicada.

$$P = F/A = [ML\theta^{-2}]\,[L^{-2}] = [ML^{-1}\theta^{-2}]$$

Las unidades más frecuentes son $\overrightarrow{\text{kg}}/\text{cm}^2$, atmósfera, $\overrightarrow{\text{lb}}/\text{in}^2$.
Algunos tipos de presión son los siguientes:

Presión hidrostática

Es el peso de una columna de fluido sobre la unidad de área.



$$Ph = \text{Peso/Area} = (PeAh)/A = Peh$$

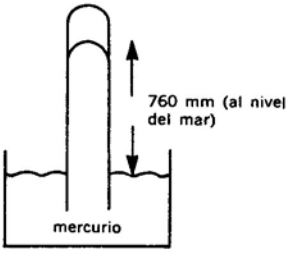
En donde Pe = peso específico = peso de la unidad de volumen.

Presión atmosférica

Debido a su peso, el aire produce sobre una superficie situada en su seno una presión análoga a la hidrostática; a dicha presión se le llama atmosférica.

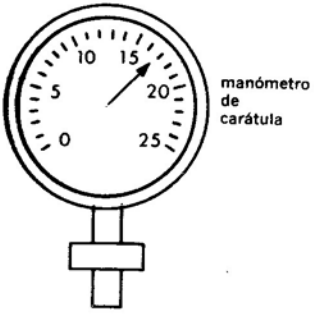
La presión atmosférica varía según los puntos de la superficie terrestre. A nivel del mar la presión atmosférica es de 1.033 kg/cm^2 o análoga a la que produciría una columna de 760 mm de Hg sobre un centímetro cuadrado de superficie. Esa presión recibe el nombre de normal. La presión atmosférica se mide con barómetros.

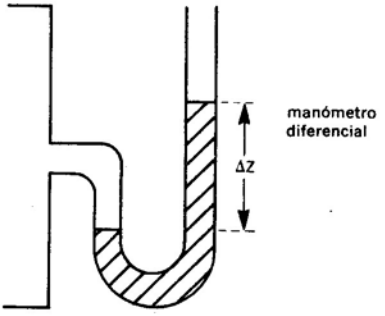




Presión manométrica

Usando la presión atmosférica como referencia la presión manométrica es una medida de la fuerza por unidad de área ejercida por un fluido. Esta presión se mide con aparatos llamados manómetros.



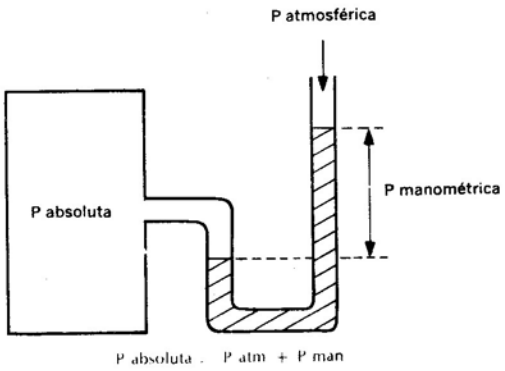


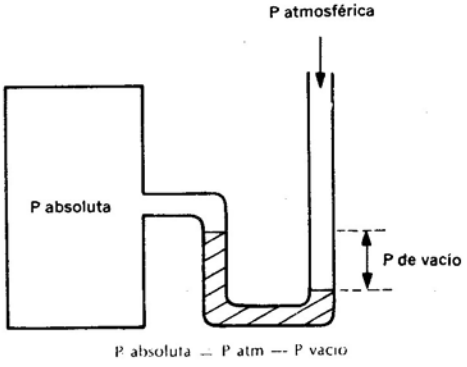
Presión de vacío

Es una presión por debajo de la presión atmosférica normal; se mide frecuentemente como la diferencia entre la presión medida y la presión atmosférica en unidades de mm o pulgadas de mercurio de vacío.

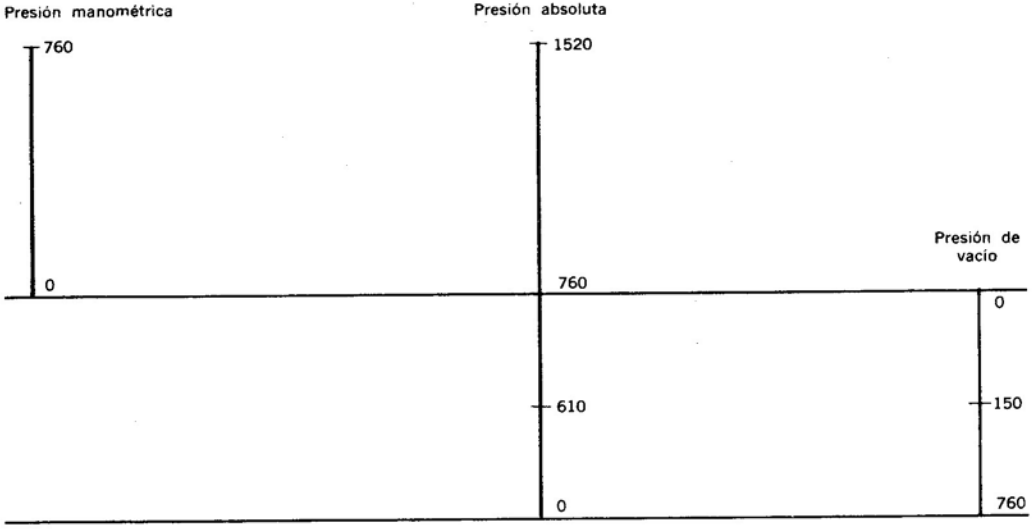
Presión absoluta

Es la fuerza total por unidad de área ejercida por un fluido. Es igual a la presión atmosférica más la presión manométrica.





Comparación gráfica de las diferentes formas de expresar las presiones en los equipos industriales. Las escalas están en mm de Hg.



Temperatura

La temperatura es una variable intensiva que puede definirse como una medida indirecta del grado de excitación de la materia; se mide con aparatos llamados termómetros, que usan escalas arbitrarias. Entre las escalas más usadas están:

Escala en grados Celsius

En esta escala se toma como punto cero la temperatura de fusión del hielo y como 100 la temperatura de ebullición del agua a la presión de 760 mm de Hg.

Escala en grados Fahrenheit

En esta escala la temperatura de fusión del hielo es de 32 °F y la de ebullición a la presión normal es de 212 °F. La relación entre ambas escalas es:

$$t\,^{\circ}C = \frac{t\,^{\circ}F - 32\,^{\circ}F}{1.8}$$

$$t\,^{\circ}F = 32\,^{\circ}F + 1.8\,t\,^{\circ}C$$

Escala en grados Kelvin

Es una escala absoluta en la que el cero corresponde a la temperatura más baja posible en el universo (— 273 °C). Usa divisiones en grados centígrados.

$$t\,^{\circ}K = t\,^{\circ}C + 273$$

Escala en grados Rankine

Es una escala absoluta en la cual el cero corresponde a la temperatura más baja posible (— 460 °F). Cada división corresponde a un grado Fahrenheit.

$$t\,^{\circ}R = t\,^{\circ}F + 460$$

En muchos problemas de ingeniería se presentan diferencias de temperaturas (Δt) en vez de temperaturas solas, por lo que se debe recordar que:

$$\Delta\,^{\circ}C = \Delta\,^{\circ}K \quad \text{y} \quad \Delta\,^{\circ}F = \Delta\,^{\circ}R$$

$$\Delta\,^{\circ}C/\Delta\,^{\circ}F = \Delta\,^{\circ}K/\Delta\,^{\circ}R = 1.8$$

RESUMEN DE LA NOMENCLATURA DE LAS PRINCIPALES VARIABLES RELACIONADAS CON LA MATERIA

CATEGORIA			Variables Másicas	Variables Molares
GASTO	gases		G	$\tilde{G}$
	líquidos		L	$\tilde{L}$
	sólidos		S	$\tilde{S}$
	mezcla de fases		M	$\tilde{M}$
CONCENTRACION	FRACCION	gases	y	$\tilde{y}$
		líquidos	x	$\tilde{x}$
		sólidos	w	$\tilde{w}$
		mezcla de fases	z	$\tilde{z}$
	RELACION	gases	Y	$\tilde{Y}$
		líquidos	X	$\tilde{X}$
		sólidos	W	$\tilde{W}$
		mezcla de fases	Z	$\tilde{Z}$

El subíndice en las propiedades se refiere a la corriente.

$G_1 =$ kg/h en la corriente 1 (gaseosa)

$T_A =$ temperatura de la corriente A

El superíndice se refiere al compuesto:

$\tilde{y}_1^{NH_3} =$ kg mol de NH_3/kg mol totales en la corriente 1 (gaseosa)

$w_2^{Na_2SO_4} =$ kg de Na_2SO_4/kg totales en la corriente 2 (sólida)

ENERGIA

Siempre ha sido la energía clave de los grandes logros de la humanidad y de su sueño de un mundo mejor. Se ha dicho que el hombre de las cavernas inició la ruta de la civilización al utilizar la energía del fuego y obtener luz y calor, y la energía de su cuerpo asociada al arco y al garrote para sobrevivir y comer.

En los siglos siguientes su búsqueda del bienestar material ha estado vinculada al aprovechamiento de las diversas formas de energía contenidas en el carbón, petróleo, electricidad, etcétera.

La descripción completa de un sistema físico requiere la especificación de la energía. La energía se define generalmente como la habilidad o aptitud para producir trabajo.

Trabajo

En su significado preciso, el trabajo entraña la aplicacion de fuerza y el concepto científico engloba esta idea de la manera más específica posible. Se define al trabajo como la aplicación de una fuerza a través de una distancia

$$\tau = Fd = \text{energía} \qquad d = \text{distancia}$$

$$F = \text{fuerza} \qquad F = ma \qquad a = \text{aceleración}$$

La unidad del trabajo o de la energía en el sistema MKS absoluto es el julio o joule

$$\text{Julio} = (\text{kgm/s}^2)\ \text{m} = \text{N (m)}$$

En el sistema MKS gravitacional la unidad es el kilogramo metro

$$1\ \vec{\text{kgm}} = 9.81\ \text{julios}$$

En el sistema inglés gravitacional la unidad es el pie libra fuerza

$$1\ \text{ft-}\vec{\text{lb}} = 32.2\ \text{poundal-pie} = 1.3559\ \text{julios}$$

$$1\ \text{ft-}\vec{\text{lb}} = 0.13847\ \vec{\text{kgm}}$$

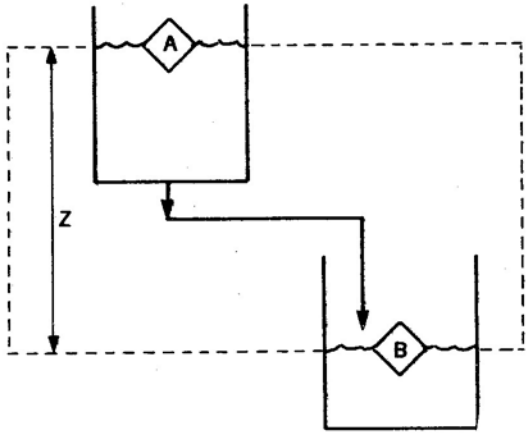
Cuando un sistema produce trabajo, éste tiene signo positivo; cuando un sistema recibe trabajo se le pone signo negativo.

La energía se manifiesta de muchos modos. Un sistema puede tener energía como resultado de su posición sobre la tierra, de la posición de sus moléculas, por la posición de sus átomos o por la excitación de los mismos.

Algunos tipos de energía que interesan a los ingenieros químicos son los siguientes:

Energía potencial

Es debida a la posición que guarda un cuerpo sobre el nivel de referencia



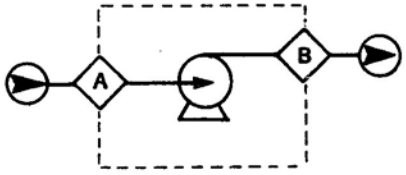
$$EP = m\,g\,z$$

$$= kg\,\frac{m}{s^2}\,m = \text{julio}$$

Energía cinética

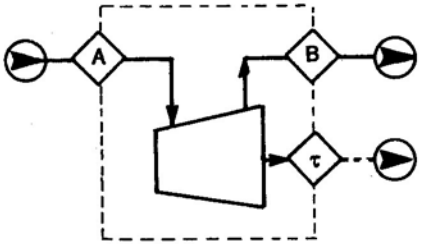
Es la energía que tiene un cuerpo en movimiento

$$EC = m\,u^2/2$$



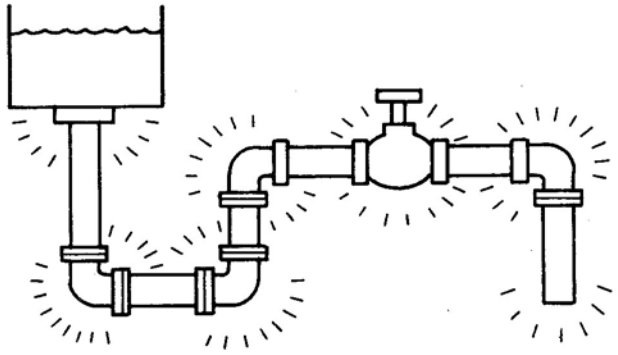
Energía mecánica

Es la energía que se introduce a un sistema por medio de una bomba o que se quita de un sistema por medio de una turbina



Energía de fricción

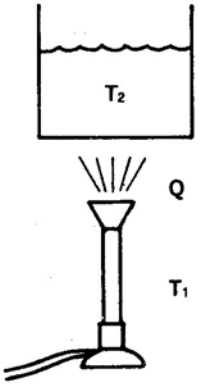
Representa la energía perdida debido a la fricción cuando un fluido pasa a través de las diferentes partes de un sistema



Calor

Usaremos el término calor para referirnos a la energía en tránsito de un cuerpo a otro, debido a la existencia de una diferencia de temperaturas entre dos cuerpos.

La adición de calor a un sistema aumenta la energía del sistema, generalmente la energía interna. La energía calorífica se suele medir en kcal o en BTU



1 BTU = 0.252 kcal

Los experimentos de Joule demostraron la relación que hay entre calor y trabajo

$$1 \text{ BTU} = 778 \overrightarrow{\text{lb}}\text{-ft}$$

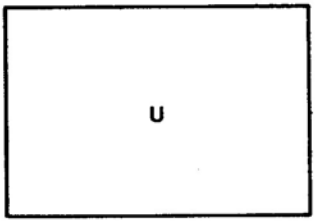
$$1 \text{ kcal} = 4\,185 \text{ julios} = 426 \text{ kgm}$$

Cuando a un sistema se le adiciona calor el signo es positivo; si se le quita calor el signo será negativo.

Energía interna

Es la suma de las energías cinéticas y potenciales de todos los constituyentes de un sistema. En general no se conoce la energía interna de un sistema, sino su variación cuando cambian las circunstancias del sistema.

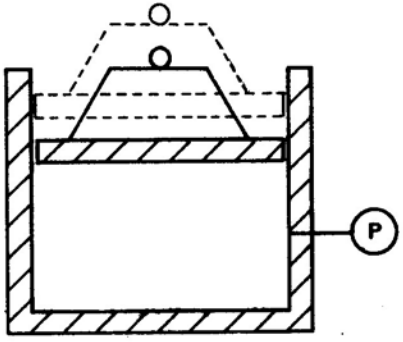
Suele medirse en kcal o en BTU



Energía de presión

Es la parte de la energía interna de un cuerpo que puede hacer trabajo

$$EPe = PV = (\vec{kg}/m^2)\ m^3 = \vec{kg}m$$



Energía química

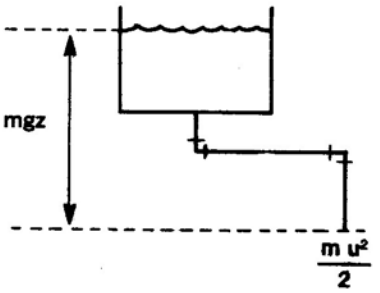
Es la liberada o absorbida durante una reacción química. Se mide generalmente en kcal o en BTU

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 + E.Q.$$



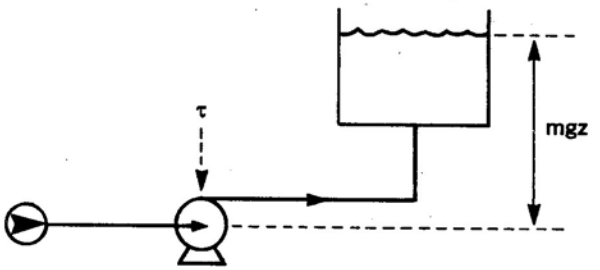
TRANSFORMACION DE LA ENERGIA

Estas formas de energía pueden cambiarse de una a otra dentro de un sistema. Por ejemplo:

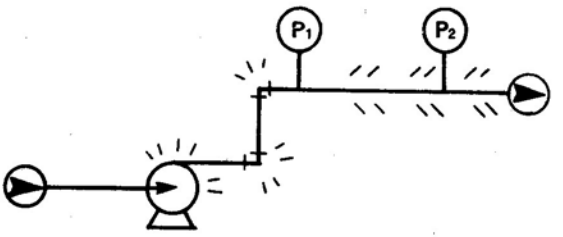


La energía potencial de un fluido en un tanque elevado se convierte en energía cinética al fluir hacia abajo del sistema de tuberías.

La energía mecánica adicionada por una bomba puede ser transformada en energía potencial, al bombear el fluido a una posición más elevada



Las energías potenciales, de presión, mecánica o cinética pueden convertirse en calor a través de las pérdidas por fricción. Esta pérdida de energía se puede observar por el cambio en la energía de presión. Aunque la energía puede cambiar de una forma a otra, sólo puede transmitirse de dos maneras: por medio de calor o por medio de trabajo



Potencia

El trabajo realizado en un cierto tiempo recibe el nombre de potencia. La unidad de potencia en el sistema MKS absoluto es el watt o vatio. En el sistema inglés lo más usado es el ft-lb/s o también el HP (Horse power

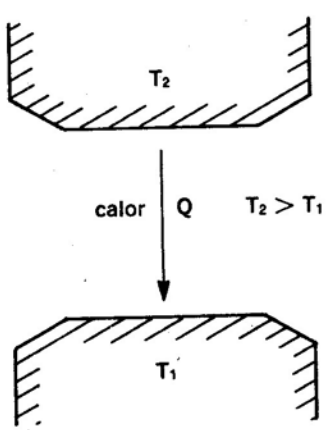
$$\mathscr{P} = \tau/0$$

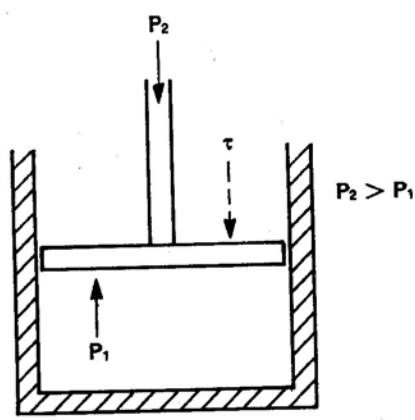
TRANSMISION DE LA ENERGIA

Mientras la energía permanece almacenada dentro de un sistema, tiene capacidad para producir efectos, pero estos no son evidentes, a menos que la energía pueda cruzar los límites de un sistema y producir cambios en los contenidos del sistema y en los alrededores o entorno. La energía que se transmite puede adoptar dos formas: trabajo o calor.

El calor y el trabajo son las dos formas en que se transmite la energía de un cuerpo a otro. Cesan en cuanto la energía deja de cruzar los límites del sistema. No se puede decir, pues, que un cuerpo tiene trabajo o calor, ya que esta forma de energía sólo existe al transmitirse y no dentro del cuerpo.

El calor es una forma de transmisión de la energía y se da cuando hay una diferencia de temperatura. El trabajo es la otra forma de transmitir la energía y se da cuando hay una diferencia de fuerzas





LEY DE LA CONSERVACION DE LA ENERGIA

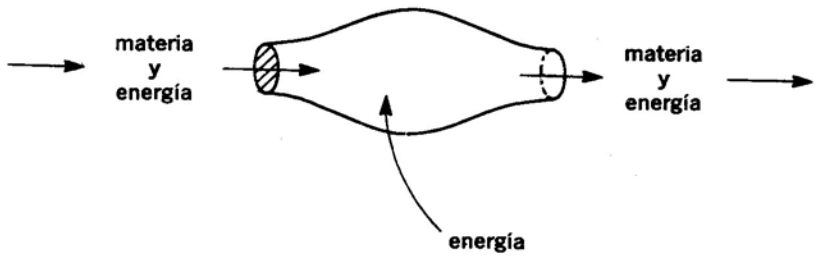
La energía no puede ser creada ni destruida, sólo se transforma. Esta ley está basada en la observación física.

Sistema cerrado

En un sistema cerrado la materia no cruza las fronteras. Sin embargo, la energía puede fluir hacia o del sistema; por ejemplo, una olla express.

Sistema abierto

Es aquel en el que tanto la materia como la energía puede atravesar las fronteras del sistema



La mayor parte de los sistemas con los que trata el ingeniero químico son sistemas abiertos.

Sistema aislado

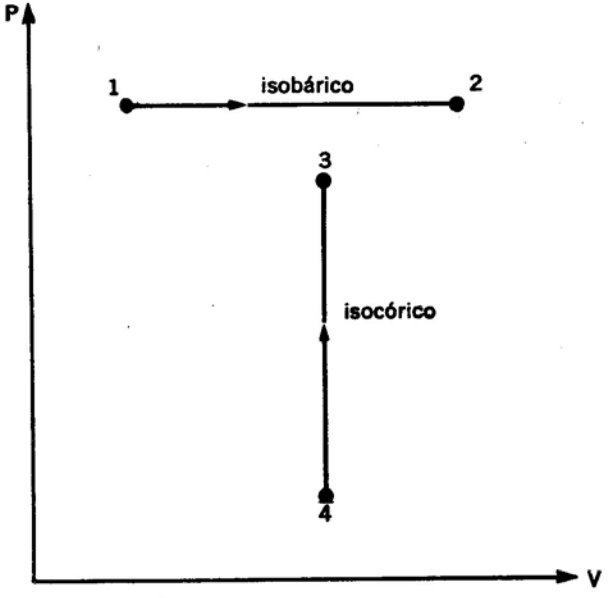
Es aquel a través de cuyos límites no fluyen ni la materia ni la energía; por ejemplo, un termo de café



PROCESOS

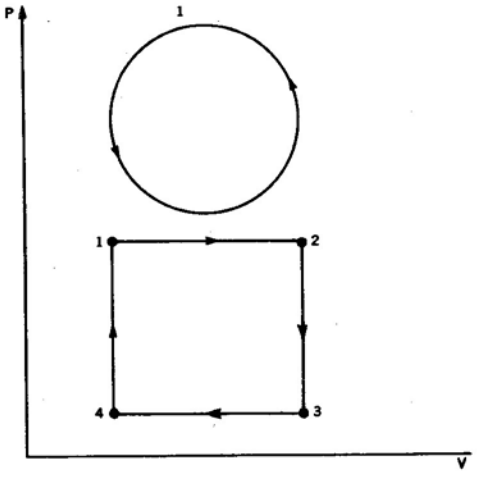
Si una o más de las variables que determinan el estado de una sustancia cambia, la sustancia ha tomado parte en un proceso. En general, los procesos reales producen cambios en casi todas las propiedades. Pero hay ciertos procesos en los que unas variables permanecen constantes. Por ejemplo,

si un proceso ocurre sin cambio de presión, se dice que es **isobárico;** si el volumen permanece constante, **isocórico;** si es la temperatura la que no cambia, **isotérmico,** y si no cambia el contenido de energía, **isoentálpico**



Ciclos

Cuando un fluido pasa a través de una serie de procesos y retorna a su estado inicial, se dice que ha efectuado un ciclo

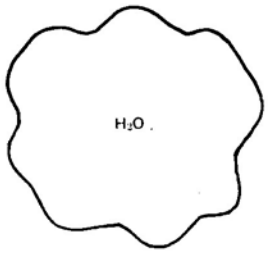


PROBLEMAS RESUELTOS

Problema 2.1

La capacidad calorífica a presión constante del agua a 200 °F es de 10.8 BTU/lb mol °R calcule su capacidad calorífica en k cal/kg mol °K.

1. Traducción



2. Planteamiento

Para resolver este problema se tendrá que hacer uso de las conversiones presentadas en el Apéndice I.

3. Cálculos

3.1 Conversión

$$Cp = 10.8 \frac{BTU}{lb\ mol\ °R}\left(\frac{0.252\ kcal}{BTU}\right)\left(\frac{1\ lb\ mol}{0.454\ kg\ mol}\right)\left(\frac{1.8\ °R}{1\ °K}\right)$$

$$Cp = 10.8\ kcal/kg\ mol\ °K$$

4. Resultado

El valor de las capacidades caloríficas es el mismo numéricamente en el sistema inglés y en el sistema métrico.

Nota: Se habrá observado que al hacer la conversión de grados Rankine a grados Kelvin se usó el factor 1.8; esto se debe a que aquí no estábamos convirtiendo una temperatura dada en otra, sino un tamaño de grado en otro.

Problema 2.2

El valor de la constante R de los gases ideales es $1\,545 \frac{\overrightarrow{lb}\ ft^3}{ft^2\ lb\ mol\ °R}$.

Exprese el valor de R en atm m^3/kg mol °K

1. Planteamiento

1.1 Discusión

Este problema es el cambio de unidades y se puede resolver usando las conversiones presentadas en el Apéndice I.

2. Cálculos

2.1 Valor de R en atm m^3/kg mol °K

$$R = 1\,545 \frac{\frac{\overrightarrow{lb}}{ft^2}\, ft^3}{lb\ mol\ °R} \left(\frac{1\ lb\ mol}{0.454\ kg\ mol}\right)\left(\frac{1.8\ °R}{1\ °K}\right)\left(\frac{0.305^3\ m^3}{1\ ft^3}\right)\left(\frac{1\ ft^2}{144\ in^2}\right) \times \left(\frac{1\ atm}{14.7\ \frac{\overrightarrow{lb}}{in^2}}\right)$$

$$R = 0.0821 \frac{atm\ m^3}{kg\ mol\ °K}$$

3. **Resultado**

El valor de la constante de los gases en

atm m^3/kg mol °K es de 0.0821

Problema 2.3

La densidad de todos los cuerpos varía con la temperatura. En algunos líquidos esta variación puede expresarse por la siguiente fórmula:

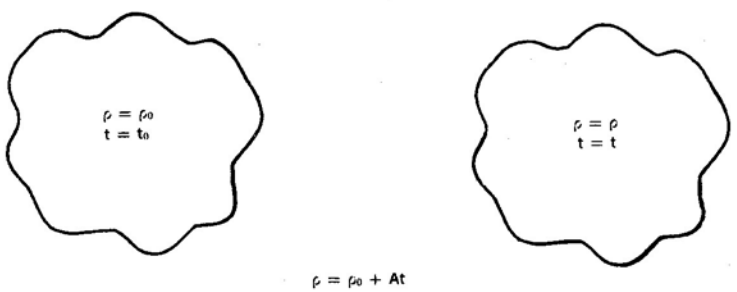
$$\rho = \rho_0 + At$$

En donde ρ = kg/m^3 a una temperatura t en °C.

ρ_0 = kg/m^3 a la temperatura base t_0.

¿Cuáles deben ser las unidades de A?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Para que una ecuación sea correcta desde el punto de vista de las unidades, ambos lados de la ecuación deben tener las mismas unidades.

3. Cálculos

3.1 Búsqueda de las unidades de A.

$$kg/m^3 = kg/m^3 + A\ °C$$

$$\therefore\ kg/m^3 - kg/m^3 = A\ °C \quad \therefore\ A = kg/m^3\ °C$$

4. Resultado

Las unidades de A deben ser $kg/m^3\ °C$. Este factor se llama coeficiente de dilatación.

Problema 2.4

Una ecuación simplificada para la transmisión de calor de un tubo al aire es la siguiente: $Q = hA\Delta T$, en donde h = coeficiente de transferencia de calor = $0.026\ G^{0.6}/D^{0.4}$.

h = BTU/h ft^2 °F; G = 1 lb/h ft^2 masa velocidad, D = diámetro en ft

Cantidad de calor = Q = BTU/h; A = área

ΔT = diferencia de temperatura = °F

En caso de expresar h en cal/min cm^2 °C

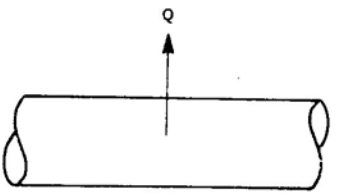
¿Cuál sería la nueva constante de la ecuación en vez de 0.026?

Si G y D fueran a utilizarse con las unidades

$$G' = g/min\ cm^2,\ D' = cm \text{ y } h = cal/min\ cm^2\ °C$$

¿Cuál sería la constante?

1. Traducción



$$h = BTU/h\ ft^2\ °F$$

$$Q = hA\Delta T$$

$$h = 0.026\ G^{0.6}/D^{0.4}$$

$$h = \alpha\ G^{0.6}/D^{0.4}\ cal/min\ cm^2\ °C$$

$$\alpha = ?$$

2. Planteamiento

2.1 Discusión

Para resolver el problema debemos partir del hecho de que para que una ecuación sea correcta deben tener las mismas unidades los dos lados de la igualdad.

3. Cálculos

3.1 Valor de la constante si h = cal/min cm² °C

$$\left(\frac{1\ \text{BTU}}{\text{h ft}^2\ ^\circ\text{F}}\right)\left(\frac{252\ \text{cal}}{\text{BTU}}\right)\left(\frac{1\ \text{h}}{60\ \text{min}}\right)\left(\frac{1\ \text{ft}^2}{(30.5)^2\ \text{cm}^2}\right)\left(\frac{1.8\ ^\circ\text{F}}{1\ ^\circ\text{C}}\right) =$$

$$= 0.008126\ \frac{\text{cal}}{\text{min cm}^2\ ^\circ\text{C}}$$

$$\therefore\ h = 0.008126\ (0.026)\ G^{0.6}/D^{0.4} = 0.000211298\ G^{0.6}/D^{0.4}$$

Comprobación: si G = 100 lb/h ft² y D = 1 ft

$h = 0.026\ G^{0.6}/D^{0.4} = 0.026\ (100)^{0.6}/(1)^{0.4} = 0.4120$ BTU/h ft² °F

$h = 0.000211298\ (100)^{0.6}/(1)^{0.4} = 0.03347$ cal/min cm² °C = 0.4120 BTU/h ft² °F

3.2 Valor de la constante si G' g/min cm² y D' = cm

$$h = 0.000211298\ G^{0.6}/D^{0.4} = \alpha\ G'^{0.6}/D'^{0.4}$$

$$0.000211298\ \frac{\left(\frac{\text{lb}}{\text{h ft}^2}\right)^{0.6}}{(\text{ft})^{0.4}} = \alpha\ \frac{\left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^2\ \text{min}}\right)^{0.6}}{(\text{cm})^{0.4}}$$

$$\alpha = 0.000211298\left(\frac{\frac{\text{lb}}{\text{h ft}^2}}{0.00813\ \frac{\text{g}}{\text{min cm}^2}}\right)^{0.6}\left(30.5\ \frac{\text{cm}}{\text{ft}}\right)^{0.4}$$

$$\alpha = 0.014878$$

$$\therefore\ h = 0.014878\ (G')^{0.6}/(D')^{0.4}$$

4. **Resultado**

La ecuación quedaría como:

a) $h = 0.000211298\ (G)^{0.6}/D^{0.4}$ donde h = cal/min cm² °C y G = lb/h ft², D = ft

b) $h = 0.014878\ (G')^{0.6}/(D')^{0.4}$; donde h = cal/(min cm² °C) G' = g/(min cm²) y D' = cm

Problema 2.5

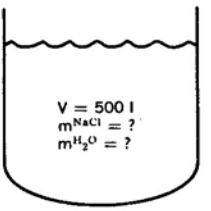
Al analizarse una solución salina, se ve que contiene 23.5 g de NaCl por cada 1 000 cm³ de solución, la cual tiene una densidad de 1.16.

¿Cuál es el porcentaje en peso de NaCl en la solución?

¿Cuántos kg de sal se deberán disolver para dar 500 l de solución?

¿Qué cantidad de agua se necesitará?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Se deberán usar las definiciones de concentración para obtener los datos requeridos.

2.2 Porcentaje en peso de NaCl

$$x^{NaCl} = m^{NaCl}/m^{solución} \qquad \% \text{ NaCl} = x^{NaCl}(100)$$

2.3 Masa de NaCl

$$m^{NaCl} = C^{NaCl}V$$

2.4 Relación masa de NaCl

$$X^{NaCl} = x^{NaCl}/(1 - x^{NaCl})$$

3. Cálculos

3.1 Porcentaje en peso de NaCl

Tomando 1 000 cm^3 $\qquad m^{NaCl} = 23.5$ g

m solución $= 1.16\ g/cm^3\ (1\ 000) = 1\ 160$ g

$x^{NaCl} = 23.5/1\ 160 = 0.02025$ g NaCl/g de solución

3.2 Relación masa

$$X = 0.02025/(1 - 0.02025) = 0.02067 \text{ kg NaCl/kg de } H_2O$$

3.3 Masa de NaCl

$$m^{NaCl} = (23.5\ g/1\ 000\ cm^3)\ (500\ l)\ (1\ 000\ cm^3/l) = 11.75\ (10^3)\ g = 11.75\ kg$$

3.4 Masa de H_2O

$$m^{H_2O} = (1/X)\ m^{NaCl} = (1/0.02067)\ (11.75) = 568.45\ kg$$

4. Resultados

El % en peso de NaCl en la solución es de 2.0225.

La masa de NaCl necesaria para formar 500 l de solución es de 11.75 kg.

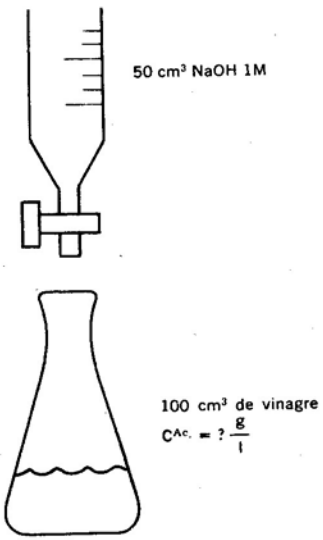
La masa de H_2O será de 568.45 kg.

Problema 2.6

Para determinar la concentración de ácido acético en un vinagre, se tomaron 100 cm^3 del vinagre, se añadieron unas gotas de indicador de fenolftaleína y se tituló con una solución de sosa cáustica 1 M.

El cambio de color se produjo después de usar 50 cm^3 de la solución cáustica. ¿Cuál es la concentración de ácido acético en gramos por litro en el vinagre?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

La titulación no es más que una reacción de neutralización en la que se usa un indicador para ver en qué momento se completa.

2.2 Reacción

$$NaOH + CH_3COOH \rightarrow CH_3COONa + H_2O$$

2.3 Molaridad

$$M = \text{gramos mol/litro de solución}$$

2.4 Gramos mol de NaOH utilizados

$$\text{gramos mol} = M \text{ (litros)}$$

2.5 Gramos mol de ácido acético de acuerdo con la reacción

$$\text{g mol de acético} = \text{gramos mol de sosa}$$

2.6 Concentración

$$C^{Ac} = \text{g mol de acético (PM de acético)/litros}$$

3. Cálculos

3.1 Gramos mol de sosa

$$g\ mol = (1)\ (0.05) = 0.05\ g\ mol$$

3.2 Concentración del ácido acético

$$C^{Ac} = 0.05\ (60)/0.1 = 30\ g/l$$

4. **Resultado**

La concentración de ácido acético es de 30 gramos por litro

Problema 2.7

Una unidad muy empleada para medir presiones es el Pascal.

¿Cuál será la presión en la ciudad de México en esa unidad?

Nota: la presión atmosférica en la ciudad de México es igual a 586 mm de Hg.

1. Traducción

P atm = 586 mm Hg
P atm = ? barias



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Se tendrán que usar conversiones para pasar de mm de Hg a Pascal, utizando los datos del Apéndice I.

3. Cálculos

3.1 Conversiones

$$P = 586\ mm\ Hg\left(\frac{1\ atm}{760\ mm\ Hg}\right)\left(\frac{1.033\ \vec{kg}}{cm^2\ atm}\right)\left(\frac{9.81\ N}{1\ \vec{kg}}\right)\left(\frac{10\,000\ cm^2}{1\ m^2}\right)$$

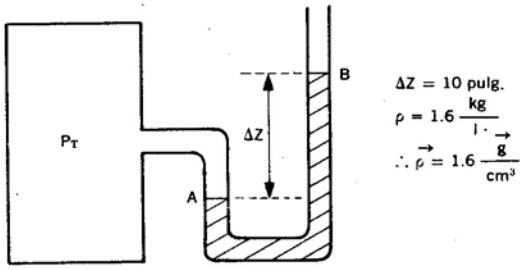
$$\left(\frac{1\ Pa}{1\ N/m^2}\right) = 78136.392\ Pa = 78.136\ k\ Pa$$

4. **Resultado**

La presión en la ciudad de México es de 78136.392 Pa o igual a 78.136 k Pa, que es la unidad más empleada.

Problema 2.8

Para medir la presión de un gas dentro de un recipiente se usa un manometro diferencial como el que se muestra en la figura. Cuando se efectúa la medición, la presión atmosférica es de 730 mm de Hg. El líquido medidor usado tiene una densidad de 1.6 g/cm³. ¿Cuál es la presión absoluta que existe en el gas dentro del recipiente? La diferencia de altura entre el punto B y el A es de diez pulgadas.



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Como el sistema está en equilibrio, debe existir un balance de fuerzas; podemos convertir dicho balance en balance de presiones si tomamos las fuerzas ejercidas por cm² de área seccional del manómetro.

2.2 Balance de presiones

Tomando como referencia el punto A

$$P_A = P_T = P\ atm + \Delta Z\ Pe$$

3. Cálculos

3.1 Presión atmosférica

$$P\ atm = 730\ mm\ Hg$$

3.2 Presión ΔZ

$P_{\Delta Z}$ = 10 pulgadas (2.54 cm/pulg) (1.6 $\vec{g}$/cm³) (760 mm Hg/1 033 $\vec{g}$/cm²) = 29.89 mm Hg

3.3 Presión en el tanque

$$P_T = 730 + 29.89 = 759.89\ mm\ de\ Hg$$

4. Resultado

La presión del gas en el tanque es de 759.89 mm de Hg.

Problema 2.9

Se desea construir una nueva escala de temperaturas basada en cierto compuesto. La escala se llamará "Escala Facultad de Química". En esta nueva escala 0 °FQ corresponden a la temperatura de fusión del compuesto y 100 °FQ a la temperatura de ebullición.

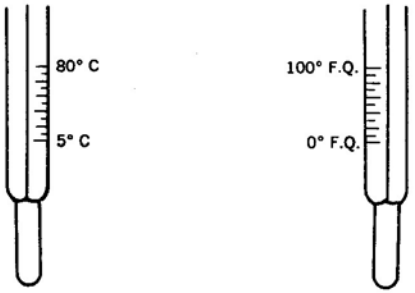
Si el punto de fusión es de 5 °C y el de ebullición 80 °C, calcule:

a) la temperatura en la nueva escala del cero absoluto.

b) a qué temperatura en la escala Celsius corresponden 200 °FQ.

c) a qué temperatura en la nueva escala corresponden 794 °R.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Del enunciado se puede encontrar que 100 °FQ corresponden en tamaño a 75 °C, lo cual nos ayudará a obtener la fórmula de conversión.

2.2 Conversión

$$T\ °C = 75\ °FQ/100 + 5 = 0.75\ FQ + 5$$

3. Cálculos

3.1 · Cero absoluto

$$-273 = 0.75\ FQ + 5 \therefore FQ = -370\ °$$

3.2 Doscientos grados FQ

$$T\ °C = 0.75\ (200) + 5 \qquad T\ °C = 155$$

3.3 Setecientos noventa y cuatro grados Rankine

$°K = 794/1.8 = 441$ $°C = 441 - 273 = 168\ °C$

$168 = 0.75\ FQ + 5$ $FQ = 217.3\ °$

4. **Resultados**

El cero absoluto corresponde a $-370\ °FQ$

$200\ °FQ = 155\ °C$

$794\ °R = 217.3\ °FQ$

Problema 2.10

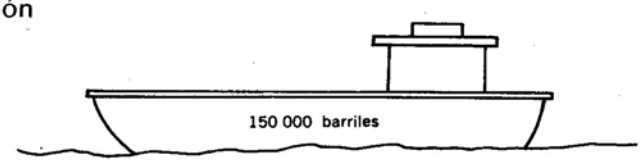
Un buque-tanque transporta 150 000 barriles de petróleo crudo cuya densidad relativa es de 0.82.

Calcule el número de m^3 de petróleo y el número de toneladas métricas que transporta.

Si el precio del barril es de 35 dólares, ¿cuál es el valor del cargamento en pesos mexicanos?

Nota: Conversión 23.5 pesos por dólar.

1. Traducción



$\rho_R = 0.82$

$\$ = 35 \frac{dls}{barril}$

$V = ?$

$m = ?$

valor = ?

2. Planteamiento

2.1 Discusión

Para calcular el volumen sólo se deberán hacer las conversiones de unidades necesarias. La masa de petróleo se obtendrá multiplicando el volumen por la densidad absoluta del petróleo.

2.2 Masa de petróleo

$$m = V\ (\rho_R)\ (\rho_{H_2O})$$

2.3 Valor del cargamento

$$\text{valor} = \text{costo}\ (V)$$

3. Cálculos

3.1 Volumen en m^3

$$V = 150\,000 \text{ barriles } (42 \text{ galones/barril}) (3.785 \text{ l/gal}) (1 \text{ m}^3/1\,000 \text{ l}) = 23\,845.5 \text{ m}^3$$

3.2 Masa del petróleo

$$m = 23\,845.5 \text{ m}^3 (0.82) (1\,000 \text{ kg/m}^3) (1 \text{ ton}/1\,000 \text{ kg}) = 19\,553.31 \text{ toneladas}$$

3.3 Valor del cargamento

$$\text{valor} = 150\,000 \text{ barriles } (35 \text{ dólares/barril}) (23.5 \text{ pesos/dólar}) = 123\,375\,000 \text{ pesos}$$

4. Resultados

El barco transporta 23 845.5 m^3 de petróleo que pesan 19 553.31 toneladas y que tienen un valor de 123 375 000 pesos.

Problema 2.11

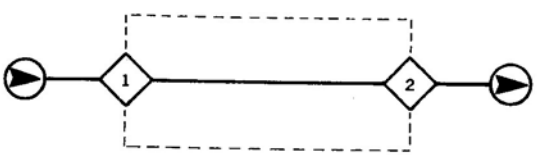
Por una tubería de 1.049 pulgadas de diámetro interior y 1.4 millas de longitud viaja un fluido más ligero que el agua que tiene una densidad de 33.74 °Be. Calcule:

a) la cantidad de m^3 de fluido contenido en la tubería.

b) la masa de fluido contenido en la tubería.

c) el gasto volumétrico si el fluido viaja a la velocidad de 3 m/s.

1. Traducción



$l_{1a2} = 1.4$ millas
$DI = 1.049$ pulg.
$\rho = 33.74°$ Bé
$U = 3 \frac{m}{s}$

2. Planteamiento

$V = ?$
$m = ?$

2.1 Discusión

Para resolver este problema, se deberá obtener el volumen interno de la tubería y multiplicarlo por la densidad absoluta para lograr la masa de fluido.

2.2 Volumen de la tubería

$$V = \pi/4 \; D^2 l$$

2.3 Masa de fluido

$$\rho\ °\text{Be} = 140/\rho_R - 130 \qquad \rho^{\text{fluido}} = \rho_R\ (\rho_{H_2O})$$

$$m = \rho^{\text{fluido}}\ V$$

2.4 Gasto volumétrico

$$Ca = uA$$

3. Cálculos

3.1 Volumen

$$D = 1.049 \text{ pulgadas } (2.54 \text{ cm/pulg})\ (1 \text{ m}/100 \text{ cm}) = 0.02664 \text{ m}$$

$$V = \pi/4\ (0.02664 \text{ m})^2\ (1.4 \text{ millas})\ (1\,609 \text{ m}/1 \text{ milla}) = 1.255 \text{ m}^3$$

3.2 Masa del fluido

$$33.74 = 140/\rho_R - 130 \qquad \rho_R = 0.855$$

$$\rho^{\text{fluido}} = 0.855\ (1\,000 \text{ kg}/1 \text{ m}^3) = 855 \text{ kg/m}^3$$

$$m = 855\ (1.255) = 1073.02 \text{ kg}$$

3.3 Gasto volumétrico

$$Ca = 3 \text{ m/seg } (\pi/4)\ (0.02664 \text{ m})^2 = 0.0016 \text{ m}^3/\text{seg} = 100 \text{ l/minuto}$$

4. **Resultados**

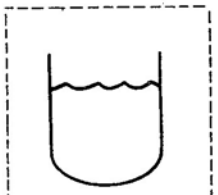
El volumen de fluido es de 1.255 m^3, la masa de 1 073 kg y el caudal de 100 litros por minuto.

Problema 2.12

Calcule la densidad en grados Baumé de una solución formada por el 20% en masa de benceno y el 80% de dicloroetano.

Datos: la densidad relativa a 25 °C del benceno es de 0.872 y la del dicloroetano a la misma temperatura es de 1.246.

1. Traducción



$(\rho_R)^B_{25°C} = 0.872$
$(\rho_R)^{DC}_{25°C} = 1.246$
(ρ_R) mezcla = ?

2. Planteamiento

2.1 Discusión

Para obtener la densidad de la mezcla consideramos que forman soluciones ideales, o sea, que no hay contracción de volúmenes.

2.2 Densidad relativa de la mezcla

$$\rho_R^{mezcla} = \rho_{R,B} x^B + \rho_{R,DC} x^{DC}$$

2.3 Densidad en grados Baumé.

La fórmula a emplearse dependerá de si la solución es más o menos densa que el agua.

3. Cálculos

3.1 Densidad relativa

$$\rho_R = 0.872\ (0.2) + 1.246\ (0.8) =$$
$$\rho_R = 0.1744 + 0.9968 = 1.1712$$

3.2 Densidad en grados Baumé

Para líquidos más pesados

$$°Be = 145 - (145/1.1712) = 145 - 123.80 = 21.19\ °Be$$

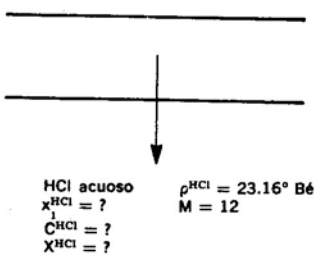
4. Resultado

La densidad de la solución es de 21.19 °Be.

Problema 2.13

Al analizar una corriente líquida de ácido clorhídrico se obtiene que su densidad es de 23.16 °Be y molaridad 12. ¿Cuál es la fracción peso, la concentración y la relación mol del HCl en la corriente?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

La corriente líquida de ácido clorhídrico es más pesada que el agua, por lo que se deberá usar la fórmula de grados Baumé para líquidos más densos que el agua y de allí se obtendrá la densidad relativa.

2.2 Grados Baumé

$$°\text{Be} = 145 - 145/\rho_R \qquad \rho = \rho_{H_2O}\,\rho_R$$

2.3 Concentración

$$M = \text{gramos mol/l solución}$$
$$C = M\,(PM)$$

2.4 Fracción masa

$$x^{HCl} = m^{HCl}/m^{Total}$$

2.5 Relación mol

$$\tilde{X}^{HCl} = (m_{HCl}/PM_{HCl})/(m_{H_2O}/PM_{H_2O})$$

3. Cálculos

3.1 Grados Baumé

$$145 - 145/\rho_R = 23.16 \quad \therefore \quad \rho = 1.19$$
$$\rho = 1.19\ (1\,000\ \text{g/l}) = 1\,190\ \text{g/l}$$

3.2 Concentración

$$C = 12\left(36.5\ \frac{\text{g HCl}}{\text{g mol HCl}}\right) = 438\ \frac{\text{g HCl}}{\text{l solución}}$$

3.3 Fracción masa

Tomando un litro de solución

$$438\ \text{g de HCl}$$
$$1\,190\ \text{g} - 438\ \text{g} = 752\ \text{g de } H_2O$$
$$x^{HCl} = 438/1\,190 = 0.3680\ \text{g } H_2O/\text{g de solución}$$

3.4 Relación mol

Tomando un litro de solución

$$\tilde{X}^{HCl} = \frac{\frac{438}{36.5}}{\frac{752}{18}} = \frac{12}{41.7} = 0.287\ \frac{\text{g mol de HCl}}{\text{g mol de } H_2O}$$

4. Resultado

La concentración de la solución es de 438 g de HCl por litro de solución, la fracción masa es de 0.368 y la relación mol de 0.287.

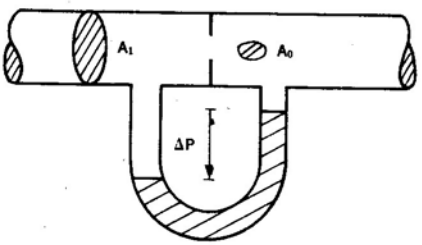
Problema 2.14

Para medir el gasto másico de un fluido que se mueve a través de una tubería, se utiliza un medidor de orificio, que da una diferencia de presiones entre la sección anterior y posterior al medidor, la cual se puede pasar a gasto másico por medio de la siguiente fórmula:

$$L = \rho\, C_o A_1 \sqrt{\frac{2gc\,(-\Delta P/\rho)}{\left(\frac{A_1^2}{A_o^2} - 1\right)}}$$

¿Qué unidades tendrá Co? Si $L = kg/s$, $\rho = kg/m^3$, $A_1 y A_o = m^2$, $\Delta P = \overrightarrow{kg/m^2}$ y $gc = 9.81\ N/\overrightarrow{kg}$.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Para que la ecuación sea consistente, las unidades deberán ser las mismas en cada lado de la igualdad.

3. Cálculo

3.1 Sustituyendo las unidades en la fórmula

$$L = \rho\, C_o A_1 \sqrt{2\, gc\,(-\Delta P/\rho)/[(A_1/A_o)^2 - 1]}$$

$$\frac{kg}{s} = C_o \frac{kg}{m^3}\, m^2 \sqrt{\frac{\frac{N}{\overrightarrow{kg}}\left(\frac{\overrightarrow{kg}}{m^2}\right)\left(\frac{m^3}{kg}\right)}{\left[\left(\frac{m^2}{m^2}\right)^2 - 1\right]}} = C_o \frac{kg}{m} \sqrt{\frac{N\,m}{kg}}$$

$$= C_o \frac{kg}{m} \sqrt{\frac{kg\ m\ m}{s^2\ kg}} = C_o \frac{kg}{m} \frac{m}{s}$$

$$\therefore \quad C_o = (kg/s)/(kg/s)$$

4. **Resultado**

C_o es adimensional y se conoce como coeficiente de descarga del orificio.

Problema 2.15

Para cierto proceso se requiere formar una solución que contenga 2.54 lb de cloruro de calcio por galón de solución. Si la densidad específica de la solución es de 1.218, encuentre:

a) La fracción peso de $CaCl_2$

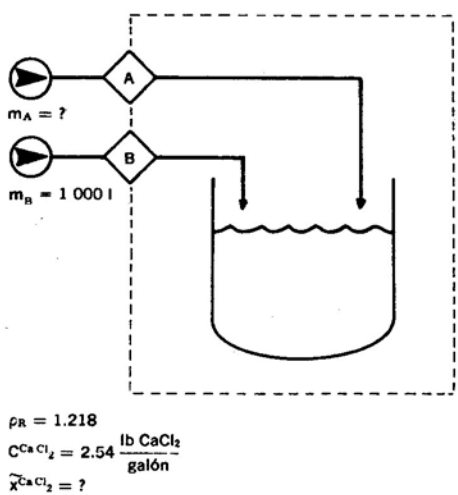
b) La fracción mol

c) La molaridad

d) La normalidad

e) Los kg de $CaCl_2$ que se necesitan agregar por cada 1 000 l de agua

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Se usarán las definiciones de cada uno de los conceptos para la resolución.

2.2 Fracción peso

$$x^{CaCl_2} = C^{CaCl_2}/(\rho_{H_2O}\ \rho_R)$$

2.3 Fracción mol

$$\tilde{x}^{CaCl_2} = \frac{\dfrac{x^{CaCl_2}}{PM^{CaCl_2}}}{\dfrac{x^{CaCl_2}}{PM^{CaCl_2}} + \dfrac{x^{H_2O}}{PM^{H_2O}}}$$

2.4 Molaridad

$$M = \text{gramos mol de } CaCl_2/1\,000 \text{ cm}^3 \text{ de la solución}$$
$$M = 1\,000\, C/PM^{CaCl_2} = 1\,000\, x^{CaCl_2}\, \rho \text{ sol}/PM^{CaCl_2}$$

2.5 Normalidad

$$N = \text{equivalentes gramo de } CaCl_2/1\,000 \text{ cm}^3 \text{ de solución}$$
$$N = 1\,000\, x^{CaCl_2}\, \rho \text{ sol}/Pe^{CaCl_2}$$

2.6 Kg de $CaCl_2$ necesarios

$$L^{CaCl_2} = X^{CaCl_2}\, L\, \rho$$

3. Cálculos

3.1 Fracción peso

$$x^{CaCl_2} = 2.54\ \frac{\text{lb } CaCl_2}{\text{gal}}\left(\frac{0.454 \text{ kg}}{\text{lb}}\right)\left(\frac{1 \text{ gal}}{3.785 \text{ l}}\right)\left(\frac{1 \text{ l sol}}{1 \text{ kg } H_2O}\right)\left(\frac{1 \text{ kg } H_2O}{1.218 \text{ kg sol}}\right) = 0.25$$

3.2 Fracción mol

$$\tilde{x}^{CaCl_2} = \frac{\dfrac{0.25}{110.986}}{\dfrac{0.25}{110.986} + \dfrac{0.75}{18}} = \frac{0.00225}{0.00225 + 0.04166} = 0.05124$$

3.3 Molaridad

$$M = \frac{0.25\ \dfrac{\text{kg } CaCl_2}{\text{kg sol}}\left(1.218\ \dfrac{\text{kg sol}}{\text{l}}\right)\left(1\,000\ \dfrac{\text{g}}{\text{kg}}\right)}{110.986 \text{ kg/kg mol } CaCl_2} = 2.743\ \frac{\text{g mol } CaCl_2}{\text{l}}$$

3.4 Normalidad

$$N = \frac{0.25\ \dfrac{\text{kg } CaCl_2}{\text{kg sol}}\left(1.218\ \dfrac{\text{kg sol}}{\text{l}}\right)\left(1\,000\ \dfrac{\text{g}}{\text{kg}}\right)}{55.493\ \dfrac{\text{kg } CaCl_2}{\text{kg eq } CaCl_2}} = 5.48$$

3.5 Kg de $CaCl_2$ necesarios

$$X^{CaCl_2} = 0.25/(1 - 0.25) = 0.333 \text{ kg } CaCl_2/\text{kg } H_2O$$

$$L^{CaCl_2} = 0.333 \frac{\text{kg } CaCl_2}{\text{kg } H_2O} (1\,000 \text{ l}_{H_2O}) \left(\frac{1 \text{ kg } H_2O}{1 \text{ l } H_2O}\right) = 333 \text{ kg de } CaCl_2$$

4. **Resultados**

La fracción peso del $CaCl_2$ es 0.25.

La fracción mol de $CaCl_2$ es 0.05124.

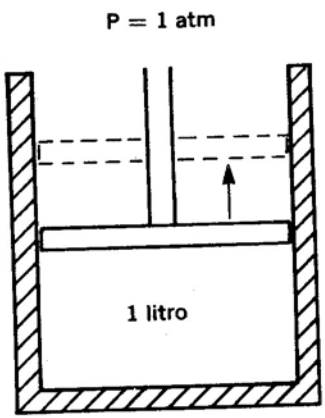
La molaridad es 2.743.

Se requieren 333 kg de $CaCl_2$ por cada 1 000 l de agua.

Problema 2.16

Se tiene un gas dentro de un recipiente con un pistón móvil. Se lleva a cabo la expansión con una fuerza externa igual a la presión de una atmósfera. Si aumentamos lentamente el volumen desde un litro hasta 2 litros ¿cuál será el trabajo efectuado?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Trabajo

$$\tau = Fd = (F/A)\,V \qquad \tau = \int_{V_1}^{V_2} P_{ex}\, dV = P_{ex}\,(V_2 - V_1)$$

3. Cálculo

3.1 Trabajo

$$\tau = 1 \text{ atm } (1 \text{ litro}) = 1 \text{ atm-litro}$$

$$1 \text{ atm-litro} \left(1.033 \frac{\vec{kg}}{cm^2 \text{ atm}}\right) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1\,000 \text{ l}}\right) \left(\frac{10\,000 \text{ cm}^2}{1 \text{ m}^2}\right) = 10.33 \vec{kgm}$$

$$10.33 \vec{kgm} = 101.33 \text{ J}$$

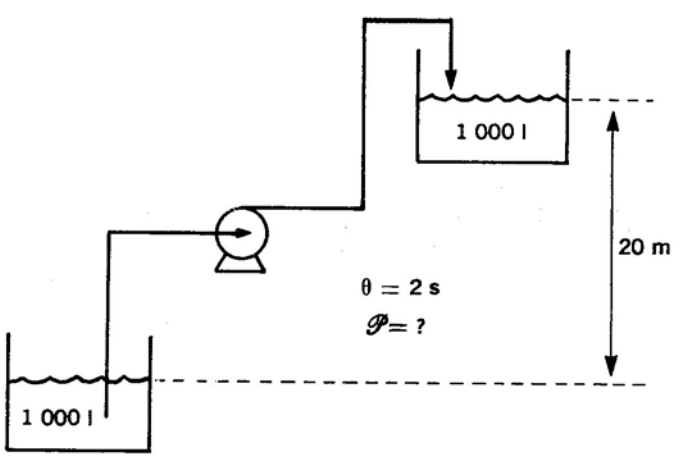
4. Resultado

El trabajo es de 101.33 julios o joules.

Problema 2.17

¿Qué potencia se necesita para elevar 1 000 l de agua a una altura de 20 m en un tiempo de dos segundos? Dé el resultado en kilovatios y en HP.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

En este caso, lo que se tiene que dar al agua es energía potencial.

2.2 Potencia

$$\mathscr{P} = \tau/\theta$$

2.3 Energía potencial

$$\tau = EP = m\,g\,h \qquad\qquad m = V\rho$$

3. Cálculos

3.1 Masa del agua

$$m = 1\,000\ l\ (1\ m^3/1\,000\ l)\ (1\,000\ kg/m^3) = 1\,000\ kg$$

3.2 Energía potencial

$$EP = 1\,000\ kg\ (9.81\ m/s^2)\ 20\ m = 196\,200\ kg\ m^2/s^2 = 196\,200\ J\ (julios)$$

3.3 Potencia

$$\mathscr{P} = 196\,200\ J/2\ s = 98\,100\ W\ (vatios)$$

$$98\,100\ W\ (1\ HP/745\ W) = 131.67\ HP$$

$$98\,100\ W\ (1\ kW/1\,000\ W) = 98.1\ kW$$

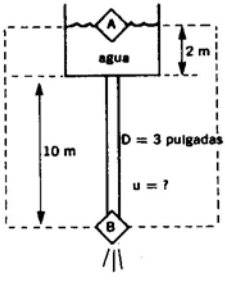
4. **Resultado**

La potencia es de 98.1 kW, 131.67 HP.

Problema 2.18

Un tanque está colocado a una altura de 10 m sobre el nivel del piso; del tanque sale una tubería de tres pulgadas. Si el agua llena el tanque hasta una altura de 2 m, ¿cuál será la velocidad con la que saldría el agua del tanque por el fondo de la tubería? Desprecie las pérdidas por fricción.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

En ausencia de fricciones, podemos indicar que toda la energía potencial se convertirá en energía cinética. EP = EC

2.2 Velocidad

$$EC = m\,u^2/2 = mg\,h \quad \therefore \quad u = \sqrt{2\,gh}$$

3. Cálculos

3.1 Velocidad

$$u = \sqrt{2\,(9.81)\ m/s^2\ (12)\ m} = 15.34\ m/s$$

4. Resultado

La velocidad con la que saldrá el agua por la tubería será de 15.34 m/s.

Problema 1.4

Convierta 1 000 W/(m² °C) a BTU/(h ft² °F)

1. Cálculos

$$1\,000\,\frac{W}{m^2\,°C}\left(\frac{1\,J}{s\,W}\right)\left(\frac{1\,kcal}{4\,180\,J}\right) = 0.2392\,\frac{kcal}{m^2\,s\,°C}$$

$$0.2392\,\frac{kcal}{m^2\,°C\,s}\left(\frac{1\,BTU}{0.252\,kcal}\right)\left(\frac{3\,600\,s}{1\,h}\right)\left(\frac{1\,°C}{1.8\,°F}\right)\left(\frac{(0.305\,m)^2}{1\,ft^2}\right) =$$

$$= 176.62\,\frac{BTU}{h\ ft^2\ °F}$$

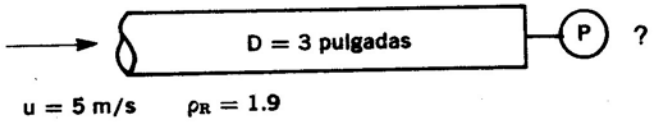
2. Resultado

$$1\,000\ W/m^2\ °C = 176.62\ BTU/h\ ft^2\ °F$$

Problema 2.19

Un líquido de densidad relativa igual a 1.9 viaja por una tubería de tres pulgadas de diámetro interior a una velocidad de 5 m/s. Si se cerrara de pronto la tubería, ¿qué presión se ejercería en la línea?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

En este caso, toda la energía cinética se convierte en energía de presión

$$E\,Pe = EC$$

2.2 Presión

$$PV = (m/gc)\,(u^2/2)$$

$$P = (m/V)\,(u^2/gc\,2) = (\rho\,u^2)/(2\,gc)$$

$$\rho = \rho_R\,\rho_{H_2O}$$

Se agrega el término gc para homogeneizar el sistema de unidades en ambos lados.

3. Cálculos

3.1 Presión

$$P = 1.9\,(1\,000)\ kg/m^3\,(5\ m/s)^2\,(1/2)\,(1\ s^2\ \vec{kg}/9.81\ kgm) =$$

$$= 2\,420.99\ \vec{kg}/m^2 = 0.242099\ \vec{kg}/cm^2 = 0.234\ atm$$

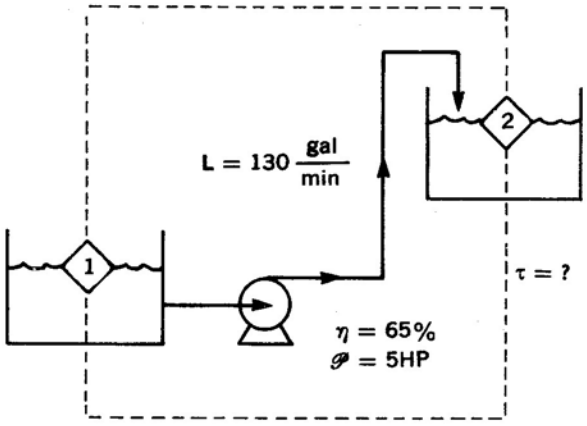
4. **Resultado**

Se ejercería una presión de 0.242 $\vec{kg}/cm^2$ o de 0.234 atm.

Problema 2.20

Se lleva una solución de 1.84 de densidad relativa de un tanque a otro por medio de una bomba de 5 HP y con una eficiencia del 65 por 100. El gasto manejado es de 1.30 gal/min. Calcule el trabajo adicionado al sistema por unidad de masa.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

La potencia real dada al fluido será:

$$\mathscr{P}\ \text{real} = \mathscr{P}\ \eta$$

El trabajo dado al fluido se obtiene por medio de:

$$\tau = \mathscr{P}/L$$

2.2 Gasto

$$L = \mathbf{L}\ \rho$$

3. Cálculos

3.1 Gasto

$$L = 130\ \text{gal/min}\ (1\ \text{ft}^3/7.48\ \text{gal})\ (1.84)\ (62.3\ \text{lb/ft}^3) = 1992.26\ \text{lb/min}$$

3.2 Potencia real

$$\mathscr{P}\ \text{real} = 5\ \text{HP}\ (0.65) = 3.25\ \text{HP}$$

3.3 Trabajo

$$\tau = \frac{\mathscr{P}\ \text{real}}{L} = 3.25\ \text{HP}\ (33\ 000)\ \frac{\text{ft-}\vec{\text{lb}}}{\text{min HP}}\left(\frac{\text{min}}{1992.26\ \text{lb}}\right) =$$

$$= -\ 53.83\ \frac{\text{ft-}\vec{\text{lb}}}{\text{lb}}$$

4. **Resultado**

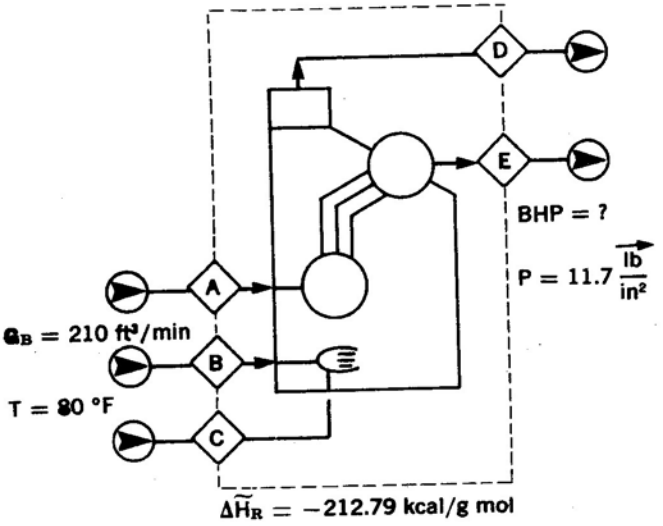
El trabajo proporcionado al sistema es de $-\ 53.83\ \text{ft-}\vec{\text{lb}}/\text{lb}$. El trabajo tiene signo negativo porque se adiciona al sistema.

Problema 2.21

Un caballo de caldera BHP es igual a 33 475 BTU/h o la potencia necesaria para evaporar 34.5 lb de agua por hora a 212 °F.

Si se queman 210 ft^3/min de metano medidos a 11.7 $\vec{\text{lb}}/\text{in}^2$ y 80 °F desprendiéndose 212.79 kcal/g mol de metano quemado, y si toda esta energía se aprovechara en un 100 por ciento para la evaporación de agua, ¿qué caballaje tendría la caldera?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Masa de metano

$$\tilde{n} = \frac{PG}{RT}$$

2.2 Calor desprendido

$$Q = \tilde{n}\,\Delta\,\tilde{H}_R$$

$$\mathscr{P} = \frac{\text{Energía}}{\text{Tiempo}}$$

2.3 Potencia

3. Cálculos

3.1 Masa de metano

$$G = 210\,\frac{ft^3}{min}\left(\frac{(0.305)^3\,m^3}{ft^3}\right)\left(\frac{1\,000\,l}{1\,m^3}\right) = 5\,958\,\frac{l}{min}$$

$$P = 11.7\,\frac{\vec{lb}}{in^2}\left(\frac{1\text{ atm}}{14.7\,\frac{\vec{lb}}{in^2}}\right) = 0.7959\text{ atm}$$

$$T = (80 - 32)/1.8 = 26.6\,^{\circ}C = 299.66\,^{\circ}K$$

$$\tilde{n} = [0.7959\,(5\,958)]/[0.082\,(299.66)] = 192.98\text{ g mol de metano/min}$$

3.2 Calor desprendido

$$Q = 192.98\,(-212.79) = -41\,064.2\text{ kcal/min}$$

3.3 Potencia

$$\mathscr{P} = 41\,064.2\text{ kcal/min (BTU/0.252 kcal) (60 min/1 h) (1 BHP/33 475 BTU/h)}$$

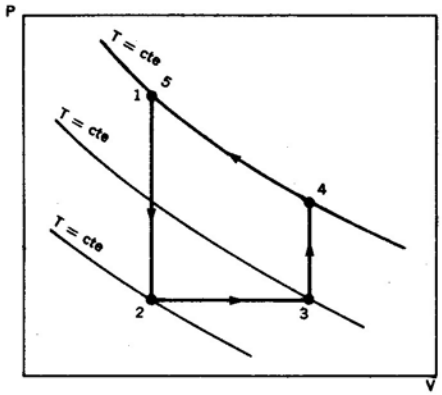
$$\mathscr{P} = 292.07\text{ BHP}$$

4. **Resultado**

La caldera tendrá 292 BHP, aproximadamente.

Problema 2.22

Indique qué tipos de procesos se están efectuando en el siguiente diagrama PV y si se efectúa o no un ciclo

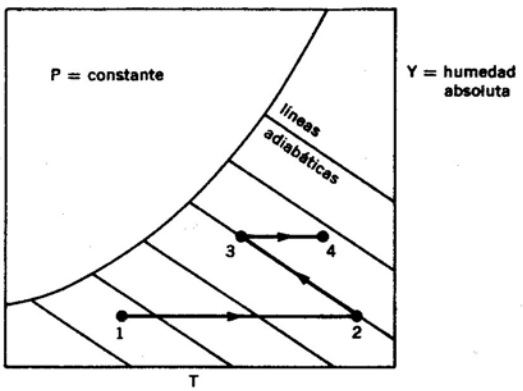


1. **Resultados**

En el diagrama anterior se están llevando a cabo dos procesos a volumen constante, 1-2 y 3-4, un proceso a presión constante 2-3 y otro isotérmico, o a temperatura constante 4-5. Se lleva a cabo un ciclo porque la sustancia utilizada en el proceso regresa a sus condiciones iniciales.

Problema 2.23

Los procesos para acondicionar aire se pueden presentar en una carta psicrométrica en la que se representa la humedad del aire frente a la temperatura. ¿Qué procesos se están llevando a cabo en el sistema siguiente?

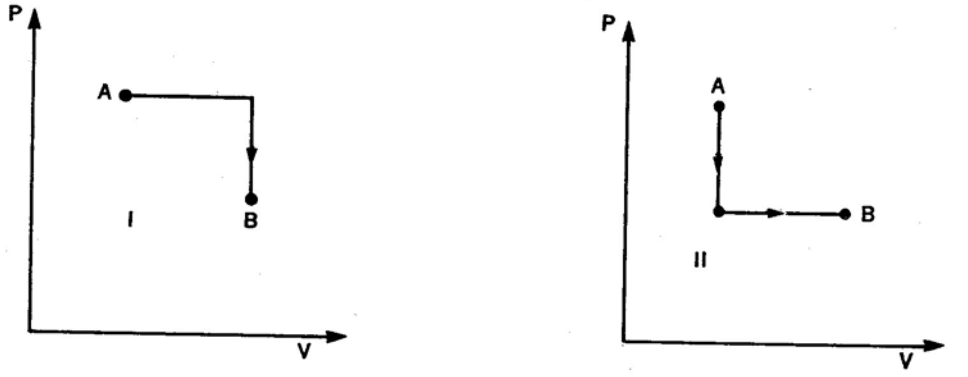


1. **Resultados**

De 1 a 2 se lleva a cabo un calentamiento a presión y humedad constantes. De 2 a 3 se lleva a cabo una humidificación adiabática. De 3 a 4 se presenta otro proceso de calentamiento isobárico.

Problema 2.24

Para llevar una sustancia del estado A al B se utilizan dos clases de procesos. Indique cuál requerirá de más trabajo



1. Discusión

El trabajo se define más bien como un proceso que como estado de un sistema. Para conocer y calcular el trabajo debemos conocer cómo P depende de V. Esto, a su vez, depende de cómo se hace el proceso, y por lo tanto debemos esperar encontrar que procesos diferentes dan diversas cantidades de trabajo, aun cuando el cambio de volumen del sistema sea el mismo. Resumiendo, el trabajo depende del paso seguido. El trabajo en un diagrama PV es igual al área situada bajo las curvas: $\tau = \int P_{ex}\, dV$.

2. **Resultado**

El área situada bajo la curva en el proceso II es menor que en el proceso I.

PROBLEMAS PROPUESTOS

Problema 2.25

Convierta

$$20\ \frac{\text{BTU}}{\text{h ft}^2\ ^\circ\text{F}} \quad \text{a} \quad \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2\ ^\circ\text{C s}}$$

Resultado

0.027 kcal/m² s °C.

Problema 2.26

Un hidrocarburo produce 18 500 BTU/lb al quemarse completamente. Si todo ese calor desprendido se convirtiera en trabajo, ¿cuántos julios por cada kilogramo de hidrocarburo quemado se producirían?

Resultado

Se generarían 42.96 (10^6) J/kg.

Problema 2.27

Calcúlese el trabajo consumido por un tren de 120 toneladas cuando recorre una rampa de 3 500 m de longitud y 1 por 100 de pendiente, despreciando las pérdidas por fricción.

Resultado

El trabajo es de 4 200 000 $\vec{kg}$m.

Problema 2.28

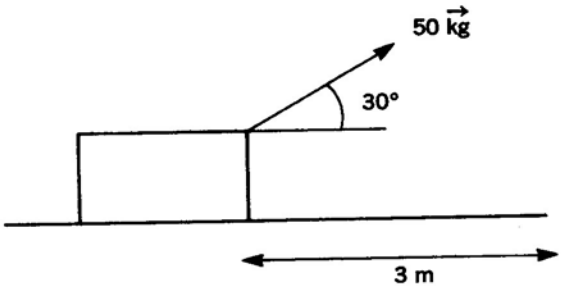
Si el tren del problema anterior recorre los 3 500 m en veinte minutos, ¿cuál será la potencia?

Resultado

La potencia es de 34 335 vatios.

Problema 2.29

¿Cuál es el trabajo efectuado en el siguiente sistema, si la caja se mueve 3 m?



Resultado

El trabajo es de 129.9 $\overrightarrow{kgm}$.

Problema 2.30

Al quemar metano se desprenden 212.79 kcal/g mol. Si se queman 350 l de metano medidos a 30 °C y 700 mm de Hg ¿cuántas kilocalorías se desprenderán?

Resultado

Se desprenden 2 760.87 kcal.

Problema 2.31

Una bala de cañón de 100 kg viaja a una velocidad de 500 m/s. Encuentre la cantidad de calor que se produciría si la bala se detuviera repentinamente.

Resultado

Se producirán 2990.43 kcal.

Problema 2.32

Una bomba de 5 C.V. y con una eficiencia del 45 por ciento se usa para bombear 500 gal/h de agua. ¿Qué trabajo se le transmite al sistema?

Resultado

El trabajo es de $-321.42 \overrightarrow{kgm/kg}$

Problema 2.33

Indique tres ejemplos de:

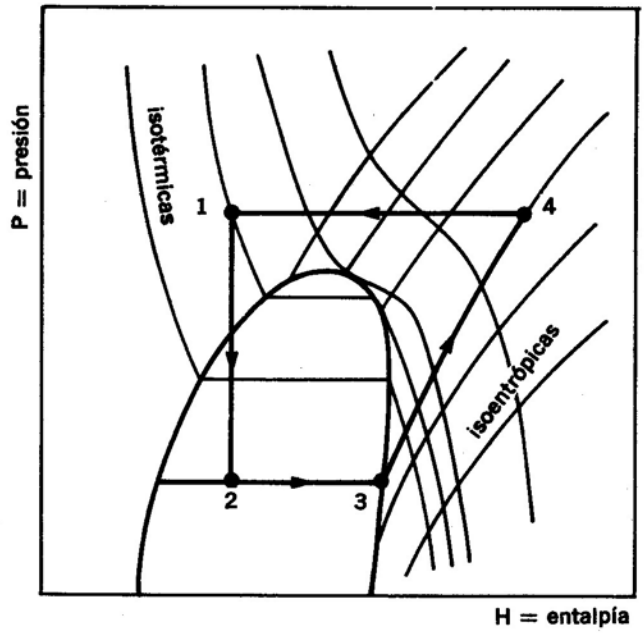
a) Sistemas abiertos

b) Sistemas cerrados

c) Sistemas aislados

Problema 2.34

El ciclo empleado para licuar gases se puede presentar en un diagrama entalpía-presión. Indique los procesos que se llevan a cabo.



Problema 2.35

El flujo másico en un punto del sistema es de 6.47 (10^{-5}) lb mol/sft². ¿Cuál será ese flujo expresado en kg mol/hm²?

Resultado

El flujo será de 1.136.

Problema 2.36

La viscosidad del agua a la temperatura de 15 °C es de 1 centipoise. ¿Cuál es el valor de esa viscosidad en lb/fts?

Nota: 1 centipoise = 0.01 poise = 1 g/cms.

Resultado

La viscosidad es de 0.0006718 lb/fts.

Problema 2.37

Demuestre que el número de Nusselt hD/k, el número de Reynolds $Dv\rho/\mu$ y el número de Pradlt $Cp\mu/k$ son adimensionales, reduciéndolos a las dimensiones fundamentales M,L,T,θ.

Datos:

h = coeficiente de transferencia de calor
energía/(tiempo) (área) (diferencia de T)
D = diámetro
k = conductividad térmica = energía/(tiempo)
(área) (diferencia de temperatura/longitud)
u = velocidad
μ = viscosidad = masa/(longitud) (tiempo)
ρ = densidad
Cp = Capacidad calorífica = energía/(masa) (diferencia de temperaturas)

Problema 2.38

Calcule la concentración en % en peso, % en mol, y en gramos de soluto por mililitro de solución de 72.4 g de NaOH en 1 000 ml de agua.

Resultado

La fracción peso es de 0.0675, la fracción mol de 0.0315, la concentración de 0.0698 gramos de NaOH por ml de solución.

Problema 2.39

En una ciudad de Estados Unidos se anuncia una temperatura de 50 °F. ¿Significa esto que será un día muy caluroso?

Resultado

Es un día frío, la temperatura es de 10 °C.

Problema 2.40

Si se disuelven 350 g de cloruro de zinc anhidro (densidad relativa 2.91) en 650 g de agua, se obtiene una solución cuyo volumen total a 20 °C es de 740 ml.

Calcule:

a) La densidad de la solución

b) La normalidad del $ZnCl_2$

c) La molalidad del $ZnCl_2$

d) La fracción molar del $ZnCl_2$

e) La fracción peso del $ZnCl_2$

f) El % en volumen del $ZnCl_2$

Resultado

La molaridad es 3.46, la normalidad 6.92, la molalidad 3.93, la fracción mol 0.0662, la fracción peso 0.35, el % en volumen 16.25.

Problema 2.41

¿Cuál es la presión en milímetros de mercurio en el fondo de un tanque de 30 pies de alto que está abierto a la atmósfera y lleno de agua a 18 °C y localizado en la ciudad de México?

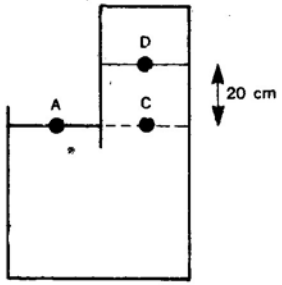
Resultado

1 259.18 mm de Hg.

Problema 2.42

¿Cuál será la presión absoluta que deberá existir en el punto D del siguiente sistema para que esté en equilibrio?

Datos: En el punto A la presión manométrica es de 0, medida al nivel del mar. El líquido tiene una densidad relativa de 0.9.



Resultado

La presión en D es de 746.75 mm de Hg.

Problema 2.43

La densidad de una disolución es de 8.8 libras por galón.

Encuentre las dimensiones que debe tener un tanque cilíndrico, cuya altura sea igual al diámetro, para contener 5 toneladas métricas de dicha disolución.

Resultado

El volumen es de 4.737 m^3 y la altura de 1.82 m.

Problema 2.44

Un camión petrolero contiene 4 000 litros de petróleo de densidad igual a 26 °API a 15 °C. Calcule las toneladas de petróleo que transporta el camión.

Resultado

El camión transporta 3.593 toneladas.

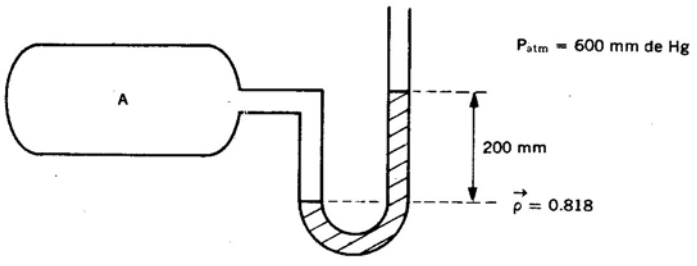
Problema 2.45

Si $\widetilde{U}$ es la energía libre molar, T la temperatura, P la presión, $\widetilde{V}$ el volumen molar y $\widetilde{H}$ la entalpía molar, indique si es correcta desde el punto de vista dimensional la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{\delta \widetilde{U}}{\delta T}\right)_{\widetilde{V}} = T\left(\frac{\delta \widetilde{V}}{\delta T}\right)_P^2\left(\frac{\delta P}{\delta \widetilde{V}}\right)_T + \left(\frac{\delta \widetilde{H}}{\delta T}\right)_P$$

Problema 2.46

¿Cuál es la presión que existe dentro del tanque?



Resultado

La presión en el tanque es de 612.036 mm de Hg.

Problema 2.47

La variación de la capacidad calorífica del metano está dada por:

$$\widetilde{Cp} = a + b\,T + c\,T^2 = 3.42 + 9.91\ (10^{-3})\ T - (1.28)\ (10^{-6})\ T^2$$

Donde $\widetilde{Cp}$ = B T U/lb mol °R y T en grados Rankine.

¿Cómo se debería arreglar la fórmula para que el Cp diera en kcal/kg mol °K y la temperatura se diera en °K?

Resultado

$$\widetilde{Cp} = 3.42 + 17.838\ (10^{-3})\ T - 4.147\ (10^{-6})\ T^2$$

Problema 2.48

Un manómetro indica una lectura de 25 pulgadas de mercurio. La presión barométrica es de 715 mm de Hg. Calcule la presión absoluta del gas en:

a) Pulgadas de mercurio

b) Libras por pulgada cuadrada

c) Pies de agua

d) Atmósferas

e) Megabarias

f) Kilonewtons/m²

Resultados

La presión es igual a 53.14 pulgadas de Hg, 26.1 $\overrightarrow{\text{lb/pulg}^2}$, 60.22 pies de agua, 1.775 atm, 1.801 megabarias, 180.1 kN/m².

Problema 2.49

Una escala de temperaturas que aún se usa en algunos países europeos es la de Réaumur. En esta escala 0 °Re corresponden a la temperatura de fusión del hielo y 80 °Re a la temperatura de ebullición del agua.

¿Cuál es la temperatura del cero absoluto en esta escala?

Resultado

La temperatura es de −218.4 grados Reaumur.

Problema 2.50

¿Cuál es el porciento en peso de sal contenido en una disolución saturada a 0 °C? ¿Cuántos kg de sal habrá disueltos en 1 250 litros de disolución?

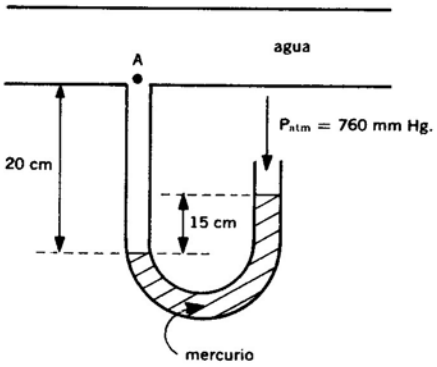
Datos: A 0 °C una disolución de agua y sal contiene 23.5 g de sal por 1 000 cm³ de disolución que tiene una densidad de 1.16 g/cm³.

Resultado

Se disolverán 29.3625 kg de sal.

Problema 2.51

¿Cuál será la presión dentro de la tubería, si se mide la presión con un manómetro como el que se muestra en la figura?



Resultado

La presión en la tubería es de 1.178 atmósferas absolutas.

CAPÍTULO 3

BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA GENERALIDADES

OBJETIVOS

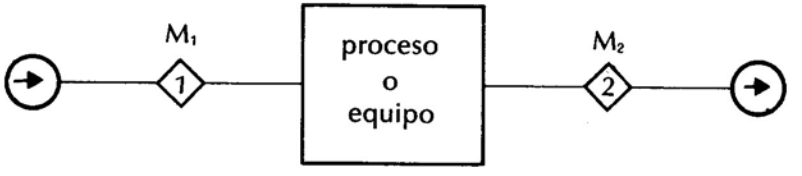
Al terminar de leer el capítulo, el lector: **a)** Conocerá los diversos tipos de balances de materia que pueden presentarse. **b)** Podrá plantear problemas de materia. **c)** Conocerá los diversos tipos de balances de energía que pueden presentarse. **d)** Será capaz de plantear balances de energía.

BREVE RESUMEN TEORICO

Los balances de masa y de energía se basan en la aplicación correcta de las leyes de la conservación de la masa y la energía y pueden llegar a ser muy complicados. Sólo la resolución sistemática de muchos de ellos creará la intuición necesaria para resolver casos nuevos. Un balance de materia o de energía es un procedimiento que lleva la contabilidad exacta de la materia entrante y saliente de un proceso. El balance de materia se basa en la ley de la conservación de la masa enunciada por Lavoisier de la siguiente manera: Nada puede crearse y en cada proceso hay exactamente la misma cantidad de sustancia presente antes y después de que el proceso haya sucedido. Solamente hay un cambio o modificación de la materia. El balance de energía se basa en la ley de la conservación de la energía enunciada por Hemholtz, que indica que la energía para un proceso químico no se crea ni se destruye, sólo se transforma.

Basándose en las leyes anteriores se puede escribir para un proceso o un equipo lo siguiente:

$$\left\{\begin{array}{l}\text{Rapidez de}\\ \text{entrada de la}\\ \text{materia en}\\ \text{el proceso}\\ \text{o equipo}\end{array}\right\} = \left\{\begin{array}{l}\text{Rapidez de}\\ \text{salida de la}\\ \text{materia en}\\ \text{el proceso}\\ \text{o equipo}\end{array}\right\} + \left\{\begin{array}{l}\text{Rapidez con}\\ \text{la que se}\\ \text{acumula la}\\ \text{materia en el}\\ \text{proceso o equipo}\end{array}\right\}$$



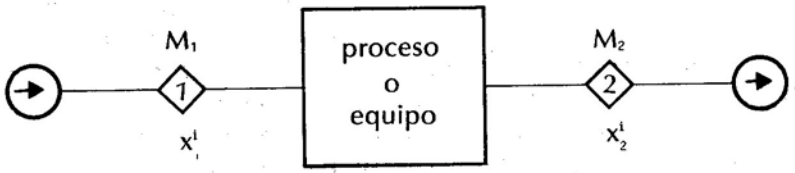
$$M_1 = M_2 + \frac{dM}{d\theta}$$

En donde

M_1 = Gasto entrante (Masa/tiempo)
M_2 = Gasto saliente (Masa/tiempo)
$\frac{dM}{d\theta}$ = Acumulación de masa

En muchas ocasiones los balances deben efectuarse para alguna o algunas sustancias en especial. Esto da origen a los balances parciales. En los balances parciales de masa se tiene en cuenta que una especie química puede aparecer o desaparecer por medio de una reacción química, por lo que hay que incluir el término de generación. En general el balance parcial para la sustancia *i* quedaría como:

$$\left\{\begin{array}{l}\text{Rapidez de}\\ \text{entrada de}\\ \text{la sustancia}\\ i \text{ en el}\\ \text{proceso o}\\ \text{equipo}\end{array}\right\} = \left\{\begin{array}{l}\text{Rapidez de}\\ \text{salida de}\\ \text{la sustancia}\\ i \text{ en el}\\ \text{proceso o}\\ \text{equipo}\end{array}\right\} + \left\{\begin{array}{l}\text{Rapidez de}\\ \text{acumulación}\\ \text{de la}\\ \text{sustancia } i\\ \text{en el proceso}\\ \text{o equipo}\end{array}\right\} + \left\{\begin{array}{l}\text{Rapidez de}\\ \text{generación}\\ \text{de la}\\ \text{sustancia}\\ i \text{ en el}\\ \text{proceso}\\ \text{o equipo}\end{array}\right\}$$



$$M_1\, x_1^i = M_2\, x_2^i + \frac{d\,(M\,x^i)}{d\,\theta} + r_1\, V$$

En donde:

x_1^i = fracción masa de la sustancia *i* a la entrada
x_2^i = fracción masa de la sustancia *i* a la salida
r_1 = generación de *i* $\frac{\text{kg de } i}{\text{h m}^3}$
V = volumen del reactor

El término rapidez neta de acumulación de masa puede ser positivo, negativo o cero, según haya aumentado o disminuido la materia acumulada o que no exista ninguna acumulación. Cuando, en un proceso, la cantidad de materia entrante es igual a la cantidad de materia saliente se dice que el proceso trabaja a régimen permanente. En el régimen no permanente o transitorio las condiciones varían con el tiempo.

En los procesos empleados en ingeniería química no hay rapidez neta de aparición de materia en un sistema termodinámico.

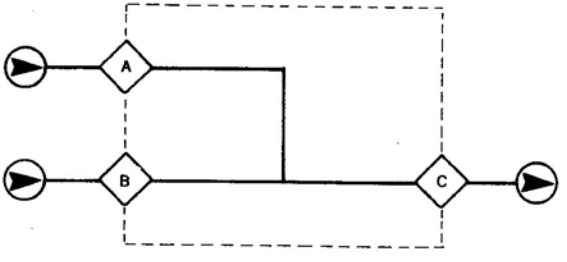
BALANCES SIMPLES DE MASA

Se llaman balances simples de masa aquéllos en los que no hay reacción química o en los que no se necesita alguna ecuación o gráfica de equilibrio físico para su resolución, y en que, además, el régimen de operación es permanente. En general, se pueden presentar los siguientes casos de balances simples de masa:

a) mezclado
b) separación
c) contacto a contracorriente
d) contacto en paralelo
e) balance con recirculación
f) balance con derivación

MEZCLADO

Los balances simples de mezclado se presentan cuando dos corrientes se unen para dar una o más corrientes de salida. En el caso más simple tendremos:



Balance total de masa

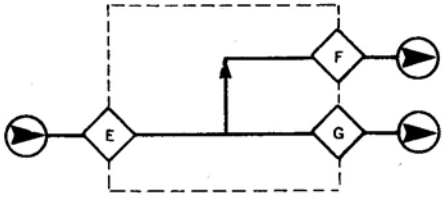
$$M_A + M_B = M_C$$

Balance parcial del componente i de la mezcla

$$M_A z_A^i + M_B z_B^i = M_C z_C^i$$

SEPARACION

Este tipo de balance se efectúa en procesos o equipos en los que hay una corriente de entrada y dos corrientes de salida.



Balance total

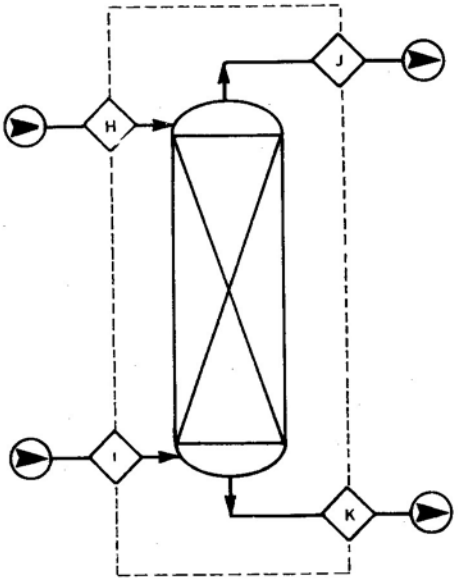
$$M_E = M_F + M_G$$

Balance parcial del componente i

$$M_E z^i_E = M_F z^i_F + M_G z^i_G$$

CONTACTO A CONTRACORRIENTE

En este tipo de balance se tienen dos corrientes de entrada y dos de salida y dichas corrientes viajan en direcciones opuestas en el proceso o en el equipo.



Balance total

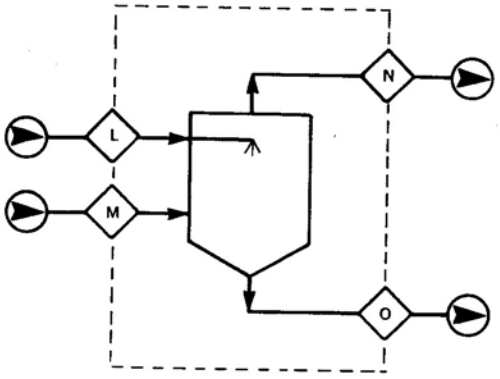
$$M_H + M_I = M_J + M_K$$

Balance parcial de componente i

$$M_H z^i_H + M_I z^i_I = M_J z^i_J + M_K z^i_K$$

CONTACTO EN PARALELO

Existe cuando se tienen dos corrientes de entrada y dos corrientes de salida que viajan en la misma dirección dentro del proceso o del equipo.



Balance total

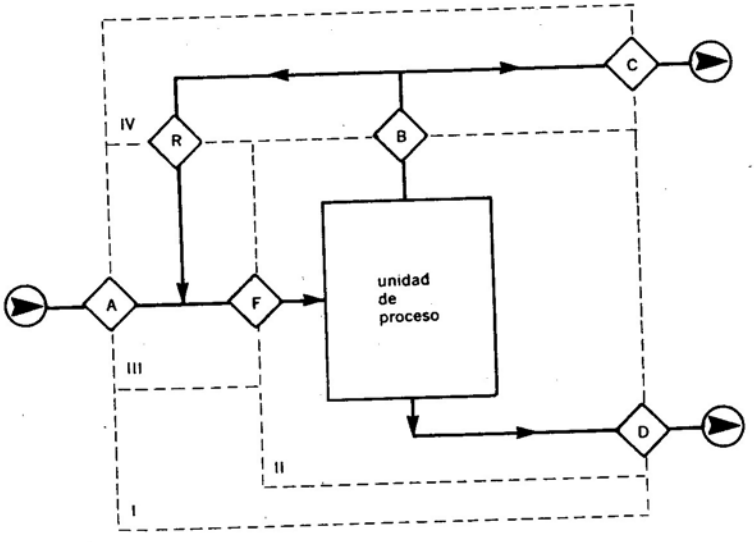
$$M_L + M_M = M_N + M_O$$

Balance parcial del componente i

$$M_L z^i_L + M_M z^i_M = M_N z^i_N + M_O z^i_O$$

BALANCES CON RECIRCULACION

En ciertos procesos es necesario retroalimentar el material a la unidad de que proviene con objeto de enriquecer los productos, reprocesar el material que no sufrió cambios, aumentar rendimientos, etc. En estos procesos los balances de materia son una combinación de balances de separación y mezclado.



Balance en la envolvente I (separación)

$$M_A = M_C + M_D$$

Balance en la envolvente II (separación)

$$M_F = M_B + M_D$$

Balance en la envolvente III (mezclado)

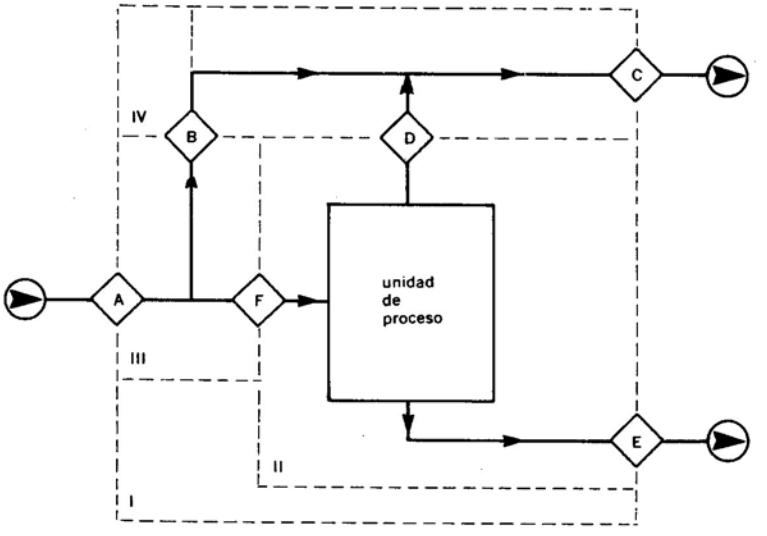
$$M_A + M_R = M_F$$

Balance en la envolvente IV (separación)

$$M_B = M_R + M_C$$

BALANCES CON DERIVACION

En ciertos tipos de procesos la corriente principal se divide en dos corrientes paralelas: una que alimenta al equipo, y otra que se mezcla con la corriente que sale del equipo. El objeto de esta separación es el de mantener una uniformidad en la concentración de descarga. También se logra con esta operación tener equipos de tamaño más reducido de los que se tendrían si se alimentara toda la corriente. Los balances que se presentan son parecidos a los obtenidos en recirculación.



Balance en la envolvente I (separación)

$$M_A = M_C + M_E$$

Balance en la envolvente II (separación)

$$M_F = M_D + M_E$$

Balance en la envolvente III (separación)

$$M_A = M_B + M_F$$

Balance en la envolvente IV (mezclado)

$$M_B + M_D = M_C$$

BALANCES USANDO EL EQUILIBRIO FISICO

Muchos de los procesos utilizados en la industria química tienen que ver con las llamadas operaciones de transferencia de masa. En estas operaciones los balances están gobernados no sólo por las corrientes entrantes y salientes, sino también por el equilibrio físico que determina la concentración máxima que puede existir de cada componente en cada una de las fases que se ponen en contacto.

El equilibrio se puede presentar en forma de tablas, ecuaciones o gráficas. Las variables principales que determinan el estado de equilibrio son: la temperatura, la presión y la concentración de las sustancias en las fases.

Un ejemplo ilustrativo de lo anterior es el caso de la disolución del cloruro de sodio en agua a 20 °C. A partir de datos experimentales se

puede demostrar que la cantidad máxima de cloruro de sodio que se puede disolver en agua a esa temperatura es de 36 partes en masa por cada 100 partes de agua. Si se agrega más sal, ésta permanecerá en el fondo del recipiente sin disolverse.

Por la importancia de estos balances se dedicarán algunos capítulos de este libro a las principales operaciones de transferencia de masa, y se tratarán en ellos con más detalle los equilibrios físicos que los gobiernan.

BALANCES CON REACCION QUIMICA

Cuando hay una reacción química, los compuestos individuales que forman las corrientes cambian en cantidad, y aun pueden llegar a desaparecer mientras se crean otros. En estos casos, el balance gira alrededor de la reacción química: esto es debido a que los símbolos y fórmulas que se emplean al escribir las ecuaciones químicas tienen un significado tanto cualitativo como cuantitativo.

LA ECUACION QUIMICA; ESTEQUIOMETRIA

Los químicos representan cada reacción química con una ecuación que resume la información mínima necesaria sobre las proporciones relativas de las sustancias que toman parte en una reacción y los productos que de ella se obtienen.

La reacción química tiene su base en la ley de la conservación de la materia que dice: "en cualquier reacción química la masa total de los productos es igual a la masa total de los reactivos".

Toda ecuación química indica la naturaleza de los átomos y la supuesta composición de las moléculas que intervienen en la reacción química, lo mismo que la proporción de las moléculas en los productos. Estas relaciones se expresan por medio de fórmulas.

Fórmula

La fórmula de un compuesto expresa el número y la clase de los átomos existentes en dicho compuesto. Esta fórmula es una especie de clave diseñada para presentar la información de manera apropiada. La solución de la clave es la masa atómica de los elementos; esta masa atómica (o peso atómico) indica la masa relativa de los atómos. Los pesos atómicos de los elementos se encuentran en la llamada tabla de pesos atómicos (Apéndice II).

Peso molecular

El peso molecular de una sustancia es igual a la suma de los pesos atómicos de los elementos que la componen.

Para efectuar los cálculos sobre pesos moleculares se procede de la siguiente manera: se escribe la fórmula del compuesto y se multiplica el peso atómico de cada elemento por el número de átomos representado en la fórmula por los subíndices.

Se suman los valores obtenidos para cada uno de los elementos; dicha suma representa el peso molecular.

Composición

Conociendo la fórmula de una sustancia, se puede calcular su composición centesimal en peso, es decir, el porciento en peso de cada elemento en dicha sustancia. Para ello se puede efectuar el siguiente procedimiento:

Se calcula el peso total de cada uno de los elementos multiplicando el peso atómico de dicho elemento por el número de átomos que contiene la fórmula dada.

Se calcula el peso total de cada elemento entre el peso molecular y se multiplica la fracción por 100.

Mol

El mol o gramo mol es la cantidad de sustancia de un sistema que contiene un número de entidades elementales iguales al número de átomos que hay en 12 g de carbono 12.

Un mol de una sustancia, elemento o compuesto contiene siempre un número fijo de átomos y moléculas, cuyo valor se conoce como el número de Avogadro (N) igual a $6.02\ (10)^{23}$.

La cantidad de sustancia contenida en un mol se indica en unidades de masa y se obtiene expresando en gramos o en cualquier otra unidad de masa el peso molecular o peso atómico de dicha sustancia.

Balanceo

Al escribir la ecuación química se debe tener cuidado de balancear la ecuación, de manera que el mismo número de átomos de cada especie aparezca en ambos lados de la ecuación.

Se denomina balanceo de una ecuación química a la determinación de los coeficientes numéricos que se deben anteponer a las fórmulas de las especies participantes en una reacción química para que se cumpla la ley de la conservación de la masa.

Balances

Las reacciones químicas están escritas para moles, de manera que la ecuación:

$$C + O_2 \longrightarrow CO_2$$

nos indica que una molécula de carbono reacciona con una molécula de oxígeno para dar una molécula de bióxido de carbono.

Se puede notar que, en la ecuación anterior,

{Moléculas salientes} $\neq$ {Moléculas entrantes}

Es decir, que en general, en una reacción química los moles no se conservan. Ahora bien, sabiendo los moles que reaccionan y la composición química de los compuestos que entran en la reacción es posible saber el peso reaccionante y el saliente. En la ecuación anterior
12 kg de carbono + 32 kg de oxígeno $\rightarrow$ 44 kg de bióxido de carbono

De donde se puede observar que:

{Masa entrante a una reacción} = {Masa saliente en una reacción}

También en la misma ecuación se puede advertir que un átomo de carbono entrante produce un átomo de carbono saliente, contenido este último en la molécula de bióxido de carbono, y que los dos átomos de oxígeno entrante salen también formando parte de la molécula de bióxido de carbono; de manera que:

$$\left\{\begin{array}{l}\text{átomos entrantes a la reacción}\\ \text{química.}\end{array}\right\} = \left\{\begin{array}{l}\text{átomos salientes de la reacción}\\ \text{química}\end{array}\right\}$$

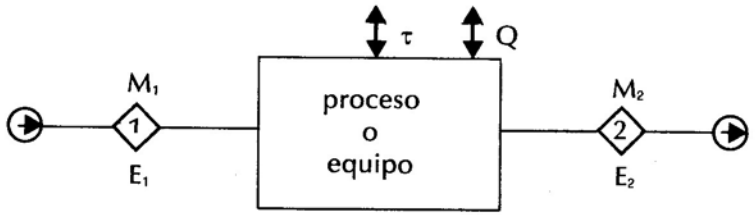
De lo anterior se puede ver que es posible trabajar a base de kilogramos átomos, o sea, el peso atómico expresado en kilogramos, pues los kg átomo de un elemento entrante deben ser igual a los kg átomo salientes.

BALANCES EN REGIMEN NO PERMANENTE

En el régimen no permanente o transitorio las condiciones varían con el tiempo, por lo que es necesario escribir el balance de materiales en forma de ecuación diferencial. La ecuación diferencial resultante debe integrarse y las constantes de integración se evalúan a partir de los valores límite.

BALANCES DE ENERGIA

En un balance total de energía se toman en cuenta las transferencias de energía a través de los límites del sistema



$$\left\{\begin{array}{l}\text{Rapidez de}\\ \text{entrada de}\\ \text{la energía}\\ \text{en el proceso}\\ \text{o equipo}\end{array}\right\} = \left\{\begin{array}{l}\text{Rapidez de}\\ \text{salida de}\\ \text{la energía}\\ \text{en el proceso}\\ \text{o equipo}\end{array}\right\} + \left\{\begin{array}{l}\text{Rapidez con}\\ \text{la que se}\\ \text{acumula}\\ \text{la energía}\\ \text{en el proceso}\\ \text{o equipo}\end{array}\right\}$$

$$M_1\ E_1 + Q - \tau = M_2\ E_2 + \frac{d\ (ME)}{d\ \theta}$$

En donde
E_1 = energía por unidad de masa asociada con la masa entrante 1
E_2 = energía por unidad de masa asociada con la masa saliente 2
Q = calor neto entrante al proceso o equipo
τ = Trabajo neto entrante al proceso o equipo.

Ciertos tipos de energía están asociadas con la masa que fluye, otros tipos, como el calor y el trabajo, son sólo formas de transmisión de energía.

Entre los tipos de energía asociadas con la masa que con más frecuencia se emplean en ingeniería química están:

EC = energía cinética
EP = energía potencial
EPe = energía de presión
U = energía interna.

Si aplicamos la ecuación de balance de energía de forma que intervengan todas las energías involucradas se obtendría:

$$L_1 (EP_1 + EC_1 + Epe_1 + U_1) + Q - \tau = L_2 (EC_2 + EP_2 + EPe_2 + U_2) + \frac{d\,(EM)}{d\,\theta}$$

Entalpía

Relacionada con la energía interna de un sistema está la entalpía. Ésta es una función de estado útil al trabajar con procesos que se efectúan a presión constante.

Por definición

$$H = U + PV$$

También a presión constante, si no hay cambio de estado

$$\Delta H = Q_p = C_p \Delta T$$

O sea, el cambio de entalpía en un sistema es igual al calor sólo cuando el proceso se lleva a cabo a presión constante. En un proceso a presión constante en el cual se desprende calor, el ΔH es negativo; esto significa que el estado final del sistema tiene menor entalpía que el inicial. Si el ΔM es negativo, el proceso es exotérmico; si es positivo es endotérmico. Al usar las entalpías el balance quedaría:

$$L_1 (EP_1 + EC_1 + H_1) + Q - \tau = L_2 (EC_2 + EP_2 + H_2) + \frac{d\,(EM)}{d\,\theta}$$

Si

$$L_1 = L_2 = L$$

$$L\ (\Delta E_c + \Delta E_p + \Delta H) = Q - \tau$$

En donde

$$\Delta EC = EC_2 - EC_1 \quad \therefore \quad \Delta H = H_2 - H_1$$

En los balances anteriores se debe tener cuidado con las unidades que se empleen. El sistema más empleado en la actualidad es el SI. En ese sistema, las unidades de ΔE_c, ΔE_p y ΔH están en J/kg o $\frac{m^2}{S^2}$. Si L se da en kg/s, todos los términos quedarían en W, incluyendo Q y τ, por ello, se dice que con frecuencia en vez de efectuar balances de energía, se emplean balances de potencia. Independientemente del sistema empleado, lo más importante deberá ser que se empleen unidades homogéneas en todos los términos de la ecuación.

Para lograr las mayores simplificaciones posibles a las ecuaciones de balance de energía, se deberán seleccionar apropiadamente los límites del sistema.

El término Q, o sea el calor neto, deberá evaluarse mediante el cálculo del calor entrante al sistema, menos el calor saliente del mismo. Con frecuencia en muchos sistemas el calor saliente, es debido a las pérdidas de fricción en el equipo o proceso Σ F.

El término τ, o sea el trabajo neto, deberá evaluarse restando al trabajo entrante al proceso o equipo, el trabajo saliente. En termodinámica se suele usar la siguiente convención para dar signo al trabajo y al calor:

Calor	entrante	positivo
Calor	saliente	negativo
trabajo	entrante	negativo
trabajo	saliente	positivo

Sin embargo en otros libros modernos se da signo positivo a lo que entra y negativo a lo que sale. En este libro se empleará la convención tradicional.

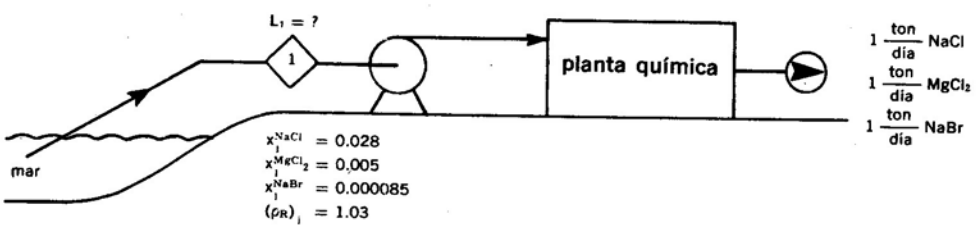
PROBLEMAS RESUELTOS

Problema 3.1

¿Cuántos metros cúbicos diarios de agua de mar se deberían tratar para obtener: **a)** una tonelada de NaCl, **b)** una tonelada de Mg Cl_2, **c)** una tonelada de NaBr

Datos: El análisis de agua de mar indica que ésta contiene 2.8% de NaCl, 0.5% de $MgCl_2$ y 0.0085% de NaBr en peso y que la densidad relativa de aquélla es de 1.03.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Siguiendo la ley de la conservación de la materia, la cantidad de sales entrantes al proceso deberá ser igual a la saliente.

$$\left\{\begin{array}{l}\text{Rapidez de entrada}\\ \text{de la sustancia i al}\\ \text{s i s tema termodiná-}\\ \text{mico.}\end{array}\right\} - \left\{\begin{array}{l}\text{Rapidez de salida de}\\ \text{la sustancia i del sis-}\\ \text{tema termodinámico.}\end{array}\right\} = 0$$

2.2 Ca para 1 ton/día de NaCl

$$Ca\,\rho_R\,\rho_{H_2O}\,x_1^{NaCl} = L_{NaCl}$$

2.3 Ca para 1 ton/día de $MgCl_2$

$$Ca\,\rho_R\,\rho_{H_2O}\,x_1^{MgCl_2} = L_{MgCl_2}$$

2.4 Ca para 1 ton/día de NaBr

$$Ca\,\rho_R\,\rho_{H_2O}\,x_1^{NaBr} = L_{NaBr}$$

3. Cálculos

3.1 Gasto necesario para obtener 1 ton de NaCl

Ca (1.03) (1 ton/m³) (0.028 ton NaCl/ton total) = 1 ton NaCl/día

$$Ca = 34.67 \text{ m}^3/\text{día}$$

3.2 Gasto necesario para obtener 1 ton de $MgCl_2$

$$Ca\ (1.03)\ \left(1\ \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}\right)\ (0.005)\ \frac{\text{Ton } MgCl_2}{\text{ton total}} = 1\ \frac{\text{ton } MgCl_2}{\text{día}}$$

$$Ca = 194.17 \text{ m}^3/\text{día}$$

3.3 Gasto necesario para obtener 1 ton/día de NaBr

Ca (1.03) (1 ton/m³) (0.000085) ton Nabr/ton total = 1 ton NaBr/día

$$Ca = 11\,422 \text{ m}^3/\text{día}$$

4. **Resultados**

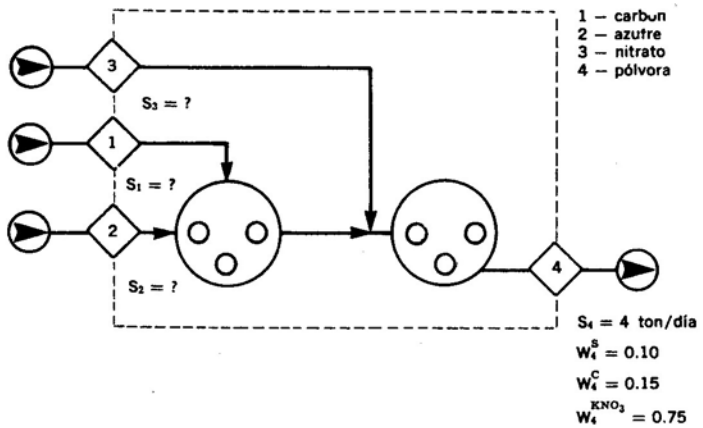
Para obtener una tonelada diaria de NaCl se deberían tratar 34.67 m³/día de agua de mar. Para obtener 1 tonelada de $MgCl_2$ se necesitarían 194.17 m³/día, para una tonelada de NaBr se deberían tratar 11 422 m³/día.

Problema 3.2

Para fabricar pólvora se necesitan tres sustancias, que son: azufre, carbón y nitrato de potasio en proporción de 10, 15 y 75% en peso. Estas sustancias se deben moler finamente y mezclarse con cuidado para dar el producto final.

¿Cuánta cantidad de cada materia se necesitará para producir 4 toneladas de pólvora por día?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Balance de materiales

$$\left\{\begin{matrix}\text{Rapidez de entrada}\\ \text{de materia al siste-}\\ \text{ma termodinámico.}\end{matrix}\right\} - \left\{\begin{matrix}\text{Rapidez de salida}\\ \text{de materia del sis-}\\ \text{tema termodinámi-}\\ \text{co.}\end{matrix}\right\} = 0$$

$$S_1 + S_2 + S_3 = S_4$$

$$S_4 w_4^S + S_4 w_4^{KNO_3} + S_4 w_4^C = S_4$$

$$w_4^S + w_4^{KNO_3} + w_4^C = 1$$

$$S_4 w_4^S = S_2$$

$$S_4 w_4^{KNO_3} = S_3$$

3. Cálculos

3.1 Balances

$$S_1 + S_2 + S_3 = 4\,000 \text{ kg/día}$$

3.2 Carbón

$$S_4 w_4^C = S_1 = 4\,000\ (0.15) = 600\ \text{kg/día}$$

3.3 Azufre

$$S_4 w_4^S = S_2 = 4\,000\ (0.1) = 400\ \text{kg/día}$$

3.4 Nitrato

$$S_3 = S_4 - (S_1 + S_2) = 4\,000 - (600 + 400) = 3\,000\ \text{kg/día}$$

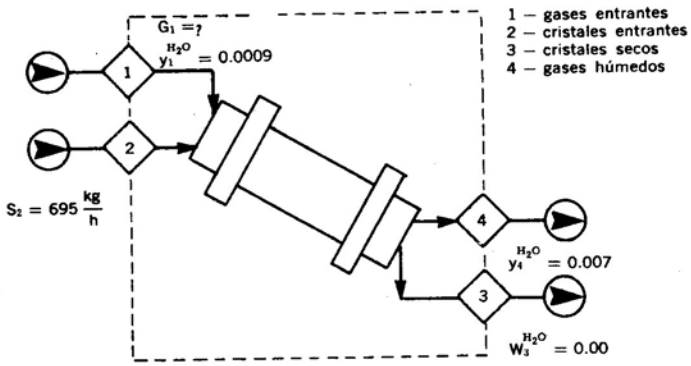
4. **Resultados**

Se requieren 600 kg/día de azufre, 400 kg/día de carbón y 3 000 kg/día de nitrato de potasio.

Problema 3.3

En un proceso de cristalización se obtienen 695 kg de cristales de $Na_2CO_3 \cdot 10\ H_2O$ por hora; dichos cristales se pasarán a un secador para obtener un producto que consiste en cristales de Na_2CO_3 anhidro. ¿Qué cantidad de agua se quitó en el secador? Si los cristales se secan en corriente paralela con aire que tiene inicialmente 0.09% de agua en peso, ¿qué cantidad de aire se necesitará para secar los cristales si el aire sale con un 0.7% de agua en peso?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Balances

Balance total: {Rapidez de entrada de materia al sistema termodinámico.} − {Rapidez de salida de materia del sistema termodinámico.} = 0

$$S_2 + G_1 = G_4 + S_3$$

Balance de Na_2CO_3

$$S_2\, w_2^{Na_2CO_3} = S_3\, w_3^{Na_2CO_3}$$

Balance de agua

$$S_2\, w_2^{H_2O} + G_1\, y_1^{H_2O} = G_4\, y_4^{H_2O} + S_3\, w_3^{H_2O}$$

$w_3^{H_2O}$ Fracción masa de agua en la corriente sólida 3.

3. Cálculos

3.1 Balance

Balance de Na_2CO_3

$$695\ (w_2^{Na_2CO_3}) = S_3$$

$w_2^{H_2O}$ es el agua en los cristales iniciales; ésta se obtiene mediante el peso molecular de los cristales

$$PM_{Na_2CO_3} = 106 \qquad PM_{Na_2CO_3 \cdot 10\, H_2O} = 286$$

$$w_2^{Na_2CO_3} = 106/286 = 0.37 \qquad w_3^{Na_2CO_3} = \text{(cristales anhidros)} = 1$$

$$695\ (0.37) = S_3$$

$$S_3 = 257.15 \text{ kg/h}$$

Balance de agua

$$695\ (1 - 0.37) + G_1\ (0.0009) = 257.15\ (0) + G_2\ (0.007)$$

$$437.85 + G_1\ (0.0009) = G_2\ (0.007) \qquad (1)$$

Balance total

$$695 + G_1 = 257.15 + G_2 \qquad (2)$$

Resolviendo simultáneamente (1) y (2)

$$G_1 = 6675.4 \text{ kg/h}$$

$$G_2 = 437.85 + 6675.4 = 7113.25 \text{ kg/h}$$

3.2 Agua evaporada

$$S_2 - S_3 = 695 - 257.15 = 437.85 \text{ kg/h}$$

4. **Resultados**

Se quitan 437.85 kg/h de agua.

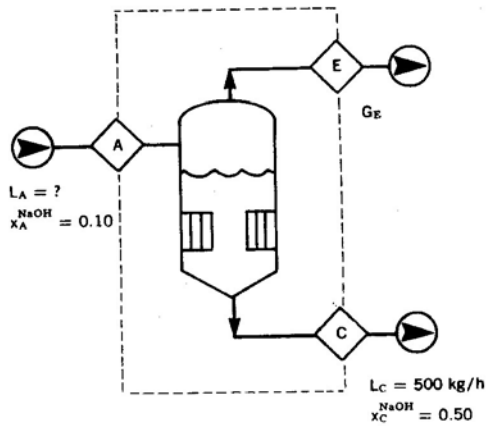
Se necesitan 6675.4 kg/h de gases entrantes para secar los cristales.

Problema 3.4

Partiendo de una solución cáustica al 10% se deben obtener 500 kg por hora a una concentración del 50% mediante evaporación.

Determine el flujo de alimentación y el agua evaporada.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Este es un problema de separación, aplicado a la operación de evaporación.

2.2 Balance de masa

Balance total

$$L_A = L_C + G_E \quad \begin{Bmatrix}\text{Rapidez de entrada de}\\ \text{materia al sistema ter-}\\ \text{modinámico.}\end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix}\text{Rapidez de salida de}\\ \text{materia del sistema}\\ \text{termodinámico.}\end{Bmatrix} = 0$$

Balance de soluto

$$L_A x_A^{NaOH} - L_C x_C^{NaOH} = 0; \quad \begin{Bmatrix}\text{Rapidez de entrada de}\\ \text{la sosa al sistema ter-}\\ \text{modinámico.}\end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix}\text{Rapidez de salida de}\\ \text{la sosa del sistema}\\ \text{termodinámico.}\end{Bmatrix} = 0$$

3. Cálculos

3.1 Balances

$L_A = 500 + G_E$

$L_A\ (0.1) = 500\ (0.5)$

$L_A = 250/0.1 = 2\,500$ kg/h

$G_E = 2\,500 - 500 = 2\,000$ kg/h

4. Resultados

El flujo de alimentación es de 2 500 kg/h

El agua evaporada es de 2 000 kg/h

Problema 3.5

La separación de una mezcla de benceno, tolueno y xileno se lleva a cabo en dos columnas de destilación.

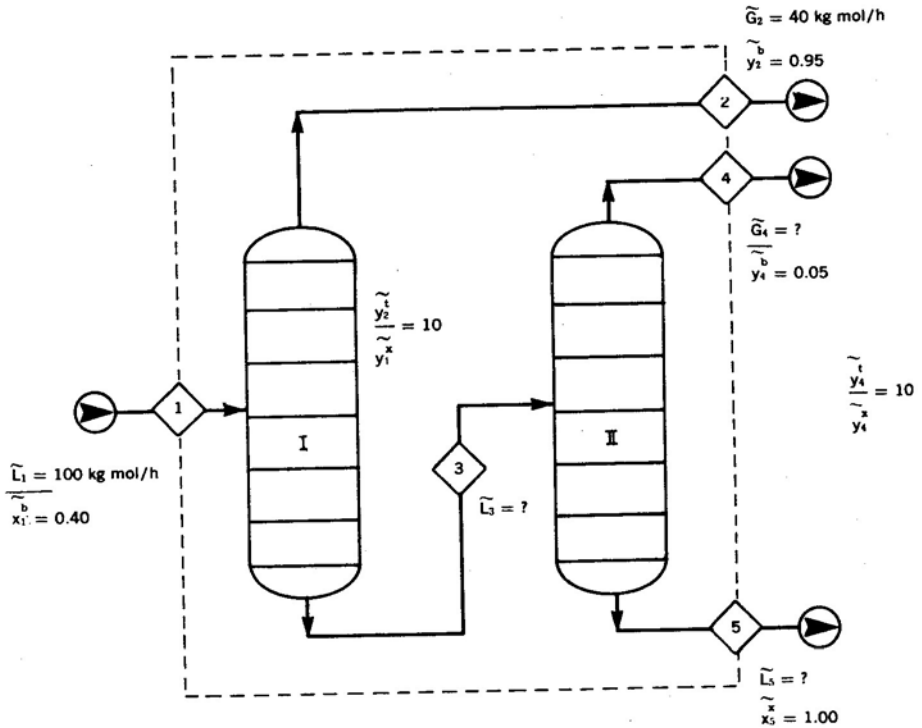
A la primera columna se le alimentan 100 kg mol/h de una mezcla del 40% en mol de benceno y el resto de tolueno y xileno. En el domo de la primera columna se obtienen 40 kg mol/h de destilado con una composición del 95% en mol de benceno, y el resto de tolueno y xileno, los cuales están en relación de 10 a 1.

Los fondos de la primera columna alimentan a la segunda. De esta columna sale un destilado que contiene 5% de benceno en mol y el resto de tolueno y xileno, los cuales están también en relación de 10 a 1.

Por el fondo de la columna se obtiene xileno con 100% de pureza.

Determine los flujos totales y parciales de las diferentes corrientes.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Al presentarse dos o más equipos en un proceso, es posible tener un balance total alrededor de todo el proceso y balances totales alrededor de cada equipo.

Son posibles también los balances parciales de sustancias alrededor de todo el proceso y alrededor de cada equipo.

2.2 Balances alrededor de todo el proceso.

$$\text{Total} \quad 0 = \left\{\begin{array}{l}\text{Rapidez de entrada de ma-}\\ \text{teria al sistema termodi-}\\ \text{námico.}\end{array}\right\} - \left\{\begin{array}{l}\text{Rapidez de salida de materia}\\ \text{del sistema termodinámico.}\end{array}\right\}$$

$$\widetilde{L}_1 = \widetilde{G}_2 + \widetilde{G}_4 + \widetilde{L}_5$$

Balances parciales

de benceno

$$\tilde{L}_1\tilde{x}_1^{\text{benceno}} = \tilde{G}_2\tilde{y}_2^{\text{benceno}} + \tilde{G}_4\tilde{y}_4^{\text{benceno}} + \tilde{L}_5\tilde{x}_5^{\text{benceno}}$$

de tolueno

$$\tilde{L}_1\tilde{x}_1^{\text{tolueno}} = \tilde{G}_2\tilde{y}_2^{\text{tolueno}} + \tilde{G}_4\tilde{y}_4^{\text{tolueno}} + \tilde{L}_5\tilde{x}_5^{\text{tolueno}}$$

2.3 Balances alrededor del equipo I

$$\tilde{L}_1 = \tilde{G}_2 + \tilde{L}_3$$

$$\tilde{L}_1\tilde{x}_1^{\text{benceno}} = \tilde{G}_2\tilde{y}_2^{\text{benceno}} + \tilde{L}_3\tilde{x}_3^{\text{benceno}}$$

$$\tilde{L}_1\tilde{x}_1^{\text{tolueno}} = \tilde{G}_2\tilde{y}_2^{\text{tolueno}} + \tilde{L}_3\tilde{x}_3^{\text{tolueno}}$$

2.4 Balances alrededor del equipo II

$$\tilde{L}_3 = \tilde{G}_4 + \tilde{L}_5$$

$$\tilde{L}_3\tilde{x}_3^{\text{tolueno}} = \tilde{G}_4\tilde{y}_4^{\text{tolueno}} + \tilde{L}_5\tilde{x}_5^{\text{tolueno}}$$

$$\tilde{L}_3\tilde{x}_3^{\text{benceno}} = \tilde{G}_4\tilde{y}_4^{\text{benceno}} + \tilde{L}_5\tilde{x}_5^{\text{benceno}}$$

3. Cálculos

3.1 Balances alrededor de todo el proceso

$$100\ (0.40) = 40\ (0.95) + \tilde{G}_4\ (0.05) + \tilde{L}_5\ (0)$$

$$\tilde{G}_4 = 40 \text{ kg mol/h}$$

Balance total

$$100 = 40 + 40 + \tilde{L}_5$$

$$\therefore \tilde{L}_5 = 20 \text{ kg mol/h}$$

3.2 Balance alrededor del equipo I

total

$$100 = 40 + \tilde{L}_3$$

$$\tilde{L}_3 = 60 \text{ kg mol/h}$$

de benceno

$$100\ (0.40) = 40\ (0.95) + 60\ (x_3^{\text{benceno}})$$

$$\tilde{x}_3^{\text{benceno}} = 0.03333 \text{ kg mol benceno/kg mol totales}$$

$$\therefore \tilde{x}_3^{\text{tolueno + xileno}} = 0.9666$$

3.3 Balance en la corriente G_2

$$\tilde{y}_2^{\text{tolueno}}/\tilde{y}_2^{\text{xileno}} = 10$$

$$\tilde{G}_2\tilde{y}_2^{\text{xileno}} + 10\,\tilde{G}_2\tilde{y}_2^{\text{xileno}} = 2$$

$$\therefore\ \tilde{G}_2\tilde{y}_2^{\text{xileno}} = 2/11 = 0.1818$$

$$\therefore\ \tilde{y}_2^{\text{xileno}} = 0.004545 \qquad \tilde{y}_2^{\text{tolueno}} = 0.04545$$

3.4 Balance en la corriente G_4

$$\tilde{y}_4^{\text{tolueno}}/\tilde{y}_4^{\text{xileno}} = 10$$

$$\tilde{G}_4\tilde{y}_4^{\text{xileno}} + \tilde{G}_4\tilde{y}_4^{\text{tolueno}} = 40(0.95)$$

$$\tilde{G}_4\tilde{y}_4^{\text{xileno}} + 10\,\tilde{G}_4\tilde{y}_4^{\text{xileno}} = 38$$

$$\tilde{G}_4\tilde{y}_4^{\text{xileno}} = 38/11 = 3.4545 \text{ kg mol/h}$$

$$\tilde{y}_4^{\text{xileno}} = 0.08636 \text{ kg mol/kg mol totales} \qquad \tilde{y}_4^{\text{tolueno}} = 0.8636$$

3.5 Balance total de xileno

$$100\,(\tilde{x}_1^{\text{xileno}}) = 20 + 40\,(0.08636)$$

$$\tilde{x}_1^{\text{xileno}} = 0.234545 \text{ kg mol xileno/kg mol total}$$

$$\tilde{x}_1^{\text{benceno}} = 0.3654$$

3.6 Balance de xileno en corriente 3

$$100\,(0.234545) = 40\,(0.004545)) + 60\,x_3^{\text{xileno}}$$

$$\tilde{x}_3^{\text{xileno}} = 0.3878$$

$$\tilde{x}_3^{\text{tolueno}} = 0.5789$$

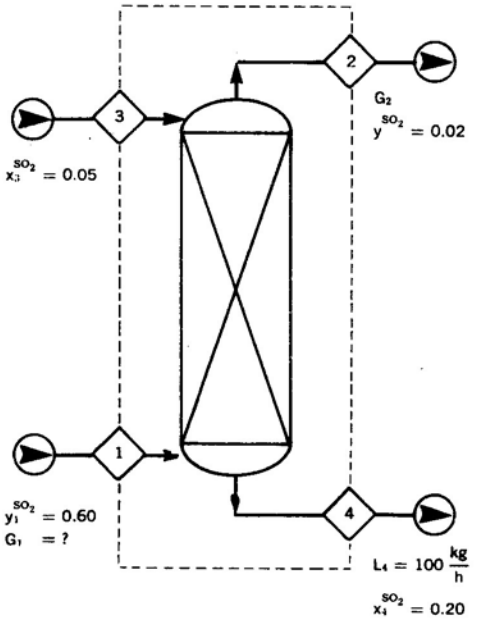
4. **Resultados**

Corriente	kg mol/h	Fracción mol de benceno	Fracción mol de tolueno	Fracción mol de xileno
1	100	0.4	0.3654	0.2345
2	40	0.95	0.04545	0.004545
3	60	0.0333	0.5789	0.3878
4	40	0.05	0.8637	0.0863
5	20	0	0	1

Problema 3.6

Una columna de absorción de SO_2 se diseña para producir una solución acuosa de SO_2. Si el agua de entrada contiene 5% de SO_2 y el agua de salida 20% de SO_2, ¿qué cantidad de solución al 5% se necesita para obtener 100 kg/h de solución de SO_2 al 20%? ¿Qué cantidad de gases se deben tratar si los gases entrantes contienen 60% en peso de SO_2 y los salientes 2%?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Este es un problema de balances a contracorriente.

2.2 Balances

Balance total

$$G_1 + L_3 = L_4 + G_2$$

Balance parcial de SO_2

$$G_1 y_1^{SO_2} + L_3 x_3^{SO_2} = G_2 y_2^{SO_2} + L_4 x_4^{SO_2}$$

$x_4^{SO_2}$ = fracción masa de SO_2 en la corriente 4

$y_1^{SO_2}$ = fracción masa de SO_2 en la corriente gaseosa 1

Balance de H_2O

$$L_3 x_3^{H_2O} = L_4 x_4^{H_2O}$$

3. Cálculos

3.1 Balances

Balance total

$$G_1 + L_3 = G_2 + 100 \text{ kg/h}$$

$$G_1 (0.60) + L_3 (0.05) = G_2 (0.02) + 100 (0.2)$$

Balance de agua

$$L_3 (0.95) = 100 (0.8)$$

$$L_3 = 84.2 \text{ kg/h}$$

$$\therefore G_1 + 84.2 = G_2 + 100$$

$$G_1 (0.60) + 84.2 (0.05) = G_2 (0.02) + 100 (0.2)$$

Resolviendo simultáneamente

$$G_2 = 10.87 \text{ kg/h}$$

$$G_1 = 26.67 \text{ kg/h}$$

4. **Resultados**

Se requieren 84.2 kg/h de la solución al 5%.

Se deben tratar 26.67 kg/h de gases que contienen 60% de SO_2.

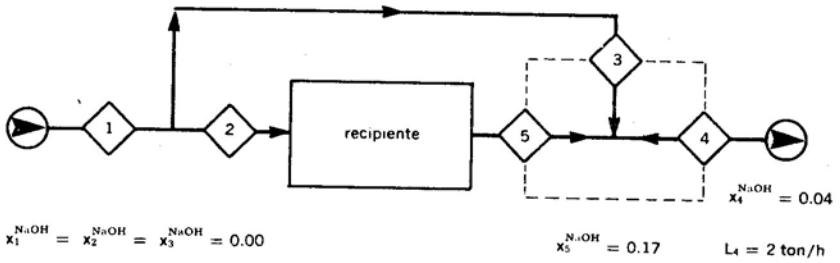
Problema 3.7

Para formar una solución de sosa cáustica al 4% en peso se efectúa el siguiente proceso:

Se disuelve sosa cáustica sólida con agua; una parte de la corriente se lleva a un recipiente con sosa cáustica sólida, de donde sale con un 17%

de sosa, la otra parte del agua se deriva uniéndose posteriormente en proporción tal que dé la solución al 4%. ¿Qué porcentaje de agua debe derivarse a través del saturador, si se requieren producir 2 ton/h de solución al 4%? ¿Qué cantidad de agua debe meterse por cada corriente?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Este tipo de problemas se resuelve mediante balances en los puntos de unión de las corrientes.

2.2 Balance total (alrededor de todo el proceso).

$$L_1 + S^{NaOH} = L_4$$

2.3 Balance parcial de NaOH

$$L_1 x_1^{NaOH} + Sw^{NaOH} = L_4 x_4^{NaOH}$$

2.4 Balance en el punto de unión

Balance total

$$L_3 + L_5 = L_4$$

Balance de NaOH

$$L_3 x_3^{NaOH} + L_5 x_5^{NaOH} = L_4 x_4^{NaOH}$$

2.5 Corriente derivada

$$(L_3/L_1)\ (100)$$

3. Cálculos

3.1 Balances alrededor de todo el proceso

$$L_1 + S = 2 \text{ ton/h} \quad S\ (1) = 2\ (0.04) \quad S = 0.08 \text{ ton NaOH/h}$$

$$L_1 = 1.92 \text{ ton/h}$$

3.2 Balance en el punto de unión

$$L_3 + L_5 = 2 \text{ ton/h} \quad L_5\ (117) = 2\ (0.04) \therefore L_5 = 0.47 \text{ ton/h}$$

$$L_3 = 2 - 0.47 = 1.53 \text{ ton/h}$$

3.3 % derivado

$$L_2 = 1.92 - 1.53 = 0.39 \text{ ton/h}$$

$$(L_3/L_1)\ (100) = (1.53/1.92)\ (100) = 79.68\%$$

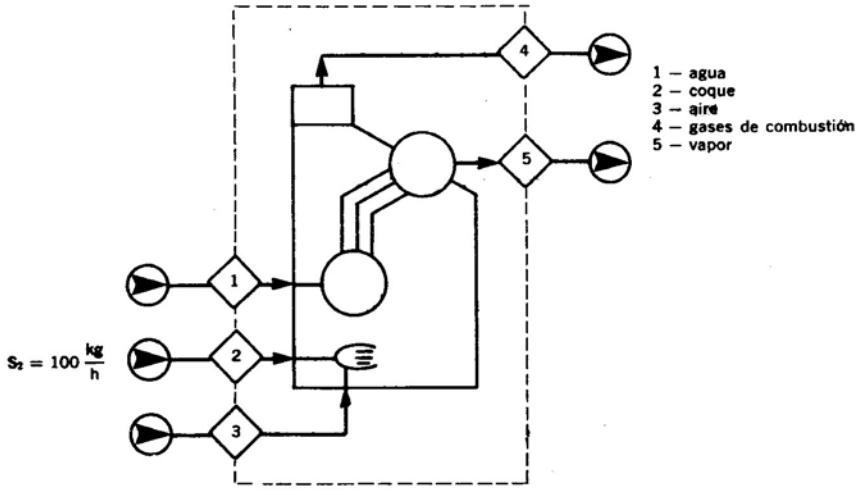
4. **Resultado**

Se debe derivar el 79.68% del agua entrante. Incorporándose 1.92 ton/h de agua, se derivan 1.53 ton/h y 0.39 ton/h se meten al saturador.

Problema 3.8

¿Cuántos kg mol/h de O_2 se requieren para quemar 100 kg/h de coque a CO_2?

1. Traducción



Reacción $C + O_2 \rightarrow CO_2$

2. Planteamiento

2.1 Discusión

Este problema se resuelve utilizando la reacción química. En ella, por cada mol de carbono quitado aparece un mol de bióxido de carbono.

2.2 Kg mol de coque quemado

$$\widetilde{S}_C = S_C/PM_C$$

2.3 Balance de oxígeno necesario

Rapidez de entrada del oxígeno = Rapidez de combustión del carbono.

$$\widetilde{S}^C = \widetilde{G}^{O_2} = \widetilde{G}^{CO_2}$$

3. Cálculos

3.1 kg mol de coque

$$\widetilde{S}^C = 100/12 = 8.33 \text{ kg mol/h}$$

3.2. kg mol de O_2

$$\widetilde{S}^C = G^{O_2} = 8.33 \text{ kg mol/h}$$

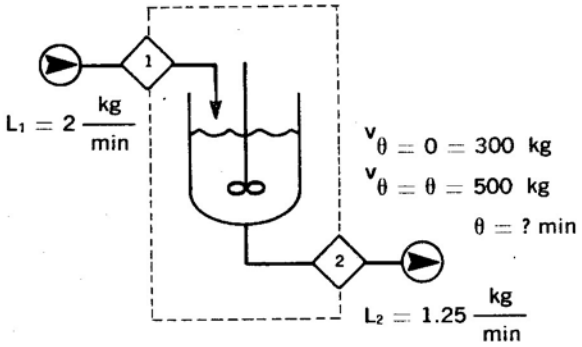
4. **Resultado**

Se necesitan 8.33 kg mol/h de oxígeno para quemar 100 kg/h de coque a CO_2.

Problema 3.9

Un tanque cuya capacidad es de 500 kg contiene 300 kg de agua. Si se alimentan 2 kg/min de agua y simultáneamente se descargan 1.25 kg/min, calcule el tiempo de llenado del tanque.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Este problema es de régimen transitorio; para resolverlo se necesitará una ecuación diferencial que represente el fenómeno.

2.2 Balance total

$$\left\{\begin{matrix}\text{Rapidez de entrada}\\ \text{de agua en el siste-}\\ \text{ma termodinámico.}\end{matrix}\right\} - \left\{\begin{matrix}\text{Rapidez de salida}\\ \text{del agua en el sis-}\\ \text{tema termodinámi-}\\ \text{co.}\end{matrix}\right\} = \left\{\begin{matrix}\text{Rapidez de acumula-}\\ \text{ción de agua en el}\\ \text{sistema termodiná-}\\ \text{mico.}\end{matrix}\right\}$$

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

$$(L_1 - L_2) \int_{\theta=0}^{\theta=0} d\theta = \int_{V=300}^{V=500} dV$$

$$(L_1 - L_2)\, 0 = \Delta V \therefore \theta = \Delta V/(L_1 - L_2)$$

3. Cálculos

3.1 Tiempo de llenado

$$0 = \frac{500 - 300}{2 - 1.25} = \frac{200 \text{ kg}}{0.75 \text{ kg min}} = 266.66 \text{ min}$$

$$0 = 4 \text{ h } 26 \text{ minutos } 39 \text{ segundos}$$

4. **Resultado**

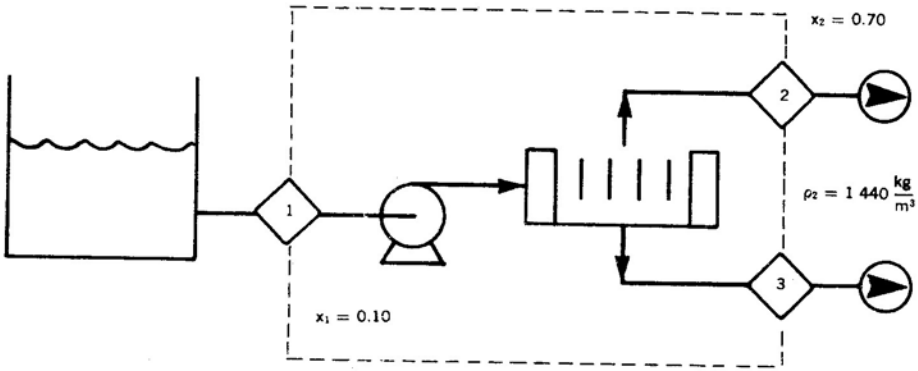
El tanque se tardará en llenar 4 horas, 26 minutos y 39 segundos.

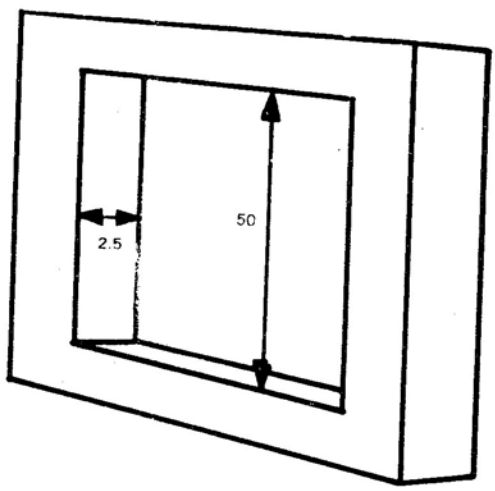
Problema 3.10

Un filtro prensa contiene 20 marcos que se usarán para filtrar unos lodos que tienen 10 kg de sólido seco por 100 kg de mezcla sólido-líquida.

Las dimensiones interiores de cada marco son 50 cm por 50 cm por 2.5 cm de grueso. La torta formada en la filtración es incompresible y contiene 0.7 kg de sólido seco por kg de torta. ¿Cuántos kg de filtrado libre de sólidos pueden obtenerse antes de que el filtro se llene con una torta húmeda que tiene una densidad de 1 440 kg/m³?

1. Traducción





2. Planteamiento

2.1 Discusión

La base está dada por los kg de torta que pueden cubrir el filtro.

2.2 Masa de torta

$$h_1\ (h_2)\ (h_3)\ (\text{número de marcos})\ (\rho\ \text{torta}) = M_T$$

2.3 Sólidos en la torta

$$M_T x_2^{\text{sólido}} = M_2 x_2^{\text{sólido}}$$

2.4 Balance de sólidos y filtrado

$$L_1 x_1^{\text{sólido}} = M_2 x_2^{\text{sólido}} \therefore L_1 = M_2 x_2^{\text{sólido}} / x_1^{\text{sólido}}$$

3. Cálculos

3.1 Masa de torta

$$(0.5)\ (0.5)\ (0.025)\ (20)\ (1\ 440) = 180\ \text{kg de torta}$$

3.2 Sólidos en la torta

$$180\ (0.7) = 126\ \text{kg de sólidos} = M_T\, x_2^{\text{sólido}}$$

3.3 Mezcla que se debe filtrar

$$L_1 = 126/0.1 = 1\ 260\ \text{kg}$$

3.4 kg de filtrado

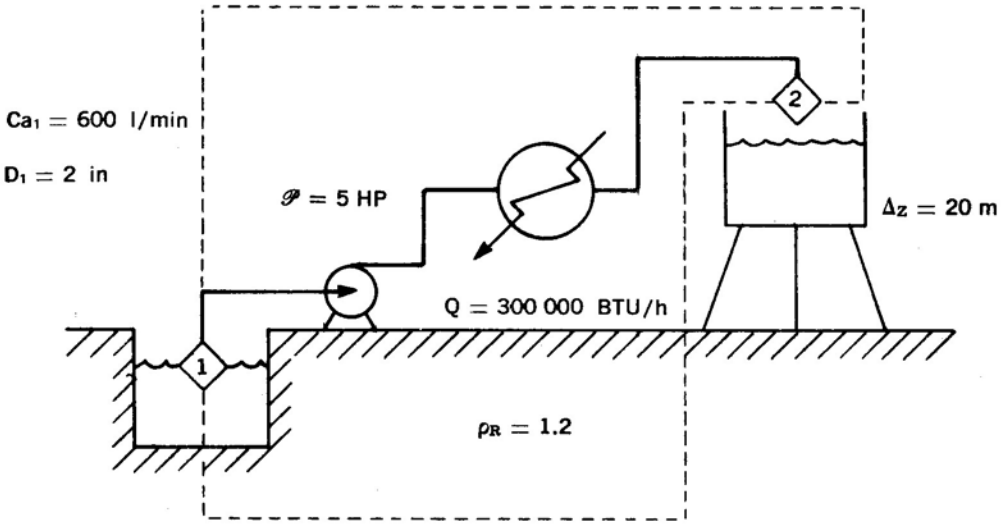
$$L_1 x_1^{H_2O} = 1\ 260\ (0.9) = 1\ 134\ \text{kg de filtrado libre de sólido.}$$

4. **Resultado**

Se deben obtener 1 134 kg de filtrado para que se llenen los marcos de torta.

Problema 3.11

Por una tubería de dos pulgadas de diámetro interior fluyen 600 l/min de una solución que tiene una densidad relativa de 1.2. Calcúlese el ΔH en kcal/kg si el fluido se mueve a través del siguiente sistema y la potencia de la bomba es de 10 HP



1. Planteamiento

1.1 Balances

$$L_1 = L_2 \qquad L_1 = Ca_1 \times \rho$$

$$L_1\ (\Delta EC + \Delta EP + \Delta H) = Q - \tau$$

2. Cálculos

2.1 Balance de materia

$$L_1 = 600\ \text{l/min} \times \frac{1\ \text{min}}{60\ \text{s}} \times 1.2\ \text{kg/l} = 12\ \text{kg/s}$$

2.2 Velocidades

Debido a la posición 1 $u_1 \cong 0$

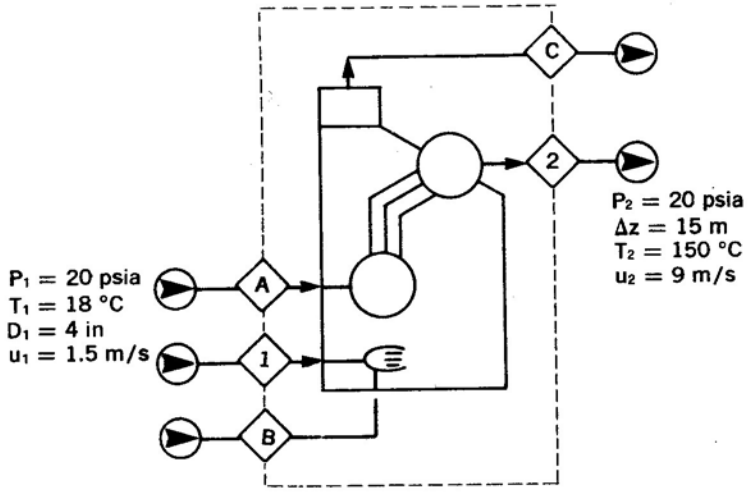
$$u_2\ \rho_2\ A_2 = L_2$$

$$u_2 = \frac{12\ \text{kg/s}}{1\,200\ \text{kg/m}^3 \times (2 \times 0.0254)^2\ (\pi/4)} = 4.93\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Problema 3.13

A una caldera se le introduce agua líquida a 18 °C y 20 psia por medio de una tubería de cuatro pulgadas y a una velocidad de 1.5 m/s. La operación es a régimen permanente y las condiciones de salida se muestran en el dibujo. Calcule los cambios de energía cinética y potencial.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Energía cinética

$$\Delta EC = \Delta u^2/2\,gc$$

2.2 Energía potencial

$$\Delta P = \Delta z\ g/gc$$

3. Cálculos

3.1 Energía cinética

$$EC_1 = \frac{(1.5)^2}{2\,(9.81)} = 0.1146\ \vec{kgm}/kg$$

$$EC_2 = \frac{(9)^2}{2\,(9.81)} = 4.128\ \vec{kgm}/kg \qquad \Delta EC = 4.0134\ \vec{kgm}/kg = 0.0094\ kcal/kg$$

3.2 Energía potencial

$$\Delta P = \Delta z\ g/gc = 15\ (9.81)/9.81 = 15\ \vec{kgm}/kg = 0.035\ kcal/kg$$

4. Resultados

El cambio de energía cinética es de 0.0094 kcal/kg y el de energía potencial de 0.035 kcal/kg.

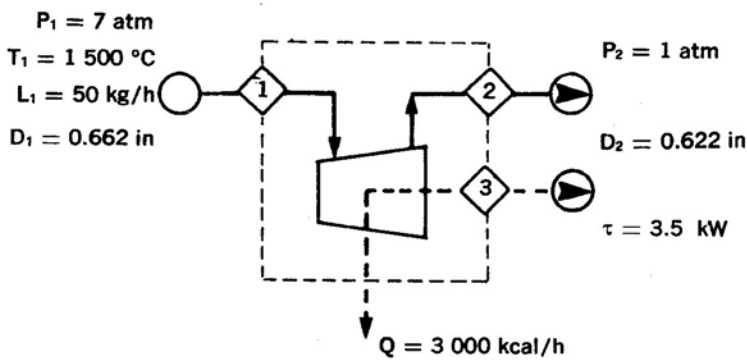
Se puede observar que los cambios de energías cinéticas y potenciales son muy bajos en comparación con los calores latentes de vaporización del agua, que es del orden de 600 kcal/kg. Y aun comparados con la energía necesaria para calentar 1 kg de agua 1 °C, que es aproximadamente de 1 kcal/kg, o para aumentar la temperatura de 1 kg de vapor de agua 1 °C, que es de 0.5 kcal/kg. Por esta razón, en los balances de energía con frecuencia se suelen despreciar las contribuciones de las energías potencial y cinética cuando hay cantidades importantes de calor adicionadas o desprendidas.

Problema 3.14

Se tiene nitrógeno a una temperatura de 1 500 °C y 7 atm y éste se expande a través de una turbina hasta una presión de 1 atm. La turbina se diseña de manera tal que los gases salen con gran velocidad. Cuando el flujo de gases es de 50 kg/h la turbina produce 3.5 kW. Las pérdidas de calor en la turbina son de 3 000 kcal/h. La tubería que llega a la turbina tiene un diámetro interno de 0.622 in.

La capacidad calorífica de los gases se puede considerar como constante e igual a 0.24 kcal/kg °C. ¿Cuál es la temperatura y velocidad del gas saliente si la tubería de salida es igual a la de entrada?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Balance de energía

No hay acumulación, es régimen permanente

$$\Delta H + \Delta u^2/2 + \Delta zg = \frac{Q - \tau}{L}$$

2.2 Ecuaciones de balance de masa

Ecuación de continuidad

$$L_1 = L_2 = A_1 u_1 \rho_1 = A_2 u_2 \rho_2$$
$$u_2 = (A_1/A_2)(\rho_1/\rho_2) u_1 = (\rho_1/\rho_2) u_1$$

Para gases ideales

$$\rho = P\,PM/RT$$
$$\therefore\ u_2 = (P_1/P_2)(T_2/T_1) u_1$$

2.3 Ecuación de la entalpía

$$\Delta H = Cp\,\Delta T$$

3. Cálculos

3.1 Calor eliminado

$$Q/L = 3\,000/50 = -60\ \text{kcal/kg} = -251\,100\ \text{J/kg}$$

3.2 Trabajo generado

$$\mathscr{P} = 3.5\ \text{kW}\left(\frac{1\,000\ \text{W}}{1\ \text{kW}}\right)\left(\frac{3\,600\ \text{s}}{1\ \text{h}}\right)\left(\frac{1\ \text{J/s}}{1\ \text{W}}\right)\left(\frac{1\ \text{kcal}}{4\,180\ \text{J}}\right) = 3\,014.35\ \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

$$\frac{\tau}{L} = \frac{3\,014.35\ \text{kcal/h}}{50\ \text{kg/h}} = 60.28\ \text{kcal/kg} = 252\,271.8\ \text{J/kg}$$

(signo positivo produce trabajo)

3.3 Entalpía

$$\Delta H = 0.24\ [T_2 - (1\,500 + 273)]\ \text{kcal/kg} = 1\,004.4\ [T_2 - 1\,773]\ \text{J/kg}$$

3.4 Velocidades

$$D = 0.622 \text{ in} = 1.579 \text{ cm} = 0.01579 \text{ m}$$

$$A = (0.01579)^2 (0.785) = 0.0001959 \text{ m}^2$$

$$\rho_1 = m/V = P\,PM/RT = 28\,(7)/[0.082\,(1773)] = 1.348 \text{ kg/m}^3$$

$$u_1 = L_1/(A_1\,\rho_1) = 50/[0.0001959\,(1.348)] = 189\,341 \text{ m/h} = 52.59 \text{ m/s}$$

$$u_2 = u_1\,(P_1/P_2)\,(T_2T_1) = 189\,341\,\frac{(7)\,T_2}{1\,(1\,773)} = 747.54\,T_2 \text{ m/h} = 0.20\,765 \text{ m/s}\,T_2$$

3.5 Energía cinética

$$\Delta u^2/2\,gc = [(0.20\,765\,T_2)^2 - (52.59)^2]/2 = 0.0215592\,T_2^2 - 1382.85 \text{ J/kg}$$

3.6 Ecuación general de balance

$$\Delta H + \Delta u^2/2 = (Q - \tau)/L$$

$$1\,004.4\,[T_2 - 1\,773] + 0.0215592\,T_2^2 - 1\,382.85 = 251\,100 - (+\,252\,271.8)$$

$$0.0215592\,T_2^2 + 1\,004.4\,T_2 - 1278812.3 = 0$$

$$T_2 = 1\,240 \text{ °K}$$

3.7 Velocidad final

$$u_2 = 0.20765\,(1240) = 257.48 \text{ m/s}$$

4. Resultados

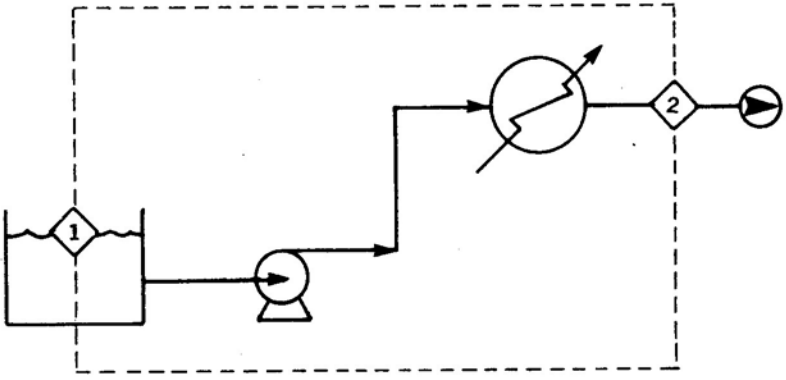
La temperatura de salida será de 1240 °K y la velocidad de 257 m/s.

Problema 3.15

El balance de energía por unidad de masa entre la sección 1 y 2 de un sistema está dado por:

$$\Delta\,(U + P/\rho + u^2/2\,gc + z\,g/gc) = (Q - \tau)/L$$

Un cambio de 1 °C en la temperatura del agua que fluye representa un ΔU de 426 kgm/kg. ¿Qué cambios en ΔP, Δu o Δz en el sistema producirían el mismo cambio en ΔU?



1. Planteamiento

1.1 Energía cinética

$$\Delta U = \Delta u^2/2\,gc$$

1.2 Energía potencial

$$\Delta U = \Delta z\ g/gc$$

1.3 Energía de presión

$$\Delta U = \Delta P/\rho$$

2. Cálculos

2.1 Energía cinética

$$\Delta u^2/2\,gc = 426\ \overrightarrow{kgm}/kg$$

$$\Delta u^2 = 426\ \overrightarrow{kgm}/kg\ (2)\ (9.81)\ \frac{kgm}{\overrightarrow{kg}\ s^2} = 8\,358\ m^2/s^2$$

$$\Delta u^2 = u_2^2 - u_1^2 = 8\,358\ m^2/s^2$$

$$\text{Si}\quad u_1 = 1\ m/s$$

$$u_2^2 = 8\,358 + 1 = 8\,359$$

$$u_2 = 91.42\ m/s$$

2.2 Energía potencial

$$\Delta z\ g/gc = 426\ \overrightarrow{kgm}/kg$$

$$\Delta z = 426\ \vec{kg}m/kg\ (9.81\ km/\vec{kg}\ s^2)\left(\frac{1\ s^2}{9.81\ m}\right) = 426\ m$$

$$\text{Si}\quad \Delta z = z_2 - z_1 = 426\ m$$

$$\text{Si}\quad z_1 = 0 \qquad z_2 = 426\ m$$

2.3 Energía de presión

$$\frac{\Delta P}{\rho} = 426\ \vec{kg}m/kg \qquad \rho = 1\,000\ kg/m^3$$

$$\Delta P = 426\ (\vec{kg}m/kg)\ (1\,000)\ kg/m^3 = 426\,000\ \vec{kg}/m^2$$

$$\Delta P = P_2 - P_1 = 426\,000\ \vec{kg}/m^2 = 42.6\ \vec{kg}/cm^2 = 41.24\ atm$$

$$\text{Si}\quad P_1 = 1\ atm \qquad P_2 = 42.24\ atm$$

3. Resultados

Un cambio de 1 °C en ΔU corresponde a un cambio desde 1 m/s a 91.42 m/s en la velocidad, a un cambio de 426 m en la elevación o de 41.24 atm en la presión.

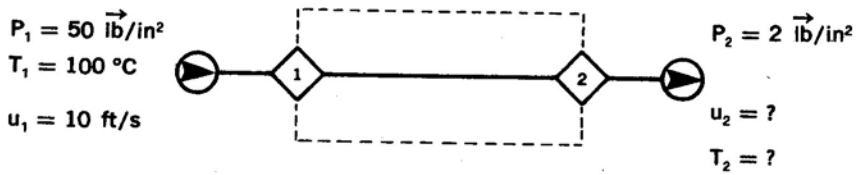
De lo anterior se puede concluir que, cuando hay una fuerte adición o sustracción de calor en un sistema, los términos de energía cinética, potencial y de presión pueden despreciarse.

Problema 3.16

Por una tubería se introduce un gas a una presión de 50 $\vec{lb}/in^2$ a una temperatura de 100 °C, siendo la velocidad de 10 ft/s. En otro punto de la misma tubería la presión es de 2 lb/in^2. ¿Cuál será la temperatura y la velocidad del gas en ese punto? Cp del gas igual a 0.46 kcal/kg °C.

El proceso es adiabático.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Balance de energía

$$(Q - \tau)/L = \Delta H + \Delta u^2/2\,gc + (g/gc)\,\Delta z$$

En nuestro caso

$$Q = 0 \qquad \tau = 0 \qquad \Delta z = 0$$

$$\therefore \quad \Delta H = -\Delta u^2/2\,gc$$

2.2 Velocidad

$$L_1 = L_2 = A_1\,u_1\,\rho_1 = A_2\,u_2\,\rho_2$$

$$u_2 = (\rho_1/\rho_2)\,u_1$$

Para gases ideales

$$\rho = P\,PM/RT$$

$$\therefore\ u_2 = u_1P_1T_2/(P_2T_1)$$

3. Cálculos

3.1 Velocidad final

$$u_2 = 10\,\frac{ft}{s}\left(\frac{50\ \overrightarrow{lb}/in^2}{2\ \overrightarrow{lb}/in^2}\right)\left(\frac{T_2\ °K}{373\ °K}\right) = 0.67\,T_2\,\frac{ft}{s}$$

$$u_2 = 0.67\,T_2\left(\frac{ft}{s}\right)\left(\frac{0.305\ m}{1\ ft}\right) = 0.20435\,T_2\left(\frac{m}{s}\right)$$

$$u_1 = 3.05\ m/s$$

3.2 Balance

$$\Delta H = Cp\Delta T \quad \therefore \quad Cp\Delta T = -\,\Delta u^2/2\,gc$$

$$(426)\ 0.46\ (T_2 - 373) = -[(0.20435\ T_2)^2 - (3.05)^2]/[2\ (9.81)]$$

$$T_2 = 371.5\ K = -98.5\ °C$$

3.3 Velocidad final

$$u_2 = 0.20435\ (371.5) = 75.91\ m/s$$

4. **Resultados**

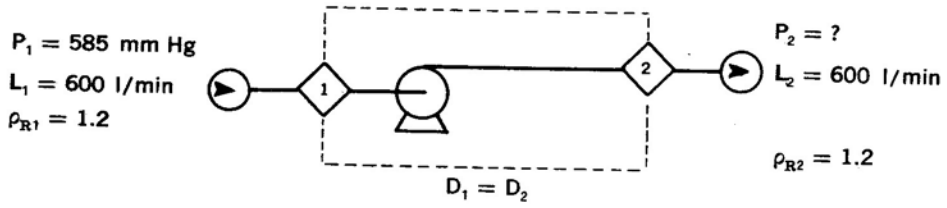
La velocidad final será de 75.91 m/s.

La temperatura final será de −98.5 °C.

Problema 3.17

Una bomba con una potencia de 5 caballos de vapor aumenta la presión de una corriente líquida que tiene una densidad de 1.2. La presión inicial de la corriente antes de entrar a la bomba es de 585 mm de Hg. El gasto de líquido es de 600 l por minuto. Calcúlese la presión a la descarga de la bomba en $\overrightarrow{kg}/cm^2$ considerando en la bomba una eficiencia del 100 por ciento. El diámetro de entrada de la bomba es igual al de salida.

1. Traducción



2. Planteamiento

Analizando las variables del balance general, la energía interna, la energía potencial y la energía cinética permanecen constantes. Al tener la bomba una eficiencia del 100 por ciento las pérdidas por fricción son cero.

2.1 Balance de energía

$$\Delta U + \Delta u^2/2 + \Delta(PV) + \Delta z\, g = (Q - \tau - \Sigma F)/L$$

$$\Delta(PV) = -\tau/L \qquad \text{como} \qquad \rho_1 = \rho_2$$

$$P_2/\rho - P_1/\rho = -\tau/L$$

2.2 Gasto

$$L = Ca\, \rho_{H_2O}\, \rho_R$$

3. Cálculos

3.1 Gasto

$$L = 600 \text{ l/min } (1 \text{ kg/l}) (1.2) (1 \text{ min}/60 \text{ s}) = 12 \text{ kg/s}$$

3.2 Trabajo

$$\mathscr{P} = (5 \text{ CV}) [75 \overrightarrow{\text{kg}} \text{ m}/(\text{s CV})] = 375 \overrightarrow{\text{kg}} \text{ m/s}$$

$$\tau = 375 \overrightarrow{\text{kg}} \text{ m/s } (1 \text{ s}/12 \text{ kg}) = -31.25 \overrightarrow{\text{kg}} \text{ m/kg}$$

El signo es negativo porque se adiciona

3.3 Presión de entrada

$$P_1 = (585 \text{ mm Hg}) (1 \text{ atm}/760 \text{ mm Hg}) [10\,333 \overrightarrow{\text{kg}}/(\text{m}^2 \text{ atm})] = 7\,953.7 \overrightarrow{\text{kg}}/\text{m}^2$$

3.4 Balance

$$(P_2/1\,200) - (7\,953.7/1\,200) = -(-31.25)$$

$$P_2 = 45\,453.7 \overrightarrow{\text{kg}}/\text{m}^2 = 4.54 \overrightarrow{\text{kg}}/\text{cm}^2$$

4. **Resultado**

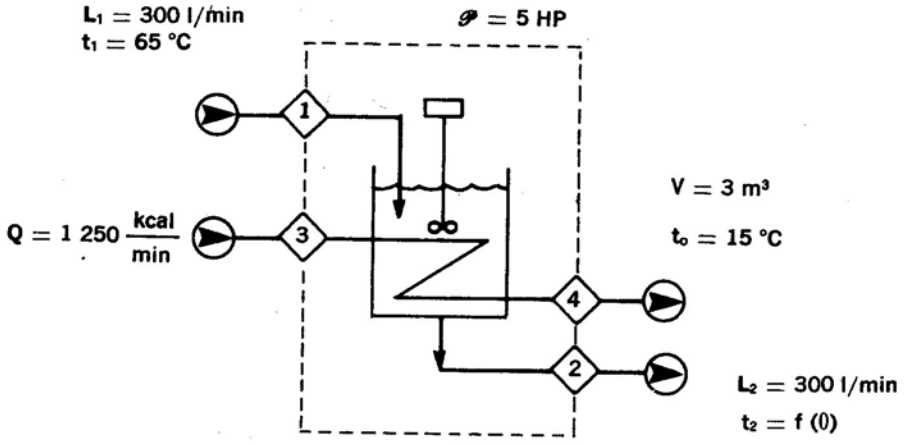
La presión de descarga de la bomba será de 4.54 $\overrightarrow{\text{kg}}/\text{cm}^2$.

Problema 3.18

A un tanque de agua con 3 m^3 de capacidad se le agrega agua a razón de 300 l/min y se le quita agua al mismo ritmo.

La temperatura inicial del agua en el tanque es de 15 °C. El agua entrante al tanque está a 65 °C. Si el calentador adiciona 1 250 kcal/min y si los caballos adicionados por el agitador son 5 HP, calcule la temperatura del tanque en función del tiempo.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Balance de energía

Entradas de energía − salidas de energía = acumulación.

$$L_1 (U_1 + EC_1 + EP_1 + EPe_1) + Q - \tau = L_2 (EC_2 + EP_2 + EPe_2 + U_2) + \frac{d\,(ME)}{d\,\theta}$$

En esta ecuación podemos despreciar los cambios de energías cinética y potencial.

La acumulación es el aumento de la energía interna del sistema

En un fluido incomprensible

$$U = CvdT = CpdT$$

Cp = capacidad calorífica

$$\frac{d\,(ME)}{d\theta} = \frac{d\,(MU)}{d\theta} = \rho\, VCp\, \frac{dT}{d\theta}$$

T = temperatura

2.4 Ecuación final

$$L_1 (P_1 V_1 + U_1) - L_2 (P_2 V_2 + U_2) + Q - \tau = \rho\, V\, Cp\, dT/d\theta$$

$$U + PV = H \qquad L_1 = L_2$$

$$\therefore \quad L (H_1 - H_2) + Q - \tau = \rho\, V\, Cp\, dT/d\theta$$

ahora bien

$$H = Cp\,(T_1 - T_0)$$

$$L\,[Cp\,(T_1 - T_0 - T_2 + T_0)] + Q - \tau = \rho\,V\,Cp\,dT/d\theta$$

$$L\,Cp\,[T_1 - T_2] + Q - \tau = \rho\,V\,Cp\,dT/d\theta$$

3. Cálculos

3.1 Masa del tanque y masa entrante

$$V\rho = \frac{1\ kg}{l}\,(3\,000\ l) = 3\,000\ kg$$

$$L_1 = 300\ (l/min)\ (1\ kg/l) = 300\ kg/min$$

3.2 Calor transmitido al tanque

$$Q = 1\,250\ kcal/min$$

3.3 Trabajo adicionado

$$\tau = 5\ HP\ (42.44\ BTU/HP\ min) = 212.2\ BTU/min = 53.47\ kcal/min =$$

$$= -\ 53.47\ kcal/min\ (negativo,\ porque\ se\ adiciona)$$

3.4 Balance de energía

$$300\ (1)\ [65 - T] + 1\,250 - (-\ 53.47) = 3\,000\ (1)\ dT/d\theta$$

$$69.34 - T = 10\ dT/d\theta$$

$$10 \int_{15}^{T} \frac{dT}{69.34 - T} = \int_{0}^{\theta} d\theta$$

$$T = 69.34 - 44.34\ e^{-\theta/10}$$

Cuando $\theta \rightarrow \infty$, la temperatura final será de 69.34 °C.

4. **Resultado**

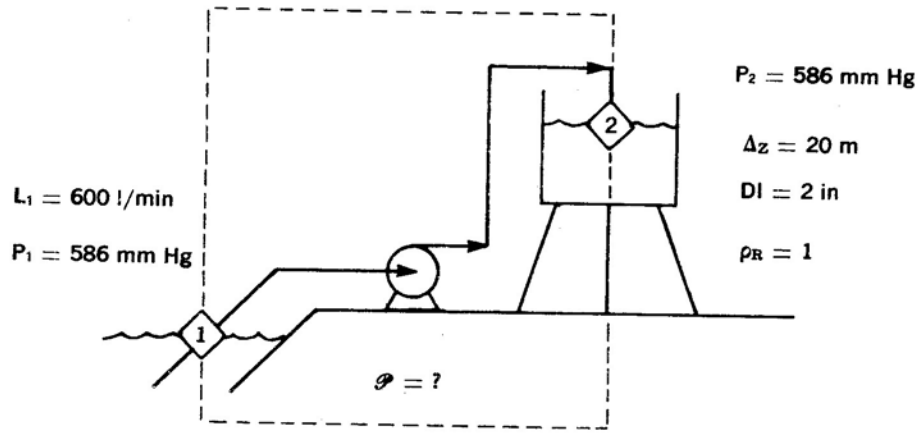
La variación de la temperatura con respecto al tiempo está dada por la ecuación

$$T = 69.34 - 44.34\ e^{-\theta/10}$$

Problema 3.19

Se desea elevar una corriente de 600 l por minuto hasta una altura de 20 m, tomando agua de un río. La densidad relativa del fluido es de 1.0. Si la descarga se hace en la ciudad de México (586 mm Hg), calcúlese la potencia de la bomba necesaria para efectuar la operación, si se usa una tubería de dos pulgadas de diámetro interior. Considérese que no existen pérdidas por fricción.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Para encontrar la potencia se debe hacer un balance de energía entre los puntos 1 y 2 de la tubería. En este caso, la energía mecánica del líquido se transforma en energía potencial.

2.2 Balance de energía

$$\Delta (PV) + \Delta z\, g/gc + \Delta u^2/2\, gc + \Delta U = \frac{Q - \tau}{L}$$

$$\Delta z\, g/gc + \Delta u^2/2\, gc = -\tau/L$$

Si el punto 1 se toma a nivel del río

$$u_1 = 0 \quad \therefore \quad \Delta z\, g/gc + u_2^2/2\, gc = -\tau/L$$

2.3 Velocidad en el punto dos

$$L_2 = \rho_2 u_2 A_2$$

$$u_2 = \frac{L_2}{\rho_2 A_2} \qquad A_2 = (\pi/4)\, D^2$$

3. Cálculos

3.1 Velocidad en el punto dos

$$L_2 = 600 \text{ l/min } (1 \text{ kg/l}) (1 \text{ min}/60 \text{ s}) = 10 \text{ kg/s}$$

$$A_2 = (\pi/4)\, (0.0508)^2 = 0.002025 \text{ m}^2$$

$$u_2 = 10/[1\,000\, (0.002025)] = 4.93 \text{ m/s}$$

3.2 Energía potencial

$$\Delta z \frac{g}{gc} = 20 \vec{\text{kg}} \text{ m/kg}$$

3.3 Balance

$$20 \vec{\text{kg}} \text{ m/kg} + (4.93)^2/[2\, (9.81)] = -\tau/10$$

$$\tau = -212.38 \vec{\text{kg}} \text{ m/s} \qquad \mathscr{P} = 2.83 \text{ CV}$$

4. **Resultado**

La potencia necesaria es de 2.83 CV.

Problema 3.20

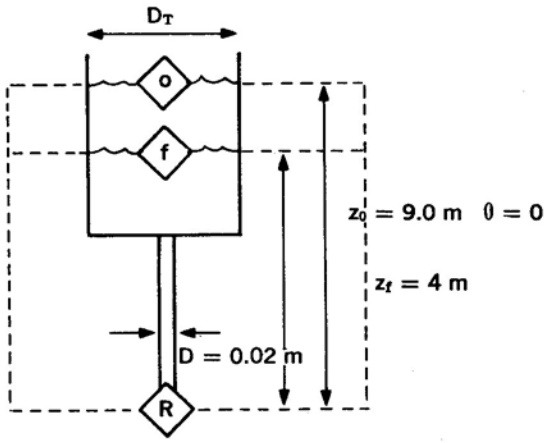
Calcule el tiempo requerido para vaciar un tanque desde una altura de 9 m hasta una altura de 4 m sobre el nivel de la tubería de descarga, a partir de los datos siguientes:

Diámetro del tanque, 2 m.

Diámetro interno de la tubería de descarga, 0.02 m.

Considere que las pérdidas por fricción son despreciables.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 La ecuación de balance sería:

$$\Delta z\, g/gc + \Delta u^2/2\, gc = 0$$

$$(z_2 - z_1)\frac{g}{gc} + \frac{u_2^2}{2\, gc} = 0$$

$$u_2 = \sqrt{2\,(z_1 - z_2)\,g} = \sqrt{2\, z_1\, g}, \quad \text{si,} \quad z_2 = 0$$

Si el volumen en el tanque decrece por dV y la altura por Δz en $d\theta$, entonces

$$dV = \frac{\pi}{4} D_T^2\, dz = \frac{\pi}{4} D_2^2\, u_2\, d\theta$$

$$d\theta = (D_T^2/D_2^2)\,(dz/u_2)$$

Sustituyendo en ambas ecuaciones

$$d\theta = \frac{D_T^2}{D_2^2}\left(\frac{dz}{\sqrt{2\, z_1 g}}\right)$$

Integrando

$$D_2^2/D_T^2 \int_0^{\theta} d\theta = \int_{z=9}^{z=4} dz_1/(2\, z_1 g)^{1/2}$$

$$\therefore \quad D_2^2/D_T^2\, \theta = (2/2\, g)\, \sqrt{2\, z_1 g} \Big|_{z=4}^{z=9}$$

3. Cálculos

3.1 Tiempo

$$(D_2^2/D_T^2)\, \theta = 1/g\, [\sqrt{2\,(9)\,(9.81)} - \sqrt{2\,(4)\,9.81}\,]$$

$$\theta = \frac{1}{9.81} \quad \frac{4}{0.0004} \quad (\sqrt{176.58} - \sqrt{78.48}\,)$$

$$\theta = 4516 \qquad s = 1.25 \text{ h}$$

4. **Resultado**

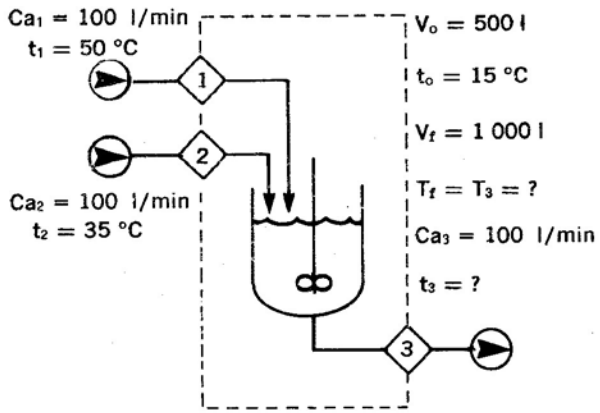
Tardaría 1.25 horas.

Problema 3.21

A un tanque entran 100 l/min de agua a 50 °C (Cp = 1), y por otro lado otros 100 l/min de agua, pero a 35 °C. Por el fondo del tanque se extraen 100 l/min del agua mezclada.

Si el tanque tiene una capacidad de 1 000 l y está lleno hasta la mitad con agua a 15 °C, ¿cuál será la temperatura del agua cuando se llene el tanque?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Este es un problema combinado de balances de masa y energía. Es también un problema de inventario, ya que

$$\text{masa inicial} + \text{acumulación} = \text{masa final}$$

$$\text{energía inicial} + \text{acumulación} = \text{energía final}$$

En este problema los cambios de energía cinética y potencial son despreciables en comparación con los cambios en la entalpía.

2.2 Acumulación de masa

$$L_1 = Ca_1\,\rho \qquad M_T = V_T\,\rho$$

$$L_2 + L_1 = L_2 + \frac{dMT}{d\theta} \quad \therefore \quad \frac{dMT}{d\theta} = L_1 + L_2 - L_3$$

2.3 Acumulación de energía

$$L_1\ H_1 + L_2\ H_2 = L_3\ H_3 + \frac{d(M_T H)}{d\theta}$$

$$L_1\ H_1 + L_2\ H_2 - L_3\ H_3 = M_T \frac{dH}{\theta d} + H \frac{dM}{d\theta}$$

$$H = Cp\ \Delta T$$

$$dH = Cp\ dT$$

$$L_1\ Cp_1\ (T_1 - T_0) + L_2\ Cp_2\ (T_2 - T_0) - L_2\ Cp_3\ (T_3 - T_0) = M_T\ Cp \frac{dT_3}{d\theta} + Cp\ (T_3 - T_0)\ (dM/d\theta)$$

$$L_1\ Cp_1\ T_1 + L_2\ Cp_2\ T_2 - S_1\ T_0 = 0 \quad M_T\ Cp \frac{dT_3}{d\theta} + Cp_3(T) \frac{dM_T}{d\theta}$$

3. Cálculos

3.1 Acumulación de masa

$$L_1 = 100\ \text{l/min}\ \left(\frac{1\ \text{kg}}{\text{l}}\right) = 100\ \text{kg};\ \text{Acumulación} = 100 + 100 - 100 =$$

$$= 100 = \frac{dM_T}{d\theta}$$

3.2 Tiempo de llenado

$$dM_T = 100\ d\theta \quad \therefore \quad \int dM_T = \int 100\ d\theta$$

$$M_T = 100\ \theta + K \quad a \quad \theta = 0 \quad M_T = 500\ l \times 1\ kg/l = 500\ kg$$

$$\therefore\ K = 500 \quad Si\ Mf = 1\,000\ kg \quad \therefore \quad \theta = (1\,000 - 500)/100 = 5$$

3.3 Acumulación de energía

$$Cp = 1\ \frac{kcal}{kg\ °C}\ ;$$

$$100\ (1)\ (50) + 100\ (1)\ (35) - 100\ (1)\ T_3 = (100\ \theta + 500)\ (1)\ \frac{dT_3}{d\theta} + (1)\ T_3\ (100)$$

$$5\,000 + 3\,500 - 100\ T_3 = (500 + 100\ \theta)\ \frac{dT_3}{d\theta} + 100\ T_3$$

$$8\,500 - 200\ T_3 = (500 + 100\ \theta)\ \frac{dT_3}{d\theta}$$

$$\frac{d\theta}{500 + 100\ \theta} = \frac{dT_3}{8\,500 - 200\ T_3}\ ; \int_{\theta = 0}^{5} \frac{d\theta}{500 + 100\ \theta} = \int_{15}^{Tf} \frac{dT_3}{8\,500 - 200\ T_3}$$

$$\frac{1}{100}\ \ln \frac{500 + 100\ (5)}{500} = \frac{1}{-200}\ \ln \frac{8\,500 - 200\ Tf}{8\,500 - 200\ (15)}$$

$$Tf = 35.625$$

4. **Resultados**

El tanque se llena en 5 minutos.

La temperatura final es de 35.62 °C.

PROBLEMAS PROPUESTOS

Problema 3.22

A un sistema se le añaden 50 kcal y realiza un trabajo de 70 000 ft – lb. ¿Cuál es el cambio de energía del sistema?

Resultado

El cambio de energía es de 27.25 kcal (esa energía la gana el sistema).

Problema 3.23

Una bomba extrae una solución de densidad relativa 1.84 de un tanque y la transfiere a otro tanque a través de una tubería de dos pulgadas a la velocidad de 130 gal/min.

El motor de la bomba es de 5 HP. El final de la línea está a 50 ft sobre el nivel del líquido almacenado. Calcule el ΔU del sistema por unidad de masa.

Resultado

El cambio de energía es de 29.27 $(\overrightarrow{ft} - lb/lb)$, ó, de 0.037 BTU/lb.

Problema 3.24

A una caldera se le alimenta agua a razón de 1.5 m/s por una tubería de cuatro pulgadas, a una temperatura de 15 °C y a una presión de 5 psig. De la caldera sale vapor a 315 °C y a una presión de 400 psig. ¿Cuál debe ser la cantidad de calor que debe adicionarse a la caldera si ésta trabaja a régimen permanente?

Resultado

$$Q = 8\,761.4 \text{ kcal/s}$$

Problema 3.25

Para el etano C_2H_6, ¿cuál es la fracción masa del carbono?, ¿cuál es la fracción mol del carbono?, ¿cuántos kilogramos átomos de hidrógeno hay por cada kilogramo átomo de carbono?, ¿cuántos kilogramos mol de hidrógeno hay por cada kilogramo mol de carbono?, ¿cuántos kilogramos mol de etano hay en 100 kg de esa sustancia?

Resultados

Hay 3 1/3 kg mol de etano en 100 kg de etano. La fracción masa de carbono es 0.8.

Hay 1.5 kg mol de hidrógeno por kg mol de carbono. Hay 3 kg átomo de hidrógeno por kg átomo de carbono.

Problema 3.26

Si se bombea agua a razón de 100 l/min en un tanque cilíndrico de 3 m de diámetro que está inicialmente vacío, y el agua deja el tanque a una velocidad que es proporcional a la altura del líquido en el tanque, de tal forma que se puede representar por **L** salida $=$ 20 h, encuentre la altura del líquido en el tanque en función del tiempo y, además, indique la altura máxima que puede alcanzar el líquido en el tanque (h $=$ altura).

Resultado

La altura máxima es de 5 m.

Problema 3.27

Un secador debe eliminar agua de un material que contiene 15% de agua en peso hasta que salga con 2% de humedad. Para efectuar el proceso se usa aire caliente. El aire entrante contiene 0.03 kg de agua/kg aire seco a una temperatura de 100 °C. El aire que sale del secador contiene 0.05 kg de agua/kg aire seco a 60 °C. ¿Cuántos m^3 de aire se deben introducir al secador por 100 kg de material húmedo?

Resultado

Se deben introducir 731 m^3 de aire.

Problema 3.28

Para separar alcohol puro de una mezcla de alcohol-agua, es necesario adicionar un tercer componente, como benceno, para así reducir la volatilidad del alcohol; ello hace posible obtener alcohol puro como producto de fondo. En uno de esos procesos se alimenta a la torre con una mezcla de 88% de alcohol y 12% de agua en masa, lo cual da un destilado con 17.5% de alcohol, 7.9% de agua y 74.6% de benceno en masa.

¿Qué volumen de benceno se debe alimentar a la columna por unidad de tiempo para producir 1 250 cm^3/s de alcohol puro en fondos y qué porcentaje de alcohol alimentado se obtiene como alcohol absoluto? (densidad del benceno 870 kg/m^3; densidad del alcohol 785 kg/m^3)

Resultados

Se deben introducir 2.06 l/s de benceno. Se obtiene 70.5% de alcohol puro.

Problema 3.29

La concentración máxima permisible de descarga de SO_2 a la atmósfera en una planta química es de y = 0.001 kg de SO_2/kg de gas total.

Por esta razón, una corriente que tiene una concentración másica de y = 0.005 kg de SO_2/kg de gas se tiene que tratar en una torre de absorción de donde sale con una concentración = 0.0005 kg de SO_2/kg de gas. ¿Qué fracción del gas se podría derivar?

Resultado

Se puede derivar 11.11% de la corriente entrante.

Problema 3.30

Para acondicionar un local se necesita aire con una humedad de 0.014 kg de agua/kg de aire seco. El aire saliente del local deberá tener una humedad máxima de 0.016. Para esta operación se cuenta con aire fresco de 0.005 de humedad, por lo que se piensa utilizar parte del aire saliente para mezclarlo con el aire fresco y así producir la mezcla que se introduce al local.

¿Qué cantidad de aire recirculado se deberá mezclar con aire fresco para producir la mezcla deseada?

Resultado

Se deben recircular 450 kg por cada 100 kg de aire entrante, o sea, el 81% del aire entrante al local.

Problema 3.31

La torta de un filtro contiene 25% de agua y 75% de sólidos y se va a secar por medio de aire en un secador de túnel a contracorriente con el aire. El aire de entrada al secador contiene 0.9% de humedad y sale con el 7% mientras que el sólido sale con 3% de agua en peso. Calcular la relación de kg de aire seco necesarios por kg de sólidos necesarios para el secado.

Resultado

Se requieren 342 kg/h de aire seco por cada 100 kg/h de torta húmeda.

Problema 3.32

A un evaporador se le alimentan continuamente 25 ton/h de una solución de 10% de NaOH, 10% de NaCl y 80% de H_2O en peso. Durante la evaporación, el agua se evapora y la sal se precipita como cristales que se dejan asentar y se eliminan. La solución concentrada saliente del evaporador contiene 50% de NaOH, 2% de NaCl y 48% de agua. Calcule los kilogramos de sal precipitados y los kilogramos de solución concentrada por hora de trabajo.

Resultados

Se evaporan 17 600 kg/h; la sal precipitada es de 2 400 kg/h; el gasto de disolución concentrada es de 5 000 kg/h.

Problema 3.33

Un tanque contiene 5 000 kg de óleum al 20%. Un óleum del 20% significa que en 100 kg de óleum hay 20 kg de SO_3 disuelto en 80 kg de H_2SO_4 puro.

¿Cuántos kilogramos de agua deben adicionarse al tanque para dar un ácido sulfúrico de 93.00% en peso?

Resultado

Se requieren 618 kg de H_2O.

Problema 3.34

A una torre de destilación se le alimentan 1 000 kg/h de una disolución de agua y alcohol. Esta alimentación se separa en un destilado que contiene 90% de alcohol y unos fondos que contienen 5% de alcohol. Parte del destilado se recicla como un reflujo.

Si el flujo total superior es de 1 000 kg/h y el flujo total de fondos es de 400 kg/h, ¿cuál es el gasto del reflujo? ¿Cuál es la relación de reflujo?

Resultados

El reflujo es de 400 kg/h y la relación de 0.4.

Problema 3.35

A un reactor de polimerización se le alimenta etileno puro. Cuando la polimerización se completa en un 60%, la mezcla se saca del reactor y se

manda a un separador. De allí salen dos corrientes, una con 90% de polietileno y 10% de etileno y la otra con vapores puros de etileno. Los vapores de etileno se reciclan. Calcule la relación de reciclado a alimentación.

Resultado

Se recicla el 50% de la alimentación.

Problema 3.36

Se bombea agua de un tanque cilíndrico alto de 3 metros de diámetro a flujo constante. Al hacer esto se nota que el nivel del tanque baja a razón de medio metro por hora.

¿Cuántos litros por minuto se descargan del tanque?, ¿cuál es la velocidad de descarga en m/seg si la tubería de salida tiene un diámetro interior de 6 pulgadas?

Nota: La masa velocidad se define como el gasto másico por unidad de área de sección perpendicular al flujo.

Resultado

Se descargan 235.61 l/min, con una masa velocidad de 500 kg/h m^2 y una velocidad de 0.2152 m/s.

Problema 3.37

Se van a destilar 6 000 kg/h de una mezcla de metanol y agua que contiene 40% en peso de metanol. Se espera que el destilado contenga 94% de metanol y los productos del fondo 1.5% de metanol en peso. Determine la cantidad destilada y los fondos obtenidos.

Resultados

Se obtienen 3 502.7 kg/h de productos del fondo y 2 497.3 kg/h de destilados.

CAPITULO IV

BALANCES DE MATERIA EN FLUJO DE FLUIDOS Y MEZCLADO

CAPITULO IV

OBJETIVOS

Al finalizar este capítulo, el lector: **a)** Será capaz de plantear y resolver problemas de balances de materia en flujo de fluidos. **b)** Será capaz de plantear y resolver problemas de balances de materia en el mezclado.

FLUJO DE FLUIDOS

Desde las más remotas épocas, el hombre se ha preocupado por el manejo y almacenamiento de los fluidos, especialmente por el agua, tan preciosa para la vida. Así es como se puede observar que cada pueblo y cultura dedicó grandes esfuerzos a la construcción de diques, canales, acequias, acueductos y cloacas.

Con el advenimiento de la revolución industrial, el hombre se vio forzado a manejar muchos fluidos nuevos, tanto líquidos como gaseosos. Actualmente, en cualquier planta de procesos de materiales se tiene siempre flujo de fluidos, ya sea en forma continua o intermitente; este flujo se realiza a través de tuberías con ayuda de bombas y compresoras. La red de tuberías conduce los materiales hasta los equipos en donde son procesados y almacenados. En este capítulo se harán balances de materia relacionados con el flujo y almacenamiento de fluidos, a reserva de volverse a tratar de nuevo cuando se trate el flujo de fluidos desde el punto de vista de balances de energía.

EQUIPOS EN USO

Como se dijo antes, los fluidos de una planta química se transportan generalmente por tuberías, las cuales son de un material que resista el ataque químico del fluido que se transporta.

Entre las características más importantes de las tuberías, aparte del material de que están hechas, se encuentra el número de cédula, el diámetro externo y el diámetro interno.

El número de cédula está definido por:

$$\text{No. de C} = 1\,000\ P/S$$

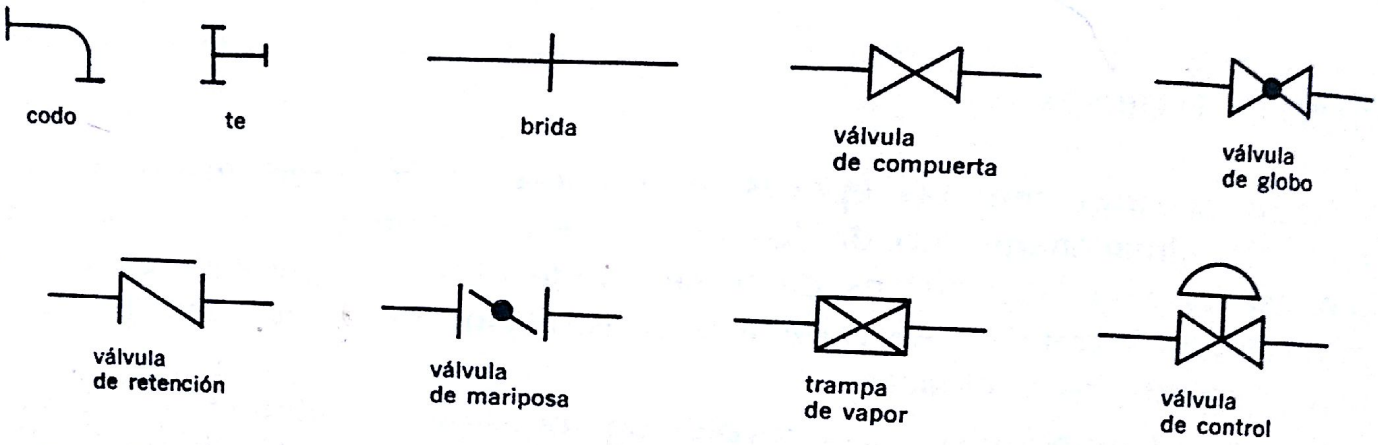
P = presión de trabajo interno en $\overrightarrow{lb}/in^2$

S = tensión permisible en $\overrightarrow{lb}/in^2$

El diámetro externo se usa para calcular recubrimientos de tuberías y para determinar los tamaños de las aberturas a través de las cuales deba pasar la tubería. El diámetro interno ID se usa para calcular los gastos.

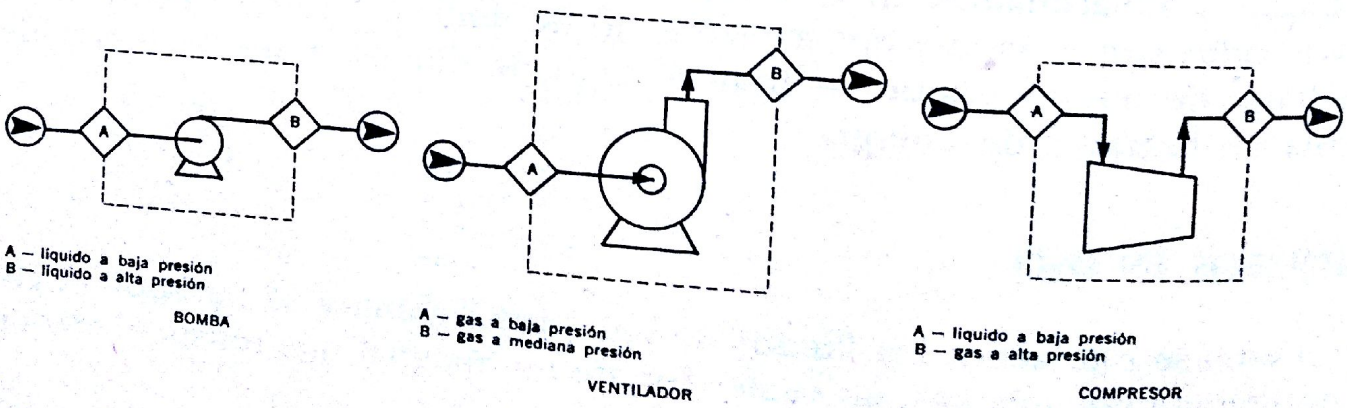
La red de ductos no sólo consta de la tubería propiamente dicha, sino de muy diversos accesorios que permiten el cambio de dirección de la tubería, el control y la medición del flujo.

Accesorios más usados:



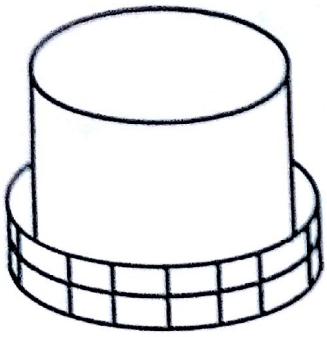
Para los fluidos que se desplazan en los ductos, es necesario con frecuencia el uso de bombas (en el caso de líquidos) o de compresores o ventiladores (en el caso de gases).

Bombas y ventiladores:

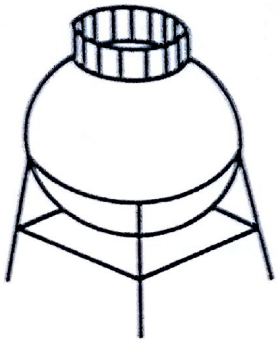


El almacenamiento de fluidos se efectúa en tanques y cisternas. En el caso del almacenamiento de gases o de gases licuados, los tanques deben diseñarse para soportar altas presiones y contar con dispositivos de seguridad.

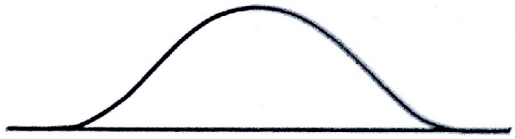
Tanques:



para líquido



para gases



para sólidos

Para el cálculo del volumen de fluido almacenado, es necesario recurrir a la geometría del tanque en cuestión. Las formas geométricas más usadas son

Esfera $V = 4/3\ \pi\ r^2$ $h =$ altura

Cilindro $V = \pi\ r^2\ h$ $r =$ radio

Paralelepípedo $V = l\ (a)\ h$ $l =$ largo $a =$ ancho

MEZCLADO

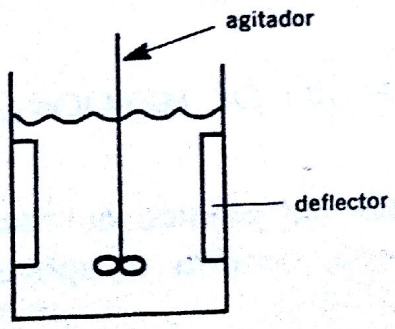
La operación de mezclado es frecuente en los procesos de ingeniería química, ya que por regla general en estos se trata más con mezclas de materiales que con sustancias puras.

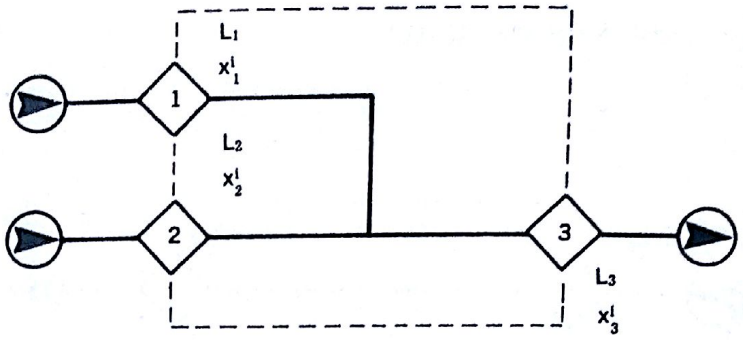
El mezclado se usa para preparar una combinación uniforme de dos o más sustancias o materiales; las sustancias que se mezclan pueden ser sólidos, líquidos o gases.

La operación de mezclado se utiliza para preparar diluciones, pinturas, alimentos, cerámica o como medio de aumentar la superficie de contacto entre las fases en otras operaciones como absorción, extracción, secado, etc.

EQUIPOS EMPLEADOS

Los líquidos se mezclan casi siempre en tanques provistos de agitadores y deflectores.





$L_1 + L_2 = L_3$ y para la sustancia i

$$L_1 x_1^i + L_2 x_2^i = L_3 x_3^i$$

En régimen transitorio se tendrá que:

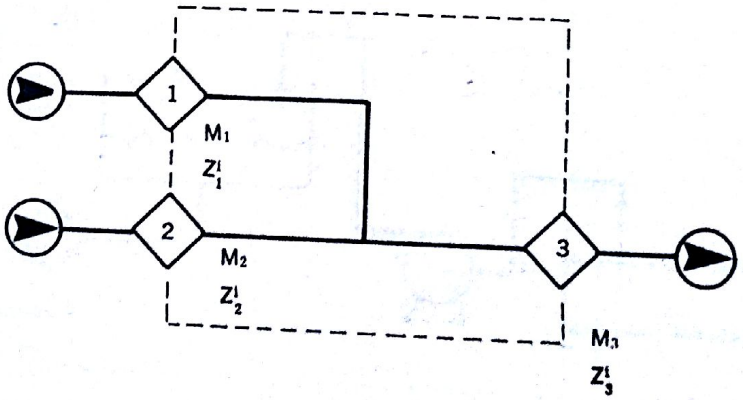
$$\left\{\begin{matrix}\text{rapidez de entrada}\\ \text{de materia.}\end{matrix}\right\} - \left\{\begin{matrix}\text{rapidez de salida de}\\ \text{materia.}\end{matrix}\right\} - \left\{\begin{matrix}\text{rapidez neta de}\\ \text{acumulación de}\\ \text{masa.}\end{matrix}\right\} = 0$$

La acumulación podrá ser positiva o negativa según que haya incremento o decremento de la cantidad de materia acumulada.

REGLA DE LA PALANCA

Los problemas de mezclado se pueden resolver también por medios gráficos. Estos se basan en la utilización de la regla de la palanca.

Si una corriente de concentración z_1^i y otra corriente de concentración z_2^i se mezclan, la composición final de la mezcla resultante caerá sobre la línea recta que conecta las composiciones z_1^i y z_2^i de tal manera que la relación M_1/M_2 será igual a la distancia desde z_2^i a z_3^i dividida por la distancia desde z_1^i a z_3^i o sea:



Balance total

$$M_1 + M_2 = M_3$$

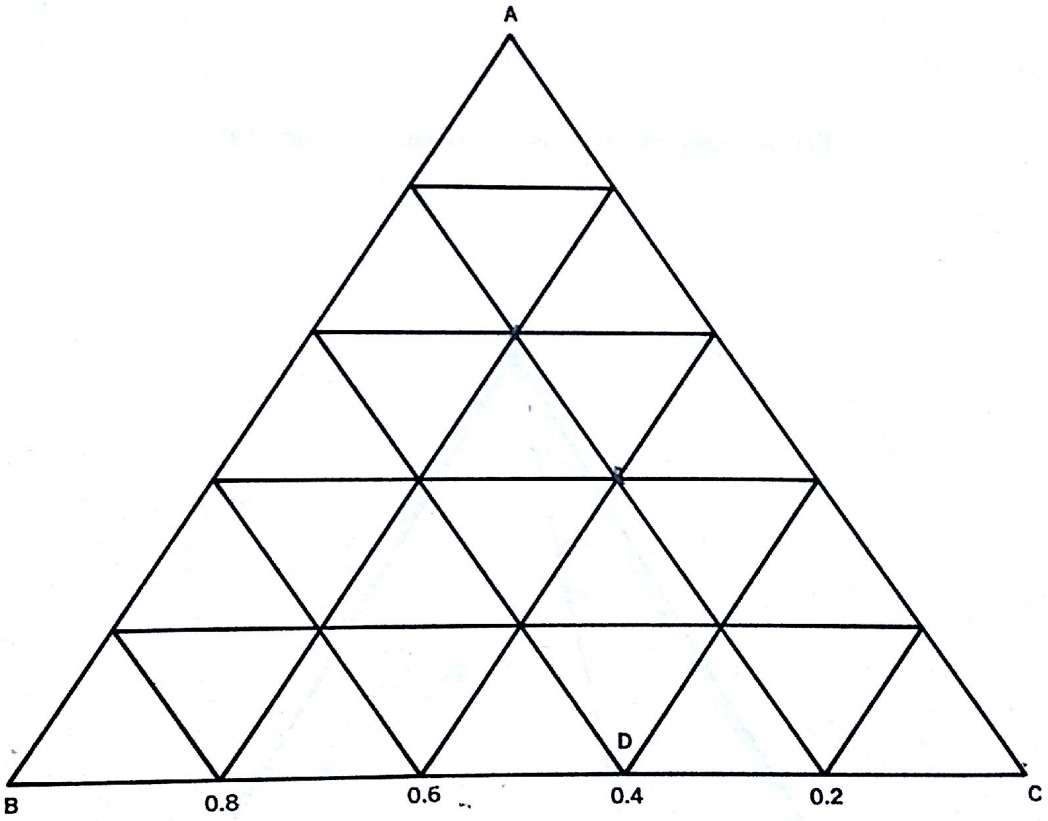
$$M_1 z_1^i + M_2 z_2^i = (M_1 + M_2) z_3^i$$

$$\therefore \frac{M_1}{M_2} = \frac{z_3^i - z_2^i}{z_1^i - z_3^i} = \frac{z_3 z_2}{z_1 z_3}$$

Las coordenadas triangulares son convenientes para representar la composición de un sistema de tres componentes. En el diagrama triangular los vértices representan componentes puros, y los lados mezclas de dos componentes.

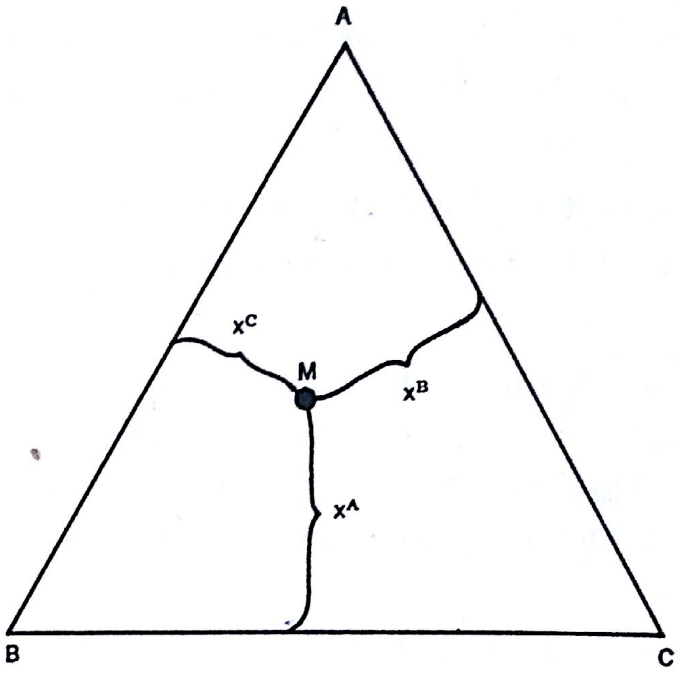
El punto A representa 100% del componente A, el punto D, de acuerdo con la regla de la planca, representa una mezcla binaria de 40% de B y 60% de C.

Si la altura del triángulo se toma como la unidad, la suma de dos distancias perpendiculares desde un punto situado en el interior del triángulo a los lados da igualmente la unidad y esas distancias pueden usarse para representar las concentraciones individuales de los tres componentes.

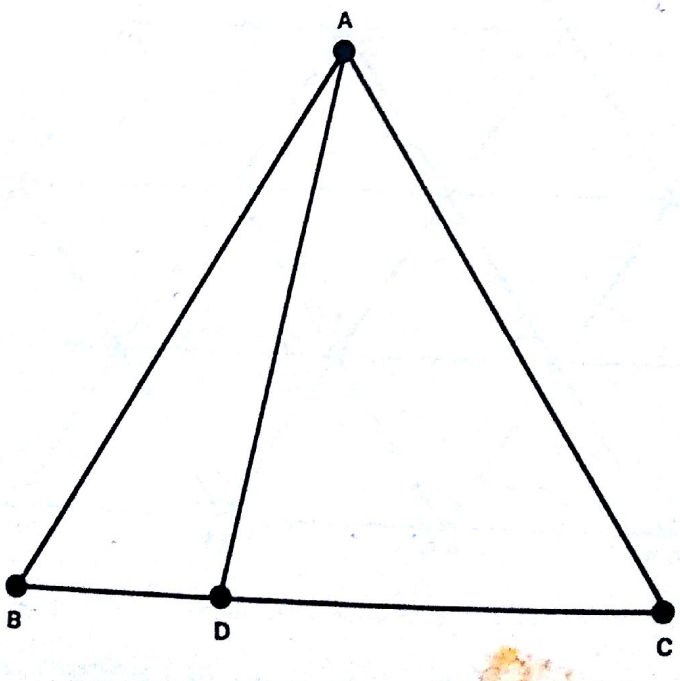


En el diagrama, la distancia x^B representa la concentración de la sustancia B en el punto M.

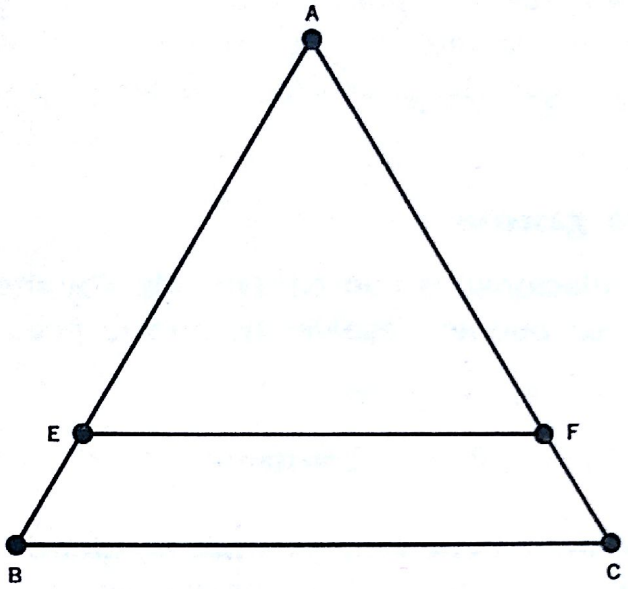
Todos los puntos de la línea que unen un vértice con un punto del lado opuesto representan mezclas de una misma relación entre las concentraciones de los componentes situados en los otros dos vértices.



En el segmento AD, $x_B/x_C =$ constante



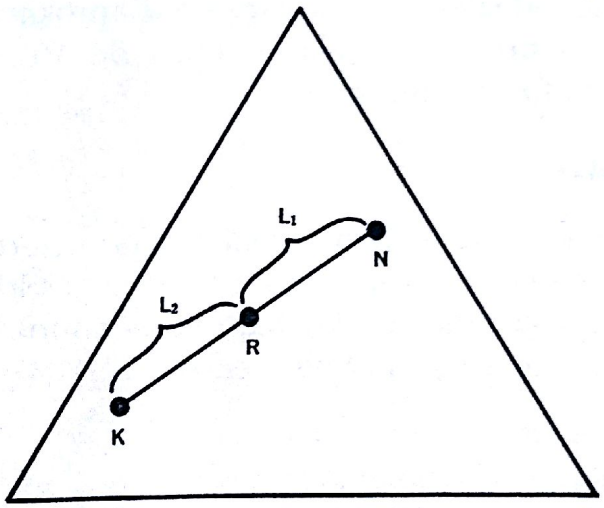
Las mezclas cuya composición corresponde a puntos sobre una recta paralela a un lado tienen una concentración constante del componente situado en el vértice opuesto.



En el segmento EF
x_A = constante

Si a L_1 kg de una mezcla situada en el punto K, se le añaden L_2 kg de una mezcla situada en el punto N, la nueva mezcla tendrá una composición dada por R, tal que:

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{RN}{RK} = \frac{x_N^i - x_R^i}{x_R^i - x_K^i}$$



GASES Y MEZCLA DE GASES

Los gases son de importancia vital en los procesos químicos, ya sea como reactivos, intermediarios o productos. El volumen ocupado por un peso dado de gas varía con la temperatura y la presión, así como con la composición del gas. Al tratar las propiedades de los gases, se nota que

cada gas difiere de los otros en su comportamiento cuantitativo, aunque hay ciertas relaciones simples que se aplican a los gases en general. En realidad, hay muchos casos en la industria en donde las leyes simples predicen el comportamiento con la precisión suficiente para hacerlas útiles.

Ecuación general del estado gaseoso

Toda clase de problemas relacionados con cambios de volumen, presión o temperatura de los gases, se pueden resolver usando la ecuación general del estado gaseoso:

$$V_1 P_1/T_1 = V_2 P_2/T_2 = \text{constante}$$

En esta ecuación, la temperatura debe estar siempre en grados absolutos; en cambio, la presión y el volumen pueden ponerse en cualquier tipo de unidades. Toda clase de problemas relacionados con la masa, volumen, presión y temperatura de los gases se pueden resolver utilizando la ley de los gases ideales:

$$P V = \tilde{m} R T$$

En donde $\tilde{m}$ es el número de moles y R la llamada constante universal de los gases.

La ley de los gases ideales es una excelente aproximación a la ecuación de los gases reales a presiones bajas (menos de 10 atm) y temperaturas mayores de cero grados centígrados.

Condiciones estándar

Son las condiciones que se han tomado como norma o base para reportar el volumen ocupado por un gramo mol de gas ideal. Las condiciones estándar son 0 °C y 760 mm de Hg; bajo estas condiciones, 1 gramo mol de un gas cualquiera ocupará un volumen de 22.41 l.

Ley de Dalton

La presión ejercida por cada componente de una mezcla gaseosa es la misma que ejercería el compuesto si estuviera solo en el mismo volumen ocupado por la mezcla a la temperatura de referencia; de ello se deduce que la suma de las presiones parciales de los componentes de una mezcla es igual a la presión total:

$$P_T = \tilde{P}_1 + \tilde{P}_2 + \tilde{P}_3 + \ldots + \tilde{P}_n$$

Ley de Amagat

El volumen de una mezcla gaseosa es igual a la suma de los volúmenes parciales de los componentes individuales a la misma temperatura y presión de la mezcla:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + \ldots + V_n = \Sigma V_i$$

En donde el volumen parcial de un gas en una mezcla, se define como el volumen que el gas ocuparía si estuviese solo en el recipiente a T y P.

De la ley de los gases ideales, se tiene que:

$$P_1 V_1 = \tilde{m}_1 R T \qquad P V_T = \tilde{m}_T R T$$

$$\frac{V_1}{V_T} = \frac{\tilde{m}_1}{\tilde{m}_T} = \frac{\tilde{m}_1}{\tilde{m}_1 + \tilde{m}_2 + \tilde{m}_n} = \tilde{y}_1$$

$$\therefore V = V_T \tilde{y}_1$$

Esto indica que, en los gases ideales, el volumen de un componente puro es igual al producto del volumen total por la fracción molar de dicho componente; también el porciento en volumen de un gas en una mezcla es igual al porcentaje en mol.

Gases reales

Los gases reales siguen la ley de los gases ideales a presiones menores de 10 atm y temperaturas mayores de 0 °C; por encima de esto la mayor parte de los gases presentan desviaciones del comportamiento ideal; estas desviaciones pueden llegar a ser hasta de varios cientos por ciento con respecto a la idealidad.

Una de las ecuaciones más famosas para predecir el comportamiento de los gases reales es la llamada ecuación de Van der Waals:

$$(P + \mathbf{a}/(V)^2)\ (V - \mathbf{b}) = R T$$

La ecuación anterior representa el comportamiento de un gas puro. En ella, V es el volumen, a representa las fuerzas de atracción intermoleculares y b es el volumen efectivo. En el Apéndice III se presentan datos de a y b para los gases más comunes.

$$(P + \tilde{m}^2 \mathbf{a}/V^2)\ (V - \tilde{m}\,\mathbf{b}) = \tilde{m} R T \text{ para más de un mol.}$$

Estados correspondientes

Van der Waals sugirió que el comportamiento de las diferentes sustancias se hacía cuantitativamente similar si la presión, la temperatura y el volumen se expresaban en un nuevo tipo de unidades.

2.2 Volumen desplazado y gasto volumétrico

$$\Delta V = \frac{\pi}{4} D^2 \frac{l}{2} = \frac{\pi}{8} D^2 l \qquad L = \frac{\pi D^2 l}{\theta\, 8}$$

2.3 Diámetro de la tubería

$$L = A\rho U \qquad L = AU \qquad \therefore \qquad A = L/U \qquad y \qquad \pi/4\, D^2_{tubo} = L/U$$

3. Cálculos

3.1 Gasto volumétrico

$$L = (\pi/8)\,(4)^2\, 6.5/24 = 1.5\ m^3/min$$

3.2 Diámetro de la tubería

$$D = \sqrt{\frac{4\,(1.5)\,\frac{m^3}{min}}{\pi\,(6.5)\,\frac{ft}{s}\left(\frac{0.305\ m}{1\ ft}\right)\left(\frac{60\ s}{1\ min}\right)}} = 0.1267\ m$$

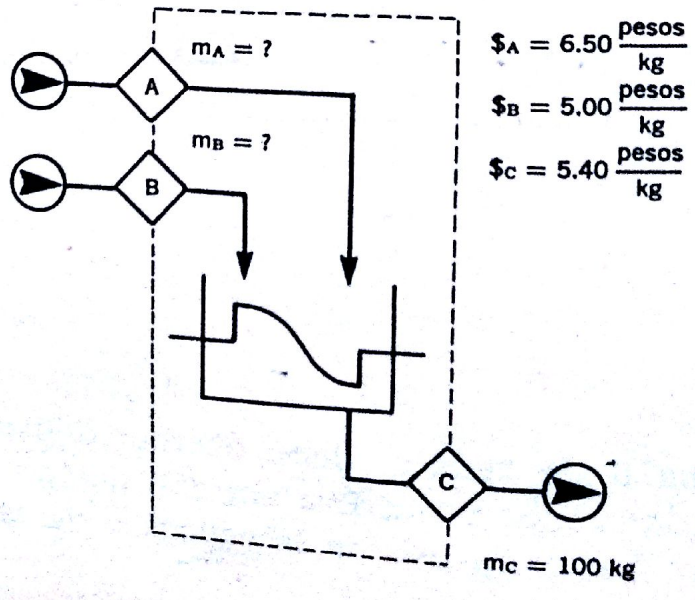
4. **Resultados**

El caudal de agua es de 1.5 m^3/min, el cual fluye a través de una tubería de 0.1267 m, o aproximadamente 5 pulgadas de I.D.

Problema 4.2

Se tienen dos tipos de alimento para aves, uno de 5 pesos el kg y el otro de 6.5 pesos el kg. Para hacer una mezcla de 100 kg y de un precio de 5.40 pesos el kg, ¿cuántos kilogramos de cada calidad se deben mezclar?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Se deberán hacer dos balances, uno de materia y otro de costos, que se resolverán simultáneamente.

2.2 Balance total de masa

$$m^A + m^B = m^C$$

$$m^A \$^A + m^B \$^B = m^C \$^C$$

3. Cálculos

3.1 Balances

$$m^A + m^B = 100$$

$$m^A (6.5) + m^B (5) = 100 (5.40)$$

$$(100 - m^B)\, 6.5 + m^B (50) = 540$$

$$650 - 6.5\, m^B + 5.0\, m^B = 540$$

$$-1.5\, m^B = -110$$

$$m^B = 73.33 \text{ kg}$$

$$m^A = 26.66 \text{ kg}$$

4. **Resultados**

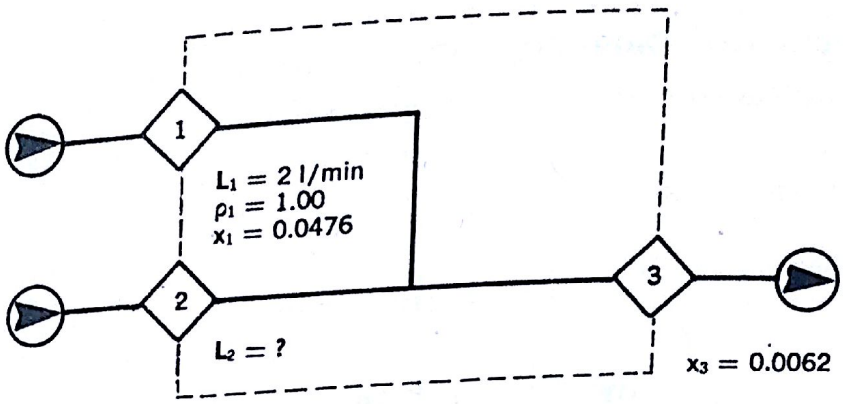
Para fabricar 100 kg de alimento para aves de 5.4 pesos se necesitan 26.66 kg del alimento de 6.5 pesos y 73.33 kg del alimento de 5 pesos.

Problema 4.3

A una corriente se le añade una sustancia de manera que la concentración sea del 4.76% en masa de esa sustancia. La corriente se une a otra y corriente abajo se toma una muestra de las corrientes combinadas, que dan una concentración de 0.62% en peso de la sustancia. Si el flujo de la primera corriente es de 2 litros por minuto, ¿cuál será el caudal de la otra corriente?

Nota: tome la densidad relativa $= 1$

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

En un problema de mezclado, lo que entra en las dos corrientes debe salir en la corriente de unión.

2.2 Balance total

$$\text{a } \rho_R = \text{constante} \qquad L_1 + L_2 = L_3 \qquad \text{o} \qquad L_1 + L_2 = L_3$$

2.3 Balance de sustancia

$$L_1 x_1^{sus} + L_2 x_2^{sus} = L_3 x_3^{sus}$$

3. Cálculos

3.1 Balance parcial

$$2\frac{\text{kg}}{\text{min}}\left(\frac{0.047 \text{ kg de sustancia}}{\text{kg total}}\right) + L_2 x_2^{sus} = L_3\left(\frac{0.0062 \text{ kg de sustancia}}{\text{kg total}}\right)$$

$$0.0952 \text{ kg sustancia/min} = L_3\,(0.00062) \text{ kg de sustancia/kg total}$$

$$L_3 = 15.35 \text{ kg total/min}$$

3.2 Balance total

$$2 \text{ kg total/min} + L_2 = 15.35 \text{ kg total/min}$$

$$L_2 = 13.35 \text{ kg total/min}$$

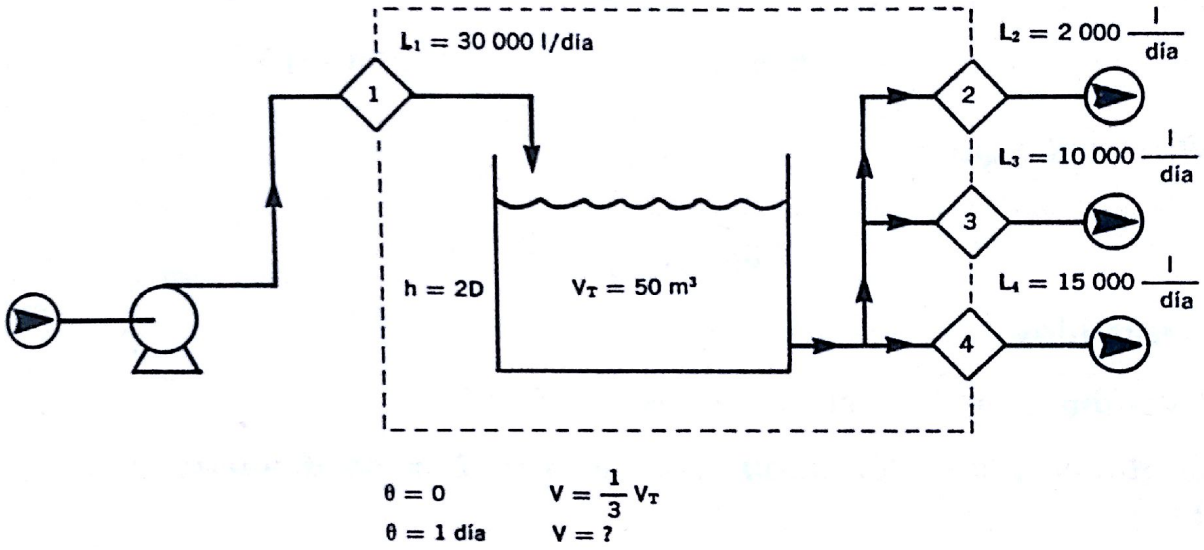
4. **Resultado**

La otra corriente tiene un gasto de 13.35 kg/min o 13.35 l/min.

Problema 4.4

Un depósito de agua de 50 m³ se usa para abastecer de agua a una planta; durante un día de operación se extrae agua de él por 3 tomas diferentes. El agua extraída fue de 2 000 l, de 10 000 y 15 000 l, y al mismo tiempo el tanque recibió 30 m³. Si al comienzo de las operaciones el tanque estaba a un tercio de su capacidad, ¿cuánta agua habrá en el tanque al final del día? Si se usa un tanque cilíndrico en el que la altura sea el doble del diámetro, ¿hasta qué altura llegará el líquido?

1. Traducción



$\theta = 0$ $\quad V = \frac{1}{3} V_T$

$\theta = 1$ día $\quad V = ?$

2. Planteamiento

2.1 Discusión

En este tanque se tienen tanto entrada como salidas y acumulación. Se aplica, por tanto, la ecuación completa de balance de masa.

2.2 Balance

$$\{\text{Entrada}\} - \{\text{Salidas}\} - \{\text{Acumulación}\} = 0$$

$$L_1 - L_2 - L_3 - L_4 - \text{Acumulación} = 0$$

2.3 Volumen del tanque

$$V = \pi/4\,(D^2\,h) = \pi/4\,(2\,D^3)$$

3. Cálculos

3.1 Acumulación

$$30\,000 \text{ l/día} = 2\,000 \text{ l/día} + 10\,000 \text{ l/día} + 15\,000 \text{ l/día} + \text{Acumulación}$$

$$\text{Acumulación} = 3\,000 \text{ l/día}$$

3.2 Volumen final de agua en el tanque

$$50\,000\,(0.33) + 3\,000 = \text{Volumen final}$$

$$\text{Volumen final} = 19\,700\ \text{l}$$

3.3 Dimensiones del tanque

$$50 = 2/4\,(\pi D^3) \qquad D = \sqrt[3]{100/\pi} = 3.1692\ \text{m} \qquad h = 6.33\ \text{m}$$

3.4 Altura del líquido en el tanque

Líquido contenido por m de altura

$$V = \pi/4\,(3.1692)^2\,(1) = 7.888\ \text{m}^3/\text{m}$$

Altura del líquido

$$\frac{19.7\ \text{m}^3}{7.888\ \text{m}^3/\text{m}} = 2.49\ \text{m}$$

4. **Resultados**

El volumen final en el tanque es de 19 700 l.

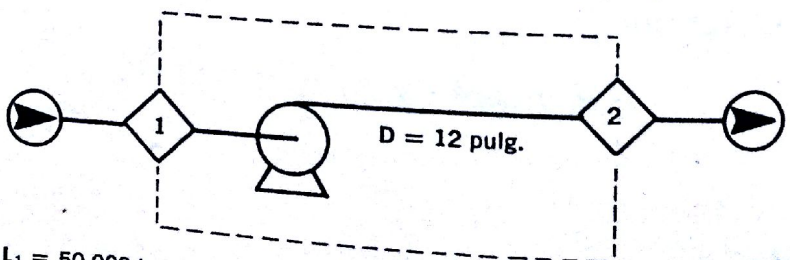
Las dimensiones del tanque son de 3.1692 m de diámetro y 6.33 m de altura.

El líquido contenido en el tanque llega a una altura de 2.49 m.

Problema 4.5

Por un oleoducto de 12 pulgadas de diámetro interior fluye petróleo crudo a razón de 50 000 barriles diarios. Calcule la velocidad lineal del petróleo en metros por segundo. Si la densidad es de 0.8 g/cm³, ¿cuál será el flujo másico en kilogramos por segundo y el flujo volumétrico en metros cúbicos por segundo?

1. Traducción



$L_1 = 50\,000$ barriles/día
$U_1 = ?$
$L = ?$ kg/s
$L = \frac{m^3}{s}$

2. Planteamiento

2.1 Discusión

Para resolver el problema se deberá hacer la conversión de barriles a m^3 y con la densidad se pasará a masa. La velocidad se puede obtener por la ecuación de la continuidad.

2.2 Flujo másico

$$L = L\rho$$

2.3 Velocidad

$L_1 = A_1U_1 \qquad U_1 = L_1/A_1$

3. Cálculos

3.1 Flujo volumétrico

$L_1 = 50\,000$ barriles/día (42 galones/barril) (3.785 l/galón) (m^3/1 000 l) (1 día/24 h) (1 h/3 600 s)

$$L_1 = 0.09199 \text{ m}^3/\text{s}$$

3.2 Flujo másico

$$L = 0.09199 \text{ m}^3/\text{s } (0.8 \text{ kg/l}) (1\,000 \text{ l/m}^3) = 73.59 \text{ kg/s}$$

3.3 Velocidad

$$U = \frac{0.09199 \dfrac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\dfrac{\pi}{4}[(12)\ (0.0254)]^2\ \text{m}^2} = \frac{0.09199}{0.07296} = 1.26 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

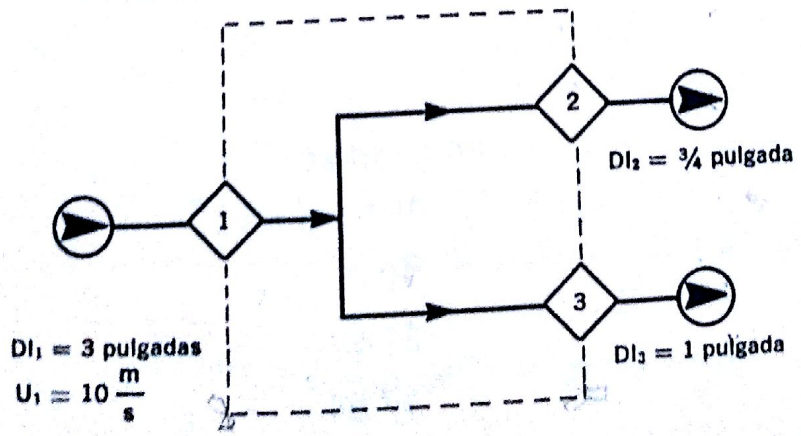
4. **Resultados**

El flujo másico es de 73.59 kg/s y la velocidad de 1.26 m/s.

Problema 4.6

En una tubería de 3 pulgadas de diámetro interior, un líquido viaja a 10 m/s.. Esta tubería se bifurca luego en dos más. ¿Cuál será a velocidad del líquido en cada tubería si éstas son de 1 pulgada de diámetro interior?. ¿Cuánto líquido viaja en cada rama? (Suponga que no existen pérdidas por fricción).

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Se deberá hacer uso de la ecuación de continuidad para obtener las velocidades en las tuberías. Como no hay fricciones, la velocidad deberá ser la misma en la tubería 2 y en la 3.

2.2 Ecuación de continuidad a densidad constante

$$\mathbf{L}_1 = \mathbf{L}_2 + \mathbf{L}_3$$
$$U_2A_2 + U_3A_3 = U_1A_1 = U_2\,(A_2 + A_3)$$

2.3 Líquido que viaja en cada rama

$$\mathbf{L}_2 = U_2A_2 \qquad \mathbf{L}_1 = U_1A_1$$
$$\mathbf{L}_3 = U_3A_3$$

3. Cálculos

3.1 Gasto volumétrico en 1

$$A_1 = \pi/4\,(3)^2 = 7.0686\ \text{in}^2 = 45.6\ \text{cm}^2 = 0.00456\ \text{m}^2$$
$$\mathbf{L}_1 = 10\ \text{m/s}\ (0.00456)\ \text{m}^2 = 0.0456\ \text{m}^3/\text{s} = 45.6\ \text{l/s},$$

3.2 Areas de flujo de A_2 y A_3

$$A_3 = \pi/4\,(1)^2 = 0.7854\ \text{in}^2 = 5.067\ \text{cm}^2 = 0.000506\ \text{m}^2$$
$$A_2 = \pi/4\,(0.75)^2 = 0.4417\ \text{in}^2 = 0.000285\ \text{m}^2$$

3.3 Velocidad en 2 y 3

$$0.0456 = U_2\,(0.000506 + 0.000285)$$
$$U_2 = 57.64\ \text{m/s}$$

3.4 Flujos en 2 y 3

$$\mathbf{L}_2 = 57.64\ (0.000285) = 0.01642\ \text{m}^3/\text{s}$$
$$\mathbf{L}_3 = 57.64\ (0.000506) = 0.02916\ \text{m}^3/\text{s}$$

4. **Resultados**

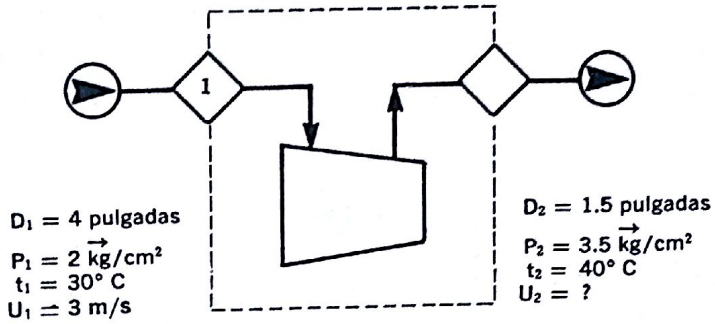
Tubería	Velocidad m/s	Flujo m^3/s
3 pulgadas	10	0.0456
1 pulgada	57.64	0.02916
3/4 pulgada	57.64	0.01642

Problema 4.7

En un punto de una línea de 4 pulgadas de diámetro interior un gas tiene una presión de 2 $\overrightarrow{kg}/cm^2$ a 30 °C y viaja a una velocidad de 3 m/seg. El gas pasa por un compresor y de allí a una tubería de 1.5 pulgadas. La presión del gas en esa tubería es de 3.5 $\overrightarrow{kg}/cm^2$ a una temperatura de 40 °C.

¿Cuál será la nueva velocidad del gas?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Como se trata de gases, hay un cambio de densidad al variar la temperatura y la presión. Esto se puede medir con la ley de los gases ideales.

2.2. Ecuación de continuidad

$$G_1 = G_2 \qquad A_1 \rho_1 U_1 = A_2 \rho_2 U_2$$

pero $\rho = m/v = P\,PM/RT$

$$U_2 = U_1 \left(\frac{A_1}{A_2}\right)\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)$$

$$U_2 = U_1 \left(\frac{A_1}{A_2}\right)\left(\frac{T_2}{T_1}\right)\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$$

3. Cálculos

3.1 Areas

$$A_1 = \frac{\pi}{4} D_1^2 = \frac{3.1416}{4} [4\ (0.0254)]^2 = 0.008107\ m^2$$

$$A_2 = \frac{3.1416}{4} [1.5\ (0.0254)]^2 = 0.00114\ m^2$$

3.2 Ecuación de continuidad

$$U_2 = 3\,\frac{m}{s}\left(\frac{0.008107}{0.00114}\right)\left(\frac{273 + 40}{273 + 30}\right)\left(\frac{2}{3.5}\right) = 12.59\,\frac{m}{s}$$

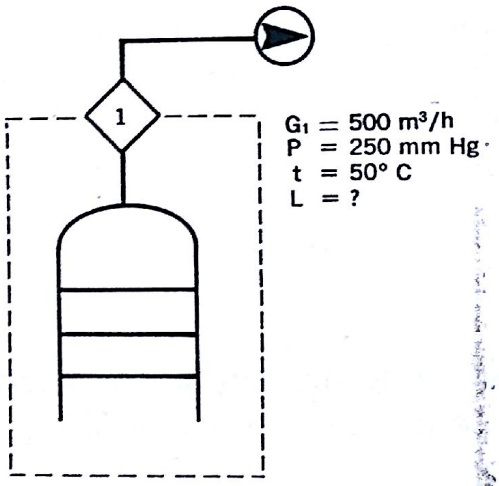
4. **Resultado**

La velocidad del gas es de 12.59 m/s.

Problema 4.8

Una columna de destilación produce vapores de benceno a razón de 500 m^3/h a la presión de 250 mm de Hg y 50 °C. ¿Cuánto peso de benceno se destila por hora?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Por la presión y temperatura del problema, se observa que puede resolverse por medio de los gases ideales.

2.2 Masa destilada

$$PV = (G/PM)\,RT \qquad G = PV\,PM/RT$$

3. Cálculos

3.1 Masa destilada

$$G = \frac{250\,(500)\,(78)}{760\,(0.082)\,(273 + 50)} = 484\,\frac{kg}{h}$$

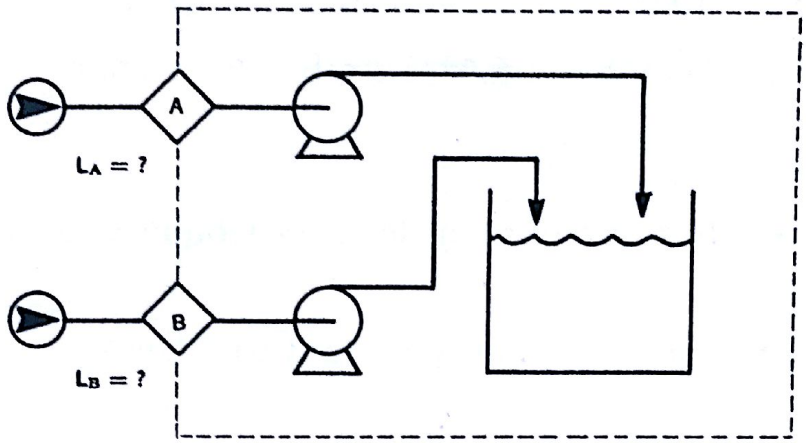
4. **Resultado**

Se destilan 484 kg/h de benceno.

Problema 4.9

Dos bombas llenan un depósito en 8 h. ¿Cuánto tiempo necesitará cada una para llenarlo separadamente, sabiendo que la primera bomba tarda 4 h más que la segunda? Si el volumen del tanque fuera de 100 m³, ¿cuáles serían los gastos de cada bomba?

1. Traducción



$L_A(8) + L_B(8) = 100\ m^3$

2. Planteamiento

2.1 Discusión

Con base en los gastos se pueden plantear ecuaciones que resuelvan el problema.

2.2 Gasto en las bombas

$$L_A\,\theta_A = V_T \qquad \theta_B = \theta_A + 4$$
$$L_B\,\theta_B = V_T \qquad L_B\,(\theta_A + 4) = V_T$$

2.3 Gasto combinado

$$L_A\theta + L_B\theta = V_T$$

3. Cálculos

3.1 Gastos y tiempos

$$L_A\,(8) + L_B\,(8) = V_T \quad (I)$$
$$L_A\,\theta_A = V_T \qquad L_A = V_T/\theta_A$$
$$L_B\,(\theta_A + 4) = V_T \qquad L_B = \frac{V_T}{(\theta_A + 4)}$$

Sustituyendo en I

$$\frac{V_T}{\theta_A}(8) + \frac{V_T}{\theta_A + 4}(8) = V_T$$

$$\theta_A^2 - 12\,\theta_A - 32 = 0$$

$$\therefore \quad \theta_A = 14.2 \qquad \theta_B = 18.2$$

3.2 Gastos si el volumen del depósito es de 100 m^3

$$L_A = 100/14.2 = 7.04\ m^3/h = 117\ l/min$$

$$L_B = 100/18.2 = 5.4945\ m^3/h = 91.5\ l/min$$

4. Resultados

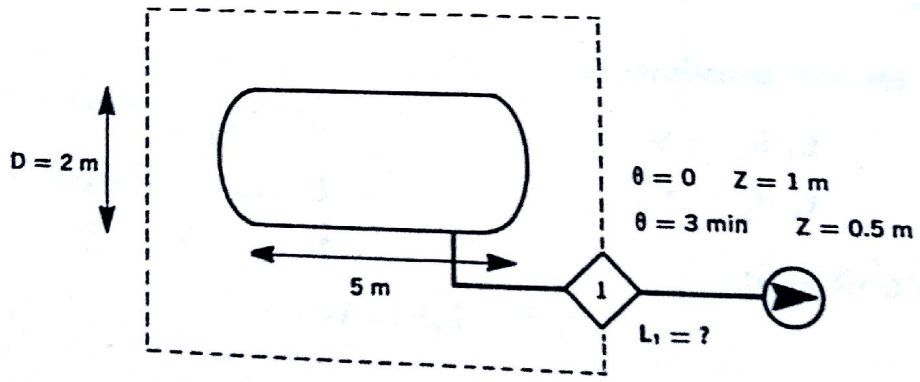
La bomba A tarda 14 h, 12 min en llenar el tanque y la bomba B tarda 18 h y 12 min.

El gasto de A es de 117 l/min y el de B 91.5 l/min.

Problema 4.10

En un tanque cilíndrico horizontal usado en una industria, la altura de agua baja de 1 m a 0.5 m en 3 min. Si el tanque tiene un diámetro de 2 m y una longitud de 5 m, ¿cuál fue el gasto volumétrico?

1. Traducción

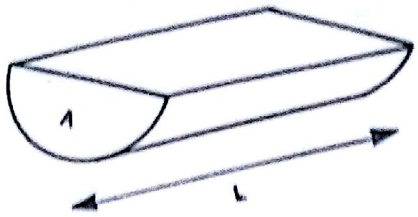


2. Planteamiento

2.1 Discusión

Cuando un tanque horizontal cilíndrico está parcialmente lleno se deben hacer deducciones para obtener el volumen.

2.2 Volumen de líquido.

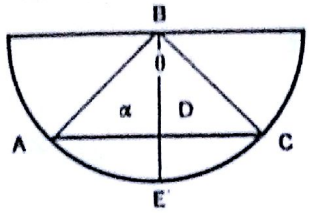


Volumen = área del segmento (longitud)

Area ACE = área del sector-área triangular

Area sector = área ABCE = 1/2 rS = 1/2 $r^2\theta$

Area segmento = 1/2 r^2 (θ − sen θ)



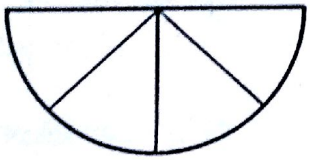
Area triángulo = $\frac{r \text{ sen } \alpha}{2}$ r cos α

Area ACE = Area ABCE − área ABC

3. Cálculo

3.1 Volumen inicial

En este caso



Area = $\pi r^2/2$ = 1.57 m^2

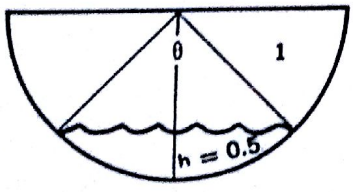
Volumen = 1.57 (5) = 7.85398 m^3

3.2 Volumen final

sen α = 0.5/1 = 0.5

$\alpha = 30°$ $2\alpha = 60°$ $\therefore$ $\theta = 120°$

θ = 2.0944 radianes sen θ = 0.866



Area segmento = 1/2 $(1)^2$ (2.0944 − 0.866) = 0.6144 m^2

Volumen = 0.6144 (5) = 3.07255 m^3

150

3.3 Gasto

$$L = \frac{7.85398 - 3.07255}{3} = 1.593 \frac{m^3}{min}$$

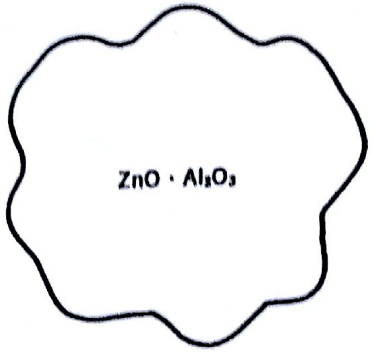
4. **Resultado**

El gasto volumétrico fue de 1.593 m^3/min.

Problema 4.11

Una muestra de $ZnO \cdot Al_2O_3$ que pesa 1.909 g dio un análisis de 1.664 g de $ZnSO_4$. ¿Cuál será el porcentaje de Al_2O_3 en la muestra? ¿Es una muestra pura?

1. Traducción



$m = 1.909$ g
$m_{ZnSO_4} = 1.664$ g
$x_{Al_2O_3} = ?$
Pureza del $ZnO \cdot Al_2O_3 = ?$

2. Planteamiento

2.1 Discusión

Para resolver este problema debemos usar la tabla de pesos atómicos, con los que encontraremos la relación que debe existir entre el ZnO y el Al_2O_3 en una mezcla pura.

2.2 Cantidad de ZnO en la muestra

$$Zn\,SO_4 \longrightarrow SO_3 + ZnO$$

$$\tilde{m}_{ZnSO_4} = \tilde{m}_{ZnO}$$

$$m_{ZnO} = \frac{PM_{ZnO}\,(m_{ZnSO_4})}{PM_{ZnSO_4}}$$

2.3 Porcentaje de Al_2O_3 en la muestra

$$\%\ Al_2O_3 = \frac{m_{Al_2O_3}}{m_{ZnO \cdot Al_2O_3}}\ (100)$$

2.4 Pureza de la muestra

$$x_{ZnO}^{\text{en muestra}} / x_{ZnO\ \text{teórico}} (100) = \text{Pureza}$$

3. Cálculos

3.1 Cantidad de ZnO en la muestra

$$PM_{ZnSO_4} = PA_{Zn} + PA_S + 4\,PA_O = 65.37 + 32.064 + 4\,(16) = 161.434$$

$$PM_{ZnO} = PA_{Zn} + PA_O = 65.37 + 16 = 81.37$$

$$\therefore m_{ZnO} = 81.37\,(1.664)/161.434 = 0.8387\ g$$

3.2 Porcentaje de Al_2O_3 en la muestra

$$\%\ Al_2O_3 = \frac{1.909 - 0.8387}{1.909}\,(100) = 56.06\%$$

3.3 Pureza

$$PM_{ZnO \cdot Al_2O_3} = 183.33$$

$$x_{ZnO}\ \text{teórica} = 81.37/183.33 = 0.4438$$

$$\text{Pureza} = (0.4394/0.4438)\,(100) = 99\%$$

4. **Resultados**

El porcentaje de Al_2O_3 en la muestra es 56.6 y la muestra tiene una pureza del 99%.

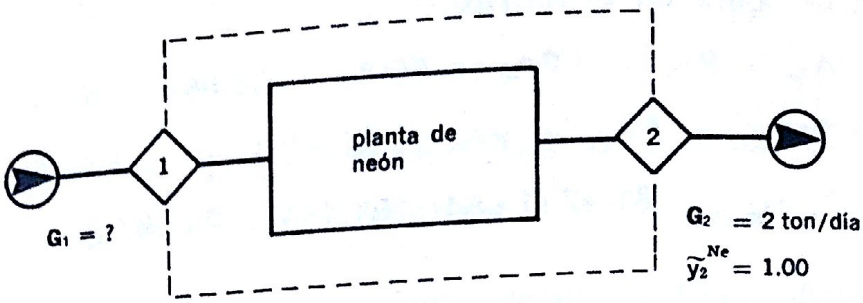
Problema 4.12

La composición volumétrica del aire es la siguiente en %:

Nitrógeno	78.03%
Oxígeno	20.99
Argón	0.94
Hidrógeno	0.01
Neón	0.0015
Helio	0.0005
Kriptón	0.00011
Xenón	0.000009

¿Cuál es el peso molecular del aire? ¿Cuál será la fracción masa de los componentes? ¿Cuál es la densidad del aire a C.E.? Si se necesita producir 2 toneladas métricas por día de neón, ¿cuántos m^3 de aire a C.E. deberían tratarse?

1. Traducción



$\tilde{y}_1^{H_2}$ = 0.0001
PM aire ?
$\tilde{y}_1^{N_2}$ = ?
$\tilde{y}_1^{O_2}$ = ?

$\tilde{y}_1^{N_2}$ = 0.7803
$\tilde{y}_1^{O_2}$ = 0.2099
$\tilde{y}_1^{A}$ = 0.0094
$\tilde{y}_1^{Ne}$ = 0.000015

2. Planteamiento

2.1 Discusión

El peso molecular de una mezcla gaseosa será igual a la suma de las fracciones mol por el peso molecular de cada componente.

2.2 Peso molecular

$$PMaire = \tilde{y}_1^{N_2} PM_{N_2} + \tilde{y}_1^{O_2} PM_{O_2} + \tilde{y}_1^{Ne} PM_{Ne} + \tilde{y}_1^{H_2} PM_{H_2} + \tilde{y}_1^{He} PM_{He} + \tilde{y}_1^{Kr} PM_{Kr} + \tilde{y}_1^{Xe} PM_{Xe} + \tilde{y}_1^{A} PM_{A}$$

2.3 Fracción peso

$$y_1^{N_2} = \tilde{y}_1^{N_2} PM_{N_2}/PMaire \qquad y_1^{O_2} = \tilde{y}_1^{O_2} PM_{O_2}/PMaire$$

2.4 Aire necesario

$$L_1 y_1^{Ne} = L_2 y_2^{Ne} \qquad \mathbf{L_1} = L_1/\rho_{aire\ C\ E}$$

2.5 Densidad a condiciones estándar

$$\rho = m/v = P\ PM/RT$$

3. Cálculos

3.1 Peso molecular

$$PM_{aire} = 0.7803\ (28.0134) + 0.2099\ (31.9988) + 0.000015\ (20.183) + 0.000005\ (4.0026) + 0.0000011\ (83.80) + 0.000000009\ (131.3) + 0.0094\ (39.948) + 0.0001\ (2.01594) = 28.95154$$

3.2 Fracción masa

$$y_1^{N_2} = 21.858856/28.95154 = 0.75502$$
$$y_1^{O_2} = 6.716548/28.95154 = 0.23199$$
$$y_1^{Kr} = 0.000092/28.95154 = 0.0000031$$
$$y_1^{Ar} = 0.375511/28.95154 = 0.01297$$
$$y_1^{Ne} = 0.000302/28.95154 = 0.0000104$$
$$y_1^{He} = 0.00002/28.95154 = 0.00000069$$
$$y_1^{Xe} = 0.000011/28.95154 = 0.0000003799$$
$$y_1^{H_2} = 0.000201/28.95154 = 0.00000694$$

3.3 Densidad del aire a C.E.

A condiciones estándar de 0 °C y 1 atm, un g mol de aire debe ocupar un volumen de 22.4 l.

$$\rho = \frac{1\ (28.95154)}{0.082\ (273)} = 1.2932\ \frac{g}{l}$$

3.4 Metros cúbicos a tratarse

$$L_1\ (0.0000104) = 2\ 000\ kg/día$$
$$L_1 = 192307692.3\ kg/día = 192307.6\ Ton/día$$
$$L_1 = 192307692.3/1.2932 = 148706845.3\ m^3/día$$

4. **Resultados**

El peso molecular del aire es de 28.95154. Este se suele redondear a 29 para los cálculos en los que se trata con aire, con vapor de agua y CO_2.

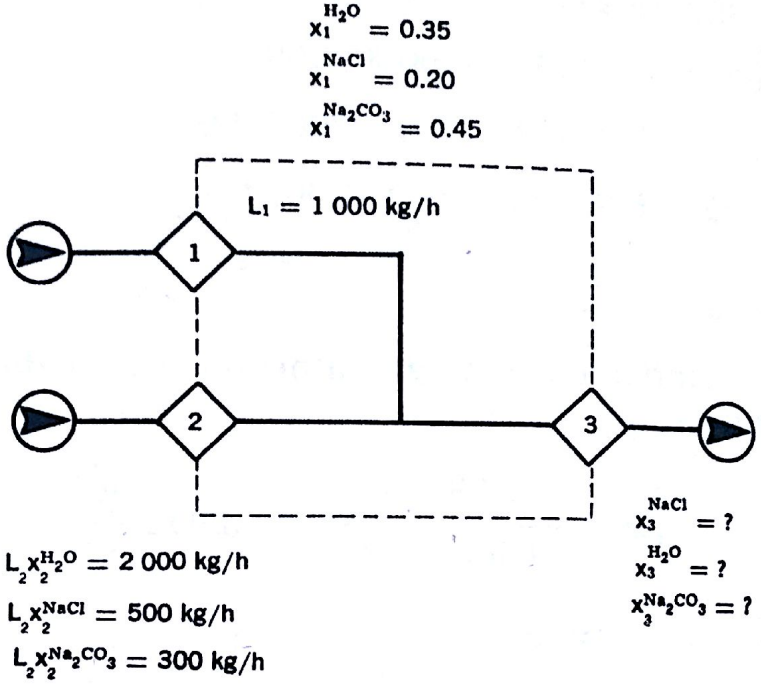
La composición en % en masa es:

Nitrógeno	75.502
Oxígeno	23.199
Argón	1.297
Hidrógeno	0.000694
Neón	0.00104
Helio	0.000069
Kriptón	0.00031
Xenón	0.00003799

Se necesitarán 148 706 845.3 m^3/día de aire a condiciones estándar para producir 2 ton/día de neón.

Problema 4.13

Calcule gráficamente la composición de la mezcla resultante de unir las dos corrientes mostradas en la figura siguiente:



1. Planteamiento

1.1 Discusión

Para resolver este problema se deberá construir un diagrama triangular y dibujar allí los puntos que identifiquen a las corrientes 1, 2 y 3.

1.2 Composición de la corriente 2

$$L_2 x_2^{H_2O} + L_2 x_2^{NaCl} + L_2 x_2^{Na_2CO_3} = L_2$$

$$x_2^{H_2O} = L_2 x_2^{H_2O}/L_2 \qquad x_2^{NaCl} = L_2 x_2^{NaCl}/L_2, \qquad x_2^{Na_2CO_3} = L_2 x_2^{Na_2CO_3}/L_2$$

2. Cálculos

2.1 Composición de la corriente 2

$$L_2 = 2\,000 + 500 + 300 = 2\,800 \text{ kg/h}$$

$$x_2^{H_2O} = 2\,000/2\,800 = 0.7142 \quad x_2^{NaCl} = 500/2\,800 = 0.1785 \quad x_2^{Na_2CO_3} = 0.1071$$

2.2 L_3

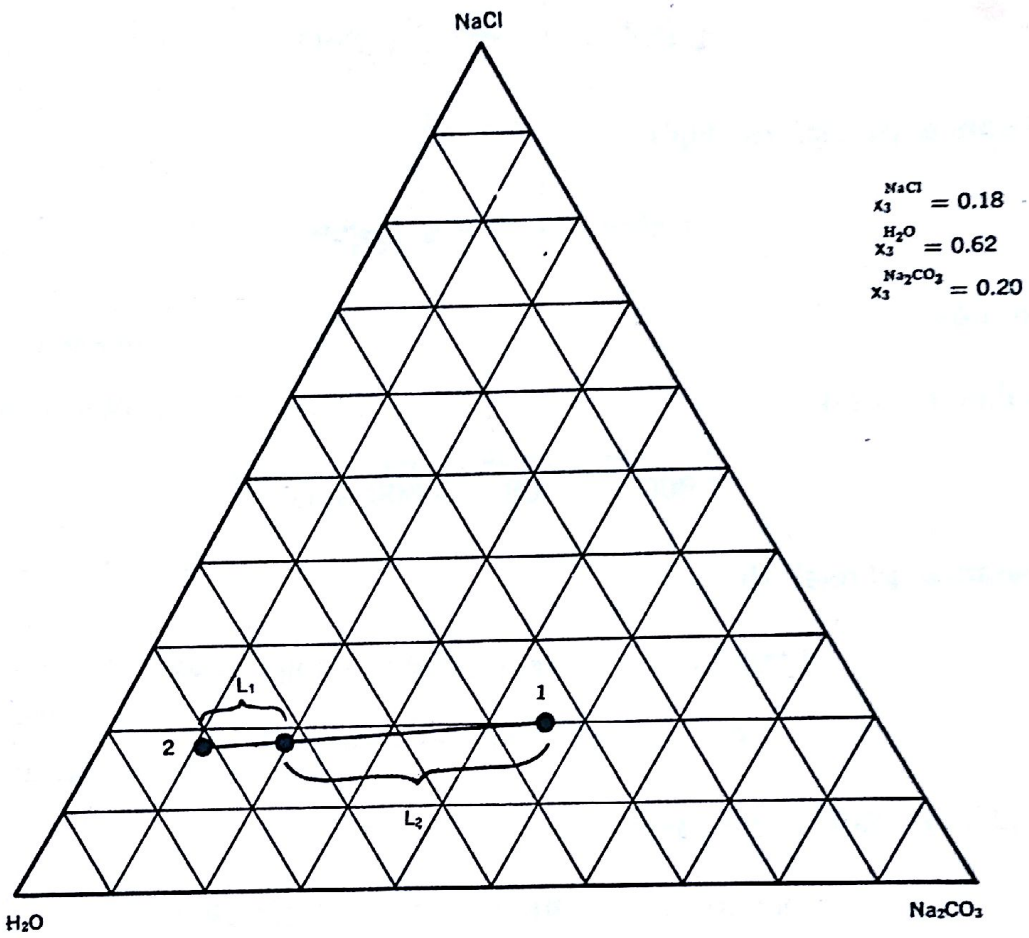
$$L_3 = 2\,800 + 1\,000 = 3\,800 \text{ kg/h}$$

$$L_2/L_1 = 2\,800/1\,000 = 2.8$$

2.3 Diagrama

$$L_2 + L_1 = 3.8$$

La distancia de 1 a 2 se debe dividir en 3.8 partes. A las 2.8 partes del punto 1, se encuentra la mezcla.



3. **Resultado**

Las composiciones así obtenidas son sólo aproximadas; las composiciones exactas se pueden obtener por los métodos analíticos.

Problema 4.14

Calcule la composición final de la mezcla del problema anterior por el método analítico.

1. Planteamiento

1.1 Discusión

Se deberán hacer balances totales y parciales para encontrar las composiciones finales.

1.2 Balance total

$$L_1 + L_2 = L_3$$

1.3 Balance parcial de NaCl

$$L_1 x_1^{NaCl} + L_2 x_2^{NaCl} = L_3 x_3^{NaCl}$$

1.4 Balance parcial de H_2O

$$L_1 x_1^{H_2O} + L_2 x_2^{H_2O} = L_3 x_3^{H_2O}$$

2. Cálculos

2.1 Balance total

$$1\,000 + 2\,800 = 3\,800 = L_3$$

2.2 Balance parcial de sal

$$1\,000\,(0.2) + 2\,800\,(0.1785) = 3\,800\,x_3^{NaCl}$$

$$x_3^{NaCl} = 0.1842 \text{ kg NaCl/kg total}$$

2.3 Balance parcial de agua

$$1\,000\,(0.35) + 2\,800\,(0.7142) = 3\,800\,x_3^{H_2O}$$

$$x_3^{H_2O} = 0.6184 \text{ kg } H_2O\text{/kg total}$$

$$x_3^{Na_2CO_3} = 1 - 0.6184 - 0.1842 = 0.1974 \text{ kg } Na_2CO_3\text{/kg total}$$

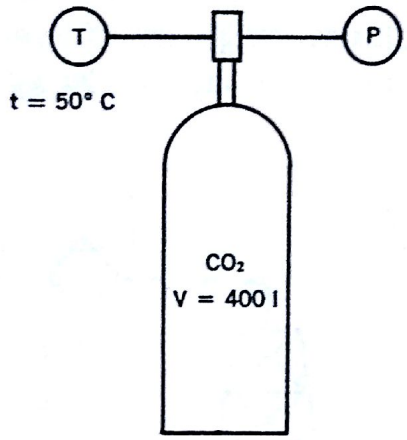
3. **Resultado**

La composición final de la mezcla es de 18.42% de H_2O y 19.7% de Na_2CO_3.

Problema 4.15

Calcule la presión que existe dentro de un cilindro de 400 l que contiene 800 kg de CO_2 a 50 °C. Haga el cálculo primero como gas ideal y luego como gas real.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Gas ideal

$$PV = \tilde{m}\, RT/PM$$

2.2 Gas real

$$(P + a\,\tilde{m}^2/V^2)\ (V - \tilde{m}\, b) = \tilde{m}\, RT$$

3. Cálculos

3.1 Presión como gas ideal

$$P = \frac{80\ (0.082)\ (273 + 50)}{44\ (0.4)} = 120.39 \text{ atm}$$

3.2 Gas real

Constantes de Van der Waals

$$a = 3.592 \text{ lt}^2 \text{ atm/mol}^2 \qquad b = 0.04267 \text{ l/mol}$$

$$\left[P + \frac{3.592\left(\frac{80\,000}{44}\right)^2}{(400)^2}\right]\left[400 - \frac{80\,000}{44}(0.04267)\right] = \frac{80\,000}{44}(0.082)\ (323)$$

$$P = 75.13 \text{ atm}$$

4. **Resultados**

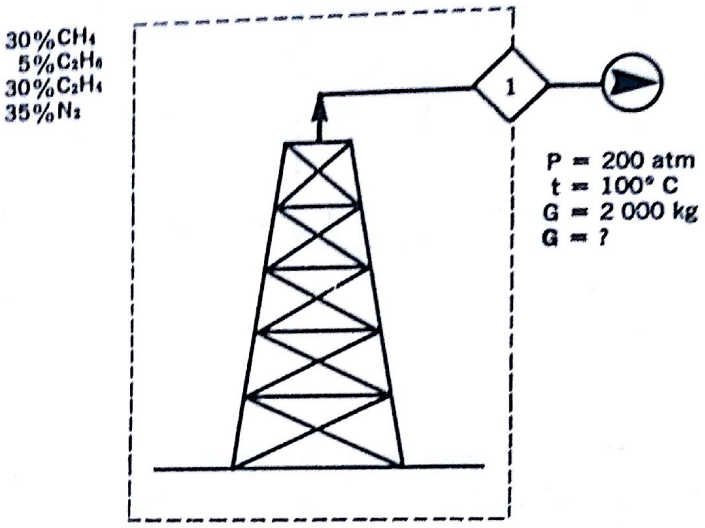
Presión como gas ideal 120.39 atm.

Presión como gas real 75.13 atm.

Problema 4.16

El gas natural saliente de un pozo está a 200 atm y 100 °C y tiene 30% de metano, 5% de etano, 30% de etileno y 35% de nitrógeno en mol. Calcule el volumen ocupado por 2 000 kg de ese gas. ¿Cuál será la densidad del mismo?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Este problema se puede tratar como mezcla real usando la ley de los estados correspondiente.

2.2 Condiciones seudocríticas

$$P'_c = P_c^{N_2}\,\tilde{y}^{N_2} + P_c^{CH_4}\,\tilde{y}^{CH_4} + P_c^{C_2H_6}\,\tilde{y}^{C_2H_6} + P_c^{C_2H_4}\,\tilde{y}^{C_2H_4}$$

$$T'_c = T_c^{N_2}\,\tilde{y}^{N_2} + T_c^{CH_4}\,\tilde{y}^{CH_4} + T_c^{C_2H_6}\,\tilde{y}^{C_2H_6} + T_c^{C_2H_4}\,\tilde{y}^{C_2H_4}$$

$$P'r = P/P'c \qquad T'r = T/T'r$$

2.3 Volumen

$$G = Z\,\tilde{G}\,RT/P$$

2.4 Densidad

$$\rho = m/V$$

3. Cálculos

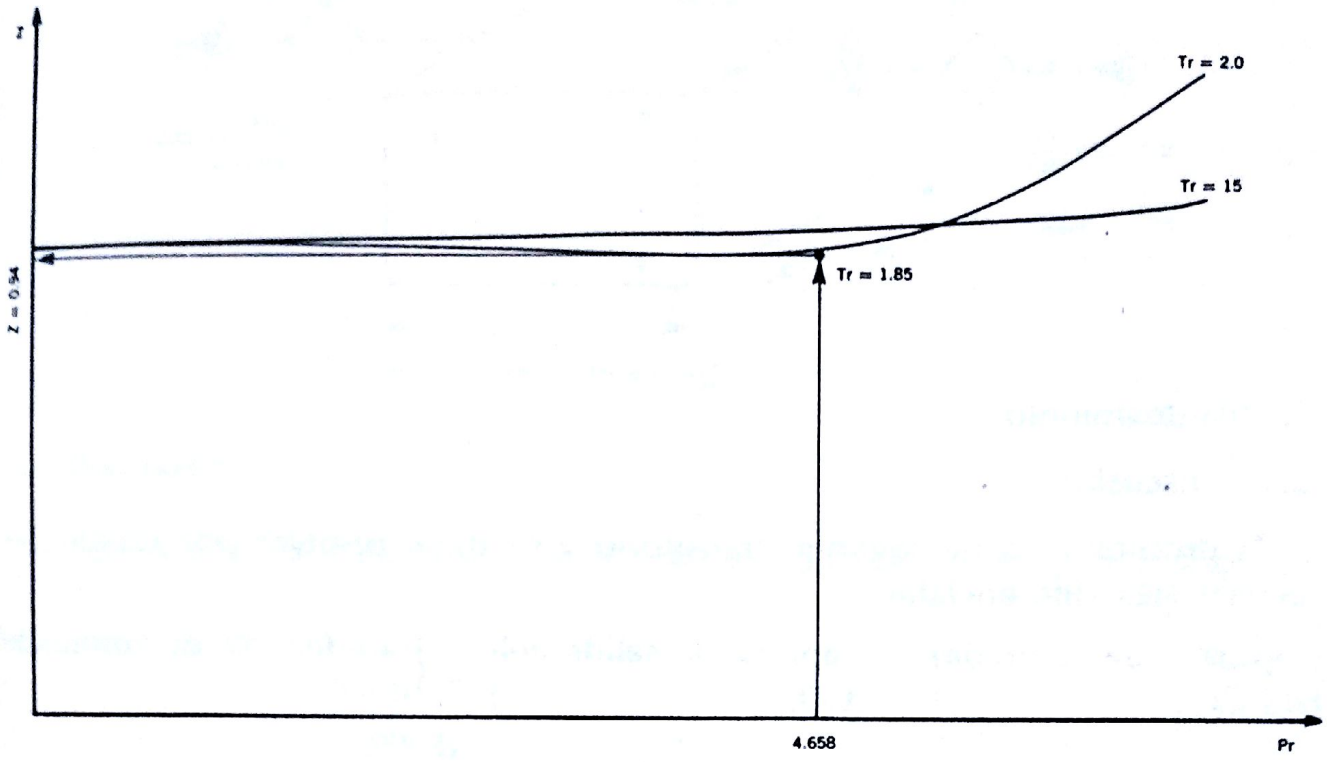
3.1 Condiciones seudocríticas

$$P'_c = 33.5\ (0.35) + 45.8\ (0.3) + 48.8\ (0.05) + 50.7\ (0.3) = 43.115 \text{ atm}$$

$$T'_c = 126\ (0.35) + 191.1\ (0.3) + 305\ (0.05) + 282.8\ (0.3) = 201.53\ ^\circ K$$

$$P'r = 200/43.115 = 4.638 \qquad T'r = 373/201.53 = 1.85$$

3.2 De la gráfica de Z



3.3 Peso molecular de la mezcla

$$PM = 16\,(0.3) + 0.05\,(30) + (0.3)\,(28) + (0.35)\,(28) = 24.5$$

3.4 Volumen

$$G = 0.94\,\frac{(2\,000)}{24.5}\,\frac{(0.082)\;(373)}{200} = 11.73\;\frac{m^3}{seg}$$

3.5 Densidad

$$\rho = 2\,000\ kg/11.73\ m^3 = 170.1\ \ kg/m^3$$

4. Resultado

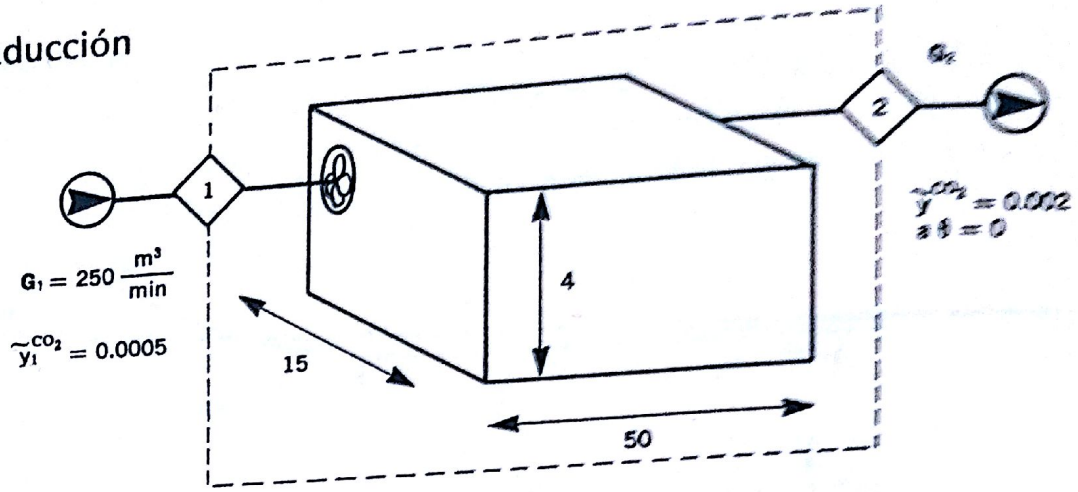
El gas ocupa 11.73 m³/seg y su densidad es de 170.1 g/l.

Problema 4.17

Al analizarse el aire de un cuarto de 50 × 4 × 15 metros, se encontró un porcentaje de $CO_2 = 0.2\%$. En seguida se introdujo al cuarto aire fresco de 0.05% de CO_2 por medio de ventiladores y a razón de 250 m³/min. Encuentre el % de CO_2 en el cuarto, después de 20 minutos.

160

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

El problema es de régimen transitorio y se debe resolver por medio de ecuaciones diferenciales.

$$\left\{\begin{matrix}\text{rapidez de entrada}\\ \text{de } CO_2\end{matrix}\right\} - \left\{\begin{matrix}\text{rapidez de salida del}\\ CO_2\end{matrix}\right\} = \left\{\begin{matrix}\text{rapidez de disminución}\\ \text{del } CO_2\end{matrix}\right\}$$

$$G_1\tilde{y}_1^{CO_2} - G_2\tilde{y}_2^{CO_2} = v \text{ cuarto } \frac{d\,\tilde{y}^{CO_2}}{d\,\theta}$$

Ahora bien $G_1 = G_2$

$$G_1(\tilde{y}_1^{CO_2} - \tilde{y}_2^{CO_2}) = v \text{ cuarto } \frac{d\,\tilde{y}^{CO_2}}{d\,\theta}$$

$$\frac{d\,\tilde{y}^{CO_2}}{\tilde{y}_2^{CO_2} - \tilde{y}_1^{CO_2}} = -\frac{G_1}{v \text{ cuarto}}\,d\,\theta$$

3. Cálculos

3.1 Balance

Volumen del cuarto $V = 15(50)\,(4) = 3\,000\ m^3$

$$d\,\tilde{y}_2^{CO_2}/(\tilde{y}_2^{CO_2} - 0.0005) = -250\,d\theta/3\,000$$

$$\frac{d\,\tilde{y}_2^{CO_2}}{\tilde{y}_2^{CO_2} - 0.0005} = -0.0833\ d\theta$$

Integrando,

$$\ln(\tilde{y}_2^{CO_2} - 0.0005) = -0.0833\,\theta + k$$

3.2 Obtención de la constante k

$$\text{Si } \theta = 0 \qquad \tilde{y}_2^{CO_2} = 0.002$$

$$\ln(0.002 - 0.0005) = k \qquad k = -6.50229$$

$$\therefore \ln(\tilde{y}_2^{CO_2} - 0.0005) = -0.0833\,\theta - 6.50229$$

3.3 Concentración a los 20 minutos

$$\ln (\tilde{y}_2^{CO_2} - 0.0005) = -0.0833\ (20) - 6.50229 =$$
$$-1.666 - 6.50229 = -8.16889$$

$$\tilde{y}_2^{CO_2} - 0.0005 = e^{-8.16889}$$
$$\tilde{y}_2^{CO_2} = 0.0005 + e^{-8.16889}$$
$$\tilde{y}_2^{CO_2} = 0.000783$$

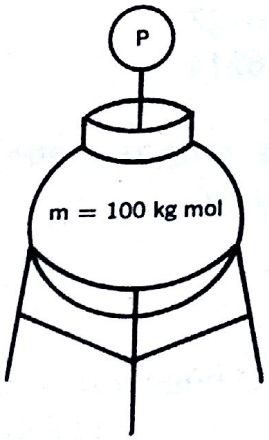
4. **Resultado**

El porcentaje de CO_2 en el cuarto después de 20 minutos es de 0.0783.

Problema 4.18

Si 100 kg mol de etileno se mantienen en un recipiente de 30 m³, ¿cuál será la máxima temperatura a la que se podrá mantener si se fija una válvula de alivio a 50.9 atm?

1. Traducción



$P_{max} = 50.9$ atm

$t = ?$

$V = 30\ m^3$

2. Planteamiento

2.1 Discusión

En este caso se desconoce el valor de Tr. Como la carta del factor de compresibilidad ha sido graficada contra Tr y Pr, el valor de Tr debe evaluarse por tanteos.

2.2 Valor de Z

$$Z = \frac{p\,V}{\tilde{m}\,RT} = \frac{p\,V}{\tilde{m}\,R}\left(\frac{1}{T}\right)$$

$$Z = \frac{p\,V}{R\,\tilde{m}\,Tc}\left(\frac{1}{Tr}\right)$$

3. Cálculos

3.1 Valor de Z

$$\frac{P\,V}{R\,\tilde{m}\,Tc} = \frac{50.9\ (30)}{(0.082)\ (100)\ (282.7)} = 0.6587$$

$$Pr = \frac{50.9}{50.9} = 1 \qquad Z = 0.6587\ \left(\frac{1}{Tr}\right)$$

Tr (supuesta)	Z (calculada)	Pr (Apéndice V)
1.0	$Z = 0.6587$	0.75
1.2	$Z = 0.05489$	2.0
1.05	$Z = 0.627$	0.95
1.1	$Z = 0.5988$	1.2
1.075	$Z = 0.6127$	1.1
1.06	$Z = 0.6214$	1

$Tr = T/T_c$ $\quad T = 1{:}06\ (282.7) = 299.66\ °K$

$T = 26.6\ °C$

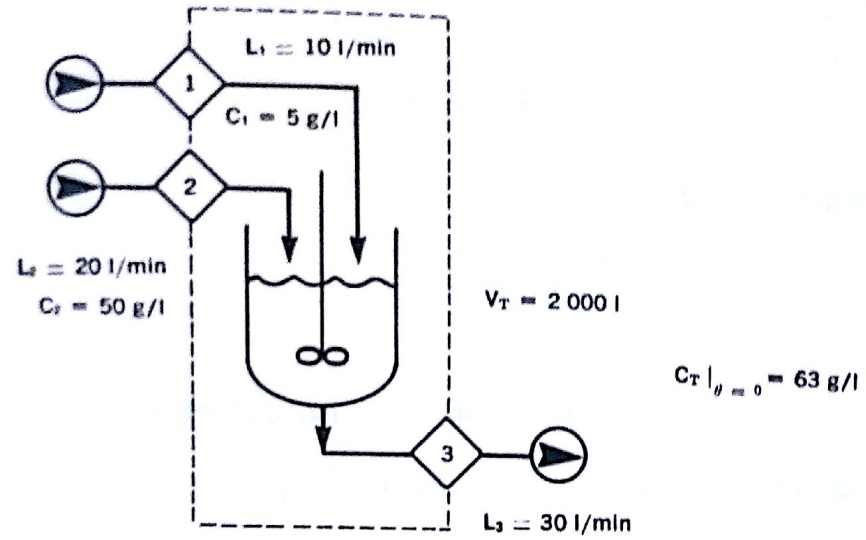
4. **Resultado**

El valor máximo de temperatura no debe exceder de 26 °C.

Problema 4.19

En un tanque se tiene una solución de 2 000 l de agua salina con una concentración de 63 g/l; a este tanque entra una corriente de 10 l/min con 5 g/l de sal y otra de 20 l/min con una concentración de 50 g/l. Por abajo del tanque se extraen 30 l/min. ¿Cuál será la concentración del tanque a los 60 minutos? Si el tiempo de operación tiende a infinito, ¿cuál será la concentración final del tanque?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Si suponemos densidad constante, la masa total en el tanque no cambia. Sólo cambiará la cantidad de sal y de agua en el tanque.

2.2 Balance

$$\left\{\begin{matrix}\text{rapidez de entrada}\\ \text{de la sal}\end{matrix}\right\} - \left\{\begin{matrix}\text{rapidez de salida de}\\ \text{la sal}\end{matrix}\right\} = \left\{\begin{matrix}\text{rapidez de dis-}\\ \text{minución de la}\\ \text{sal}\end{matrix}\right\}$$

$$\{L_1 c_1^{sal} + L_2 c_2^{sal}\} - \{L_3 c_3^{sal}\} = v_T d\, c_3^{sal}/d\,\theta$$

3. Cálculos

3.1 Balance

$$\{10\ (5) + 20\ (50)\} - 30\ c_3^{sal} = 2\,000\ d\, c_3^{sal}/d\,\theta$$

$$1\,050 - 30\, c_3^{sal} = 2\,000\ d\, c_3^{sal}/d\,\theta$$

$$d\, c_3^{sal}/d\,\theta + 0.015\, c_3^{sal} = 0.525$$

Resolviendo la ecuación anterior,

$$c_3^{sal} = 35 + ke^{-0.015\theta}$$

3.2 Obtención del valor de la constante

$$\text{Si } \theta = 0 \qquad c_3^{sal} = 63$$

$$63 = 35 + k \qquad k = 28$$

$$c_3^{sal} = 35 + 28\ e^{-0.015\theta}$$

3.3 Concentración si $\theta = 60$ min

$$C_3^{sal} = 35 + 28\, e^{-0.015\,(60)}$$

$$C_3^{sal} = 43.38 \text{ g/l}$$

3.4 Concentración si $\theta = \infty$

$$C_3^{sal} = 35 + 28\, e^{-0.015\infty} = 35 \text{ g/l}$$

4. **Resultados**

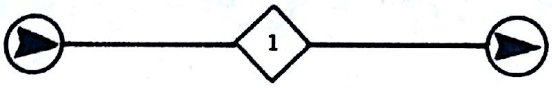
La concentración de la sal después de 1 hora será de 43.38 g/l.

La concentración final si $\theta = \infty$ será de 35 g/l.

Problema 4.20

Por una tubería de 6 pulgadas de diámetro interior, viajan 2 000 kg/min de una mezcla de 20% de CO_2, 45% de C_2H_4, 20% de CO y 15% de N_2 en volumen a 3 000 psig (libras por pulgada cuadrada manométricas) y 140 °F. ¿Cuál será la velocidad de los gases dentro de la tubería en m/s? La presión atmósferica es de 760 mm Hg.

1. Traducción



$G_1 = 2\,000$ kg/min
$\tilde{y}_1^{CO_2} = 0.20$
$\tilde{y}_1^{C_2H_4} = 0.45$
$\tilde{y}_1^{CO} = 0.20$
$\tilde{y}_1^{N_2} = 0.15$
$p_1 = 3\,000$ psig
$t = 140°$ F

2. Planteamiento

2.1 Discusión

Por la presión a que se encuentran los gases, deben tratarse como gases reales. Para ello se usarán las condiciones seudocríticas.

2.2 Gases reales

$$P\,\mathbf{G} = \frac{G}{PM}\,z\,R\,T$$

2.3 Peso molecular promedio

$$PM = \tilde{y}^{N_2}\,PM_{N_2} + \tilde{y}^{CO}\,PM_{CO} + \tilde{y}^{CO_2}\,PM_{CO_2} + \tilde{y}^{C_2H_4}\,PM_{C_2H_4}$$

2.4 Condiciones seudocríticas

$$P'c = \tilde{y}^{N_2}\,P_C^{N_2} + \tilde{y}^{CO}\,P_C^{CO} + \tilde{y}^{CO_2}\,P_C^{CO_2} + \tilde{y}^{C_2H_4}\,P_C^{C_2H_4}$$

$$T'c = \tilde{y}^{N_2}\,T_C^{N_2} + \tilde{y}^{CO}\,T_C^{CO} + \tilde{y}^{CO_2}\,T_C^{CO_2} + \tilde{y}^{C_2H_4}\,T_C^{C_2H_4}$$

2.5 Velocidad

$$U = \mathbf{G}/\text{área} = 4\,\mathbf{G}/\pi\,D^2$$

3. Cálculos

3.1 Peso molecular promedio

$$PM = 0.15\ (28) + 0.2\ (28) + 0.2\ (44) + 0.45\ (28) = 31.2$$

3.2 Condiciones seudocríticas y seudoreducidas

$$P'c = 33.5\ (0.15) + 35\ (0.2) + 73\ (0.2) + 0.45\ (50.9) = 49.5\ \text{atm.}$$

$$T'c = 125.9\ (0.15) + (0.2)\ (134) + 0.2\ (304) + 0.45\ (282.7) = 228.55\ ^\circ\text{K}$$

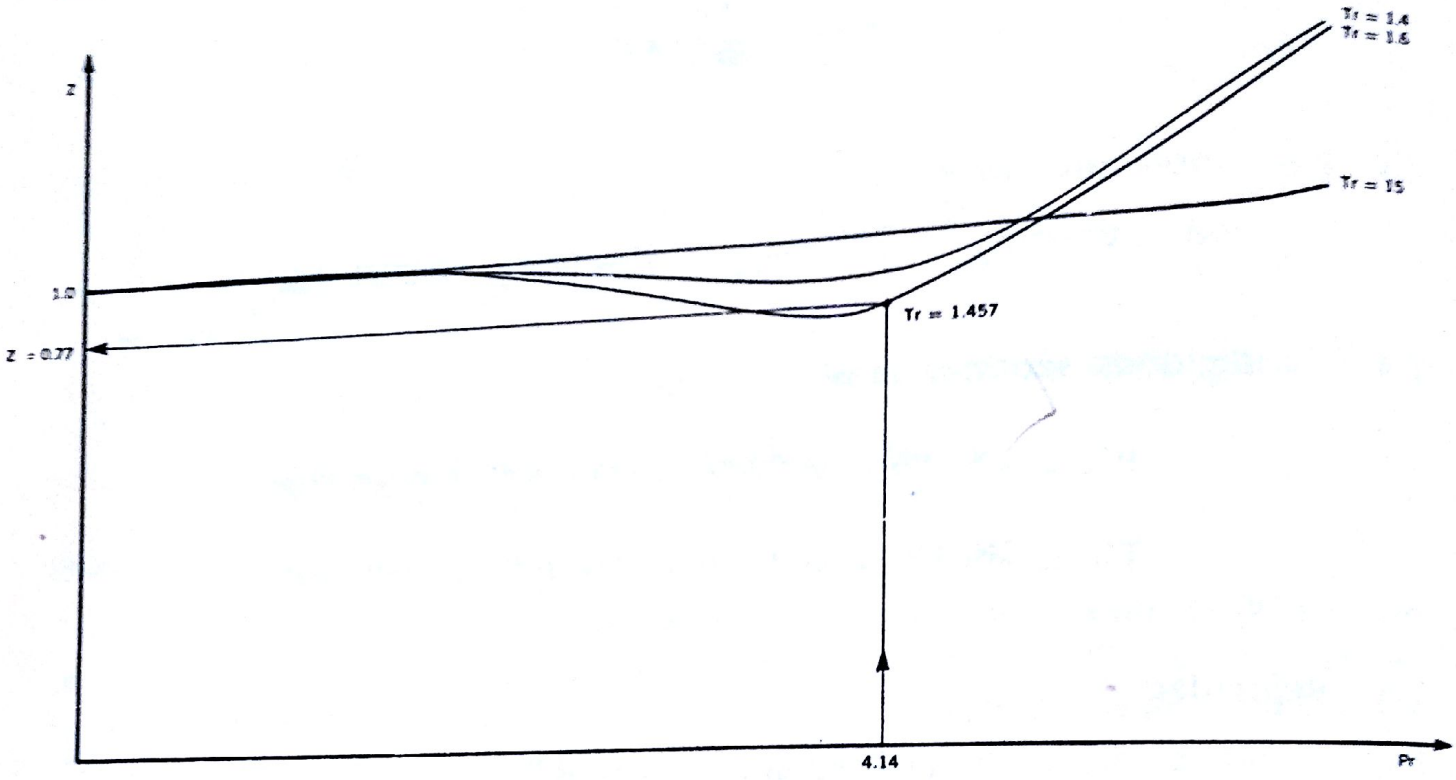
$$P = (3\,000 + 14.7) = 3\,014.7\ \text{psia} = 3\,014.7\ \text{lb/in}^2$$

$$P = 3014.7\ \frac{\overrightarrow{\text{lb}}}{\text{in}^2}\ (1\ \text{atm}/14.7\ \text{psia}) = 205.08\ \text{atm}$$

$$Pr = 205.08/49.5 = 4.14$$

$$Tr = \frac{273 + 60}{228.55} = 1.457$$

3.3 Volumen. De la carta de compresibilidad



$$G = \frac{2\,000}{31.2}\left(\frac{0.77\,(0.082)\,(273 + 60)}{205.8}\right) = 6.549\ m^3/min$$

3.4 Velocidad

$$\text{Area} = \frac{3.1416}{4}[6(0.0254)]^2 = 0.01824\ m^2$$

$$U = 6.549\ \frac{m^3}{min}\left(\frac{1}{0.01824\ m^2}\right) = 359\ \frac{m}{min} = 5.984\ \frac{m}{s}$$

4. **Resultado**

La velocidad de los gases dentro de la tubería es de 5.984 m/s.

PROBLEMAS PROPUESTOS

Problema 4.21

¿Cuántos litros de gasolina de 90% de iso-octano y 10% de n-heptano se deben mezclar con una gasolina de 65% en peso de iso-octano y 35% de n-heptano para producir 20 000 l/h de una gasolina que contenga 80% en peso de iso-octano y 20% de n-heptano? La densidad de las gasolinas es semejante e igual a 53 °API.

Resultado

Se requieren 12 000 l/h de la gasolina de 90% y 8 000 de la gasolina de 65%.

Problema 4.22

La velocidad de paso de los vapores en una columna de destilación es de 56 m/s y la masa de los vapores que pasan es de 40 kg/s. ¿Cuál será el diámetro de dicha columna, si la mezcla contiene 40% de benceno y 60% de tolueno en volumen a 70 °C y 580 mm de Hg? (la columna es cilíndrica).

Resultado

El diámetro de la columna será de 2 m.

Problema 4.23

Se requiere reducir la concentración de oxígeno en un reactor por debajo del 1% antes de introducir en él una mezcla explosiva. Para lograr lo anterior se meten a través del reactor 20 l/min de una corriente gaseosa de nitrógeno que contiene 0.15% de oxígeno en volumen. ¿Cuánto tiempo pasará antes de que la concentración del oxígeno contenido en un reactor de 60 l baje a 1% en volumen? El reactor está inicialmente lleno de aire a una temperatura de 20 °C y 1 atm.

Resultado

Se requieren 9 min y 12 s.

Problema 4.24

Se desea extraer el agua de un pozo y llenar un tanque de abastecimiento. Si la bomba A trabaja sola, puede hacer el trabajo en 2 h. Si la bomba B trabaja sola lo hace en 3 h. ¿Cuánto tardarán las 2 bombas trabajando juntas?

Resultado

Trabajando juntas llenarán el tanque en 1 h y 12 min.

Problema 4.25

El costo de bombear agua en una planta es de 250 pesos por día, si se usa tubería de dos pulgadas. El costo de instalar una nueva bomba y una línea de 2 pulgadas es de 25 000 pesos. Si se usa una tubería de 4 pulgadas, el costo de bombeo será de $ 125.00 diarios y el costo de instalación de la bomba y tubería de $ 50 000.00.

¿Qué sistema recomendaría Ud. basándose en lo que se puede ahorrar durante el primer año? **Nota:** la planta opera 365 días del año.

Resultado

El sistema de cuatro pulgadas es el que produce más ahorro.

Problema 4.26

Si se hacen pasar 600 ft^3/min de aire a través de una torre de absorción de 1.5 m de diámetro. ¿Cuál será la masa velocidad del aire si éste se encuentra a 20 °C y 20 atm? Exprese el resultado en kg/h m^2.

Resultado

La masa velocidad es de 14 121 kg/h m^2.

Problema 4.27

Calcule el volumen que ocuparán 100 kg mol de etileno a 65 °C y 68 atm. ¿Qué error se obtendría si se supone comportamiento ideal?

Resultado

El volumen de etileno es de 28.93 m^3; el error que se obtendría es del 40.85%.

Problema 4.28

Los gases salientes de un quemador dieron el siguiente análisis en fracción masa:

$$CO = 0.15$$
$$CO_2 = 0.30$$
$$N_2 = 0.40$$
$$O_2 = 0.15$$

La mezcla obtenida para el análisis estaba a una temperatura de 90 °C y a 760 mm de presión. Calcule la presión parcial de los gases y su volumen parcial.

Resultados

Presión parcial del $N_2 = 348.53$ mm Hg, volumen parcial 45.86%.

Problema 4.29

Calcule los kilogramos de vapor de agua por kg de aire seco en un aire que resulta de la mezcla de 100 kg/h de aire seco con 0.10 kg de vapor de agua por kg de aire seco y de 50 kg/h de otro aire húmedo que contiene 0.02 kg de H_2O/kg de A.S.

Resultado

La humedad en el aire de la mezcla es de 0.07368 kg de H_2O por cada kg de aire seco.

Problema 4.30

Para fabricar el ácido necesario para la nitración (27% HNO_3, 60% H_2SO_4 y 13% de H_2O) se cuenta con:

a) un ácido sulfúrico de 93% de pureza
b) un ácido nítrico del 90% de pureza
c) un ácido saliente del nitrador con 23% de HNO_3, 57% H_2SO_4 y 20% de H_2O.

Si se quieren producir 1 000 kg/h del ácido concentrado, ¿qué cantidad se deberá usar de cada ácido? Hágalo **a)** gráficamente y **b)** analíticamente.

Resultado

Se requieren 193 kg del ácido de 90% de HNO_3, 417 del de 23% de HNO_3 y 389 del de 93% de H_2SO_4.

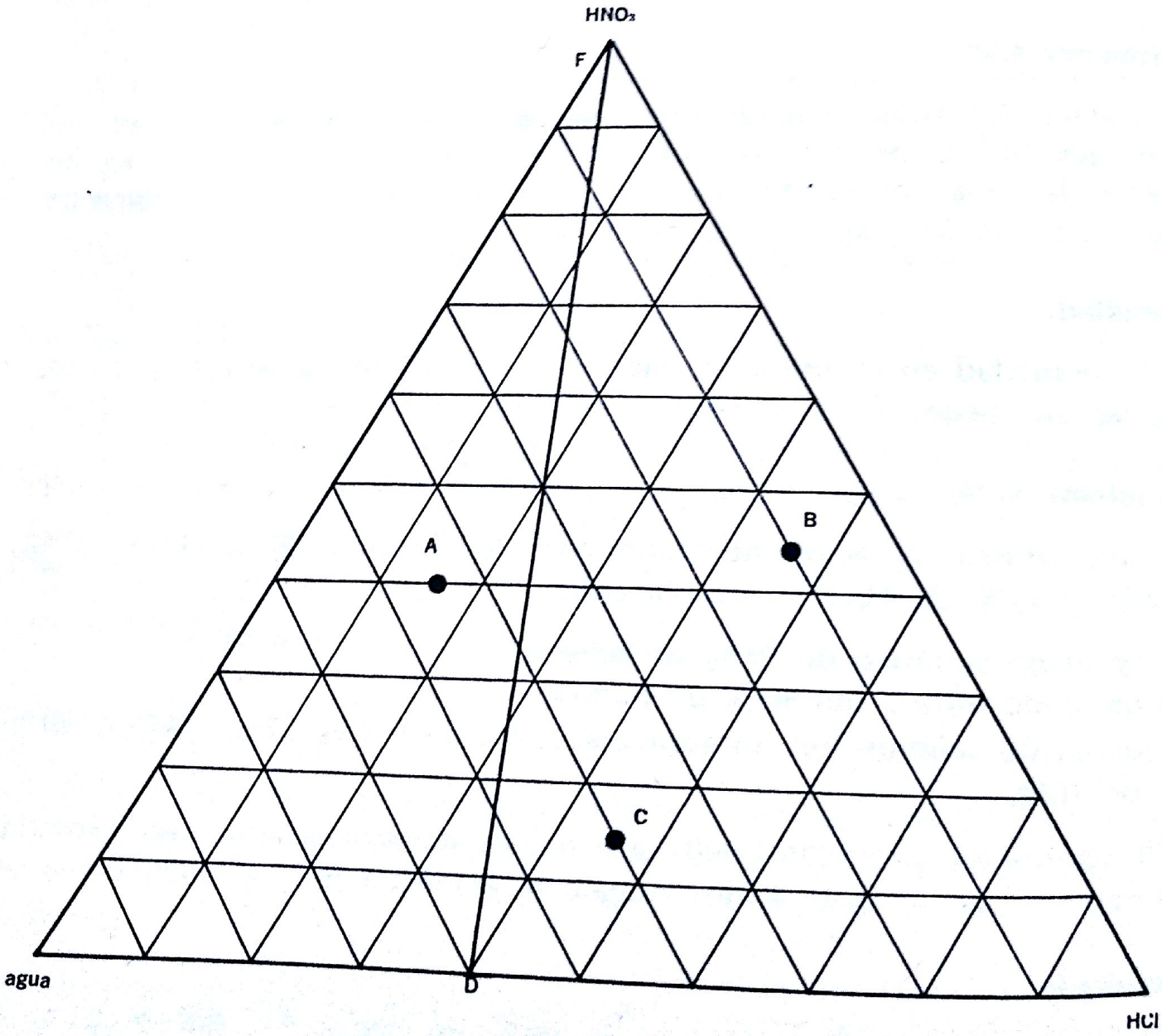
Problema 4.31

En el siguiente diagrama triangular calcule:

a) la composición del punto A
b) la relación de agua a HCl en la línea DF
c) la composición de la mezcla resultante de mezclar 2 partes de la representada en el punto B con 1 parte de la representada en el punto C.

Resultados

La composición del punto A es de 40% de HNO_3, 45% de H_2O y 15% de HCl. La relación de agua a ácido clorhídrico es 1.5. La composición resultante es de 35% de HNO_3, 45% de HCl y 20% de H_2O.



Problema 4.32

Con objeto de satisfacer ciertas especificaciones, un vendedor mezcla una resina seca, cuyo precio es de $ 5.00 kg con resina de 22% de humedad a $ 2.75 kg, de tal forma que la mezcla contenga 16% de agua, ¿a qué precio resultará la mezcla?

Resultado

El precio de la resina es de $ 3.36 kg.

Problema 4.33

¿Cuál es la densidad del aire en la ciudad de México? Dato: la temperatura promedio es de 18 °C y la presión de 586 mm. de Hg.

Resultado

La densidad es de 0.937 kg/m³.

Problema 4.34

Se tiene un gasto de 250 m³/min de nitrógeno a 15 °C y 1 atm. ¿Qué gasto resultará de gas, si se sujetara a la presión de 2 300 psia y se mantuviera la temperatura a 15 °C? Use **a)** la ecuación de los gases ideales; **b)** la ecuación de Van der Waals.

Resultados

Usando gases ideales el gasto es de 1.5978 m³/min. Usando la ecuación de Van der Waals, el gasto es de 2.01 m³/min.

Problema 4.35

Un sistema de refrigeración contiene 6 kg de cloruro de metilo y está provisto de una válvula de seguridad que se levanta a la presión de 10 atm absolutas.

¿A qué temperatura se abrirá la válvula si el sistema tiene una capacidad de 250 litros?

Resultado

La válvula se abrirá a −16.6 °C.

Problema 4.36

Dos tuberías llevan agua a un tanque. Cuando la línea A y B trabajan simultáneamente, el tanque se puede llenar en 2 h y 40 min. Después de que la línea A ha mandado agua durante 3 h, se abrió la línea B y el tanque se llenó en 40 minutos. Si cada línea trabajara sola, ¿en cuánto tiempo se llenaría el tanque?

Resultados

La línea A llenará el tanque en 4 h y la línea B en 8 h.

Problema 4.37

Una mezcla gaseosa tiene la siguiente composición volumétrica: O_2 5%, N_2 65%, CO_2 20% y H_2O 10%.
Si la mezcla anterior ocupa un volumen de 30 m^3 a 50 °C y 750 mm de Hg, determine:

a) la presión parcial del agua,
b) el volumen parcial del oxígeno,
c) el peso molecular promedio de los gases,
d) la densidad de la mezcla.

Resultados

La presión parcial del agua es de 75 mm Hg, el volumen parcial del oxígeno es de 1.5 m^3, el peso molecular es de 30.4 y la densidad de la mezcla es de 1.1326 kg/m^3.

Problema 4.38

La concentración de ácido en un tanque de 4.5 m^3 se reduce de 21% a menos de 1% pasando agua a razón de 85 l/min, que contiene 0.2% de ácido en peso. Si se extrae solución al mismo ritmo, ¿cuánto tardará en lograrse ésto, si el tanque está perfectamente mezclado y si las densidades permanecen constantes?

Resultado

El tiempo requerido es de 2 h 52 min y 34 s.

Problema 4.39

En un cilindro metálico hay 100 litros de metano a 100 kg/cm^2 absolutos y 21 °C. ¿Qué masa de metano contiene el cilindro?

Resultado

La masa de metano es de 5.482 kg.

APENDICE III

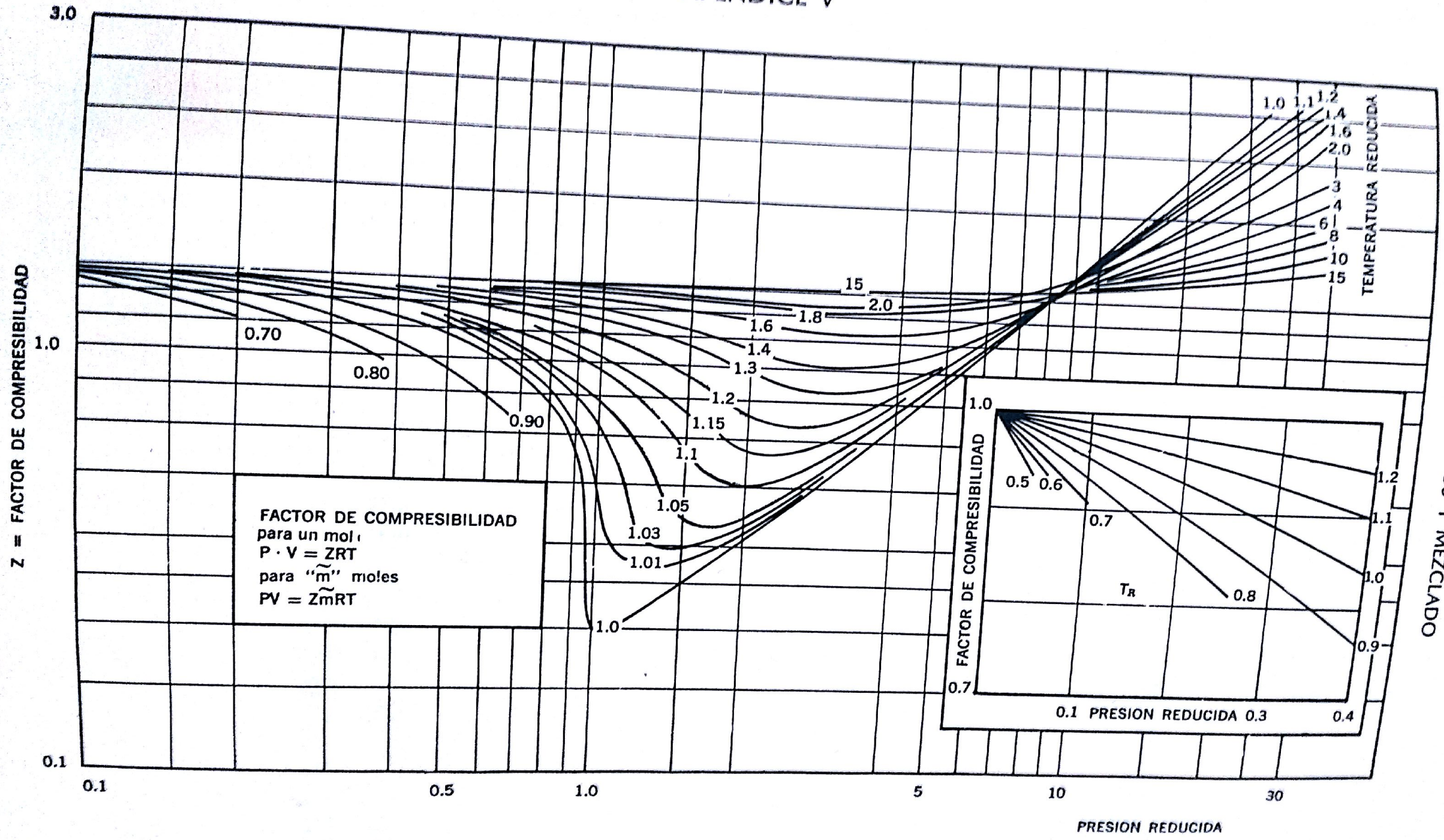
Constantes de Van der Waals de algunas sustancias

Sustancia	A l^2 atm mol^{-2}	B l mol^{-1}
H_2O	5.464	0.03099
SO_2	6.714	0.05636
H_2	0.2444	0.02661
HCl	3.667	0.04081
H_2S	4.431	0.04287
NH_3	4.17	0.03707
CO_2	3.592	0.04267
CO	1.485	0.03985
Cl_2	6.493	0.05622
CH_4	2.253	0.04278

APENDICE IV

Propiedades críticas de algunas sustancias

Sustancia	Tc °K	Pc atm
H_2	33.2	12.8
N_2	126	33.5
O_2	154.3	49.7
Cl_2	417	76
Aire	132	36.4
CO	134.4	34.6
CO_2	304.1	72.9
NO_2	431	99
NO	179	65
HCl	324.5	81.6
H_2O	647.3	218.2
H_2S	373.5	88.9
SO_2	430.3	77.7
SO_3	491.4	83.8
NH_3	405.5	111.5
CH_4	191.9	45.8
C_2H_6	305.2	48.8
C_3H_8	369.9	42
$n\text{-}C_4H_{10}$	426.1	36
$iso\text{-}C_4H_{10}$	407.1	37
C_2H_4	282.8	50.7
C_3H_6	364.8	45
C_2H_2	309.1	61.7
CH_3OH	513.2	98.7
C_2H_5OH	516.2	63.1
C_6H_6	561.6	47.7



Fuente: O.A. Hougen y K.M. Watson. **Chemical Process Principles Charts.** John Wiley. Nueva York, 1946.

CAPÍTULO 5

BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA EN MEZCLADO Y EVAPORACIÓN

OBJETIVOS

Al finalizar este capítulo, el lector: **a)** Será capaz de plantear y resolver problemas de balances de materia en flujo de fluidos. **b)** Será capaz de plantear y resolver problemas de balances de materia en el mezclado. **c)** Se mostrará al lector la forma de calcular los calores de mezcla. **d)** Asimismo la forma de utilizar los diagramas de entalpía-concentración para hacer balances de energía en procesos de mezclado. **e)** El lector, al terminar de leer y estudiar este capítulo, estará capacitado para efectuar balances de energía en procesos de mezclado y de evaporación.

FLUJO DE FLUIDOS

Desde las más remotas épocas, el hombre se ha preocupado por el manejo y almacenamiento de los fluidos, especialmente por el agua, tan preciosa para la vida. Así es como se puede observar que cada pueblo y cultura dedicó grandes esfuerzos a la construcción de diques, canales, acequias, acueductos y cloacas.

Con el advenimiento de la revolución industrial, el hombre se vio forzado a manejar muchos fluidos nuevos, tanto líquidos como gaseosos. Actualmente, en cualquier planta de procesos de materiales se tiene siempre flujo de fluidos, ya sea en forma continua o intermitente; este flujo se realiza a través de tuberías con ayuda de bombas y compresoras. La red de tuberías conduce los materiales hasta los equipos en donde son procesados y almacenados. En este capítulo se harán balances de materia relacionados con el flujo y almacenamiento de fluidos, a reserva de volverse a tratar de nuevo cuando se trate el flujo de fluidos desde el punto de vista de balances de energía.

EQUIPOS EN USO

Como se dijo antes, los fluidos de una planta química se transportan generalmente por tuberías, las cuales son de un material que resista el ataque

químico del fluido que se transporta.

Entre las características más importantes de las tuberías, aparte del material de que están hechas, se encuentra el número de cédula, el diámetro externo y el diámetro interno.

El número de cédula está definido por:

$$\text{No. de C} = 1\,000\,P/S$$

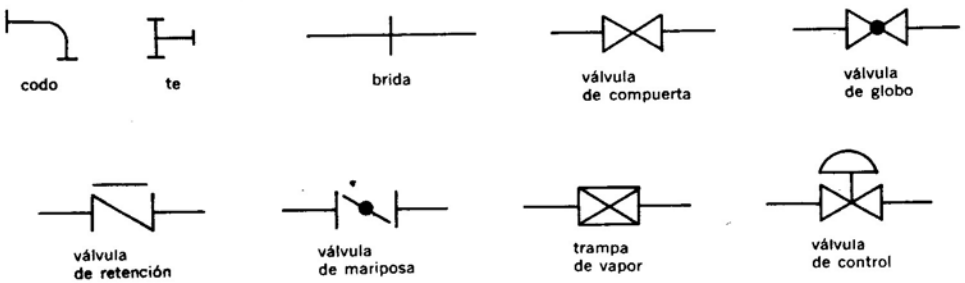
$$P = \text{presión de trabajo interno en } \overrightarrow{lb/in^2}$$

$$S = \text{tensión permisible en } \overrightarrow{lb/in^2}$$

El diámetro externo se usa para calcular recubrimientos de tuberías y para determinar los tamaños de las aberturas a través de las cuales deba pasar la tubería. El diámetro interno ID se usa para calcular los gastos.

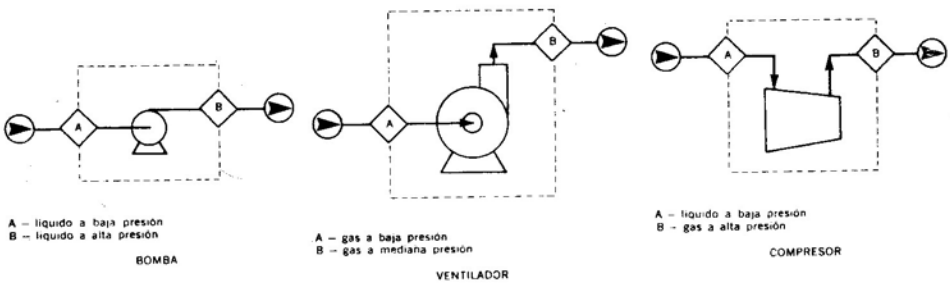
La red de ductos no sólo consta de la tubería propiamente dicha, sino de muy diversos accesorios que permiten el cambio de dirección de la tubería, el control y la medición del flujo.

Accesorios más usados:



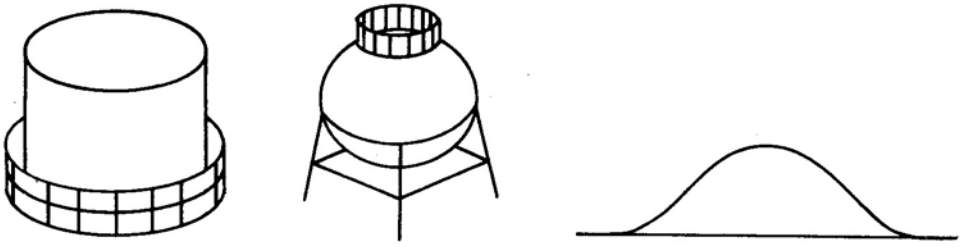
Para los fluidos que se desplazan en los ductos, es necesario con frecuencia el uso de bombas (en el caso de líquidos) o de compresores o ventiladores (en el caso de gases).

Bombas y ventiladores:



El almacenamiento de fluidos se efectúa en tanques y cisternas. En el caso del almacenamiento de gases o de gases licuados, los tanques deben diseñarse para soportar altas presiones y contar con dispositivos de seguridad.

Tanques:



para líquido para gases para sólidos

Para el cálculo del volumen de fluido almacenado, es necesario recurrir a la geometría del tanque en cuestión. Las formas geométricas más usadas son

Esfera $V = 4/3\ \pi\ r^3$ Cilindro $V = \pi\ r^2\ h$ Paralelepípedo $V = l\ (a)\ h$

h = altura r = radio l = largo a = ancho

MEZCLADO

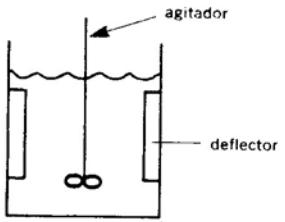
La operación de mezclado es frecuente en los procesos de ingeniería química, ya que por regla general en estos se trata más con mezclas de materiales que con sustancias puras.

El mezclado se usa para preparar una combinación uniforme de dos o más sustancias o materiales; las sustancias que se mezclan pueden ser sólidos, líquidos o gases.

La operación de mezclado se utiliza para preparar diluciones, pinturas, alimentos, cerámica o como medio de aumentar la superficie de contacto entre las fases en otras operaciones como absorción, extracción, secado, etc.

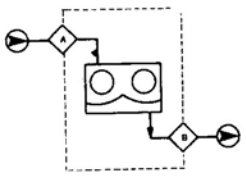
EQUIPOS EMPLEADOS

Los líquidos se mezclan casi siempre en tanques provistos de agitadores y deflectores.

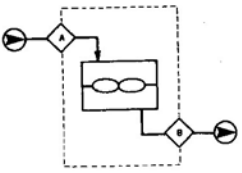


Para mezclar sólidos se usan equipos más complicados, que se ajustan a la naturaleza del sólido (arenas, pastas, polvos). Estos aparatos sirven también para mezclar líquidos con sólidos.

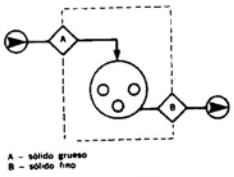
Mezcladores de sólidos:



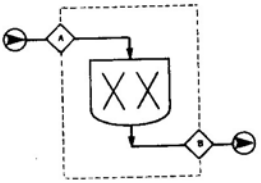
MEZCLADOR DE RODILLOS



MEZCLADOR DE BANDA

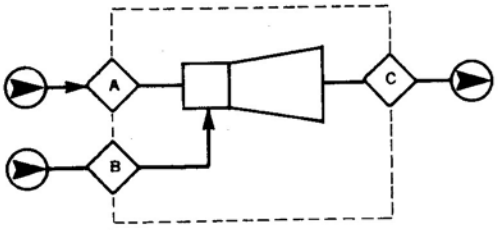


MOLINO DE BOLAS

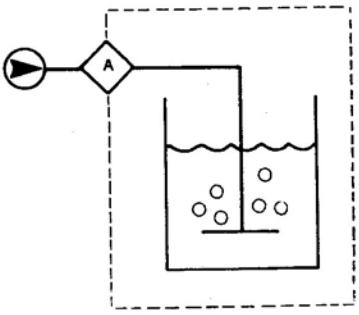


MOLINO DE ENGRANES

Los gases se mezclan generalmente por medio de toberas o burbujeadores.



VENTURI



BURBUJEADOR

BALANCES DE MASA EN FLUJO DE FLUIDOS

La ecuación de la continuidad plantea de manera cuantitativa la ley de la conservación de la materia, cuando se aplica a sistemas de fluidos en movimiento.

En general, para una tubería dada



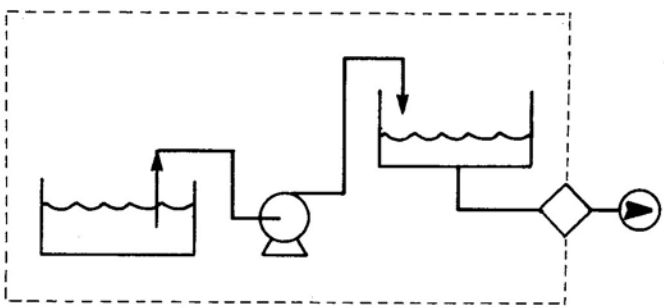
$$L_1 = L_2$$
$$L_1 = A_1 \rho_1 U_1$$
$$L_1 = A_1 U_1$$

En donde

L = flujo másico
ρ = densidad
U = velocidad del fluido
A = área seccional de la tubería en m^2

O sea, que la velocidad másica es función de la densidad del fluido, la velocidad promedio dentro de la tubería y el área seccional de la misma. Si el balance incluye tanques de almacenamiento, tendremos que:

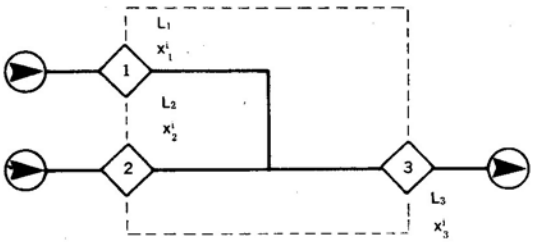
$$\left\{\begin{matrix}\text{rapidez de entrada}\\ \text{de masa.}\end{matrix}\right\} = \left\{\begin{matrix}\text{rapidez de salida}\\ \text{de masa.}\end{matrix}\right\} + \left\{\begin{matrix}\text{rapidez de acumula-}\\ \text{ción de masa.}\end{matrix}\right\}$$



BALANCES DE MASA EN MEZCLADO

En general, para el mezclado a régimen permanente se tiene que:

$$\{\text{rapidez de entrada de materia}\} = \{\text{rapidez de salida de materia}\}$$



$L_1 + L_2 = L_3$ y para la sustancia i

$$L_1 x_1^i + L_2 x_2^i = L_3 x_3^i$$

En régimen transitorio se tendrá que:

$$\left\{\begin{matrix}\text{rapidez de entrada}\\ \text{de materia.}\end{matrix}\right\} - \left\{\begin{matrix}\text{rapidez de salida de}\\ \text{materia.}\end{matrix}\right\} - \left\{\begin{matrix}\text{rapidez neta de}\\ \text{acumulación de}\\ \text{masa.}\end{matrix}\right\} = 0$$

La acumulación podrá ser positiva o negativa según que haya incremento o decremento de la cantidad de materia acumulada.

BALANCES DE ENERGIA EN MEZCLADO

$$\left\{\begin{matrix}\text{Rapidez de salida de energía en}\\ \text{el sistema termodinámico}\end{matrix}\right\} - \left\{\begin{matrix}\text{Rapidez de entrada de energía}\\ \text{en el sistema termodinámico}\end{matrix}\right\} = 0$$

$$L_C (Ep + Ec + EPe + U)_C - L_A (Ep + Ec + EPe + U)_A -$$

$$- L_B (Ep + Ec + EPe + U)_B = 0$$

En términos de entalpía

$$L_C (Ep + Ec + H)_C - L_A (Ep + Ec + H)_A - L_B (Ep + Ec + H)_B = 0$$

En los procesos en los que se mezclan corrientes a temperaturas diferentes, los términos Ep y Ec son, en general, despreciables frente a los términos de entalpía, por lo tanto

$$L_C H_C - L_A H_A - L_B H_B = 0$$

$$L_A H_A + L_B H_B = L_C H_C$$

En general

$$H_A = \int_{T_O}^{T_A} Cp_A \, dT$$

T_O = temperatura base para computar las entalpías

$Cp_C = Cp_A x_A + Cp_B x_B$

Cpa = capacidad calorífica a presión constante del fluido A

x_B = fracción masa del compuesto B

Si en el proceso hay acumulación

$$L_C H_C - L_A H_A - L_B H_B + \frac{d\,(H)}{d\theta} \rho V = 0$$

Mezclas de líquidos reales

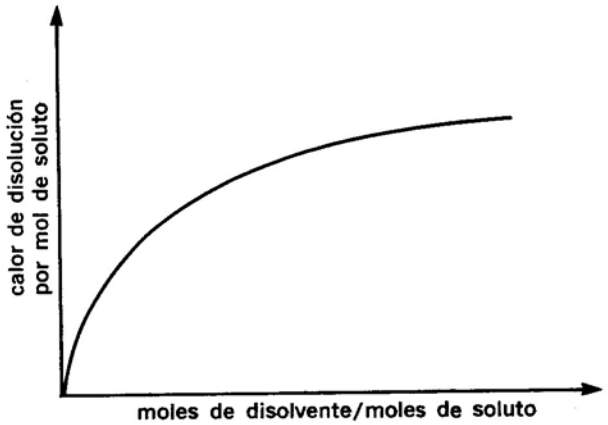
En muchos casos, al mezclarse dos líquidos o dos soluciones se desprende o se absorbe calor; cuando esto sucede se dice que hay un calor de disolución. El cambio de entalpía que se produce al mezclar dos líquidos a la misma temperatura se denomina calor de disolución.

Calores integrales estándar de disolución

El calor integral estándar de disolución se define como el cambio en la entalpía de un sistema cuando un mol de soluto se disuelve en **n** moles de disolvente manteniendo la temperatura a 25 °C y 1 atm de presión.

El valor numérico del calor integral de disolución depende del número de moles de disolvente. Al aumentar la cantidad de disolvente en aumentos iguales, el calor en cada adición disminuye progresivamente, hasta que se obtiene una gran dilución, generalmente de 100 a 200 moles de disolvente por mol de soluto, en la que ya no se perciben efectos de desprendimiento de calor. El calor integral de disolución se acerca un máximo a dilución infinita. Este valor límite se conoce como calor integral de disolución a dilución infinita.

Los calores de disolución se obtienen experimentalmente, y por lo general se presentan en forma de gráficas, como la que se muestra en la figura.



Algunas gráficas que presentan los calores de disolución para las mezclas más comunes se presentan en el apéndice XX.

La entalpía de una disolución a la temperatura T será:

$\tilde{H}$ disolución $= \tilde{x}_1\tilde{H}_1 + \tilde{x}_2\tilde{H}_2 + \tilde{x}_2\,\Delta\tilde{H}_s$

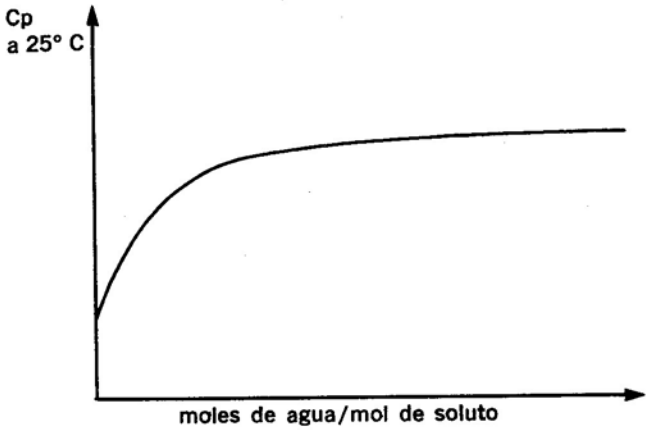
$\tilde{H}_1 =$ Entalpía del disolvente a T y P

$\tilde{H}_2 =$ Entalpía del soluto a T y P

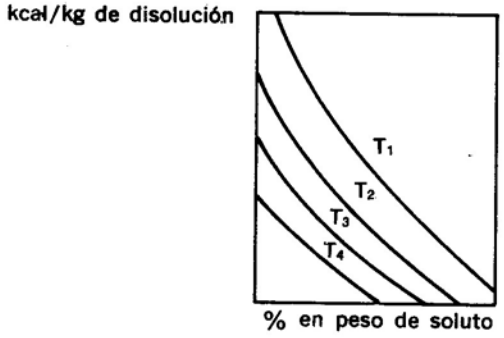
$\Delta\tilde{H}_s =$ Entalpía de disolución por mol de soluto

Capacidades caloríficas de disoluciones a presión constante

En ciertas disoluciones en las que un sólido inorgánico está disuelto en agua, los colores específicos de la mezcla se pueden obtener a partir de gráficas del tipo siguiente



Como el cálculo de las entalpías de las disoluciones que presentan calores de mezcla es tedioso, los ingenieros suelen utilizar los diagramas de entalpía a concentración para mezclas binarias, en tales gráficas las entalpías por unidad de peso de solución se grafican contra la concentración para una serie de temperaturas a presión constante



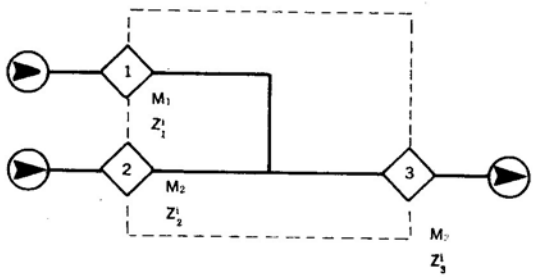
Con el uso de tales diagramas, los cálculos de mezclado son simples y rápidos, requiriéndose sólo el uso adecuado de la regla de la palanca.

En los apéndices XXIV, XXV y XXVI, se presentan algunos de los diagramas de entalpía-concentración de los sistemas con calores de mezclado más comunes.

REGLA DE LA PALANCA

Los problemas de mezclado se pueden resolver también por medios gráficos. Estos se basan en la utilización de la regla de la palanca.

Si una corriente de concentración z_1^i y otra corriente de concentración z_2^i se mezclan, la composición final de la mezcla resultante caerá sobre la línea recta que conecta las composiciones z_1^i y z_2^i de tal manera que la relación M_1/M_2 será igual a la distancia desde z_2^i a z_3^i dividida por la distancia desde z_1^i a z_3^i o sea:

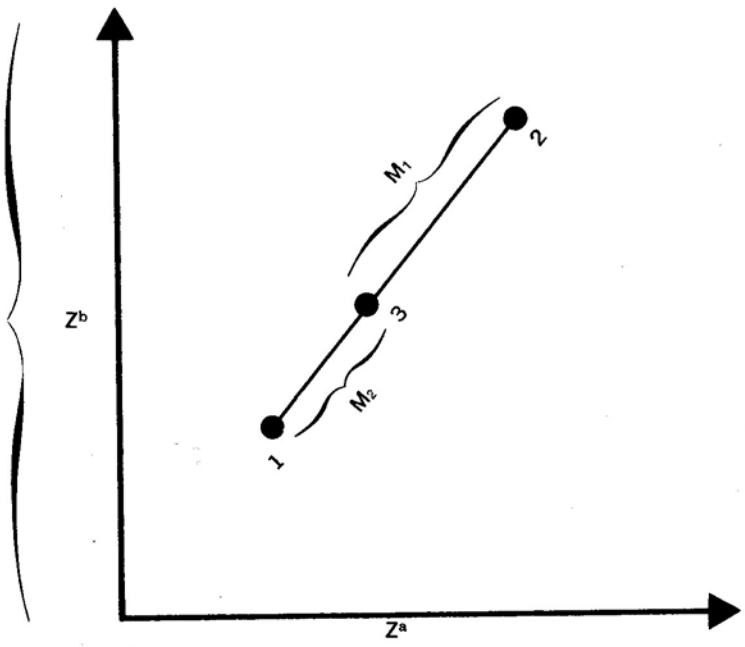


Balance total

$$M_1 + M_2 = M_3$$

$$M_1 z'_1 + M_2 z'_2 = (M_1 + M_2) z'_3$$

$$\therefore \frac{M_1}{M_2} = \frac{z'_3 - z'_2}{z'_1 - z'_3} = \frac{z_3 z_2}{z_1 z_3}$$

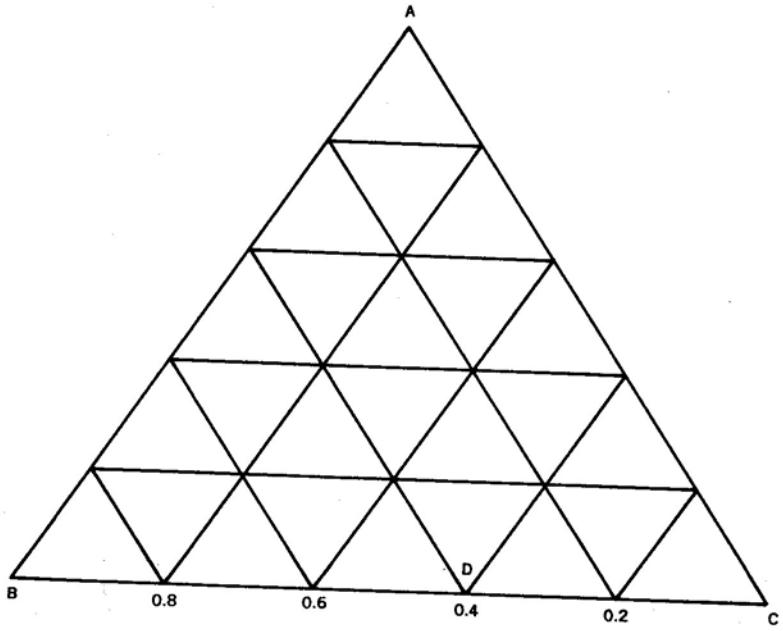


DIAGRAMAS TRIANGULARES

Las coordenadas triangulares son convenientes para representar la composición de un sistema de tres componentes. En el diagrama triangular los vértices representan componentes puros, y los lados mezclas de dos componentes.

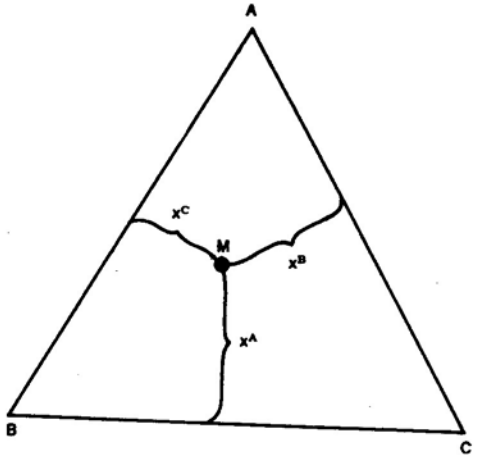
El punto A representa 100% del componente A, el punto D, de acuerdo con la regla de la planca, representa una mezcla binaria de 40% de B y 60% de C.

Si la altura del triángulo se toma como la unidad, la suma de dos distancias perpendiculares desde un punto situado en el interior del triángulo a los lados da igualmente la unidad y esas distancias pueden usarse para representar las concentraciones individuales de los tres componentes.

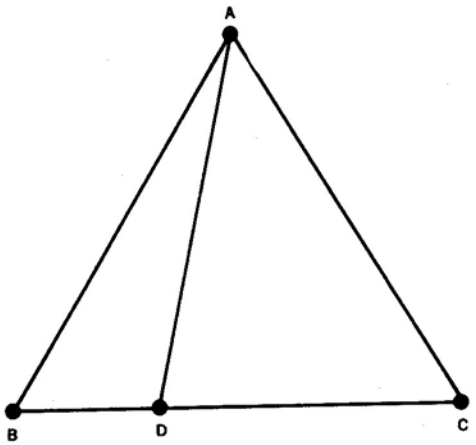


En el diagrama, la distancia x^B representa la concentración de la sustancia B en el punto M.

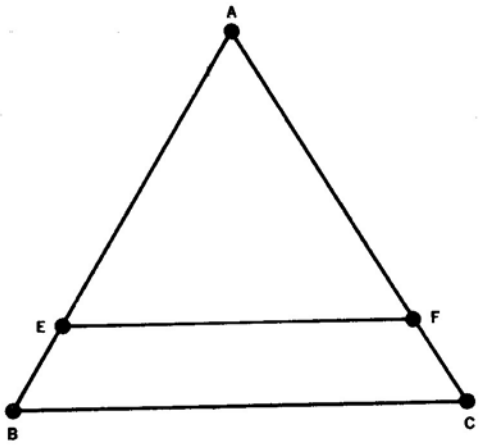
Todos los puntos de la línea que unen un vértice con un punto del lado opuesto representan mezclas de una misma relación entre las concentraciones de los componentes situados en los otros dos vértices.



En el segmento AD, x_B/x_C = constante



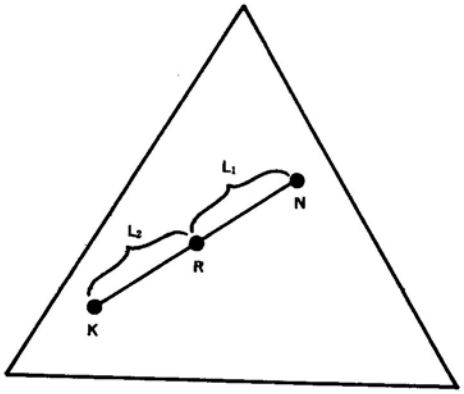
Las mezclas cuya composición corresponde a puntos sobre una recta paralela a un lado tienen una concentración constante del componente situado en el vértice opuesto.



En el segmento EF
x_A = constante

Si a L_1 kg de una mezcla situada en el punto K, se le añaden L_2 kg de una mezcla situada en el punto N, la nueva mezcla tendrá una composición dada por R, tal que:

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{RN}{RK} = \frac{x'_N - x'_R}{x'_R - x'_K}$$



GASES Y MEZCLA DE GASES

Los gases son de importancia vital en los procesos químicos, ya sea como reactivos, intermediarios o productos. El volumen ocupado por un peso dado de gas varía con la temperatura y la presión, así como con la composición del gas. Al tratar las propiedades de los gases, se nota que cada gas difiere de los otros en su comportamiento cuantitativo, aunque hay ciertas relaciones simples que se aplican a los gases en general. En realidad, hay muchos casos en la industria en donde las leyes simples predicen el comportamiento con la precisión suficiente para hacerlas útiles.

Ecuación general del estado gaseoso

Toda clase de problemas relacionados con cambios de volumen, presión o temperatura de los gases, se pueden resolver usando la ecuación general del estado gaseoso:

$$V_1 P_1/T_1 = V_2 P_2/T_2 = \text{constante}$$

En esta ecuación, la temperatura debe estar siempre en grados absolutos; en cambio, la presión y el volumen pueden ponerse en cualquier tipo de unidades. Toda clase de problemas relacionados con la masa, volumen, presión y temperatura de los gases se pueden resolver utilizando la ley de los gases ideales:

$$P V = \tilde{m} R T$$

En donde $\tilde{m}$ es el número de moles y R la llamada constante universal de los gases.

La ley de los gases ideales es una excelente aproximación a la ecuación de los gases reales a presiones bajas (menos de 10 atm) y temperaturas mayores de cero grados centígrados.

Condiciones estándar

Son las condiciones que se han tomado como norma o base para reportar el volumen ocupado por un gramo mol de gas ideal. Las condiciones estándar son 0 °C y 760 mm de Hg; bajo estas condiciones, 1 gramo mol de un gas cualquiera ocupará un volumen de 22.41 l.

Ley de Dalton

La presión ejercida por cada componente de una mezcla gaseosa es la misma que ejercería el compuesto si estuviera solo en el mismo volumen ocupado por la mezcla a la temperatura de referencia; de ello se deduce que la suma de las presiones parciales de los componentes de una mezcla es igual a la presión total:

$$P_T = \tilde{P}_1 + \tilde{P}_2 + \tilde{P}_3 + \ldots + \tilde{P}_n$$

Ley de Amagat

El volumen de una mezcla gaseosa es igual a la suma de los volúmenes parciales de los componentes individuales a la misma temperatura y presión de la mezcla:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + \ldots + V_n = \Sigma V_i$$

En donde el volumen parcial de un gas en una mezcla, se define como el volumen que el gas ocuparía si estuviese solo en el recipiente a T y P.

De la ley de los gases ideales, se tiene que:

$$P_1 V_1 = \tilde{m}_1 R T \qquad P V_T = \tilde{m}_T R T$$

$$\frac{V_1}{V_T} = \frac{\tilde{m}_1}{\tilde{m}_T} = \frac{\tilde{m}_1}{\tilde{m}_1 + \tilde{m}_2 + \tilde{m}_n} = \tilde{y}_1$$

$$\therefore V = V_T \tilde{y}_1$$

Esto indica que, en los gases ideales, el volumen de un componente puro es igual al producto del volumen total por la fracción molar de dicho componente; también el porciento en volumen de un gas en una mezcla es igual al porcentaje en mol.

Gases reales

Los gases reales siguen la ley de los gases ideales a presiones menores de 10 atm y temperaturas mayores de 0 °C; por encima de esto la mayor parte de los gases presentan desviaciones del comportamiento ideal; estas desviaciones pueden llegar a ser hasta de varios cientos por ciento con respecto a la idealidad.

Una de las ecuaciones más famosas para predecir el comportamiento de los gases reales es la llamada ecuación de Van der Waals:

$$(P + \mathbf{a}/(V)^2)\ (V - \mathbf{b}) = R\,T$$

La ecuación anterior representa el comportamiento de un gas puro. En ella, V es el volumen, a representa las fuerzas de atracción intermoleculares y b es el volumen efectivo. En el Apéndice IV se presentan datos de a y b para los gases más comunes.

$$(P + \tilde{m}^2\,\mathbf{a}/V^2)\ (V - \tilde{m}\,\mathbf{b}) = \tilde{m}\,R\,T \text{ para más de un mol.}$$

Estados correspondientes

Van der Waals sugirió que el comportamiento de las diferentes sustancias se hacía cuantitativamente similar si la presión, la temperatura y el volumen se expresaban en un nuevo tipo de unidades.

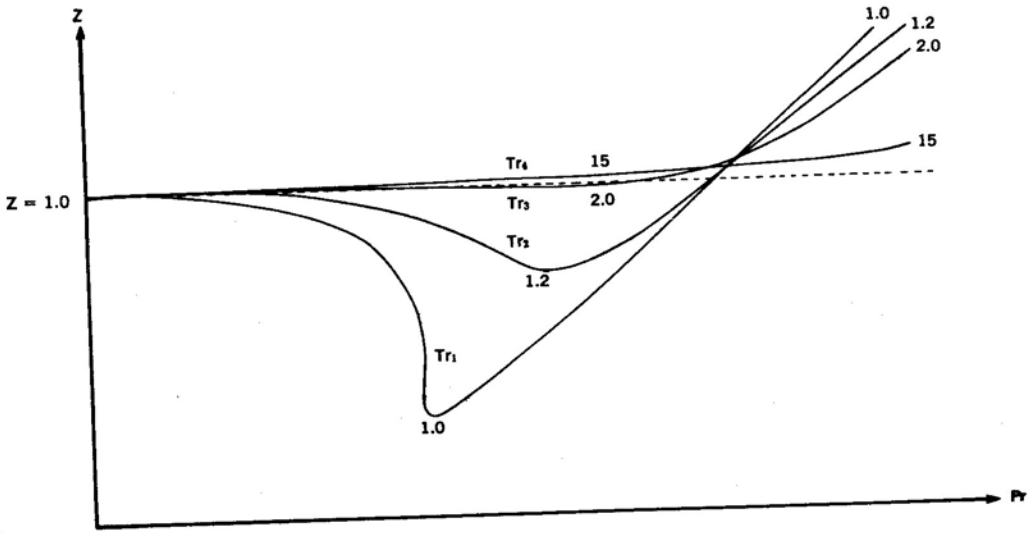
Propuso que la presión se expresara como la presión reducida definida como P/Pc, en donde P es la presión absoluta y Pc la presión crítica. De manera semejante,

$$\text{temperatura reducida } T_r = T/T_c$$

$$\text{volumen reducido } V_r = V/V_c$$

Van der Waals propuso también que, a una temperatura y presión reducida dadas, todos los gases deberían ocupar el mismo volumen. Esta es la ley de los estados correspondientes. De acuerdo con este postulado, la desviación del estado ideal para los diferentes gases será la misma al examinarla con las mismas condiciones de presión y temperatura reducida.

Para usar la ley de los estados correspondientes, se usan gráficas como la siguiente (véase Apéndice V):



En donde Z es el factor de compresibilidad definido como:

$$Z = P\,V/R\,T$$

Mezclas de gases

Para las mezclas de gases reales se pueden usar también las gráficas de propiedades correspondientes si se usan, en vez de presiones y temperaturas críticas, las presiones y temperaturas seudocríticas definidas por:

$$P'_c = \sum_{i=1}^{n} Pc_i \tilde{y}_i$$

$$T'_c = \sum_{i=1}^{n} Tc_i \tilde{y}_i$$

De manera que la presión y la temperatura seudocríticas son las que se usarán en la gráfica del Apéndice V:

$$P'_r = P/P'_c \qquad T'_r = T/T'_c$$

EVAPORACION

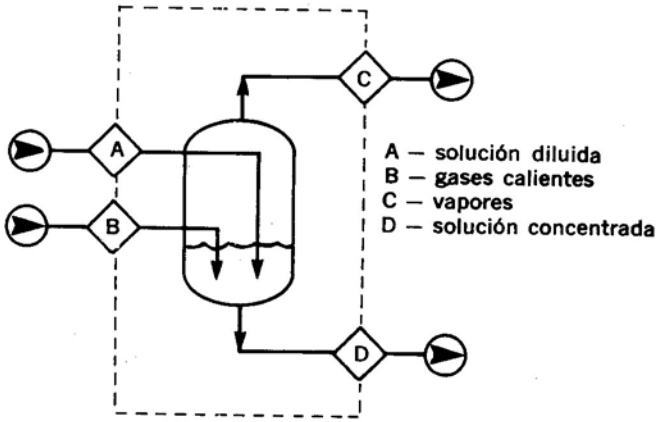
En esta operación se necesita dar calor a la disolución para que llegue a su temperatura de ebullición, y allí se debe proporcionar el calor suficiente para que se evapore la disolución. Como medio de calentamiento se puede utilizar el vapor de agua, aunque también puede utilizarse el contacto directo con gases de combustión.

Cuando se trabaja con disoluciones la temperatura de ebullición se altera debido al soluto disuelto. El aumento en el punto de ebullición se obtiene mediante el uso de las gráficas de Dühring. (Véase capítulo VII de la obra "Problemas de balances de materia").

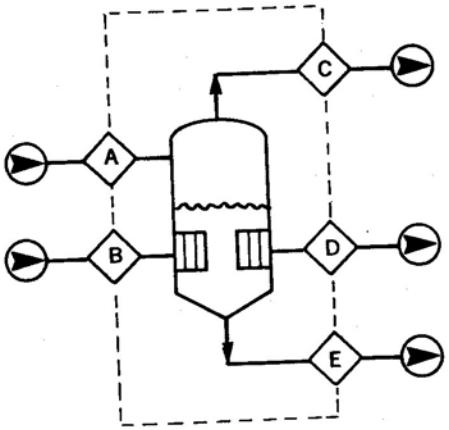
Para efectuar la evaporación a temperaturas más bajas, y así proporcionar una mejor transferencia de calor entre el medio calentante y la disolución, se suele operar al vacío.

En la evaporación, la disolución concentrada suele ser el producto final deseado, por ejemplo, NaOH, azúcar, sulfúrico, etc. Hay casos en que lo que se quiere recuperar son los vapores, como en el caso de la obtención de agua destilada a partir de agua de mar.

Los equipos utilizados en la evaporación se llaman evaporadores. Si los gases calientes pasan directamente sobre la disolución son evaporadores de contacto directo

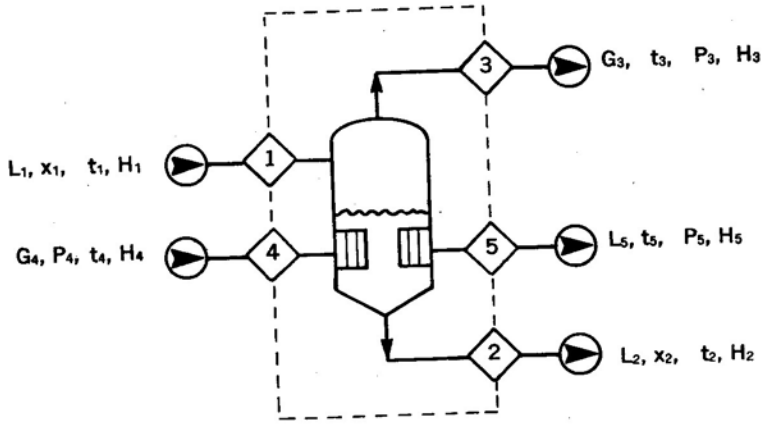


La mayor parte de los evaporadores son de contacto indirecto, es decir, el medio calentante (generalmente vapor de agua) pasa por el interior o el exterior de tubos metálicos, mientras que la disolución pasa por el otro lado, sin que se mezclen las dos corrientes



A — solución diluida
B — vapor de calentamiento
C — vapor de agua
D — vapor condensado
E — solución concentrada

BALANCES EN UN EVAPORADOR



L_2 = solución concentrada saliente
G_4 = vapor de calentamiento
P_4 = presión del vapor de calentamiento
x_1 = concentración de la disolución diluida
H_5 = entalpía de vapor condensado

Balances de materia del lado de la disolución

$$L_1 = G_3 + L_2$$

Balances de sólidos

$$L_1 x_1 = L_2 x_2$$

Balances de agua

$$G_3 = L_1 - L_1 (x_1/x_2)$$

Del lado del vapor de calentamiento

$$G_4 = L_5$$

Balances de energía

$$L_1 H_1 + G_4 H_4 = G_3 H_3 + L_5 H_5 + L_2 H_2$$
$$G_4 H_4 - L_5 H_5 = G_3 H_3 + L_2 H_2 - L_1 H_1$$
$$G_4 (H_4 - H_5) = G_3 H_3 + L_2 H_2 - L_1 H_1$$

Las entalpías H_2 y H_1 dependen de las características de las disoluciones que se concentran.

La mayor parte de las disoluciones no producen mucho calor de disolución; esto es cierto en soluciones como azúcar, papel y aun sal; sin embargo, el ácido sulfúrico y la sosa cáustica producen mucho calor de disolución.

Cuando se quiere concentrar esas disoluciones se necesita adicionar, además del calor sensible y el latente, el calor de mezcla. Estas disoluciones tienen, además, una alta elevación de su punto de ebullición. Para resolver estos sistemas se usan los diagramas de entalpía-concentración.

En aquellos sistemas que tienen un calor de mezcla bajo, las entalpías de entrada y salida de las soluciones se pueden calcular a partir de los calores específicos de las disoluciones.

La entalpía del vapor de calentamiento y la del vapor condensado se obtienen a partir de las tablas de entalpía para vapor de agua. La entalpía de los vapores producidos a partir de la disolución evaporada se obtiene a partir de las tablas de vapor de agua a la temperatura de ebullición de la disolución. Si se trata de otro líquido, se obtendrán a partir de los Cp y los calores latentes.

Ebullición

Cuando la presión de vapor iguala a la presión total, el líquido alcanza su temperatura de ebullición y comienza a hervir. En este punto, el cambio de fase (líquido a gas) se llevará a cabo a temperatura constante hasta que todo el líquido pase a gas.

Cuando la presión total es igual a 760 mm de Hg se dice que el líquido hierve a su temperatura normal de ebullición. Un líquido a su punto de

ebullición recibe el nombre de líquido saturado. Si está por debajo de esa temperatura se llamará líquido subenfriado.

Presión de vapor de un líquido que contiene un soluto no volátil

Un soluto no volátil actúa como si no tuviera presión de vapor. Las teorías de las soluciones ideales sugieren que debe existir un abatimiento en la presión de vapor y, por lo tanto, una elevación en la temperatura de ebullición de la solución al aumentar la concentración del soluto.

Para soluciones ideales.

$$\Delta Te = \frac{R\,Te^2\,\tilde{x}_2}{\tilde{\lambda}} = \left[\frac{R\,Te^2\,PM_1}{1\,000\,\tilde{\lambda}}\right] \text{Molalidad} = Kb\ \text{Molalidad}$$

ΔTe = Elevación en la temperatura de ebullición.

R = Constante de los gases.

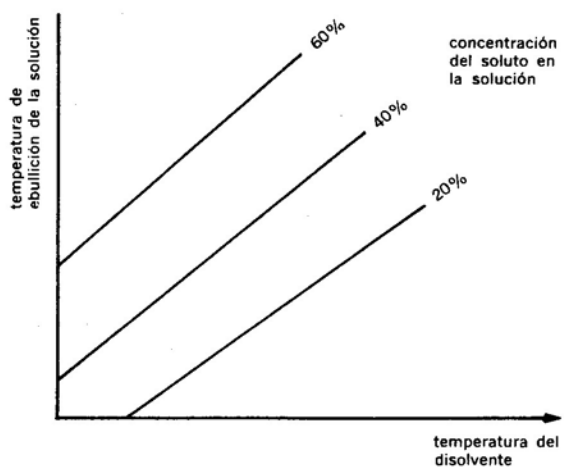
Te = Temperatura de ebullición normal.

$\tilde{x}$ = Fracción molar del soluto A.

$\tilde{\lambda}$ = Calor latente molar de vaporización del disolvente puro a la T normal de ebullición.

Kb = Constante molar de la elevación en el punto de ebullición.

Las desviaciones experimentales son grandes, por lo que en la práctica se hace uso de la regla de Dühring, según la cual, si se grafica el punto de ebullición de una solución frente a la temperatura de ebullición del disolvente, los puntos correspondientes a la misma concentración caerán sobre una recta.



En general se puede concluir que cuando se evaporan soluciones ideales, éstas hervirán a la temperatura a la que ebulliría el agua pura sujeta a la misma presión que la que se tiene sobre la solución, o dicho de otra manera, el aumento en el punto de ebullición es despreciable. Éste es el caso de las soluciones azucaradas, la leche, los jugos, etc. En cambio cuando se evaporan soluciones no ideales, los aumentos en el punto de ebullición son grandes y deben obtenerse mediante las gráficas de Dühring. Éste es el caso de las soluciones salinas, del ácido sulfúrico y de la sosa caústica.

PROBLEMAS RESUELTOS

Problema 5.1

Calcule el calor específico a 20 °C de una solución de K_2CO_3 en agua al 20 por 100.

a) usando las gráficas
b) usando las contribuciones

1. Planteamiento

1.1 Calor específico a presión constante de la mezcla

$$Cpm = x_{K_2CO_3} Cp_{K_2CO_3} + x_{H_2O} Cp_{H_2O}$$

$$\tilde{Cp}_{K_2CO_3} = \Sigma \tilde{Cp} \text{ elementos}$$

2. Cálculos

2.1 Usando las contribuciones

$$\tilde{Cp}_{K_2CO_3} = 1.8\ (1) + 4\ (3) + 6.2\ (2) = 26.2 \text{ kcal/kg mol °C}$$

$$PM_{K_2CO_3} = 39\ (2) + 12 + 16\ (3) = 138$$

$$Cp_{K_2CO_3} = 0.1898 \text{ kcal/kg °C}$$

2.2 Calor específico de la mezcla

$$Cp_{mezcla} = 0.1898\ (0.2) + 1\ (0.8) = 0.8379 \text{ kcal/kg °C}$$

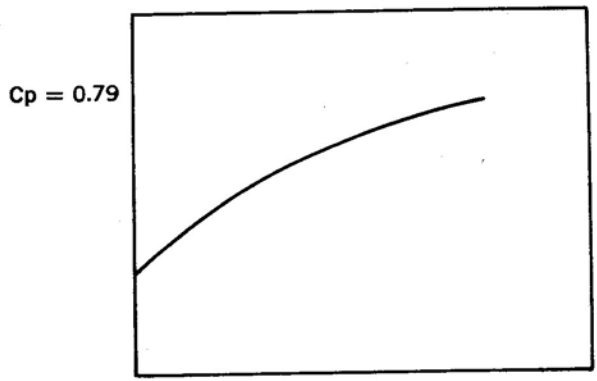
2.3 De la gráfica (Apéndice XII):

Base 1 kg

800 g de H_2O = 44.4 moles H_2O

200 g de K_2CO_3 = 1.449 moles K_2CO_3

$\tilde{m}\ H_2O / \tilde{m}\ K_2CO_3 = 30.66$



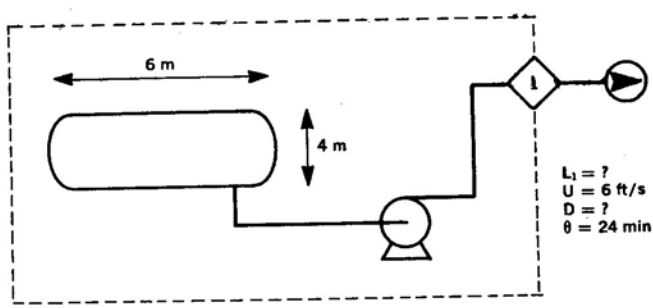
3. **Resultados**

El Cp de la solución es de 0.79 kcal/kg °C.

Problema 5.2

En una planta se bombea agua desde un tanque horizontal de 4 m de diámetro por 6 m de largo completamente lleno de agua. La mitad de agua en el tanque se bombea en 24 minutos. Se pregunta: **a)** ¿Cuál es el caudal de agua en l/min?; **b)** Si el agua fluye a través de una tubería y la velocidad del aguá en ella es de 6.5 pies por segundo, ¿cuál es el diámetro de la tubería?

1. Traducción



$V_{\theta = 0} = V$

$V_{\theta = 24} = \frac{V}{2}$

2. Planteamiento

2.1 Discusión

Para saber el caudal de agua se debe obtener primero el volumen de agua que desplazó la bomba y dividirla entre el tiempo. El diámetro de la tubería se obtendrá haciendo uso de la ecuación de la continuidad.

2.2 Volumen desplazado y gasto volumétrico

$$\Delta V = \frac{\pi}{4} D^2 \frac{l}{2} = \frac{\pi}{8} D^2 l \qquad \mathbf{L} = \frac{\pi D^2 l}{\theta 8}$$

2.3 Diámetro de la tubería

$$L = A\rho U \qquad \mathbf{L} = AU \qquad \therefore \qquad A = \mathbf{L}/U \qquad y \qquad \pi/4\, D^2_{tubo} = \mathbf{L}/U$$

3. Cálculos

3.1 Gasto volumétrico

$$\mathbf{L} = (\pi/8)\,(4)^2\, 6.5/24 = 1.5\ m^3/min$$

3.2 Diámetro de la tubería

$$D = \sqrt{\frac{4\,(1.5)\,\frac{m^3}{min}}{\pi\,(6.5)\,\frac{ft}{s}\left(\frac{0.305\ m}{1\ ft}\right)\left(\frac{60\ s}{1\ min}\right)}} = 0.1267\ m$$

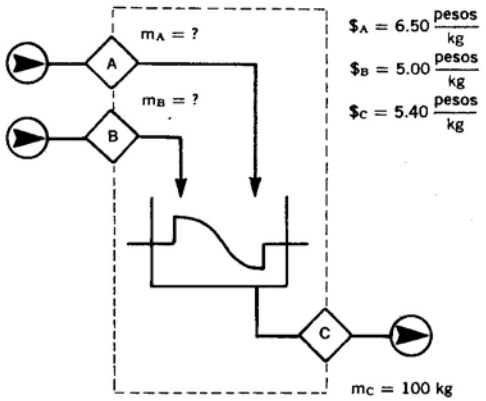
4. **Resultados**

El caudal de agua es de 1.5 m^3/min, el cual fluye a través de una tubería de 0.1267 m, o aproximadamente 5 pulgadas de I.D.

Problema 5.3

Se tienen dos tipos de alimento para aves, uno de 5 pesos el kg y el otro de 6.5 pesos el kg. Para hacer una mezcla de 100 kg y de un precio de 5.40 pesos el kg, ¿cuántos kilogramos de cada calidad se deben mezclar?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Se deberán hacer dos balances, uno de materia y otro de costos, que se resolverán simultáneamente.

2.2 Balance total de masa

$$m^A + m^B = m^C$$

$$m^A \$^A + m^B \$^B = m^C \$^C$$

3. Cálculos

3.1 Balances

$$m^A + m^B = 100$$

$$m^A (6.5) + m^B (5) = 100 (5.40)$$

$$(100 - m^B)\ 6.5 + m^B\ (5) = 540$$

$$650 - 6.5\ m^B + 5.0\ m^B = 540$$

$$-\ 1.5\ m^B = -110$$

$$m^B = 73.33 \text{ kg}$$

$$m^A = 26.66 \text{ kg}$$

4. **Resultados**

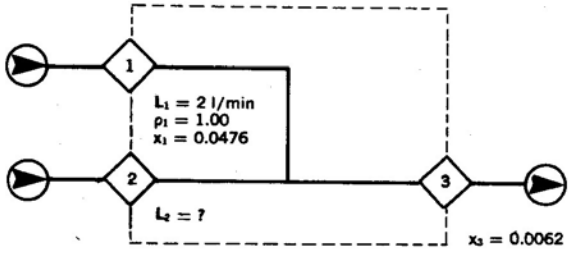
Para fabricar 100 kg de alimento para aves de 5.4 pesos se necesitan 26.66 kg del alimento de 6.5 pesos y 73.33 kg del alimento de 5 pesos.

Problema 5.4

A una corriente se le añade una sustancia de manera que la concentración sea del 4.76% en masa de esa sustancia. La corriente se une a otra y corriente abajo se toma una muestra de las corrientes combinadas, que dan una concentración de 0.62% en peso de la sustancia. Si el flujo de la primera corriente es de 2 litros por minuto, ¿cuál será el caudal de la otra corriente?

Nota: tome la densidad relativa = 1

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

En un problema de mezclado, lo que entra en las dos corrientes debe salir en la corriente de unión.

2.2 Balance total

$$\text{a } \rho_R = \text{constante} \qquad L_1 + L_2 = L_3 \qquad \text{o} \qquad L_1 + L_2 = L_3$$

2.3 Balance de sustancia

$$L_1 x_1^{sus} + L_2 x_2^{sus} = L_3 x_3^{sus}$$

3. Cálculos

3.1 Balance parcial

$$2\ \frac{\text{kg}}{\text{min}}\left(\frac{0.047\ \text{kg de sustancia}}{\text{kg total}}\right) + L_2 x_2^{sus} = L_3\left(\frac{0.0062\ \text{kg de sustancia}}{\text{kg total}}\right)$$

$$0.0952\ \text{kg sustancia/min} = L_3\ (0.00062)\ \text{kg de sustancia/kg total}$$

$$L_3 = 15.35\ \text{kg total/min}$$

3.2 Balance total

$$2\ \text{kg total/min} + L_2 = 15.35\ \text{kg total/min}$$

$$L_2 = 13.35\ \text{kg total/min}$$

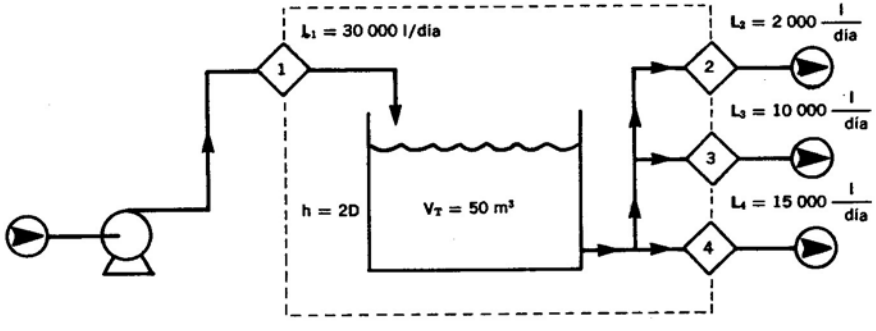
4. **Resultado**

La otra corriente tiene un gasto de 13.35 kg/min o 13.35 l/min.

Problema 5.5

Un depósito de agua de 50 m³ se usa para abastecer de agua a una planta; durante un día de operación se extrae agua de él por 3 tomas diferentes. El agua extraída fue de 2 000 l, de 10 000 y 15 000 l, y al mismo tiempo el tanque recibió 30 m³. Si al comienzo de las operaciones el tanque estaba a un tercio de su capacidad, ¿cuánta agua habrá en el tanque al final del día? Si se usa un tanque cilíndrico en el que la altura sea el doble del diámetro, ¿hasta qué altura llegará el líquido?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

En este tanque se tienen tanto entrada como salidas y acumulación. Se aplica, por tanto, la ecuación completa de balance de masa.

2.2 Balance

$$\{\text{Entrada}\} - \{\text{Salidas}\} - \{\text{Acumulación}\} = 0$$

$$L_1 - L_2 - L_3 - L_4 - \text{Acumulación} = 0$$

2.3 Volumen del tanque

$$V = \pi/4\,(D^2 h) = \pi/4\,(2\,D^3)$$

3. Cálculos

3.1 Acumulación

$$30\,000 \text{ l/día} = 2\,000 \text{ l/día} + 10\,000 \text{ l/día} + 15\,000 \text{ l/día} + \text{Acumulación}$$

$$\text{Acumulación} = 3\,000 \text{ l/día}$$

3.2 Volumen final de agua en el tanque

$$50\,000\,(0.33) + 3\,000 = \text{Volumen final}$$

$$\text{Volumen final} = 19\,700 \text{ l}$$

3.3 Dimensiones del tanque

$$50 = 2/4\,(\pi D^3) \qquad D = \sqrt[3]{100/\pi} = 3.1692 \text{ m} \qquad h = 6.33 \text{ m}$$

3.4 Altura del líquido en el tanque

Líquido contenido por m de altura

$$V = \pi/4\,(3.1692)^2\,(1) = 7.888 \text{ m}^3/\text{m}$$

Altura del líquido

$$\frac{19.7 \text{ m}^3}{7.888 \text{ m}^3/\text{m}} = 2.49 \text{ m}$$

4. **Resultados**

El volumen final en el tanque es de 19 700 l.

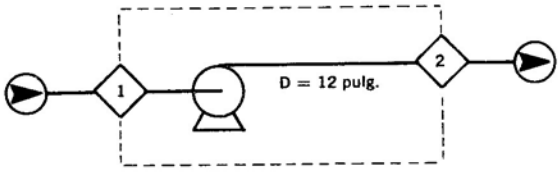
Las dimensiones del tanque son de 3.1692 m de diámetro y 6.33 m de altura.

El líquido contenido en el tanque llega a una altura de 2.49 m.

Problema 5.6

Por un oleoducto de 12 pulgadas de diámetro interior fluye petróleo crudo a razón de 50 000 barriles diarios. Calcule la velocidad lineal del petróleo en metros por segundo. Si la densidad es de 0.8 g/cm³, ¿cuál será el flujo másico en kilogramos por segundo y el flujo volumétrico en metros cúbicos por segundo?

1. Traducción



L_1 = 50 000 barriles/día
U_1 = ?
L = ? kg/s
$L = \frac{m^3}{s}$

2. Planteamiento

2.1 Discusión

Para resolver el problema se deberá hacer la conversión de barriles a m³ y con la densidad se pasará a masa. La velocidad se puede obtener por la ecuación de la continuidad.

2.2 Flujo másico

$$L = \mathbf{L}\rho$$

2.3 Velocidad

$\mathbf{L}_1 = A_1U_1 \qquad U_1 = \mathbf{L}_1/A_1$

3. Cálculos

3.1 Flujo volumétrico

$\mathbf{L}_1$ = 50 000 barriles/día (42 galones/barril) (3.785 l/galón) (m³/1 000 l) (1 día/24 h) (1 h/3 600 s)

$$\mathbf{L}_1 = 0.09199 \text{ m}^3/\text{s}$$

3.2 Flujo másico

$$L = 0.09199\ m^3/s\ (0.8\ kg/l)\ (1\,000\ l/m^3) = 73.59\ kg/s$$

3.3 Velocidad

$$U = \frac{0.09199\ \frac{m^3}{s}}{\frac{\pi}{4}\,[(12)\ (0.0254)]^2\ m^2} = \frac{0.09199}{0.07296} = 1.26\ \frac{m}{s}$$

4. **Resultados**

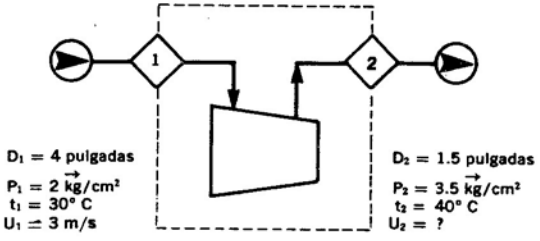
El flujo másico es de 73.59 kg/s y la velocidad de 1.26 m/s.

Problema 5.7

En un punto de una línea de 4 pulgadas de diámetro interior un gas tiene una presión de 2 $\vec{kg}/cm^2$ a 30 °C y viaja a una velocidad de 3 m/seg. El gas pasa por un compresor y de allí a una tubería de 1.5 pulgadas. La presión del gas en esa tubería es de 3.5 $\vec{kg}/cm^2$ a una temperatura de 40 °C.

¿Cuál será la nueva velocidad del gas?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Como se trata de gases, hay un cambio de densidad al variar la temperatura y la presión. Esto se puede medir con la ley de los gases ideales.

2.2. Ecuación de continuidad

$$G_1 = G_2 \qquad A_1 \rho_1 U_1 = A_2 \rho_2 U_2$$

pero $\rho = m/v = P\,PM/RT$

$$U_2 = U_1\left(\frac{A_1}{A_2}\right)\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)$$

$$U_2 = U_1\left(\frac{A_1}{A_2}\right)\left(\frac{T_2}{T_1}\right)\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$$

3. Cálculos

3.1 Areas

$$A_1 = \frac{\pi}{4} D_1^2 = \frac{3.1416}{4} [4\ (0.0254)]^2 = 0.008107\ m^2$$

$$A_2 = \frac{3.1416}{4} [1.5\ (0.0254)]^2 = 0.00114\ m^2$$

3.2 Ecuación de continuidad

$$U_2 = 3\ \frac{m}{s}\left(\frac{0.008107}{0.00114}\right)\left(\frac{273 + 40}{273 + 30}\right)\left(\frac{2}{3.5}\right) = 12.59\ \frac{m}{s}$$

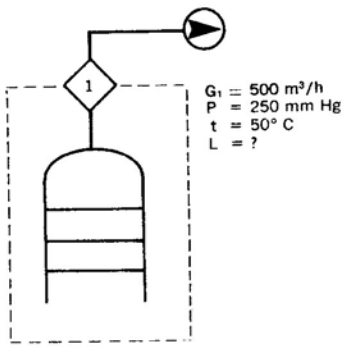
4. **Resultado**

La velocidad del gas es de 12.59 m/s.

Problema 5.8

Una columna de destilación produce vapores de benceno a razón de 500 m^3/h a la presión de 250 mm de Hg y 50 °C. ¿Cuánto peso de benceno se destila por hora?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Por la presión y temperatura del problema, se observa que puede resolverse por medio de los gases ideales.

2.2 Masa destilada

$$PV = (G/PM)\,RT \qquad G = PV\,PM/RT$$

3. Cálculos

3.1 Masa destilada

$$G = \frac{250\,(500)\,(78)}{760\,(0.082)\,(273 + 50)} = 484\,\frac{kg}{h}$$

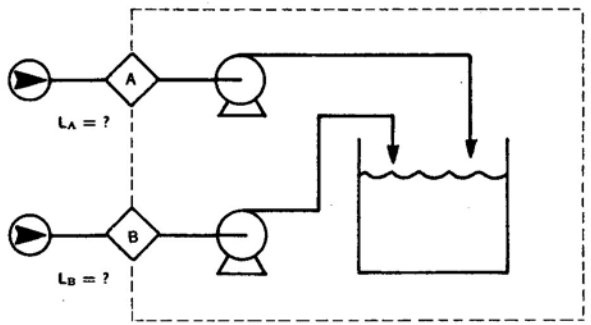
4. **Resultado**

Se destilan 484 kg/h de benceno.

Problema 5.9

Dos bombas llenan un depósito en 8 h. ¿Cuánto tiempo necesitará cada una para llenarlo separadamente, sabiendo que la primera bomba tarda 4 h más que la segunda? Si el volumen del tanque fuera de 100 m³, ¿cuáles serían los gastos de cada bomba?

1. Traducción



$L_A(8) + L_B(8) = 100\ m^3$

2. Planteamiento

2.1 Discusión

Con base en los gastos se pueden plantear ecuaciones que resuelvan el problema.

2.2 Gasto en las bombas

$$\mathbf{L}_A\,\theta_A = V_T \qquad \theta_B = \theta_A + 4$$
$$\mathbf{L}_B\,\theta_B = V_T \qquad \mathbf{L}_B\,(\theta_A + 4) = V_T$$

2.3 Gasto combinado

$$\mathbf{L}_A\theta + \mathbf{L}_B\theta = V_T$$

3. Cálculos

3.1 Gastos y tiempos

$$\mathbf{L}_A\,(8) + \mathbf{L}_B\,(8) = V_T \quad (I)$$
$$\mathbf{L}_A\,\theta_A = V_T \qquad \mathbf{L}_A = V_T/\theta_A$$
$$\mathbf{L}_B\,(\theta_A + 4) = V_T \qquad \mathbf{L}_B = \frac{V_T}{(\theta_A + 4)}$$

Sustituyendo en I

$$\frac{V_T}{\theta_A}(8) + \frac{V_T}{\theta_A + 4}(8) = V_T$$
$$\theta_A^2 - 12\,\theta_A - 32 = 0$$
$$\therefore \quad \theta_A = 14.2 \qquad \theta_B = 18.2$$

3.2 Gastos si el volumen del depósito es de 100 m^3

$$Ca_A = 100/14.2 = 7.04\ m^3/h = 117\ l/min$$
$$Ca_B = 100/18.2 = 5.4945\ m^3/h = 91.5\ l/min$$

4. **Resultados**

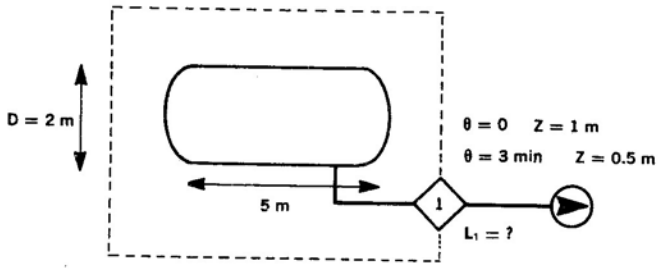
La bomba A tarda 14 h, 12 min en llenar el tanque y la bomba B tarda 18 h y 12 min.

El gasto de A es de 117 l/min y el de B 91.5 l/min.

Problema 5.10

En un tanque cilíndrico horizontal usado en una industria, la altura de agua baja de 1 m a 0.5 m en 3 min. Si el tanque tiene un diámetro de 2 m y una longitud de 5 m, ¿cuál fue el gasto volumétrico?

1. Traducción

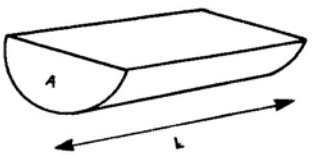


2. Planteamiento

2.1 Discusión

Cuando un tanque horizontal cilíndrico está parcialmente lleno se deben hacer deducciones para obtener el volumen.

2.2 Volumen de líquido.

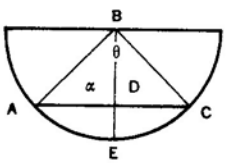


Volumen = área del segmento (longitud)

Area ACE = área del sector-área triangular

Area sector = área ABCE = $1/2\ rS = 1/2\ r^2\theta$

Area segmento = $1/2\ r^2\ (\theta - \text{sen}\ \theta)$



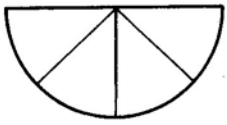
$$\text{Area triángulo} = \frac{r\ \text{sen}\ \alpha}{2}\ r\ \cos\ \alpha$$

Area ACE = Area ABCE − área ABC

3. Cálculo

3.1 Volumen inicial

En este caso



$$\text{Area} = \pi r^2/2 = 1.57 \text{ m}^2$$

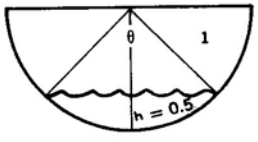
$$\text{Volumen} = 1.57 \ (5) = 7.85398 \text{ m}^3$$

3.2 Volumen final

$$\text{sen } \alpha = 0.5/1 = 0.5$$

$$\alpha = 30° \qquad 2\alpha = 60° \qquad \therefore \quad \theta = 120°$$

$$\theta = 2.0944 \text{ radianes} \qquad \text{sen } \theta = 0.866$$



$$\text{Area segmento} = 1/2 \ (1)^2 \ (2.0944 - 0.866) = 0.6144 \text{ m}^2$$

$$\text{Volumen} = 0.6144 \ (5) = 3.07255 \text{ m}^3$$

3.3 Gasto

$$Ca = \frac{7.85398 - 3.07255}{3} = 1.593 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

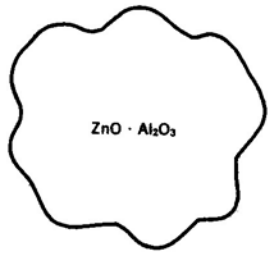
4. **Resultado**

El gasto volumétrico fue de 1.593 m^3/min.

Problema 5.11

Una muestra de $ZnO \cdot Al_2O_3$ que pesa 1.909 g dio un análisis de 1.664 g de $ZnSO_4$. ¿Cuál será el porcentaje de Al_2O_3 en la muestra? ¿Es una muestra pura?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Para resolver este problema debemos usar la tabla de pesos atómicos, con los que encontraremos la relación qué debe existir entre el ZnO y el Al_2O_3 en una mezcla pura.

2.2 Cantidad de ZnO en la muestra

$$Zn\,SO_4 \longrightarrow SO_3 + ZnO$$

$$\tilde{m}_{ZnSO_4} = \tilde{m}_{ZnO}$$

$$m_{ZnO} = \frac{PM_{ZnO}\,(m_{ZnSO_4})}{PM_{ZnSO_4}}$$

2.3 Porcentaje de Al_2O_3 en la muestra

$$\%\ Al_2O_3 = \frac{m_{Al_2O_3}}{m_{ZnO\cdot Al_2O_3}}\,(100)$$

2.4 Pureza de la muestra

$$x_{ZnO}^{\text{en muestra}}/x_{ZnO\ \text{teórico}}(100) = \text{Pureza}$$

3. Cálculos

3.1 Cantidad de ZnO en la muestra

$$PM_{ZnSO_4} = PA_{Zn} + PA_S + 4\,PA_O = 65.37 + 32.064 + 4\,(16) = 161.434$$

$$PM_{ZnO} = PA_{Zn} + PA_O = 65.37 + 16 = 81.37$$

$$\therefore m_{ZnO} = 81.37\,(1.664)/161.434 = 0.8387\ g$$

3.2 Porcentaje de Al_2O_3 en la muestra

$$\%\ Al_2O_3 = \frac{1.909 - 0.8387}{1.909}\,(100) = 56.06\%$$

3.3 Pureza

$$PM_{ZnO \cdot Al_2O_3} = 183.33$$

$$x_{ZnO} \text{ teórica} = 81.37/183.33 = 0.4438$$

$$\text{Pureza} = (0.4394/0.4438)\ (100) = 99\%$$

4. Resultados

El porcentaje de Al_2O_3 en la muestra es 56.6 y la muestra tiene una pureza del 99%.

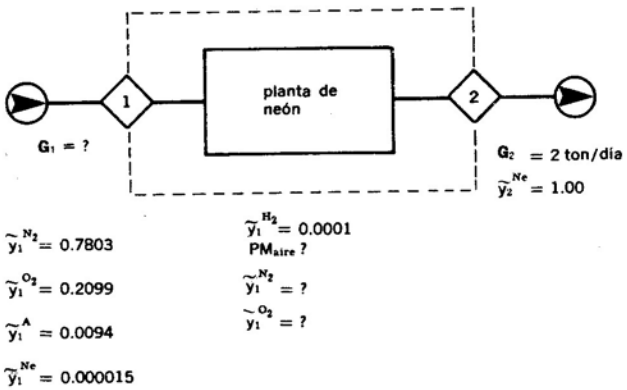
Problema 5.12

La composición volumétrica del aire es la siguiente en %:

Nitrógeno	78.03%
Oxígeno	20.99
Argón	0.94
Hidrógeno	0.01
Neón	0.0015
Helio	0.0005
Kriptón	0.00011
Xenón	0.000009

¿Cuál es el peso molecular del aire? ¿Cuál será la fracción masa de los componentes? ¿Cuál es la densidad del aire a C.E.? Si se necesita producir 2 toneladas métricas por día de neón, ¿cuántos m³ de aire a C.E. deberían tratarse?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

El peso molecular de una mezcla gaseosa será igual a la suma de las fracciones mol por el peso molecular de cada componente.

2.2 Peso molecular

$$PMaire = \tilde{y}_1^{N_2} PM_{N_2} + \tilde{y}_1^{O_2} PM_{O_2} + \tilde{y}_1^{Ne} PM_{Ne} + \tilde{y}_1^{H_2} PM_{H_2} + \tilde{y}_1^{He} PM_{He} + \tilde{y}_1^{Kr} PM_{Kr} + \tilde{y}_1^{Xe} PM_{Xe} + \tilde{y}_1^{A} PM_{A}$$

2.3 Fracción peso

$$y_1^{N_2} = \tilde{y}_1^{N_2} PM_{N_2}/PMaire \qquad y_1^{O_2} = \tilde{y}_1^{O_2} PM_{O_2}/PMaire$$

2.4 Aire necesario

$$L_1 y_1^{Ne} = L_2 y_2^{Ne} \qquad Ca_1 = L_1/\rho_{aire\ C\ E}$$

2.5 Densidad a condiciones estándar

$$\rho = m/v = P\ PM/RT$$

3. Cálculos

3.1 Peso molecular

$$PM_{aire} = 0.7803\ (28.0134) + 0.2099\ (31.9988) + 0.000015\ (20.183) + 0.000005\ (4.0026) + 0.0000011\ (83.80) + 0.000000009\ (131.3) + 0.0094\ (39.948) + 0.0001\ (2.01594) = 28.95154$$

3.2 Fracción masa

$$y_1^{N_2} = 21.858856/28.95154 = 0.75502$$
$$y_1^{O_2} = 6.716548/28.95154 = 0.23199$$
$$y_1^{Kr} = 0.000092/28.95154 = 0.0000031$$
$$y_1^{Ar} = 0.375511/28.95154 = 0.01297$$
$$y_1^{Ne} = 0.000302/28.95154 = 0.0000104$$
$$y_1^{He} = 0.00002/28.95154 = 0.00000069$$
$$y_1^{Xe} = 0.000011/28.95154 = 0.0000003799$$
$$y_1^{H_2} = 0.000201/28.95154 = 0.00000694$$

3.3 Densidad del aire a C.E.

A condiciones estándar de 0 °C y 1 atm, un g mol de aire debe ocupar un volumen de 22.4 l.

$$\rho = \frac{1\ (28.95154)}{0.082\ (273)} = 1.2932\ \frac{g}{l}$$

3.4 Metros cúbicos a tratarse

$$L_1\ (0.0000104) = 2\ 000\ kg/día$$

$$L_1 = 192307692.3\ kg/día = 192307.6\ Ton/día$$

$$Ca_1 = 192307692.3/1.2932 = 148706845.3\ m^3/día$$

4. **Resultados**

El peso molecular del aire es de 28.95154. Este se suele redondear a 29 para los cálculos en los que se trata con aire, con vapor de agua y CO_2.

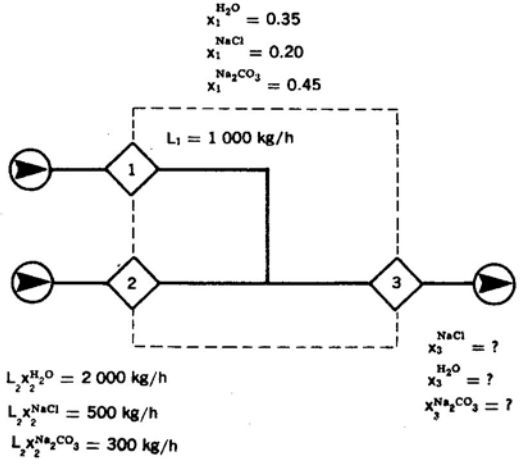
La composición en % en masa es:

Nitrógeno	75.502
Oxígeno	23.199
Argón	1.297
Hidrógeno	0.000694
Neón	0.00104
Helio	0.000069
Kriptón	0.00031
Xenón	0.00003799

Se necesitarán 148 706 845.3 m^3/día de aire a condiciones estándar para producir 2 ton/día de neón.

Problema 5.13

Calcule gráficamente la composición de la mezcla resultante de unir las dos corrientes mostradas en la figura siguiente:



1. Planteamiento

1.1 Discusión

Para resolver este problema se deberá construir un diagrama triangular y dibujar allí los puntos que identifiquen a las corrientes 1, 2 y 3.

1.2 Composición de la corriente 2

$$L_2 x_2^{H_2O} + L_2 x_2^{NaCl} + L_2 x_2^{Na_2CO_3} = L_2$$

$$x_2^{H_2O} = L_2 x_2^{H_2O}/L_2 \qquad x_2^{NaCl} = L_2 x_2^{NaCl}/L_2, \qquad x_2^{Na_2CO_3} = L_2 x_2^{Na_2CO_3}/L_2$$

2. Cálculos

2.1 Composición de la corriente 2

$$L_2 = 2\,000 + 500 + 300 = 2\,800 \text{ kg/h}$$

$$x_2^{H_2O} = 2\,000/2\,800 = 0.7142 \quad x_2^{NaCl} = 500/2\,800 = 0.1785 \quad x_2^{Na_2CO_3} = 0.1071$$

2.2 L_3

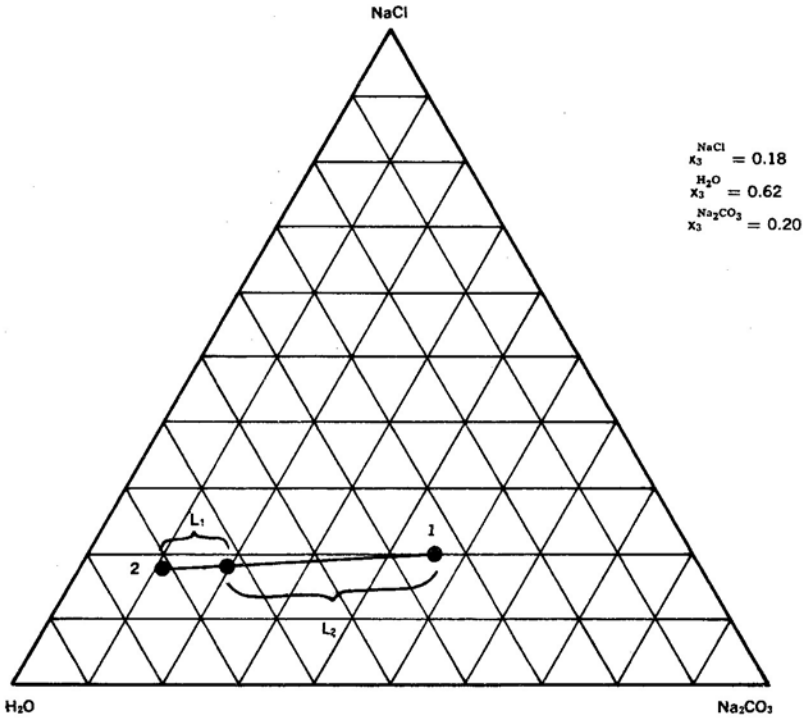
$$L_3 = 2\,800 + 1\,000 = 3\,800 \text{ kg/h}$$

$$L_2/L_1 = 2\,800/1\,000 = 2.8$$

2.3 Diagrama

$$L_2 + L_1 = 3.8$$

La distancia de 1 a 2 se debe dividir en 3.8 partes. A las 2.8 partes del punto 1, se encuentra la mezcla.



3. **Resultado**

Las composiciones así obtenidas son sólo aproximadas; las composiciones exactas se pueden obtener por los métodos analíticos.

Problema 5.14

Calcule la composición final de la mezcla del problema anterior por el método analítico.

1. Planteamiento

1.1 Discusión

Se deberán hacer balances totales y parciales para encontrar las composiciones finales.

1.2 Balance total

$$L_1 + L_2 = L_3$$

1.3 Balance parcial de NaCl

$$L_1 x_1^{NaCl} + L_2 x_2^{NaCl} = L_3 x_3^{NaCl}$$

1.4 Balance parcial de H_2O

$$L_1 x_1^{H_2O} + L_2 x_2^{H_2O} = L_3 x_3^{H_2O}$$

2. Cálculos

2.1 Balance total

$$1\,000 + 2\,800 = 3\,800 = L_3$$

2.2 Balance parcial de sal

$$1\,000\,(0.2) + 2\,800\,(0.1785) = 3\,800\, x_3^{NaCl}$$

$$x_3^{NaCl} = 0.1842 \text{ kg NaCl/kg total}$$

2.3 Balance parcial de agua

$$1\,000\,(0.35) + 2\,800\,(0.7142) = 3\,800\, x_3^{H_2O}$$

$$x_3^{H_2O} = 0.6184 \text{ kg } H_2O\text{/kg total}$$

$$x_3^{Na_2CO_3} = 1 - 0.6184 - 0.1842 = 0.1974 \text{ kg } Na_2CO_3\text{/kg total}$$

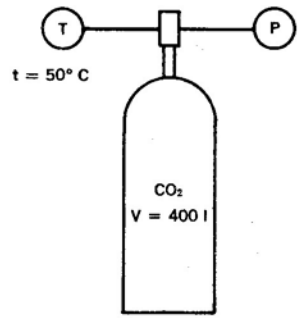
3. **Resultado**

La composición final de la mezcla es de 18.42% de H_2O y 19.7% de Na_2CO_3.

Problema 5.15

Calcule la presión que existe dentro de un cilindro de 400 l que contiene 80 kg de CO_2 a 50 °C. Haga el cálculo primero como gas ideal y luego como gas real.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Gas ideal

$$PV = \tilde{m}\, RT/PM$$

2.2 Gas real

$$(P + a\,\tilde{m}^2/V^2)\ (V - \tilde{m}\, b) = \tilde{m}\, RT$$

3. Cálculos

3.1 Presión como gas ideal

$$P = \frac{80\ (0.082)\ (273 + 50)}{44\ (0.4)} = 120.39\ \text{atm}$$

3.2 Gas real

Constantes de Van der Waals

$$a = 3.592\ \text{lt}^2\ \text{atm/mol}^2 \qquad b = 0.04267\ \text{l/mol}$$

$$\left[P + \frac{3.592\left(\frac{80\,000}{44}\right)^2}{(400)^2}\right]\left[400 - \frac{80\,000}{44}(0.04267)\right] = \frac{80\,000}{44}(0.082)\ (323)$$

$$P = 75.13\ \text{atm}$$

4. **Resultados**

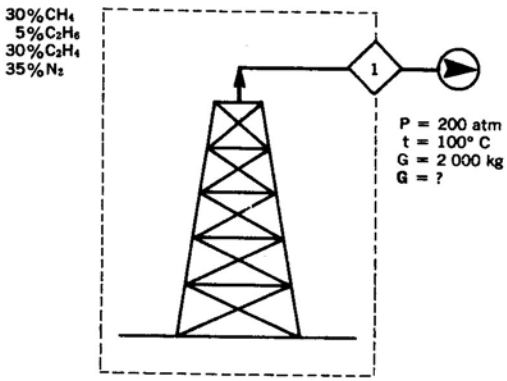
Presión como gas ideal 120.39 atm.

Presión como gas real 75.13 atm.

Problema 5.16

El gas natural saliente de un pozo está a 200 atm y 100 °C y tiene 30% de metano, 5% de etano, 30% de etileno y 35% de nitrógeno en mol. Calcule el volumen ocupado por 2 000 kg de ese gas. ¿Cuál será la densidad del mismo?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Este problema se puede tratar como mezcla real usando la ley de los estados correspondiente.

2.2 Condiciones seudocríticas

$$P'_C = P_C^{N_2}\,\tilde{y}^{N_2} + P_C^{CH_4}\,\tilde{y}^{CH_4} + P_C^{C_2H_6}\,\tilde{y}^{C_2H_6} + P_C^{C_2H_4}\,\tilde{y}^{C_2H_4}$$

$$T'_C = T_C^{N_2}\,\tilde{y}^{N_2} + T_C^{CH_4}\,\tilde{y}^{CH_4} + T_C^{C_2H_6}\,\tilde{y}^{C_2H_6} + T_C^{C_2H_4}\,\tilde{y}^{C_2H_4}$$

$$P'r = P/P'c \qquad T'r = T/T'r$$

2.3 Volumen

$$Ca = Z\,\tilde{G}\,RT/P$$

2.4 Densidad

$$\rho = m/V$$

3. Cálculos

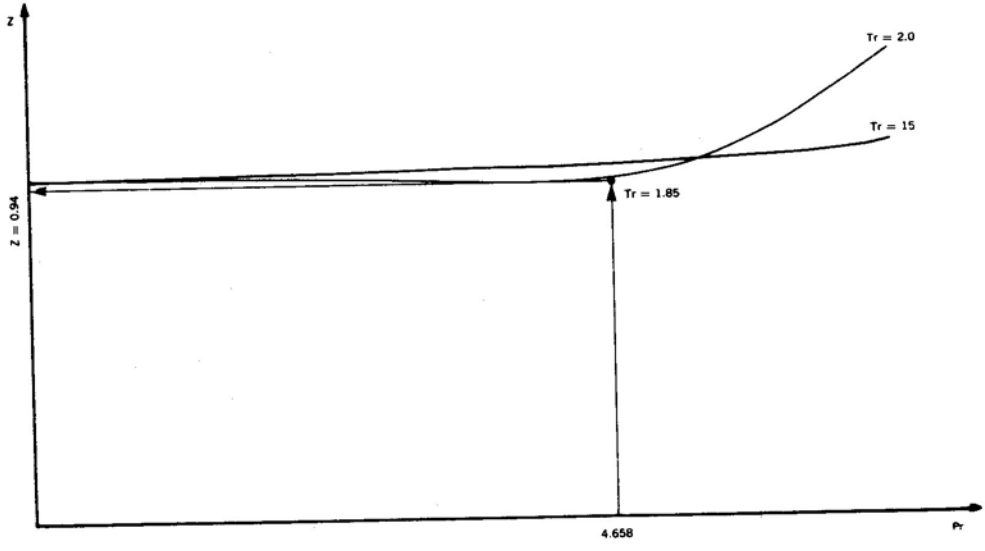
3.1 Condiciones seudocríticas

$$P'_C = 33.5\ (0.35) + 45.8\ (0.3) + 48.8\ (0.05) + 50.7\ (0.3) = 43.115\ \text{atm}$$

$$T'_C = 126\ (0.35) + 191.1\ (0.3) + 305\ (0.05) + 282.8\ (0.3) = 201.53\ °K$$

$$P'r = 200/43.115 = 4.638 \qquad T'r = 373/201.53 = 1.85$$

3.2 De la gráfica de Z



3.3 Peso molecular de la mezcla

$$PM = 16\ (0.3) + 0.05\ (30) + (0.3)\ (28) + (0.35)\ (28) = 24.5$$

3.4 Volumen

$$Ca = 0.94\ \frac{(2\ 000)}{24.5}\ \frac{(0.082)\ (373)}{200} = 11.73\ \frac{m^3}{seg}$$

3.5 Densidad

$$\rho = 2\ 000\ kg/11.73\ m^3 = 170.1\ \ kg/m^3$$

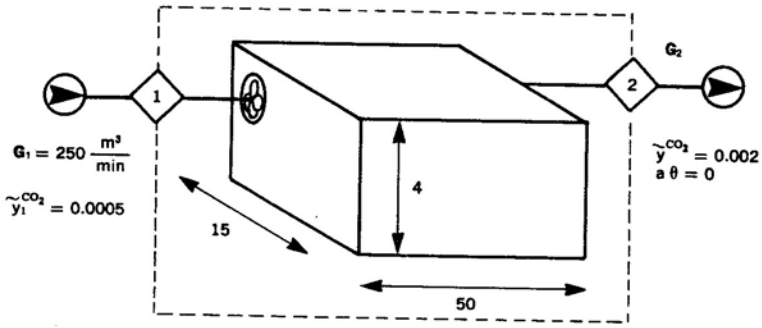
4. **Resultado**

El gas ocupa 11.73 m^3/seg y su densidad es de 170.1 g/l.

Problema 5.17

Al analizarse el aire de un cuarto de 50 × 4 × 15 metros, se encontró un porcentaje de $CO_2 = 0.2\%$. En seguida se introdujo al cuarto aire fresco de 0.05% de CO_2 por medio de ventiladores y a razón de 250 m^3/min. Encuentre el % de CO_2 en el cuarto, después de 20 minutos.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

El problema es de régimen transitorio y se debe resolver por medio de ecuaciones diferenciales.

$$\left\{\begin{matrix}\text{rapidez de entrada}\\ \text{de } CO_2\end{matrix}\right\} - \left\{\begin{matrix}\text{rapidez de salida del}\\ CO_2\end{matrix}\right\} = \left\{\begin{matrix}\text{rapidez de disminución}\\ \text{del } CO_2\end{matrix}\right\}$$

$$G_1\tilde{y}_1^{CO_2} - G_2\tilde{y}_2^{CO_2} = v \text{ cuarto } \frac{d\,\tilde{y}^{CO_2}}{d\,\theta}$$

Ahora bien $G_1 = G_2$

$$G_1(\tilde{y}_1^{CO_2} - \tilde{y}_2^{CO_2}) = v \text{ cuarto } \frac{d\,\tilde{y}^{CO_2}}{d\,\theta}$$

$$\frac{d\,\tilde{y}^{CO_2}}{\tilde{y}_2^{CO_2} - \tilde{y}_1^{CO_2}} = -\frac{G_1}{v \text{ cuarto}}\,d\,\theta$$

3. Cálculos

3.1 Balance

Volumen del cuarto $V = 15(50)(4) = 3\,000\ m^3$

$$d\,\tilde{y}_2^{CO_2}/(\tilde{y}_2^{CO_2} - 0.0005) = -250\,d\theta/3\,000$$

$$\frac{d\,\tilde{y}_2^{CO_2}}{\tilde{y}_2^{CO_2} - 0.0005} = -0.0833\,d\theta$$

Integrando,

$$\ln(\tilde{y}_2^{CO_2} - 0.0005) = -0.0833\,\theta + k$$

3.2 Obtención de la constante k

$$\text{Si } \theta = 0 \qquad \tilde{y}_2^{CO_2} = 0.002$$

$$\ln(0.002 - 0.0005) = k \qquad k = -6.50229$$

$$\therefore \ln(\tilde{y}_2^{CO_2} - 0.0005) = -0.0833\,\theta - 6.50229$$

3.3 Concentración a los 20 minutos

$$\ln (\tilde{y}_2^{CO_2} - 0.0005) = -0.0833\,(20) - 6.50229 =$$
$$-1.666 - 6.50229 = -8.16889$$

$$\tilde{y}_2^{CO_2} - 0.0005 = e^{-8.16889}$$
$$\tilde{y}_2^{CO_2} = 0.0005 + e^{-8.16889}$$
$$\tilde{y}_2^{CO_2} = 0.000783$$

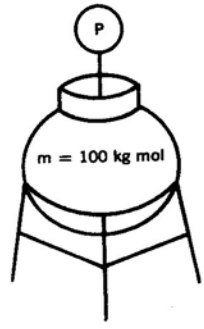
4. **Resultado**

El porcentaje de CO_2 en el cuarto después de 20 minutos es de 0.0783.

Problema 5.18

Si 100 kg mol de etileno se mantienen en un recipiente de 30 m^3, ¿cuál será la máxima temperatura a la que se podrá mantener si se fija una válvula de alivio a 50.9 atm?

1. Traducción



$P_{max} = 50.9$ atm
$t = ?$
$V = 30\ m^3$

2. Planteamiento

2.1 Discusión

En este caso se desconoce el valor de Tr. Como la carta del factor de compresibilidad ha sido graficada contra Tr y Pr, el valor de Tr debe evaluarse por tanteos.

2.2 Valor de Z

$$Z = \frac{p\,V}{\tilde{m}\,RT} = \frac{P\,V}{\tilde{m}\,R}\left(\frac{1}{T}\right)$$

$$Z = \frac{p\,V}{R\,\tilde{m}\,Tc}\left(\frac{1}{Tr}\right)$$

3. Cálculos

3.1 Valor de Z

$$\frac{P\,V}{R\,\tilde{m}\,Tc} = \frac{50.9\ (30)}{(0.082)\ (100)\ (282.7)} = 0.6587$$

$$Pr = \frac{50.9}{50.9} = 1 \qquad Z = 0.6587\ \left(\frac{1}{Tr}\right)$$

Tr (supuesta)	Z (calculada)	Pr (Apéndice V)
1.0	$Z = 0.6587$	0.75
1.2	$Z = 0.05489$	2.0
1.05	$Z = 0.627$	0.95
1.1	$Z = 0.5988$	1.2
1.075	$Z = 0.6127$	1.1
1.06	$Z = 0.6214$	1

$Tr = T/T_c$ $\quad T = 1.06\ (282.7) = 299.66\ °K$
$T = 26.6\ °C$

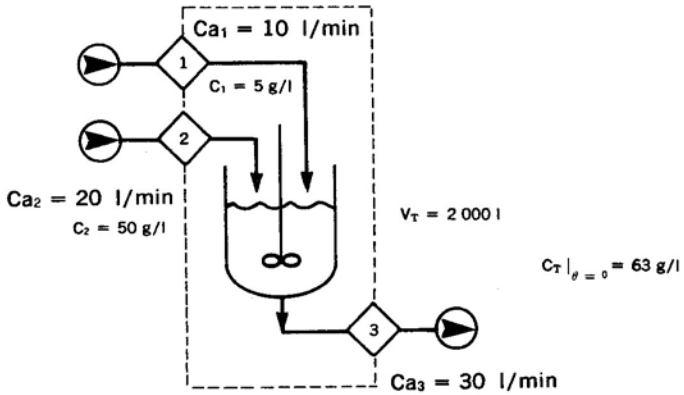
4. Resultado

El valor máximo de temperatura no debe exceder de 26 °C.

Problema 5.19

En un tanque se tiene una solución de 2 000 l de agua salina con una concentración de 63 g/l; a este tanque entra una corriente de 10 l/min con 5 g/l de sal y otra de 20 l/min con una concentración de 50 g/l. Por abajo del tanque se extraen 30 l/min. ¿Cuál será la concentración del tanque a los 60 minutos? Si el tiempo de operación tiende a infinito, ¿cuál será la concentración final del tanque?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Si suponemos densidad constante, la masa total en el tanque no cambia. Sólo cambiará la cantidad de sal y de agua en el tanque.

2.2 Balance

$$\left\{\begin{matrix}\text{rapidez de entrada}\\ \text{de la sal}\end{matrix}\right\} - \left\{\begin{matrix}\text{rapidez de salida de}\\ \text{la sal}\end{matrix}\right\} = \left\{\begin{matrix}\text{rapidez de dis-}\\ \text{minución de la}\\ \text{sal}\end{matrix}\right\}$$

Considerando la densidad como una constante

$$\{Ca_1 c_1^{sal} + Ca_2 c_2^{sal}\} - \{Ca_3 c_3^{sal}\} = v_T d\ c_3^{sal}/d\ \theta$$

3. Cálculos

3.1 Balance

$$\{10\ (5) + 20\ (50)\} - 30\ c_3^{sal} = 2\,000\ d\ c_3^{sal}/d\ \theta$$

$$1\,050 - 30\ c_3^{sal} = 2\,000\ d\ c_3^{sal}/d\ \theta$$

$$d\ c_3^{sal}/d\ \theta + 0.015\ c_3^{sal} = 0.525$$

Resolviendo la ecuación anterior,

$$c_3^{sal} = 35 + ke^{-0.015\theta}$$

3.2 Obtención del valor de la constante

$$\text{Si } \theta = 0 \qquad c_3^{sal} = 63$$

$$63 = 35 + k \qquad k = 28$$

$$c_3^{sal} = 35 + 28\ e^{-0.015\theta}$$

3.3 Concentración si $\theta = 60$ min

$$c_3^{sal} = 35 + 28\, e^{-0.015\,(60)}$$

$$c_3^{sal} = 43.38 \text{ g/l}$$

3.4 Concentración si $\theta = \infty$

$$c_3^{sal} = 35 + 28\, e^{-0.015\infty} = 35 \text{ g/l}$$

4. **Resultados**

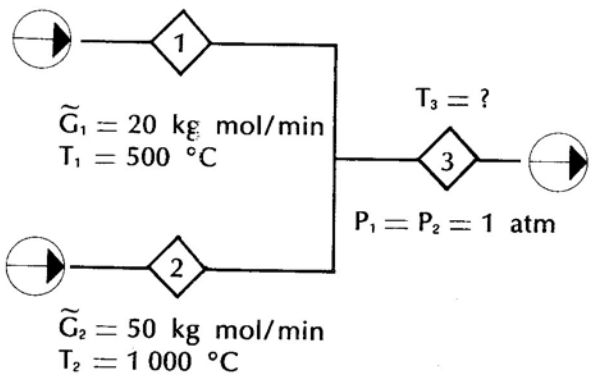
La concentración de la sal después de 1 hora será de 43.38 g/l.

La concentración final si $\theta = \infty$ será de 35 g/l.

Problema 5.20

Se desean mezclar 20 kg mol/min de aire a 500 °C y 1 atm con 50 kg mol/min de aire a 1 000 °C. ¿Cuál será la temperatura final de la mezcla?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Balance de materia

$$\tilde{G}_1 + \tilde{G}_2 = \tilde{G}_3$$

2.2 Balance de energía

$$\tilde{G}_1\ \tilde{H}_1 + \tilde{G}_2\ \tilde{H}_2 = \tilde{G}_3\ \tilde{H}_3$$

$$\tilde{H} = \tilde{C}pm\ \Delta T$$

3. Cálculos

3.1 Balance de materia

$$20 + 50 = 70 = \tilde{G}_3$$

3.2 Balance de energía

Del apéndice $\tilde{C}pm$ a 500 °C = 7.25 kcal/kg mol °C

$\tilde{C}pm$ a 1 000 °C = 7.6 kcal/kg mol °C

$$20\ (7.25)\ (500-0) + 50\ (7.6)\ (1\,000-0) = 70\ \tilde{H}_3$$

$$\tilde{H}_3 = 6\,464.28\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg mol}}$$

3.3 Temperatura

$6\,464.28 = \tilde{C}pm\ (T_3 - 0)$. Esto se debe resolver por tanteos

1a. Suposición $T_3 = 750$ °C $\therefore$ $\tilde{C}pm$ del apéndice $= 7.4$

$6\,464.28 = 7.4\ (T_3)$ $\therefore$ $T_3 = 873$ °C;

2a. Suposición $T_3 = 873$ °C $\therefore$ $\tilde{C}p$ del apéndice $= 7.5$

$\therefore$ $6\,464.28 = 7.5\ (T_3)$ $\therefore$ $T_3 = 862$ °C

4. **Resultado**

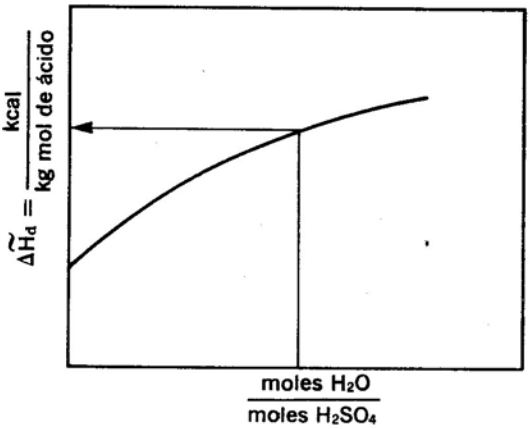
La temperatura final es de alrededor de 862 °C.

Problema 5.21

Obtenga el calor de disolución del H_2SO_4 en agua cuando se mezclan 5 moles de agua por una de ácido.

1. Planteamiento

1.1 De la gráfica



$$\Delta\tilde{H}_d = -13\,500 \text{ kcal/kg mol de } H_2SO_4$$

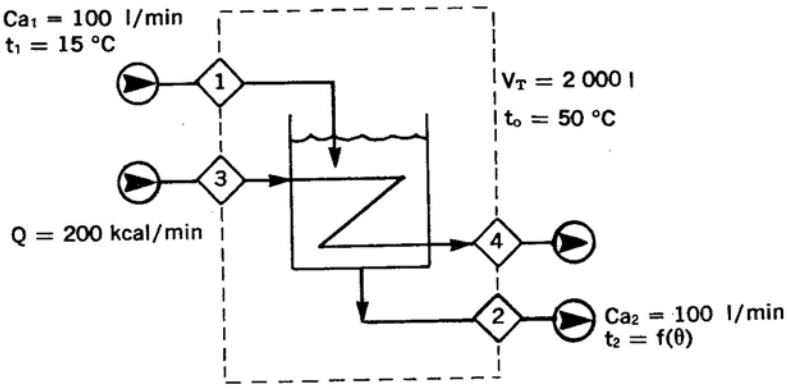
2. **Resultado**

Se desprenden 13 500 kcal/kg mol de H_2SO_4

Problema 5.22

A un tanque de aceite con 2 000 l de capacidad se le agrega aceite a razón de 100 l/min y se le quita aceite al mismo ritmo. La temperatura inicial del aceite en el tanque es de 50 °C. El aceite entrante al tanque está a 15 °C. Si un calentador adiciona 200 kcal/min, calcule cuál será la temperatura en el tanque a los cinco minutos. El Cp del aceite es constante e igual a 0.62 kcal/kg °C y su densidad puede considerarse constante e igual a 800 kg/m³.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Balance de masa y energía

$$\{\text{Masa inicial}\} + \{\text{Acumulación}\} = \{\text{Masa final}\}$$

$$\left\{\begin{matrix}\text{Salida de ener-}\\ \text{gía con la ma-}\\ \text{sa}\end{matrix}\right\} - \left\{\begin{matrix}\text{Entrada de}\\ \text{energía con la}\\ \text{masa}\end{matrix}\right\} + \left\{\text{Acumulación}\right\} = \left\{\begin{matrix}\text{Energía transferi-}\\ \text{da sin la masa}\end{matrix}\right\}$$

$$\text{Acumulación de masa} = 0$$

$$\therefore \quad L_1 = L_2 \qquad d\rho V/d\theta = 0$$

Balance de energía

$$L_2 (H_2) - L_1 H_1 + \rho V d H/d\theta = Q$$

$$L_1 (H_1 - H_2) + Q = \rho V d H/d\theta$$

$$L_1 [Cp_1 T_1 - Cp_2 T_2] + Q = \rho V d Cp T/d\theta$$

$$L Cp_1 (T_1 - T_2) + Q = \rho V Cp d T/d\theta$$

3. Cálculos

3.1 Masa del tanque y masa entrante

$$V\rho = 2 \text{ m}^3 (800 \text{ kg/m}^3) = 1\,600 \text{ kg}$$

$$L_1 = 0.1 \text{ m}^3/\text{min} (800 \text{ kg/m}^3) = 80 \text{ kg/min}$$

3.2 Balance de energía

$$80\,(0.62)\,[15 - T] + 200 = 1\,600\,(0.62)\,d\,T/d\,\theta$$

$$744 - 49.6\,T + 200 = 992\,d\,T/d\,\theta$$

$$19.03 - T = 20\,d\,T/d\,\theta$$

$$20 \int_{50}^{T} d\,T/(19.03 - T) = \int_{0}^{5} d\,\theta$$

$$-20 \ln \frac{19.03 - T}{19.03 - 50} = 5$$

$$T = 43.14\ ^\circ C$$

4. **Resultado**

La temperatura al cabo de cinco minutos será de 43.14 °C.

Problema 5.23

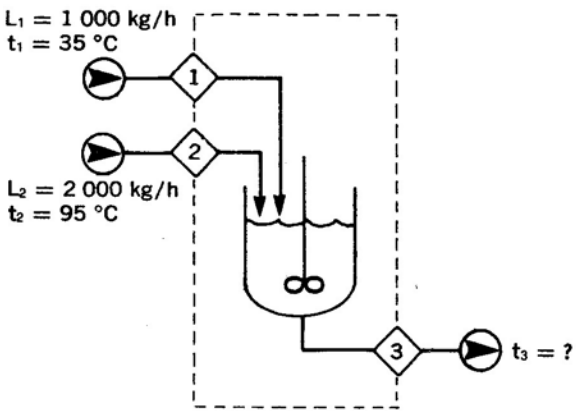
1 000 kg/h de benceno líquido a 35 °C se mezclan con 2 000 kg/h de heptano líquido a 95 °C.

¿Cuál es la temperatura final de la mezcla?

Datos

$$\tilde{C}p_B = 14.95 + 0.0558\,T \qquad \tilde{C}p_H = 29.9 + 0.081\,T \text{ cal/g mol } ^\circ K$$

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Consideraremos que no hay calor de disolución y que el calor ganado por una sustancia es el calor perdido por la otra.

2.2 Balance de energía

$$L_3 [z_3\, g/gc + u_3^2/2\, gc + H_3] - L_1 [z_1\, g/gc + u_1^2/2\, gc + H_1] - L_2$$

$$[z_2\, g/gc + u_2^2/2\, gc + H_2] + (d/d\,\theta)\,(U)\,\rho\, V = Q - \tau - \Sigma F$$

Despreciando las energías cinéticas, potenciales y de fricción y como tampoco hay trabajo, calor ni acumulación

$$\tilde{L}_3 \tilde{H}_3 - \tilde{L}_1 \tilde{H}_1 - \tilde{L}_2 \tilde{H}_2 = 0$$

$$\tilde{L}_2 \tilde{H}_2 + \tilde{L}_1 \tilde{H}_1 = \tilde{L}_3 \tilde{H}_3$$

$$\tilde{H} = \int_{To}^{T} Cp\, d\,T$$

3. Cálculos

3.1 Entalpías

$$\tilde{H}_1 = \int_{T=273}^{273+35} (14.95 + 0.0558\,T)\, d\,T = 14.95\,(308 - 273) + 0.0558/2\,(308^2 - 273^2) = 1\,090.6 \text{ cal/g mol}$$

$$\tilde{H}_2 = \int_{T=273}^{368} (29.9 + 0.081\,T)\, d\,T = 29.9\,(368 - 273) + 0.081/2\,(368^2 - 273^2) = 5\,306.7 \text{ cal/g mol}$$

3.2 Balance de masa

$$L_1 + L_2 = L_3 = 1\,000 + 2\,000 = 3\,000 \text{ kg/h}$$

$$1\,000/78 + 2\,000/100 = 33.22 \text{ kg mol/h}$$

3.3 Capacidad calorífica de la mezcla

$$\tilde{C}p = 14.95\,(12.82/33.22) + 0.0558\,T\,(12.82/33.22) + 29.9\,(20.4/33.22) + 0.081\,T\,(20.4/33.22)$$

$$\tilde{C}p_{\text{mezcla}} = 24.13 + 0.0712\,T$$

3.4 Balance de energía

$$20.00\,(5\,306.7) + 12.82\,(1\,090.6) = 33.22 \int_{273}^{T} (24.13 + 0.0712\,T)\, d\,T$$

$$108\,256.68 + 13\,981.4 = 33.22\,[24.13\,(T - 273) + (0.0712/2)\,(T^2 - 273^2)]$$

$$T = 352\ ^\circ K = 79\ ^\circ C$$

4. **Resultado**

La temperatura final de la mezcla es de 79 °C.

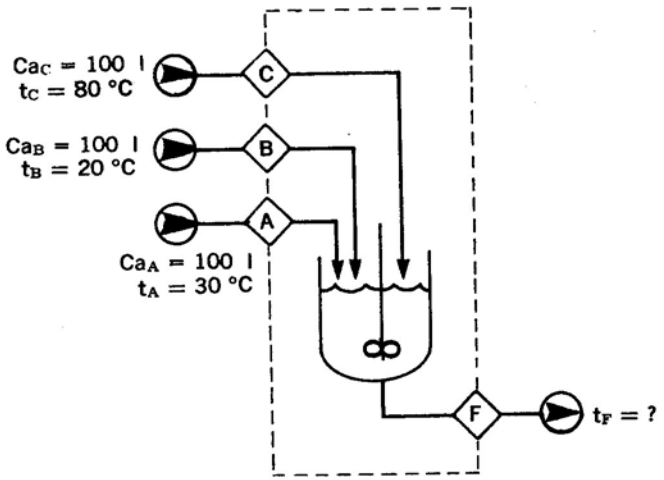
Problema 5.24

Si A es etanol, B dietilenglicol y C agua, obtenga la temperatura final de la mezcla cuando se introducen 100 l de cada sustancia a un tanque y se mezclan.

Datos:

Sustancia	Temperatura °C	Cp cal/g °C	densidad g/cm³
A	30	0.52	0.74
B	20	0.55	1.13
C	80	1.0	1.0

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Balance de masa

$$m = \rho V \qquad m_F = m_A + m_B + m_C$$

2.2 Balance de energía

$$m_A H_A + m_B H_B + m_C H_C = m_F H_F$$

Si tomamos los Cp como constantes

$$m_A Cp_A (t_A - t_O) + m_B Cp_B (t_B - t_O) + m_C Cp_C (t_C - t_O) = m_F Cp_F (t_F - t_O)$$

$$Cp_F = x_A Cp_A + x_B Cp_B + x_C Cp_C$$

3. Cálculos

3.1 Balance de masa

$$m_A = 100 \text{ l } (0.74 \text{ kg/l}) = 74 \text{ kg}$$

$$m_B = 100 \text{ l } (1.13 \text{ kg/l}) = 113 \text{ kg}$$

$$m_C = 100 \text{ l } (1 \text{ kg/l}) = 100 \text{ kg}$$

$$m_F = 74 + 113 + 100 = 287 \text{ kg}$$

3.2 Capacidad calorífica de la mezcla final

$$Cp_F = 0.52\ (74/287) + 0.55\ (113/287) + 1\ (100/287) = 0.6989 \text{ cal/g °C}$$

3.3 Balance de energía

$$74\ (0.52)\ (30 - 0) + 113\ (0.55)\ (20 - 0) + 100\ (1)\ (80 - 0) =$$

$$= 287\ (0.6989)\ (T_F - 0)$$

$$T_F = 51.83 \text{ °C}$$

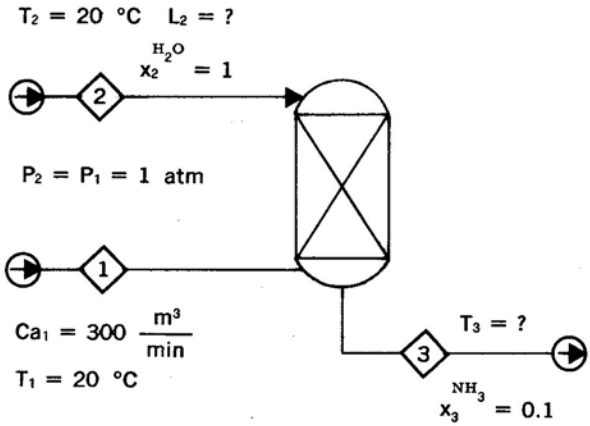
4. **Resultado**

La temperatura final es de 51.83 °C.

Problema 5.25

En una torre de absorción se introducen 300 m³/min de NH_3, los que se disuelven en agua para formar una disolución amoniacal con 10% en peso de amoniaco. Si tanto el agua como el amoniaco entran a la torre a 20 °C y 1 atm. ¿Cuál será la temperatura de salida de la disolución?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Balances de masa

Para gases ideales

$$Ca_1 P = \tilde{G}_1 RT$$

$$G_1 + L_2 = L_3 \text{ Balance total}$$

$$G_1 y_3^{NH_3} = L_3 x_3^{NH_3} \text{ Balance parcial}$$

2.2 Balance de energía

$$L_2 H_2 + G_1 H_1 = L_3 H_3$$

3. Cálculos

3.1 Balances de materia

$$300 \text{ m}^3/\text{min } (1 \text{ atm}) = \tilde{G}_1 \left(0.082 \frac{\text{m}^3 \text{ atm}}{\text{kg mol °K}}\right) (293 \text{ °K})$$

$$\tilde{G}_1 = 12.486 \text{ kg mol/min}$$

$$G_1 = 12.486 \text{ (17 kg/kg mol } NH_3) = 212.27 \text{ kg/min}$$

$$212.27 + L_2 = L_3 \text{ Balance total (I)}$$

$$212.27\ (1) = L_3\ (0.1)\ \text{Balance parcial (II)}$$

$$\therefore\quad L_3 = 2\,122.7\ \text{kg/min}$$

$$L_2 = 1\,910.43\ \text{kg/min}$$

3.2 Balance de energía

$$\text{Entalpía del agua } H_2 = Cp\ \Delta T = 1\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg °C}}\ (20 - 0)$$

$$H_2 = 20\ \text{kcal/kg}$$

Entalpía del amoniaco gaseoso

$$H_1 = Cpm\ \Delta T$$

$$\text{Del apéndice a } 20\ °C\ \tilde{Cpm} = 9\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg mol °C}}\quad \therefore\quad Cpm = 0.53\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg °C}}$$

$$H_1 = 0.53\ (20 - 0) = 10.58\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$212.27\ (10.58) + 1\,910.43\ (20) = 2\,122.7\ (H_3)$$

$$H_3 = 19.057\ \text{kcal/kg}$$

3.3 Temperatura T_3

$$H_3 = Cp_{\text{disolución}}\ (T_3 - 0) - \Delta H_{\text{disol}}\ x^{NH_3}$$

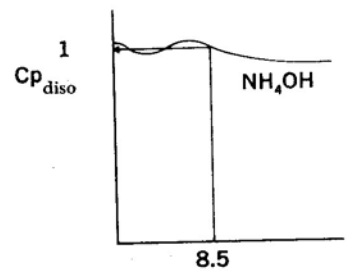
Tomando como base 100 kg de la disolución 3

10 kg de $NH_3 = 0.5\,882$ kg mol de NH_3

90 kg de $H_2O = 5$ kg mol de H_2O

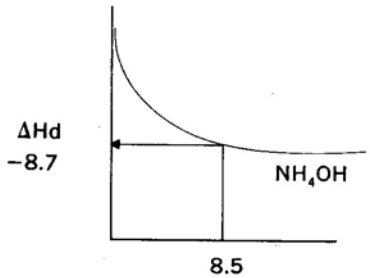
$\therefore\quad 5/0.5\,882 = 8.5$ kg mol de H_2O/kg mol de NH_3

Del apéndice XII:



$$Cp_{\text{disolución}} = 1\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg de disol °C}}$$

Del apéndice XXI:



$$\Delta Hd = -8.7 \frac{\text{kcal}}{\text{g mol } NH_3}$$

$$19.057 = \frac{1 \text{ cal } (T_3 - 0)}{\text{kg de disolución °C}} - 8.7 \frac{\text{kcal}}{\text{g mol } NH_3} \times$$

$$\times \frac{1\,000 \text{ g mol } NH_3}{\text{kg mol } NH_3} \times \frac{1 \text{ kg mol}}{17 \text{ kg } NH_3} \times \frac{0.1 \text{ kg } NH_3}{\text{kg de disol.}}$$

$$T_3 = 70.23 \text{ °C}$$

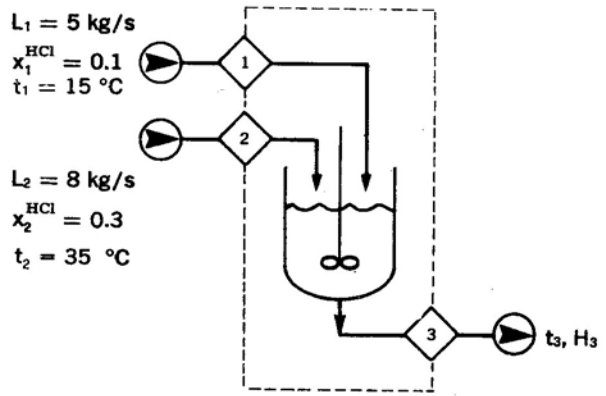
4. **Resultado**

La temperatura de la disolución saliente es de 70.23 °C.

Problema 5.26

Calcule la temperatura final de la mezcla y la entalpía de la misma, cuando se mezclan 5 kg/s de HCl al 10 por 100 y 15 °C con 8 kg/s de HCl al 30 por 100 y 35 °C.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Para resolver este problema podemos utilizar el diagrama de entalpía-concentración del HCl y agua. (Apéndice XXIV).

2.2 Balance de masa

$$L_1 + L_2 = L_3$$

$$L_1 x_1^{HCl} + L_2 x_2^{HCl} = L_3 x_3^{HCl}$$

2.3 Balances de energía

$$L_1H_1 + L_2H_2 = L_3H_3$$

3. Cálculos

3.1 Balances de masa

$$5 + 8 = L_3 = 13 \text{ kg/s}$$

$$5\ (0.1) + 8\ (0.3) = 13\ x_3^{HCl}$$

$$x_3^{HCl} = 0.22 \text{ kg de HCl/kg total}$$

3.2 Balance de entalpía

Utilizando el diagrama de entalpía-concentración, localizamos el punto 1 y el punto 2.

Punto 1

$$x_1^{HCl} = 0.1 \qquad t_1 = 15\ ^\circ\text{C}$$

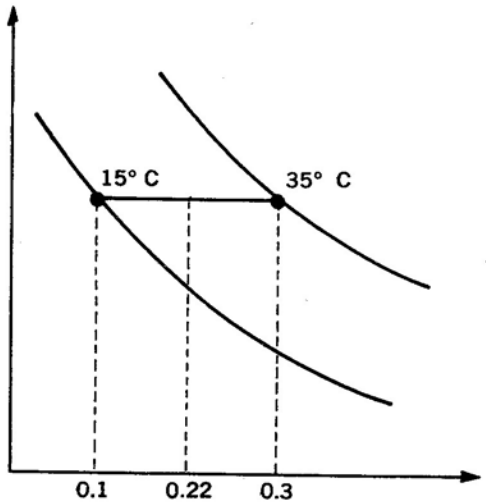
$$H_1 = -65 \text{ BTU/lb} = -36 \text{ kcal/kg}$$

Punto 2

$$x_2^{HCl} = 0.3 \qquad t_2 = 35\ ^\circ\text{C}$$

$$H_2 = -180 \text{ BTU/lb} = -100 \text{ kcal/kg}$$

Uniendo el punto 1 con el 2 en el diagrama y localizando la concentración $x = 0.22$, encontraremos la entalpía y la temperatura de la mezcla.



De la gráfica

$$13\ H_3 = 8\ (-100) + 5\ (-36)$$

$$H_3 = -75\ \text{kcal/kg}$$

4. **Resultados**

La temperatura final es de 27 °C.

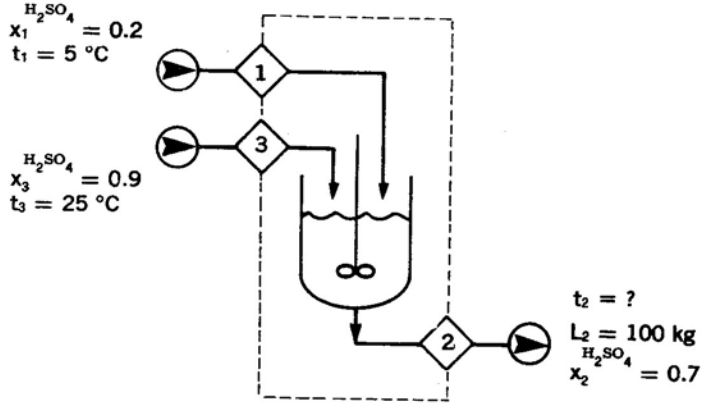
La entalpía final es de −75 kcal/kg.

Problema 5.27

Para formar un ácido de 70 por 100 de H_2SO_4 se parte de un ácido de 20 por 100 en peso que está a 5 °C y de otro ácido al 90 por 100 y 25 °C. ¿Qué cantidades de cada ácido se deberán usar para formar 100 kg del ácido al 70 por 100 y a qué temperatura se encontrará el producto?

Si la operación se hubiera efectuado a 25 °C (isotérmicamente), ¿cuánto calor se debería haber eliminado?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Balance de masa

$$L_1 + L_3 = L_2$$

$$L_1 x_1^{H_2SO_4} + L_3 x_3^{H_2SO_4} = L_2 x_2^{H_2SO_4}$$

2.2 Balance de energía

Usando el diagrama de entalpía-concentración, se fijan los puntos 1 y 3 uniéndolos con una línea recta y allí se obtendrá, a la concentración de 70 por 100, la temperatura. Para obtener el calor desprendido a T constante se irá a concentración constante del punto de mezcla, hasta la temperatura inicial.

2.3 Balance de energía, proceso isotérmico

$$Q = L\,(H_2 - H_2')$$

Uniendo el punto de 2 de mezcla con el punto 2' a 25 °C se obtendrán las entalpías.

3. Cálculos

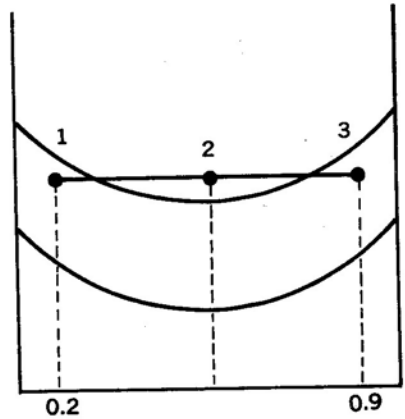
3.1 Balance de masa

$$L_1 + L_3 = 100 \qquad L_1\,(0.2) + L_3\,(0.9) = 100\,(0.7)$$

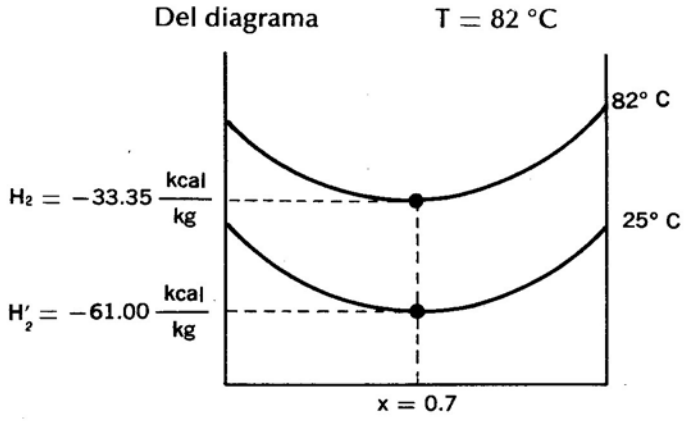
$$L_1 = 28.58 \text{ kg} \qquad L_3 = 71.42 \text{ kg}$$

3.2 Temperatura final en el proceso adiabático (Apéndice XXV):

Del diagrama $T = 82$ °C



3.3 Balance en proceso isotérmico



$$\Delta H = -61 - (-33.35) = -27.65 \text{ kcal/kg}$$

$$Q = -27.75\ (100) = -2\,775 \text{ kcal}$$

4. Resultados

Se deberán agregar 28.58 kg del ácido al 20 por 100 y 71.42 kg del ácido al 90 por 100.

En proceso isotérmico se deberán quitar 2 765 kcal.

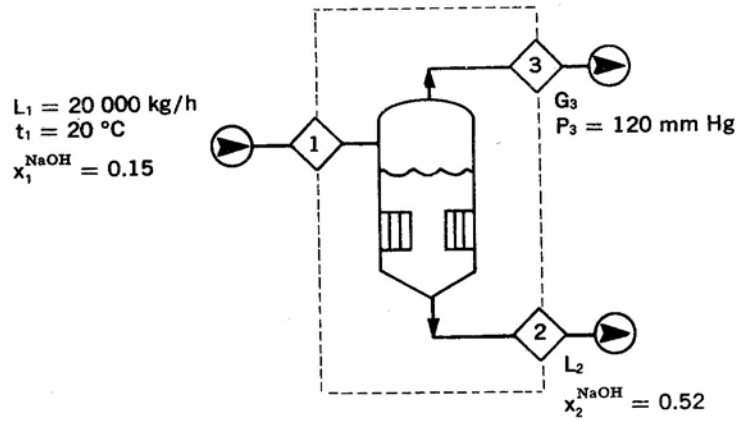
Problema 5.28

Un evaporador concentra 20 000 kg/h de una disolución al 15 por 100 de NaOH hasta que tenga 52 por 100 de sólidos. La presión manométrica del vapor usado es de 20 lb/ n^2.

La presión absoluta en el espacio de vaporización es de 120 mm de Hg. La temperatura de alimentación es de 20 °C.

Calcule la cantidad de vapor consumido.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Balance de masa

$$L_1 = G_3 + L_2$$

$$L_1 x_1^{NaOH} = L_2 x_2^{NaOH}$$

2.2 Balance de energía

$$G_4 (H_4 - H_5) = G_3 H_3 + L_2 H_2 - L_1 H_1$$

3. Cálculos

3.1 Balance de masa

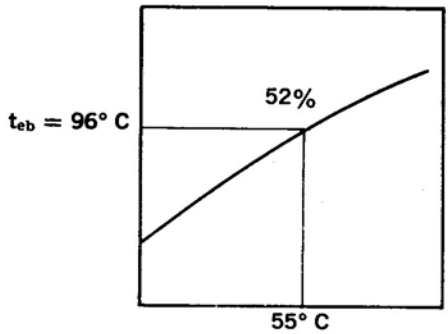
$$20\,000 = L_2 + G_3$$

$$20\,000\,(0.15) = L_2\,(0.52) \quad \therefore \quad L_2 = 5\,769 \text{ kg/h} \quad , \quad G_3 = 14\,231 \text{ kg/h}$$

3.2 Temperatura de ebullición de la solución de sosa cáustica al 52 por 100

Temperatura de ebullición del agua a 120 mm Hg = 55 °C.

Temperatura de ebullición de la disolución de sosa cáustica (usando el diagrama de Dühring (Apéndice XXX):



3.3 Entalpías de la sosa cáustica (del diagrama de entalpía-concentración) (Apéndice XXVI):

$$H_{1\ 15\%}^{20\ °C} = 16.6 \text{ kcal/kg} \qquad H_{2\ 52\%}^{96\ °C} = 127.66 \text{ kcal/kg}$$

3.4 Entalpías de la disolución (de tablas de vapor) (Apéndice XVIII):

$$H_{3\ 96\ °C}^{120\ mm\ Hg} = 636 \text{ kcal/kg} \quad \text{(vapor sobrecalentado)}$$

3.5 Entalpías del vapor de calentamiento (de tablas de vapor) (Apéndice XVII):

$$H_4 = 648 \text{ kcal/kg} \qquad H_5 = 126 \text{ kcal/kg}$$

3.6 Balance de energía

$$G_4 (648 - 126) = 14\,231\ (636) + 5\,769\ (127.66) - 20\,000\ (16.6)$$

$$G_4 = 18\,113 \text{ kg/h}$$

4. Resultado

Se requerirán 18 113 kg/h de vapor a 20 psig (libras por pulgada cuadrada manométricas).

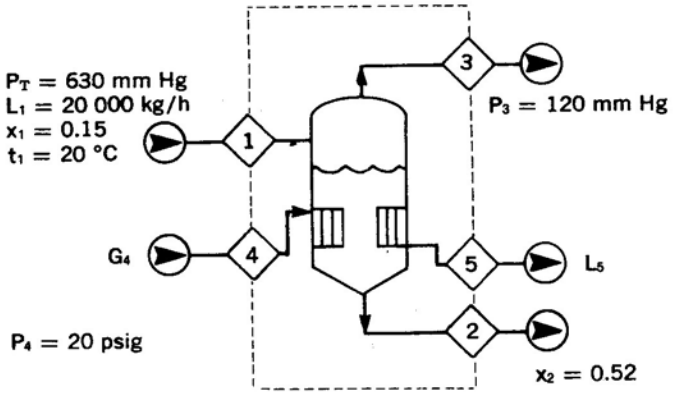
Problema 5.29

Un evaporador concentra 20 000 kg/h de una disolución de caña de azúcar con 15 por 100 de sólidos. La disolución de caña de azúcar se concentra hasta que tenga 52 por 100 de sólidos. La presión manométrica del vapor de calentamiento es de 20 psig. La presión absoluta en el espacio de vaporización es de 120 mm de Hg. La temperatura de alimentación es de 20 °C. La presión barométrica es de 630 mm de Hg.

Calcule la cantidad de vapor consumido para lograr esa evaporación.

$$\text{Cp disolución} = 1 \text{ kcal/kg °C}$$

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

La disolución de azúcar puede tomarse como ideal, el calor de disolución es despreciable y el aumento en el punto de ebullición también.

2.2 Balance de materia

$$L_1 = G_3 + L_2 \qquad G_4 = L_5$$

$$L_1 x_1^{\text{azúcar}} = L_2 x_2^{\text{azúcar}}$$

2.3 Balance de energía

$$G_4 (H_4 - H_5) = G_3 H_3 + L_2 H_2 - L_1 H_1$$

$$H_3 = Cp_3 (t_3 - t_0) + \lambda t_3 \quad ; \quad H_1 = Cp_1 (t_1 - t_0)$$

$$H_2 = Cp_2 (t_2 - t_0), \text{ pero } t_3 = t_2 \text{ y } Cp_3 = Cp_2$$

Si hacemos t_0 (temperatura base para computar las entalpías) igual a

$$t_2 = t_3 = t_e \qquad H_2 = 0; \qquad H_3 = \lambda t_3; \qquad H_1 = Cp_1 (t_1 - t_3)$$

$$\therefore \quad G_4 (H_4 - H_5) = G_3 \lambda_{t_3} - L_1 Cp_1 (t_1 - t_3)$$

3. Cálculos

3.1 Temperatura de ebullición de la disolución. (De tablas de presión de vapor del agua)

$$\text{para } 120 \text{ mm de Hg} \qquad t = 55\ ^\circ\text{C}$$

3.2 Calores latentes y entalpías

$$P_{eb} = \text{P manométrica} + \text{P barométrica} = 20 \text{ psig} + (630/760)\ (14.7) =$$
$$= 32.19 \text{ psia}$$

$(H_4 - H_5)$ de tablas de vapor de saturado a 32.19 psia y 123 °C

$$(H_4 - H_5) = 523 \text{ kcal/kg} \qquad \lambda_{55\ ^\circ C} = 565 \text{ kcal/kg}$$

3.3 Balance de masa

$$20\,000\ (0.15) = L_2\ (0.52)$$

$$L_2 = 5\,769 \text{ kg/h} \qquad G_3 = 14\,231 \text{ kg/h}$$

3.4 Balance de energía

$$G_4\ (523) = 14\,231\ (565) - 20\,000\ (1)\ (20 - 55)$$

$$G_4 = 16\,712 \text{ kg/h}$$

4. **Resultado**

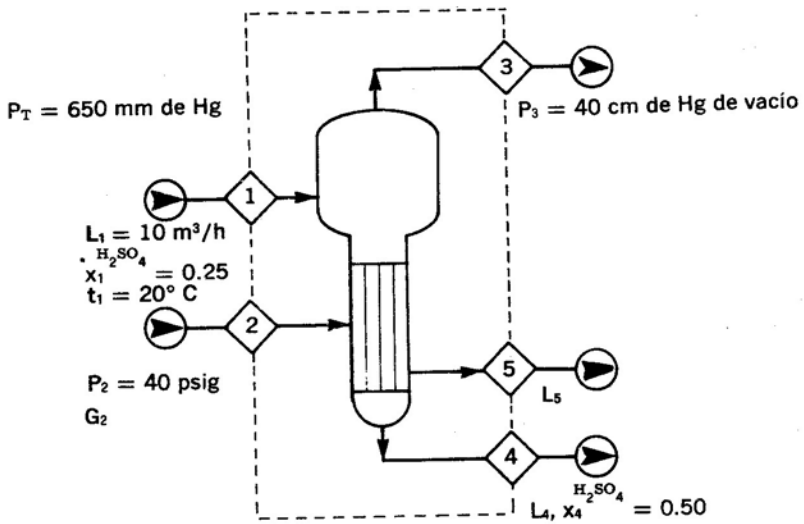
Se requieren 16 712 kg/h de vapor.

Problema 5.30

Se quieren evaporar 10 m³/h de una disolución de ácido sulfúrico al 25 por 100 hasta que alcance el 50 por 100 en peso. La disolución entrante está a 20 °C. Para llevar a cabo la evaporación se usará vapor de 40 psig. En el espacio de vaporización se hará un vacío de 40 cm de Hg cuando la presión atmosférica sea de 650 mm de Hg.

¿Cuánto vapor de calentamiento se deberá usar?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Balance de masa

$$L_1 = G_3 + L_4 \qquad G_2 = L_5 \qquad L_1 x_1^{H_2SO_4} = L_4 x_4^{H_2SO_4}$$

2.2 Balance de energía

$$G_2 (H_2 - H_5) = G_3 H_3 + L_4 H_4 - L_1 H_1$$

3. Cálculos

3.1 Masa entrante

$$\rho_{T = 20\ °C}^{H_2SO_4 \text{ al } 25\%} = 1.1783 \text{ kg/l}$$

$$L_1 = 10 \text{ m}^3\text{/h } (1\,000 \text{ l/m}^3)\ (1.1783 \text{ kg/l}) = 11\,783 \text{ kg/h}$$

3.2 Balance de masa

$$11\,783\ (0.25) = L_4\ (0.5)$$

$$L_4 = 5\,891.5 \text{ kg/h}; \qquad G_3 = 5\,891.5 \text{ kg/h}$$

3.3 Entalpías de las disoluciones de H_2SO_4
De gráficas (Apéndice XXV):

$$H^{20\ °C}_{25\%} = -22.2 \text{ kcal/kg} \qquad H^{50\%}_{96\ °C} = -11 \text{ kcal/kg}$$

3.4 Temperatura de ebullición de la disolución de H_2SO_4 en la cámara de evaporación

$$Pe = 65 - 40 = 25 \text{ cm de Hg}$$

$$T \text{ de ebullición del agua a 25 cm de Hg} = 75\ °C$$

$$T \text{ de ebullición de la disolución de } H_2SO_4 \text{ al 50 por 100} = 96\ °C$$

(De las gráficas de Dühring) (Apéndice XXXI).

3.5 Entalpías del vapor de calentamiento

$$P_{ab} = 40 \text{ psig} + 12.57 = 52.57 \text{ lb/in}^2 \text{ abs} = 3.69 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{De tablas de vapor } T = 140\ °C$$

$H_2 = 652.5$ kcal/kg $\qquad H_5 = 140$ kcal/kg (agua líquida a 140 °C)

3.6 Entalpía de los vapores salientes

Considerando que es vapor de agua a 25 cm de Hg y 96 °C (sobrecalentado), su valor a partir de las tablas de vapor será

$$H = 635 \text{ kcal/kg}$$

3.7 Balance de energía

$$G_2 (652.5 - 140) = 5\,891.5\ (635) + 5\,891.5\ (-11) - 11\,783\ (-22.2)$$

$$G_2 = 7\,683.6 \text{ kg/h}$$

4. Resultado

Se deberán usar 7 683.6 kg/h de vapor saturado a 40 psig.

PROBLEMAS PROPUESTOS

Problema 5.31

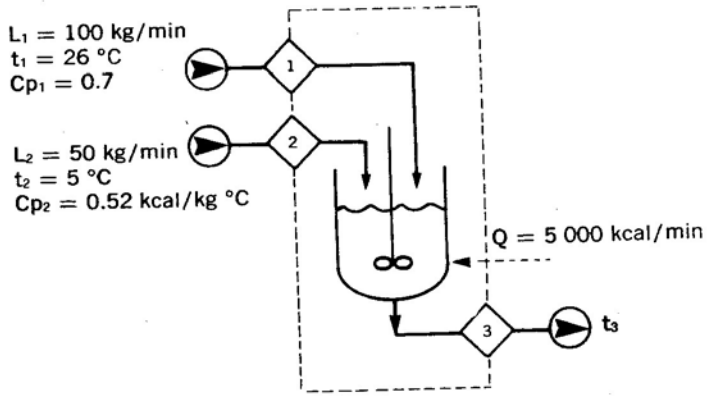
Obtenga la capacidad calorífica de una disolución de azúcar y agua al 10 por 100 en masa y a 20 °C.

Resultado

Con base en las contribuciones de cada sustancia, $Cp = 0.9339$ cal/g °C

Problema 5.32

Dos corrientes de aceite se mezclan y calientan en un proceso continuo. Para las condiciones mostradas en el dibujo, calcule la temperatura final T_3.



Resultado

La temperatura final será de 72.4 °C.

Problema 5.33

Si se agrega 1 kg de $CaCl_2$ a 100 kg de agua a 25 °C que están en un recipiente aislado, ¿qué temperatura alcanzará la mezcla?

Resultado

La temperatura final será de 26.6 °C.

Problema 5.34

Si se agregan 15 kg de HNO_3 al 100 por ciento a 100 kg de agua y toda la operación se lleva a cabo a 25 °C, ¿cuánto calor se desprende de la mezcla? Si el proceso fuera adiabático, ¿cuál sería la temperatura final de la mezcla? Cp $HNO_3 = 0.417$.

Resultados

A 25 °C se desprenden 2 053.5 kcal. Si el proceso es adiabático, la temperatura final será de 49.79 °C.

Problema 5.35

Calcule la temperatura final cuando se mezclan 10 kg de HCl al 10 por 100 y a 20 °C con 10 kg de HCl al 20 por 100 y a 50 °C.

Resultado

La temperatura final de la disolución es de 37.7 °C.

Problema 5.36

Se van a producir 500 kg/h de ácido sulfúrico al 70 por 100 y 38 °C diluyendo ácido de 80 por 100 en peso a 93 °C, con agua a 0 °C. ¿Cuánto calor se deberá eliminar?

Resultado

Se deberán eliminar 17 762 kcal/h.

Problema 5.37

Una disolución de un coloide orgánico en agua se va a concentrar de 10 a 50 por 100 de sólidos en un evaporador. El vapor utilizado para el calentamiento tiene una presión manométrica de 1.05 kg/cm^2. En el espacio de vaporización se mantiene una presión absoluta de 10 cm de Hg. La alimentación será de 25 000 kg/h. La disolución tiene una elevación del punto de ebullición y un calor de disolución despreciable. Calcule el consumo de vapor si la temperatura de la alimentación es de 20 °C. El Cp de la disolución entrante es de 0.9 kcal/kg °C.

Resultado

Se requieren 23 126.6 kg/h de vapor.

Problema 5.38

Un evaporador opera a la presión de 1 atm y se ha diseñado para concentrar 5 000 kg/h de una disolución al 10 por 100 en peso de NaOH, la cual se alimenta a 15 °C para formar una disolución al 40 por 100. Si se usa vapor a 50 psia como medio de calentamiento, el cual únicamente cede calor de condensación, calcular:

a) Los kg/h de vapor de calentamiento.

b) Si la disolución concentrada se utiliza para precalentar la alimentación mediante un cambiador de calor del cual sale a 35 °C, ¿cuál será el calor cedido por dicha disolución concentrada en kcal/h?

c) En las condiciones del inciso **b)**, ¿qué cantidad de vapor de calentamiento en kcal/h se requieren en el evaporador?

Resultados

El vapor necesario sin precalentamiento es 4 872.6 kg/h.

El calor cedido por la disolución concentrada es de 80 625 kcal/h y la nueva temperatura de alimentación es de 43 °C.

El vapor necesario si se usa precalentamiento es de 4 715 kg/h.

Problema 5.39

Un evaporador concentra 10 000 kg/h de una disolución al 10 por 100 de NaOH hasta que ésta alcance el 50 por 100 de sólidos.

La presión manométrica del vapor de calentamiento es de 20 lb/in^2.

La presión absoluta en el espacio de evaporación es de 100 mm de Hg.

La temperatura de alimentación es de 30 °C.

¿Qué cantidad de vapor de agua se requiere?

Resultado

Se requieren 9 647.5 kg/h de vapor.

Problema 5.40

¿Cuántos litros de gasolina de 90% de iso-octano y 10% de n-heptano se deben mezclar con una gasolina de 65% en peso de iso-octano y 35% de n-heptano para producir 20 000 l/h de una gasolina que contenga 80% en peso de iso-octano y 20% de n-heptano? La densidad de las gasolinas es semejante e igual a 53 °API.

Resultado

Se requieren 12 000 l/h de la gasolina de 90% y 8 000 de la gasolina de 65%.

Problema 5.41

La velocidad de paso de los vapores en una columna de destilación es de 5.6 m/s y la masa de los vapores que pasan es de 40 kg/s. ¿Cuál será el diámetro de dicha columna, si la mezcla contiene 40% de benceno y 60% de tolueno en volumen a 70 °C y 580 mm de Hg? (la columna es cilíndrica).

Resultado

El diámetro de la columna será de 2 m.

Problema 5.42

Se requiere reducir la concentración de oxígeno en un reactor por debajo del 1% antes de introducir en él una mezcla explosiva. Para lograr lo anterior se meten a través del reactor 20 l/min de una corriente gaseosa de nitrógeno que contiene 0.15% de oxígeno en volumen. ¿Cuánto tiempo pasará antes de que la concentración del oxígeno contenido en un reactor de 60 l baje a 1% en volumen? El reactor está inicialmente lleno de aire a una temperatura de 20 °C y 1 atm.

Resultado

Se requieren 9 min y 12 s.

Problema 5.43

Se desea extraer el agua de un pozo y llenar un tanque de abastecimiento. Si la bomba A trabaja sola, puede hacer el trabajo en 2 h. Si la bomba B trabaja sola lo hace en 3 h. ¿Cuánto tardarán las 2 bombas trabajando juntas?

Resultado

Trabajando juntas llenarán el tanque en 1 h y 12 min.

Problema 5.44

El costo de bombear agua en una planta es de 250 pesos por día, si se usa tubería de dos pulgadas. El costo de instalar una nueva bomba

y una línea de 2 pulgadas es de 25 000 pesos. Si se usa una tubería de 4 pulgadas, el costo de bombeo será de $ 125.00 diarios y el costo de instalación de la bomba y tubería de $ 50 000.00.

¿Qué sistema recomendaría Ud. basándose en lo que se puede ahorrar durante el primer año? **Nota:** la planta opera 365 días del año.

Resultado

El sistema de cuatro pulgadas es el que produce más ahorro.

Problema 5.45

Si se hacen pasar 600 ft^3/min de aire a través de una torre de absorción de 1.5 m de diámetro. ¿Cuál será la masa velocidad del aire si éste se encuentra a 20 °C y 20 atm? Exprese el resultado en kg/h m^2.

Resultado

La masa velocidad es de 14 121 kg/h m^2.

Problema 5.46

Calcule el volumen que ocuparán 100 kg mol de etileno a 65 °C y 68 atm. ¿Qué error se obtendría si se supone comportamiento ideal?

Resultado

El volumen de etileno es de 28.93 m^3; el error que se obtendría es del 40.85%.

Problema 5.47

Los gases salientes de un quemador dieron el siguiente análisis en fracción masa:

$$CO = 0.15$$
$$CO_2 = 0.30$$
$$N_2 = 0.40$$
$$O_2 = 0.15$$

La mezcla obtenida para el análisis estaba a una temperatura de 90 °C y a 760 mm de presión. Calcule la presión parcial de los gases y su volumen parcial.

Resultados

Presión parcial del $N_2 = 348.53$ mm Hg, volumen parcial 45.86%.

Problema 5.48

Calcule los kilogramos de vapor de agua por kg de aire seco en un aire que resulta de la mezcla de 100 kg/h de aire seco con 0.10 kg de vapor de agua por kg de aire seco y de 50 kg/h de otro aire húmedo que contiene 0.02 kg de H_2O/kg de A.S.

Resultado

La humedad en el aire de la mezcla es de 0.07368 kg de H_2O por cada kg de aire seco.

Problema 5.49

Para fabricar el ácido necesario para la nitración (27% HNO_3, 60% H_2SO_4 y 13% de H_2O) se cuenta con:

a) un ácido sulfúrico de 93% de pureza
b) un ácido nítrico del 90% de pureza
c) un ácido saliente del nitrador con 23% de HNO_3, 57% H_2SO_4 y 20% de H_2O.

Si se quieren producir 1 000 kg/h del ácido concentrado, ¿qué cantidad se deberá usar de cada ácido? Hágalo **a)** gráficamente y **b)** analíticamente.

Resultado

Se requieren 193 kg del ácido de 90% de HNO_3, 417 del de 23% de HNO_3 y 389 del de 93% de H_2SO_4.

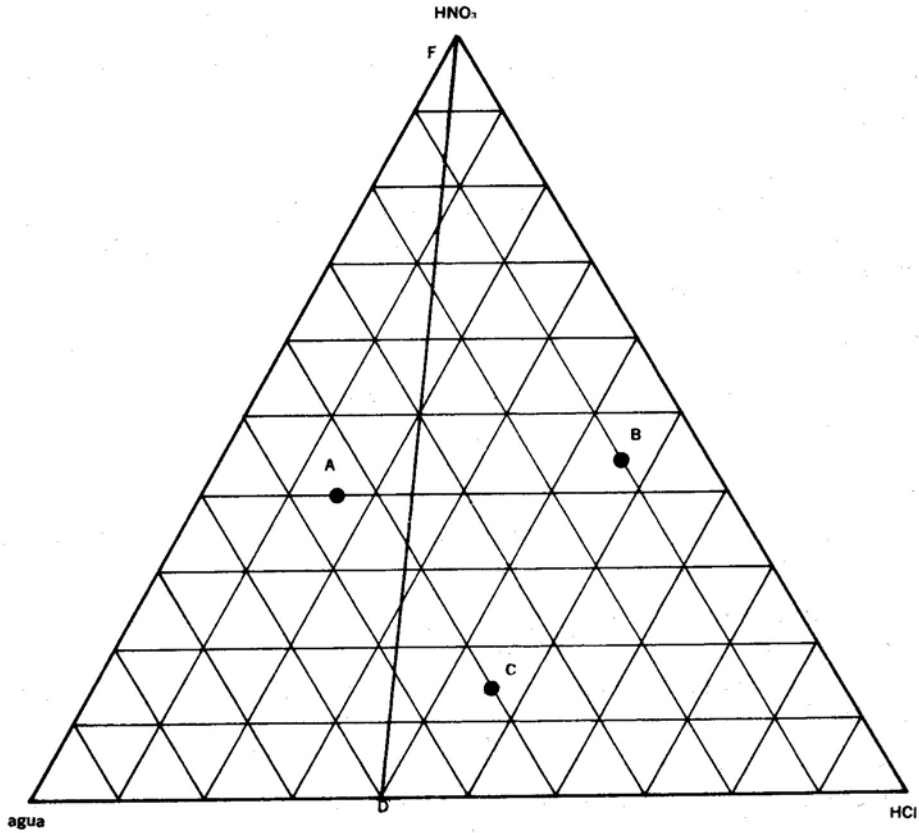
Problema 5.50

En el siguiente diagrama triangular calcule:

a) la composición del punto A
b) la relación de agua a HCl en la línea DF
c) la composición de la mezcla resultante de mezclar 2 partes de la representada en el punto B con 1 parte de la representada en el punto C.

Resultados

La composición del punto A es de 40% de HNO_3, 45% de H_2O y 15% de HCl. La relación de agua a ácido clorhídrico es 1.5. La composición resultante es de 35% de HNO_3, 45% de HCl y 20% de H_2O.



Problema 5.51

Con objeto de satisfacer ciertas especificaciones, un vendedor mezcla una resina seca, cuyo precio es de $ 5.00 kg con resina de 22% de humedad a $ 2.75 kg, de tal forma que la mezcla contenga 16% de agua, ¿a qué precio resultará la mezcla?

Resultado

El precio de la resina es de $ 3.36 kg.

Problema 5.52

¿Cuál es la densidad del aire en la ciudad de México? Dato: la temperatura promedio es de 18 °C y la presión de 586 mm. de Hg.

Resultado

La densidad es de 0.937 kg/m³.

Problema 5.53

Se tiene un gasto de 250 m³/min de nitrógeno a 15 °C y 1 atm. ¿Qué gasto resultará de gas, si se sujetara a la presión de 2 300 psia y se mantuviera la temperatura a 15 °C? Use **a)** la ecuación de los gases ideales; **b)** la ecuación de Van der Waals.

Resultados

Usando gases ideales el gasto es de 1.5978 m³/min. Usando la ecuación de Van der Waals, el gasto es de 2.01 m³/min.

Problema 5.54

Un sistema de refrigeración contiene 6 kg de cloruro de metilo y está provisto de una válvula de seguridad que se levanta a la presión de 10 atm absolutas.

¿A qué temperatura se abrirá la válvula si el sistema tiene una capacidad de 250 litros?

Resultado

La válvula se abrirá a −16.6 °C.

Problema 5.55

Dos tuberías llevan agua a un tanque. Cuando la línea A y B trabajan simultáneamente, el tanque se puede llenar en 2 h y 40 min. Después de que la línea A ha mandado agua durante 3 h, se abrió la línea B y el tanque se llenó en 40 minutos. Si cada línea trabajara sc , ¿en cuánto tiempo se llenaría el tanque?

Resultados

La línea A llenará el tanque en 4 h y la línea B en 8 h.

Problema 5.56

Una mezcla gaseosa tiene la siguiente composición volumétrica:
O_2 5%, N_2 65%, CO_2 20% y H_2O 10%.
Si la mezcla anterior ocupa un volumen de 30 m³ a 50 °C y 750 mm de Hg, determine:

CAPÍTULO 6

BALANCES EN LAS OPERACIONES UNITARIAS DE EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO, LIXIVIACIÓN Y CRISTALIZACIÓN

OBJETIVOS

Al finalizar este capítulo el lector será capaz de: **a)** Utilizar los diagramas de equilibrio de cristalización y resolver problemas de balances de masa. **b)** Resolver problemas de balances de masa relacionados con las operaciones de cristalización. **c)** Utilizar los diagramas de equilibrio de extracción sólido-líquido y líquido-sólido, para resolver problemas de balances de materia. **d)** Resolver problemas de balance de materia relacionados con la extracción líquido-líquido y lixiviación.

EXTRACCION SOLIDO-LIQUIDO

Esta operación 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.

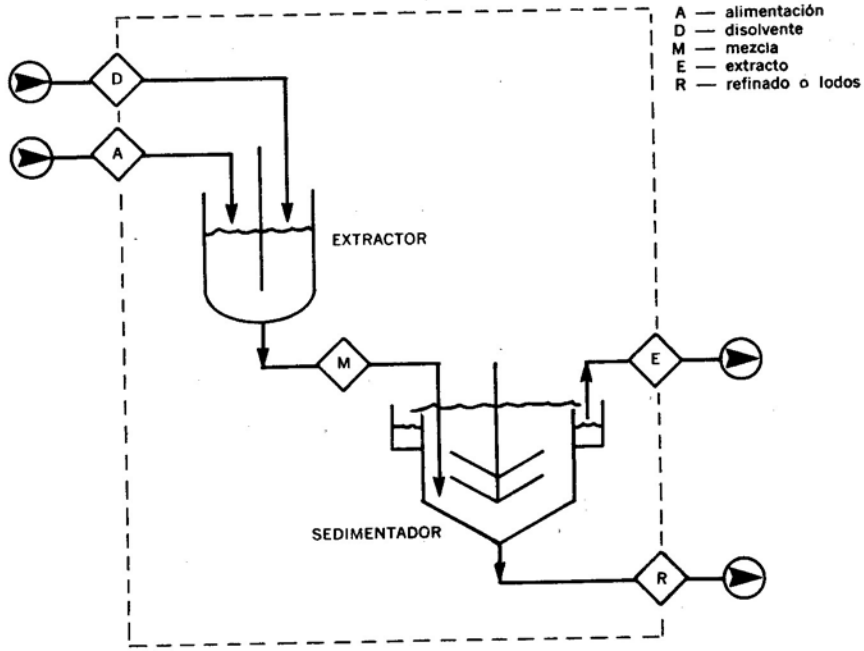
La extracción líquido-líquido se emplea para extraer minerales solubles en la industria minera, también en la industria alimentaria, farmacéutica y en la industria de esencias y perfumes.

La extracción sólido-líquido puede ser una operación a régimen continuo o intermitente, según los volúmenes que se manejen.

EQUIPOS UTILIZADOS

Los equipos utilizados reciben el nombre de extractores, lixiviadores o percoladores.

El equipo más sencillo consistiría en un tanque agitado y luego un sedimentador.



Los equipos a régimen continuo son más complicados; los ejemplos de los más utilizados se pueden ver en libros como: Coulson & Richardson. **Chemical Engineering.** Tomo 2. Pergamon Press, 1968.

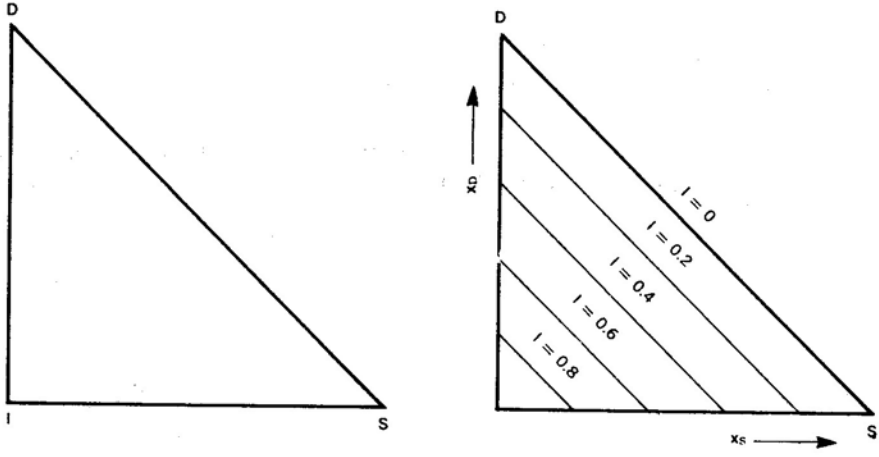
Equilibrio

En el caso general de la extracción sólido-líquido, se agrega disolvente en exceso para evitar que la solución se sature y ya no pueda extraerse más soluto.

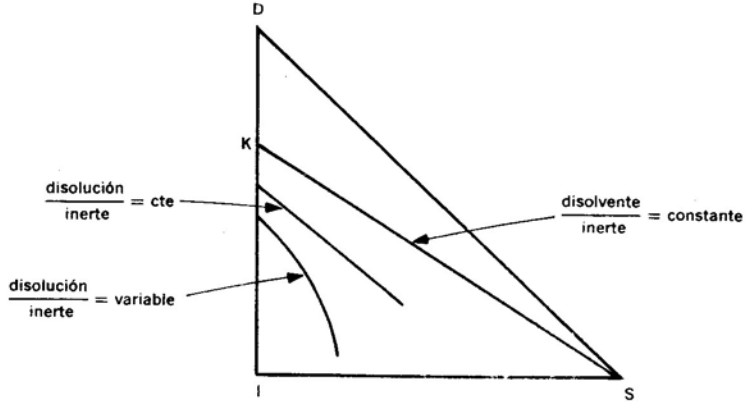
Diagrama triangular

En este diagrama se representa, en el vértice del ángulo recto, el componente inerte I, en el de la derecha el componente a extraer, o soluto S, y en el superior el disolvente D.

Por lo tanto, en el lado IS están localizadas todas las mezclas de soluto e inerte, en el lado ID las mezclas de inerte y disolvente, en la hipotenusa DS estarán localizadas las mezclas de soluto y disolvente. Los puntos interiores del triángulo representan mezclas ternarias.



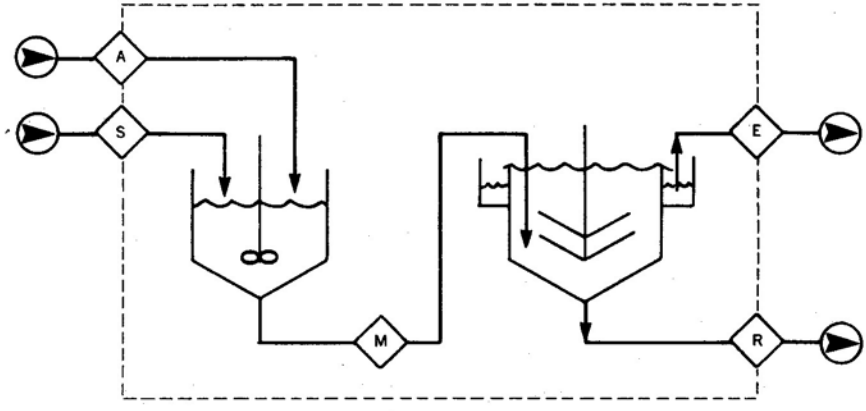
Si se supone que la solución retenida por unidad de soluto inerte permanece constante, el lugar geométrico de las mezclas de soluto inerte y solución es una recta paralela al lado de soluto disolvente. Si lo que permanece constante es el lugar geométrico de las mezclas sólido inerte, el disolvente vendrá dado por la recta SK. En muchos otros casos esta relación varía y tiene que obtenerse experimentalmente.



Las rectas que representan la cantidad de solución retenida por los sólidos inertes nos darán las composiciones de la corriente inferior o lodos. La hipotenusa DS nos dará las composiciones de la corriente superior.

BALANCES DE MATERIA

Si tenemos un extractor de una sola etapa que consiste en: **a)** un mezclador en donde se pone en contacto el sólido con el solvente, y por medio de un aparato se agitan para lograr un buen contacto, **b)** un asentador, que es un aparato diseñado para facilitar la separación de las dos fases,



A — sólidos
S — solvente
M — mezcla
E — extracto
R — refinado o lodos

Balance total de materia

$$S_A + L_S = M_M = L_E + M_R$$

En donde:

S_A = corriente entrante de sólido kg/h

L_D = corriente entrante de disolvente kg/h

M_M = corriente de mezcla kg/h

L_E = corriente de extracto kg/h

M_R = corriente saliente del refinado (sólido + solución) kg/h

Balance de soluto **a**

$$S_A w_A^a + L_D x_D^a = M_M z_M^a = L_E x_E^a + M_R z_R^a$$

En donde:

z_R^a fracción masa del soluto en los lodos

w_A^a = fracción masa del soluto en los sólidos

x_E^a = fracción masa del soluto en la corriente del extracto

De lo anterior se observa que la concentración en la mezcla M será:

$$z_M^a = (S_A w_A^a + L_D x_D^a)/(S_A + L_D)$$

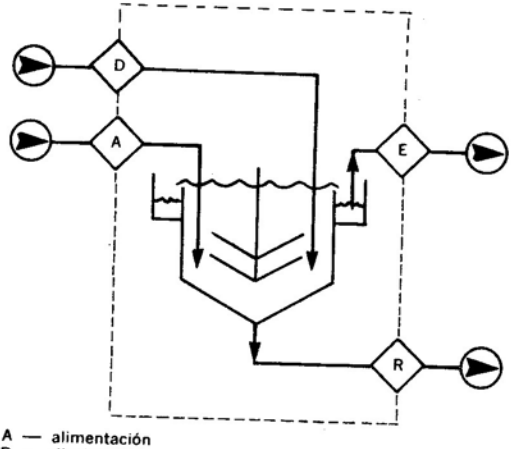
y la cantidad de extracto y refinado obtenido se logrará por medio de un balance alrededor del asentador:

$$M_M = L_E + M_R \qquad M_M z_M^a = L_E x_E^a + M_R z_R^a$$

Para el cálculo de los procesos de extracción se ha de conocer la cantidad de disolución retenida por los sólidos inertes.

Balance usando el diagrama triangular

Los balances en la extracción sólido-líquido se pueden efectuar usando los datos del equilibrio que, como ya dijimos, se expresan por medio del diagrama triangular.



A — alimentación
D — disolvente
E — extracto (disolución)
R — lodos (sólidos + disolución)

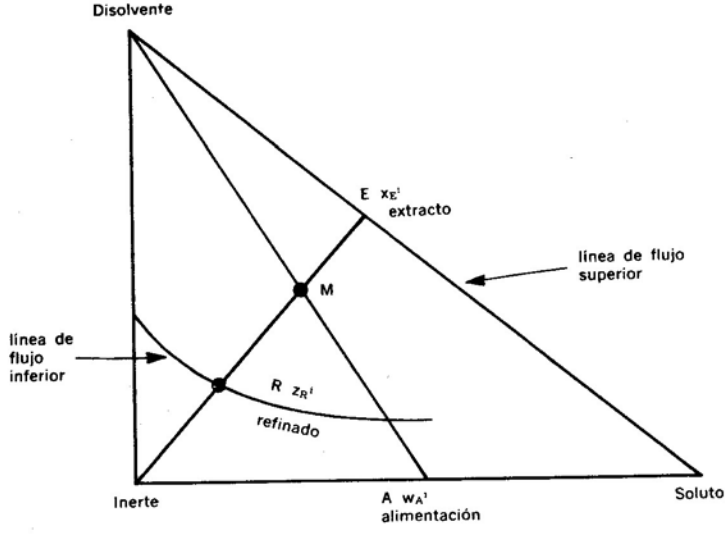
$$S_A + L_D = M_M = L_E + M_R$$

Balance de soluto

$$S_A w_A^i + L_D x_D^i = M_M z_M^i = L_E x_E^i + M_R z_R^i$$

$$z_M^i = (S_A w_A^i + L_D x_D^i)/(S_A + L_D)$$

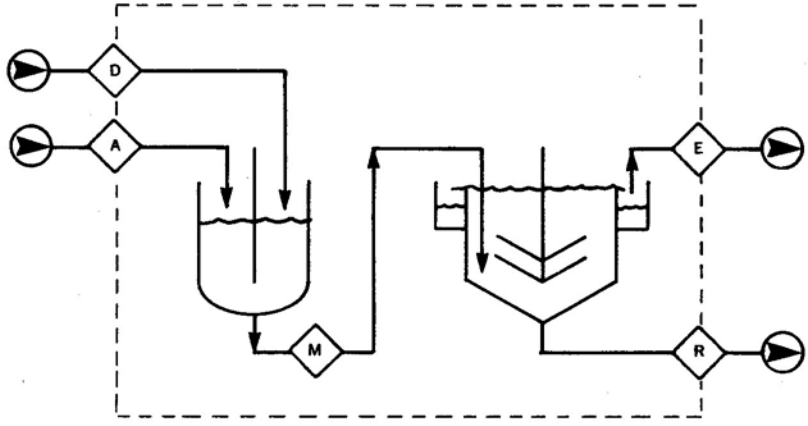
Con esto se conoce el punto de mezcla, el cual debe necesariamente estar sobre la recta que une al punto A de alimentación con el punto D de disolvente empleado en la extracción (regla de la palanca). Una vez conocido el punto z_M^i por medio de la ecuación anterior o por la relación S_A/L_D, se puede obtener la concentración del flujo superior e inferior uniendo M con el vértice de inertes y solución. Cuando esta línea corta el lado de disolvente y soluto, da la concentración del flujo superior, y cuando corta la línea de flujo inferior da la concentración de este flujo.



Balances usando relaciones masa

En los balances de extracción sólido-líquido, es frecuente usar los inertes como sustancia de base para los balances, ya que estos se mantienen constantes.

Es frecuente también el uso de los balances usando relaciones masa con base en la masa de soluto por masa de solución.



Balance total

$$M_A + L_D = M_M = M_R + L_E$$

Balance parcial de soluto en relaciones masa:

$$M_A (1 - z_A^I)\ Z_A^i + L_D (1 - x_D^I)\ X_D^i = M_R (1 - z_R^I)\ Z_R^i + L_E (1 + x_E^I)\ X_E^i$$

Como

$$(1 - x_D^I) = 1 \quad \text{y} \quad (1 - x_E^I) = 1$$

$$M_A (1 - z_A^I)\ Z_A^i + L_D X_D^i = M_R (1 - z_R^I)\ Z_R^i + L_E X_E^i$$

En donde

z_A^I = kg inerte/kg totales en A; Z_A^i = kg de i/kg de solución;

X_E^i = kg de i/kg de solución, x_E^I = kg de inerte/kg totales en E

De esa forma el balance da:

$$\left(\frac{\text{kg totales}}{\text{h}}\right)\left(\frac{\text{kg de solución}}{\text{kg totales}}\right)\left(\frac{\text{kg de i}}{\text{kg de solución}}\right) = \frac{\text{kg de i}}{\text{h}}$$

En la ecuación anterior se debe observar que $X_E^i = Z_R^i$, ya que la solución que rodea a los lodos es la misma que sale por E.

Por lo tanto,

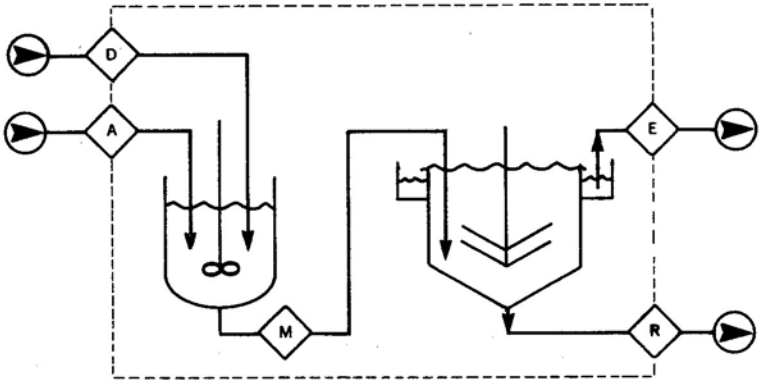
$$M_A (1 - z_A^I)\ Z_A^i + L_D X_D^i = M_R (1 - z_R^I)\ X_E^i + L_E X_E^i$$

Procesos de extracción

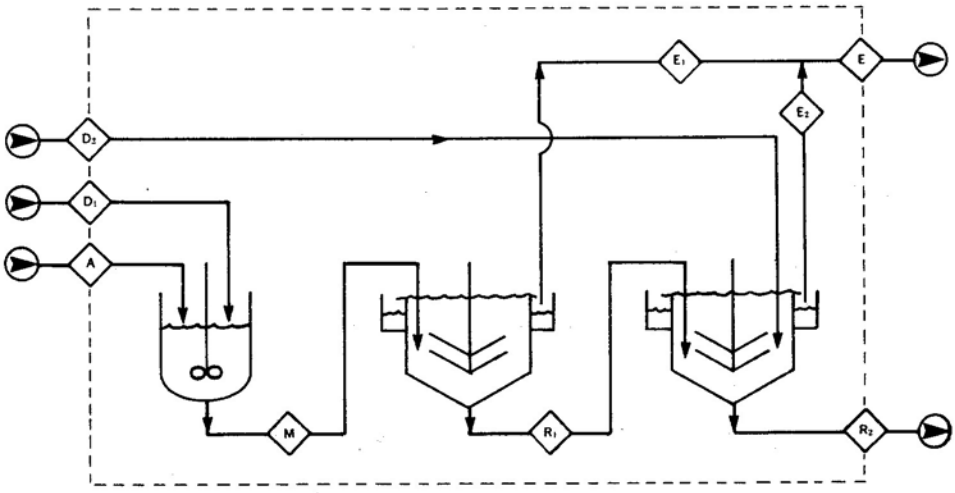
El proceso de extracción sólido-líquido puede llevarse a cabo de las siguientes formas:

Extracción simple

En este proceso la eficiencia de la transferencia de masa depende de las condiciones de equilibrio, del grado de agitación y de la relación de alimentación a solvente.



Contacto múltiple con corriente transversal

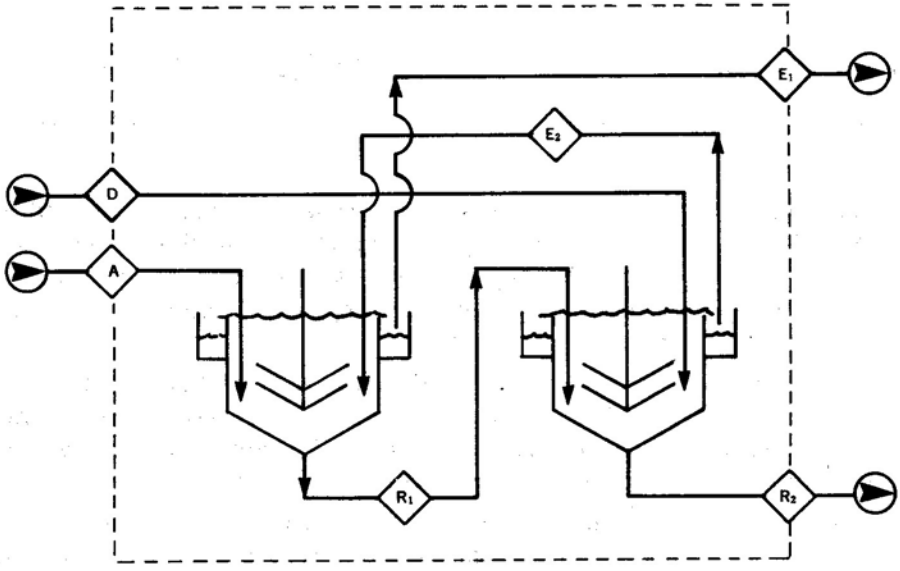


En esta operación el refinado se pone en contacto repetidamente con disolvente nuevo.

Contacto múltiple a contracorriente

Este método usa una serie de etapas en las que el disolvente de extracción y los sólidos que han de extraerse entran por los extremos opuestos en la serie de equipos.

Los extractos y los refinados fluyen en direcciones contrarias. Es un arreglo muy eficiente que consta, por lo general, de 2 a 5 etapas.



EXTRACCION LIQUIDO-LIQUIDO

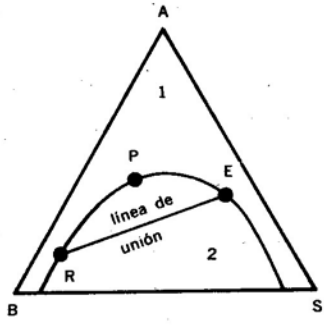
Es una operación unitaria que consiste en poner una mezcla líquida en contacto con un segundo líquido inmiscible, que selectivamente extrae uno o más de los componentes de la mezcla.

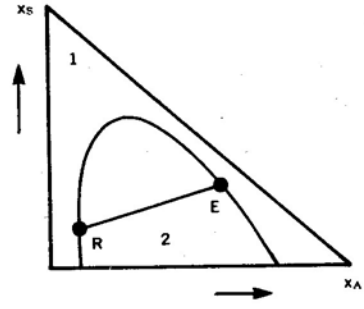
Se emplea en la refinación de aceites lubricantes y de solventes, para la extracción de productos que contienen azufre y en la obtención de ceras parafínicas.

EQUILIBRIO

Para extraer el compuesto deseado D que forma parte de una mezcla líquida homogénea, introducimos otro líquido, que es insoluble, en el que

contiene A, pero que disuelve a A. Después de poner en contacto el disolvente y la mezcla se obtienen dos fases líquidas que reciben los nombres de extracto y refinado. En los casos más generales siempre hay alguna solubilidad entre los solventes. El equilibrio en la extracción líquido-líquido se grafica en un diagrama triangular como el siguiente:

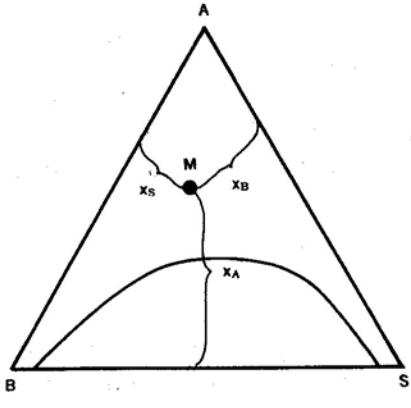


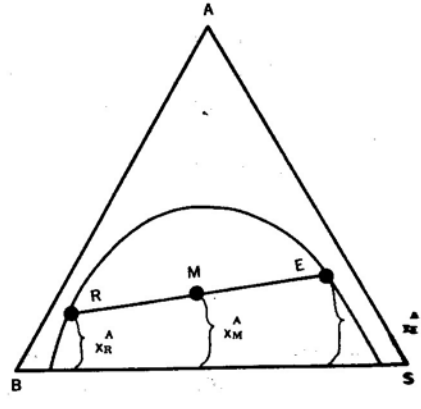


En el diagrama anterior la región 1 caracteriza a mezclas homogéneas de tres líquidos. Cualquier mezcla cuya composición global se encuentre dentro del área 2, o área de inmiscibilidad, se escindirá en dos fases en equilibrio, cuyas composiciones se encuentran sobre la curva binodal, que es la que separa la región 1 de la 2.

La región situada a la derecha del punto crítico o de pliegue da la fase rica en solvente E. A la izquierda queda el refinado. La localización de las líneas de unión, o sea, las que unen la composición del refinado con el extracto y la de la curva binodal se obtienen experimentalmente.

La composición de cualquier punto se obtendrá trazando perpendiculares a los lados y midiendo estas longitudes con respecto a la unitaria que es la altura.



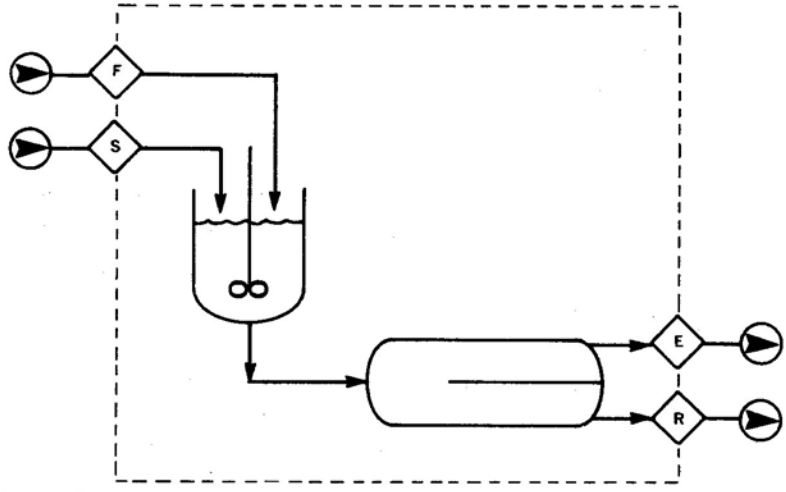


EQUIPOS

Existen dos grandes clases de equipos usados en estas operaciones:

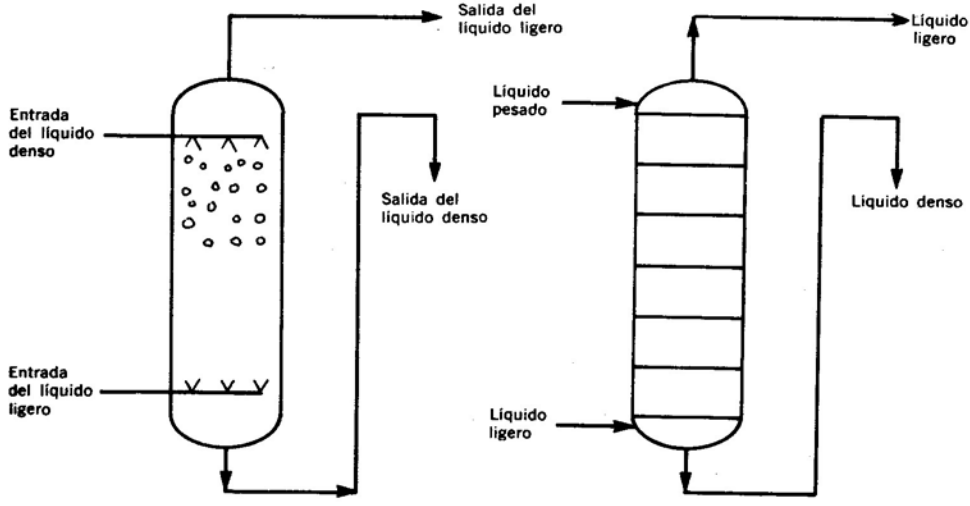
1. Equipo de etapas.

En este tipo los líquidos se mezclan en cada etapa, ocurre la extracción y los líquidos insolubles se separan por diferencia de densidades para volver a entrar a otra etapa. El ejemplo más común de esto es el mezclador sedimentador:



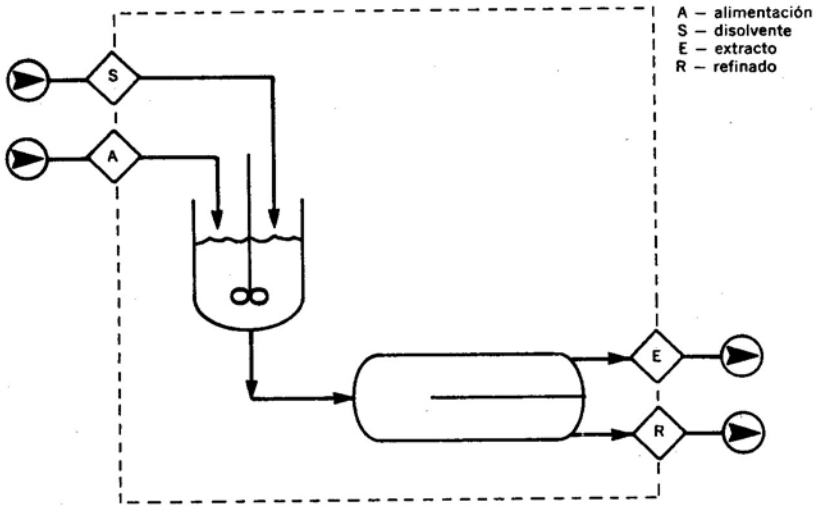
2. Equipos de contacto continuo

En estos equipos los líquidos se meten por partes diferentes y se ponen en contacto durante el tránsito a través del aparato.



BALANCES DE MATERIA

Balances de materia en contacto simple



Un balance total para la operación da

$$L_F + L_S = L_R + L_E = M_M$$

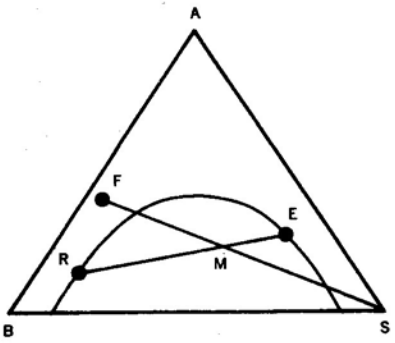
en donde M representa la mezcla total. Esta mezcla, para que ocurra la extracción debe caer en la región de dos fases líquidas.

El balance del compuesto (a) daría.

$$L_F x_F^a + L_S x_S^a = M_M x_M^a$$

$$x_M^a = (L_F x_F^a + L_S x_S^a)/M_M = (L_F x_F^a + L_S x_S^a)/(L_F + L_S)$$

Con lo que se puede determinar el punto M.



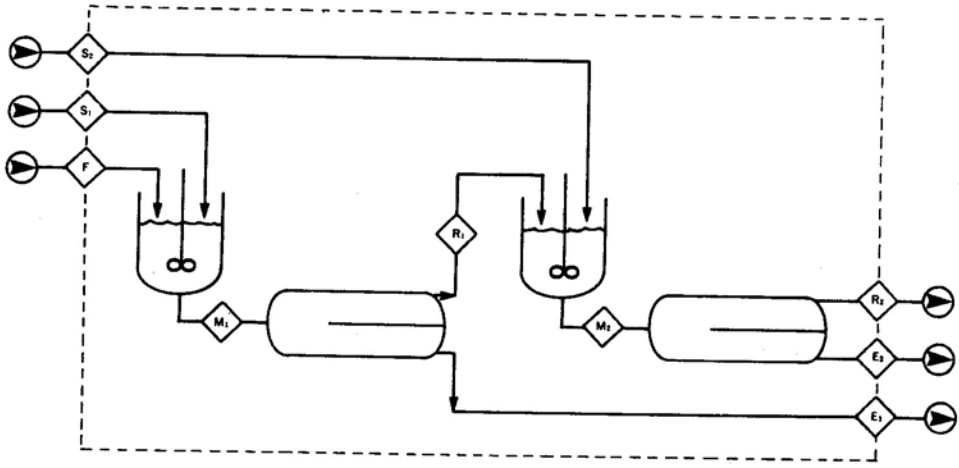
La composición de las corrientes E y R se ha de determinar gráficamente en el diagrama por medio de las líneas de unión. Y sus pesos se pueden calcular por medio de:

$$L_E x_E^a + L_R x_R^a = M_M x_M^a$$

$$L_E = M_M (x_M^a - x_R^a)/(x_E^a - x_R^a)$$

Balance en extracción múltiple con contacto transversal

Este proceso es una extensión del proceso de contacto en una sola etapa. En él el refinado de la primera etapa se vuelve a tratar con disolvente y con ello se reduce progresivamente la concentración del soluto en el refinado. En cada etapa pueden usarse las mismas o diferentes cantidades de disolvente.

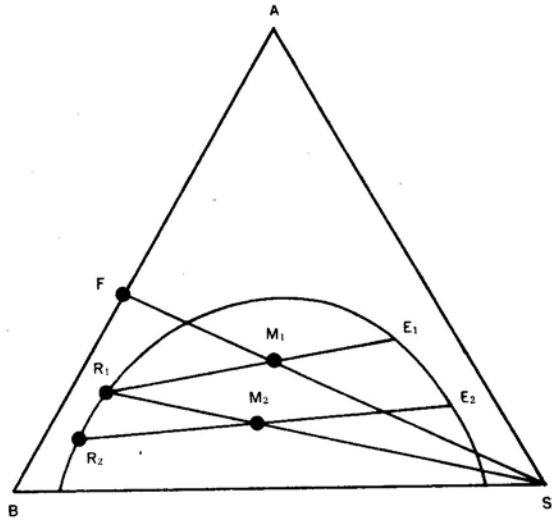


En el primer extractor $L_F + L_{S1} = M_{M1}$. Este punto en el diagrama da el punto de mezcla del primer extractor que está sobre la línea FS1. A partir del punto de mezcla se sigue por la línea de unión para dar la composición del primer extracto y refinado.

Balance en el siguiente extractor:

$$L_{R1} + L_{S2} = M_{M2}$$

Este punto estará sobre la línea que une a S_2 con R_1 y con él se puede obtener la composición del segundo refinado y del extracto:



La recuperación del soluto se obtiene por:

$$L_{E_1} x^a_{E_1} + L_{E_2} x^a_{E_2}$$

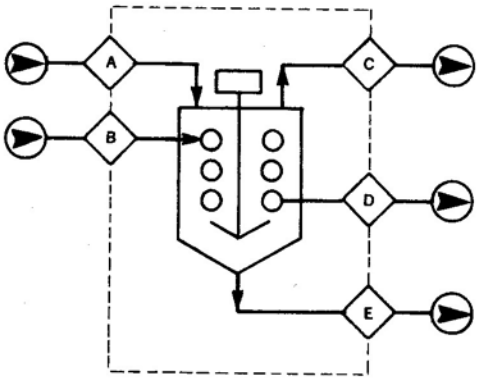
CRISTALIZACION

La cristalización es una operación que consiste en obtener sólidos en forma cristalina a partir de una solución líquida saturada. El amplio uso de los materiales en forma de cristales está basado en el hecho de que un cristal que se ha formado a partir de una solución, es puro en sí mismo, o cual es la base de un método práctico de obtención de sustancias químicas puras, las cuales además se pueden almacenar y empacar de manera satisfactoria.

APARATOS

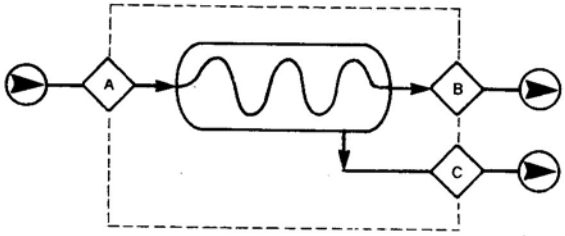
Los aparatos usados en esta operación se llaman cristalizadores. El principal objetivo de un cristalizador es, primero, crear una solución sobresaturada, en vista de que sin sobresaturación no es posible la cristalización, y luego fomentar la creación y el crecimiento de los cristales.

En algunos casos se agregan al cristalizador cristales pequeños de la sustancia que se desea cristalizar; estos cristales sirven como núcleos para comenzar la cristalización.



A — solución
B — refrigerante frío
C — aguas madres
D — refrigerante caliente
E — cristales

TANQUE DE CRISTALIZACION



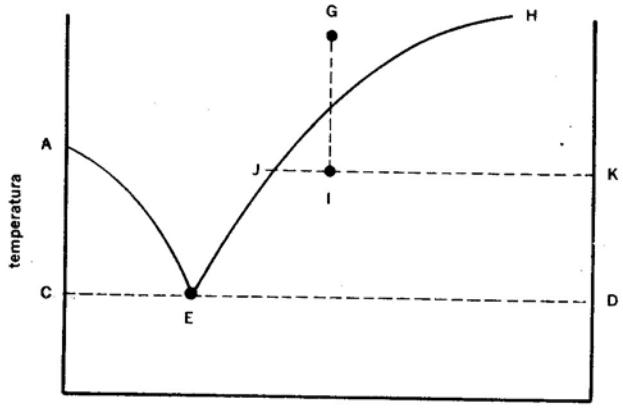
A — solución
B — aguas madres
C — cristales

CRISTALIZADOR DE BANDA

EQUILIBRIO

Las teorías modernas utilizadas para predecir el equilibrio son muy restringidas, por lo que generalmente se deben usar relaciones empíricas y datos experimentales para describir el equilibrio. Los datos de solubilidad se suelen dar para materiales anhidros por cada 100 partes de solvente.

La curva de solubilidad tiene casi siempre la forma siguiente:



concentración del soluto

El área situada por arriba de AEH es de líquido insaturado. El área situada por debajo de esa curva representa una mezcla de solución y sólido o región de sobresaturación.

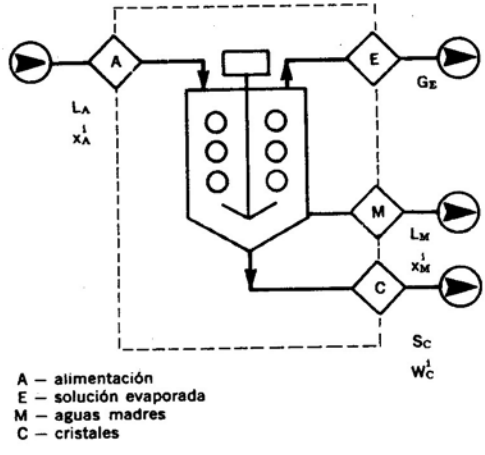
El punto E se llama punto eutéctico; una solución en ese punto solidifica completamente a la temperatura de solidificación más baja del sistema. Una solución de ese punto, si se enfría, dará un sólido mezcla de soluto y solvente.

Abajo de la línea CD se encuentran sólidos. El área AEC da mezclas de solvente sólido y soluto líquido.

Si un líquido en G se enfría, al llegar a la curva de saturación comienza a cristalizarse, y si continúa el enfriamiento hasta I habrá una mezcla de sólidos en equilibrio con la solución de aguas madres representada por J.

BALANCES DE MATERIA

De acuerdo con el siguiente diagrama, el balance quedaría a régimen permanente:



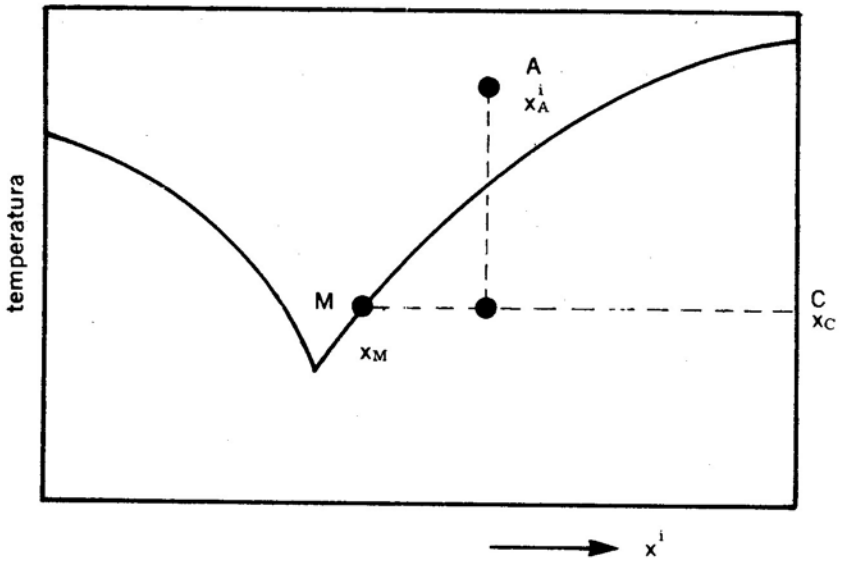
Balance total

$$L_A = G_E + L_M + S_C \quad \left\{\begin{matrix}\text{Rapidez de entrada de}\\ \text{materia al sistema ter-}\\ \text{modinámico.}\end{matrix}\right\} - \left\{\begin{matrix}\text{Rapidez de salida de}\\ \text{materia del sistema}\\ \text{termodinámico.}\end{matrix}\right\} = 0$$

Balance de soluto

$$L_A x_A^{soluto} = L_M x_M^{soluto} + S_C w_C^{soluto}$$

Para obtener las concentraciones x_M^{soluto} y w_C^{soluto} se deberá hacer uso de tablas o de gráficas que representan el equilibrio.



PROBLEMAS RESUELTOS

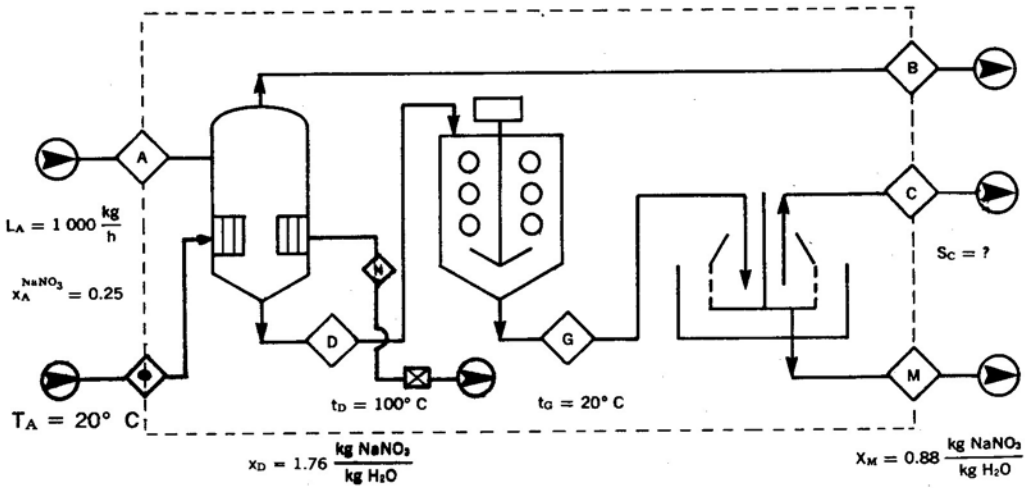
Problema 6.1

Una tonelada métrica por hora de nitrato de sodio al 25% en peso se concentra hasta saturación a 100 °C por evaporación. La solución se enfría entonces hasta 25 °C, con lo cual se precipitan los cristales de $NaNO_3$, los cuales se eliminan posteriormente por centrifugación. La solubilidad del $NaNO_3$ es de 1.76 kg/kg H_2O a 100 °C y de 0.88 kg/kg H_2O a 25 °C.

Calcule el agua evaporada para lograr la saturación a 100 °C y el peso total de los cristales de $NaNO_3$ obtenidos.

Si se emplea vapor saturado a 5 $\vec{kg}/cm^2$ abs. ¿Cuánto vapor de agua se requiere para la evaporación? ¿Cuánto calor de enfriamiento se debe quitar? La temperatura de la alimentación es de 20 °C.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Balance en el evaporador

Balance total

$$L_A = G_B + L_D$$

Balance parcial

$$L_A X_A^{N_aNO_3} = L_D X_D^{N_aNO_3}$$

Balance de vapor

$$G_0 = L_N$$

Balance de energía

$$L_A H_A + G_0 H_0 = G_B H_B + L_D H_D + L_N H_N$$

2.2 Balance en el cristalizador

Balance total

$$L_D = S_c + L_M$$

Balance parcial

$$L_D x_D^{NaNO_3} = Sc\ x_c^{NaNO_3} + L_M x_M^{NaNO_3}$$

Balance de energía

$$L_D H_D = H_G L_G + Q$$

3. Cálculos

3.1 Balances en el evaporador

$$1\,000 = G_B + L_D$$

$$1\,000\,(0.25) = L_D\ \frac{1.76}{1 + 1.76} \qquad \therefore \quad L_D = 392\ \text{kg/h}$$

$$G_B = 1\,000 - 392 = 608\ \text{kg/h de agua evaporada}$$

3.2 Balance de energía en el evaporador

Entalpía del vapor $H_0 = 655.78$ kcal/k
Entalpía del condensado $H_N = 151.94$ kcal/k
Entalpía del vapor $H_B = 638.9$ kcal/k
Entalpía de la alimentación H_A
Tomando 100 kg como base

$$25\ \text{kg}\ NaNO_3 = 0.2923\ \text{kg mol de}\ NaNO_3$$

$$75\ \text{kg}\ H_2O = 4.1666\ \text{kg mol de}\ H_2O$$

$$14.25\ \frac{\text{kg mol de}\ NaNO_3}{\text{kg mol de}\ NaNO_3}$$

De los diagramas

$$\Delta Hd = 4.000\ \text{kcal/g mol}\ NaNO_3$$

$$Cp = 0.85\ \text{kcal/kg}$$

$$\therefore \quad H_A = 0.85\,(20) + \frac{4\ \text{kcal}}{\text{g mol}\ NaNO_3} \times \frac{1\,000\ \text{g mol}}{1\ \text{kg mol}} \times$$

$$\times \frac{1\ \text{kg mol}}{85.5\ \text{kg}\ NaNO_3} \times \frac{0.25\ \text{kg}\ NaNO_3}{\text{kg de solución}}$$

$$H_A = 28.69 \text{ kcal kg}$$

Entalpía del líquido concentrado H_D

Tomando como base 100 kg

$$63.76 \text{ kg } NaNO_3 = 0.745 \text{ kg mol } NaNO_3$$

$$36.24 \text{ kg } H_2O = 2.01 \text{ kg mol } H_2O$$

$$2.697 \frac{\text{kg mol } NaNO_3}{\text{kg mol } H_2O}$$

De los apéndices

$$\Delta Hd = 3.5 \text{ kcal/g mol } NaNO_3$$

$$Cp = 0.8 \text{ kcal/kg}$$

$$H_D = 0.8\,(100) + 3.5 \times \frac{1\,000}{85.5} \times 0.6376 = 106.1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg de solución}}$$

Balance de energía

$$1\,000\,(28.69) + G_0\,(65.78) = 608\,(638.9) + 392\,(106.1) + L_N\,(151.94)$$

$$G_0 = L_N = 795 \text{ kg/h}$$

3.3 Balance en el cristalizador

$$392 = S_c + L_M \text{ Balance total}$$

$$250 = S_c + L_M \left(\frac{0.88}{1 + 0.88}\right) \text{ Balance parcial}$$

$$S_c = 125 \text{ kg/h} \quad \therefore \quad L_M = 267 \text{ kg/h}$$

3.4 Calor quitado en el cristalizador

$$H_D = 106.1 \quad H_G = 0.8\,(20) + 3.5 \times \frac{1\,000}{85.5} \times 0.6376 = 421 \text{ l}$$

$$L_D = L_G = 392$$

$$Q = 392\,(106.1 - 42.1) = 25\,088 \text{ kcal/h}$$

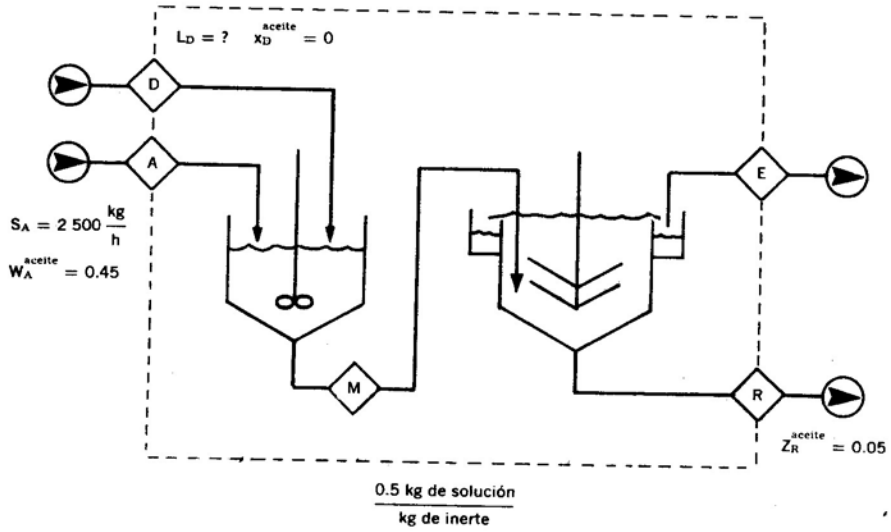
4. Resultados

Se deben evaporar 608 kg de agua y se obtendrán 125 kg/h de cristales de $NaNO_3$. Se requieren 795 kg/h de vapor para el proceso. Se deben retirar 25 088 kcal/h en el cristalizador.

Problema 6.2

En una planta de harina de pescado se tratan 2.5 toneladas métricas por hora con benceno puro para extraer el aceite contenido en el pescado. La harina de pescado contiene 45% de peso de aceite. Experimentalmente se ha obtenido que por cada kilogramo de harina libre de aceite se retiene 0.5 kg de solución. ¿Cuánto benceno se deberá utilizar para que la harina saliente contenga sólo 5% de aceite?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Para resolver este problema se usará el método gráfico utilizando un diagrama triangular. En este caso, la línea correspondiente al flujo inferior será paralela a la hipotenusa:

$$\text{sólido inerte/lodos} = \text{constante}$$

La composición del refinado deberá caer sobre esta línea. Con el punto de alimentación y el disolvente en el diagrama se pueden obtener los demás datos. Para ello únanse A con D y luego R con I prolongándose hasta la línea de flujo superior o extracto.

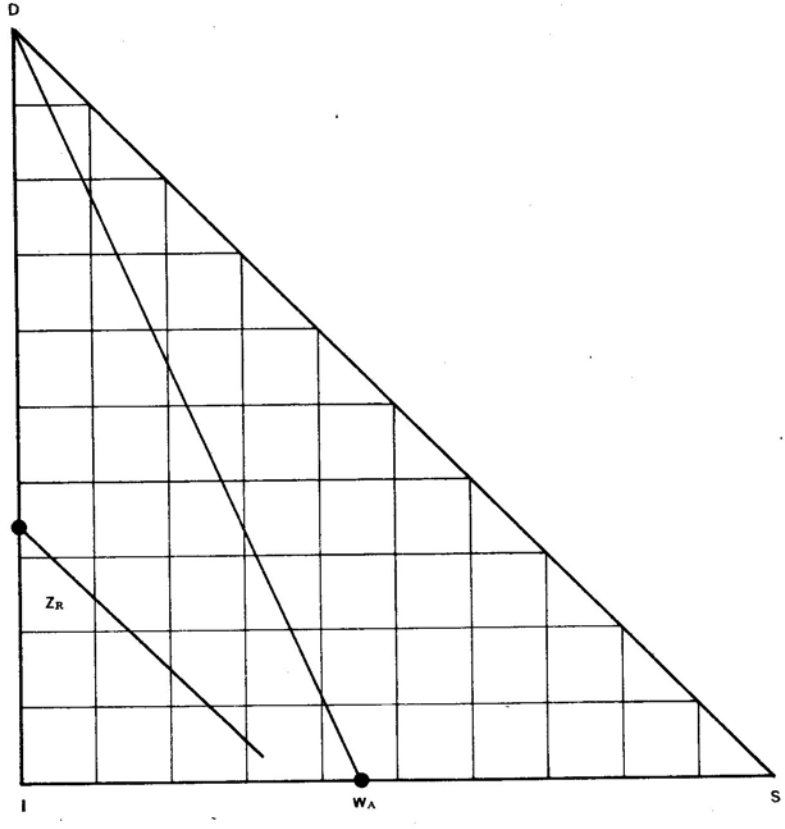
2.2 Balance total

$$S_A + L_S = M_M$$

3. Cálculos

3.1 Construcción del diagrama

$$\text{sólido inerte/lodos} = \frac{1}{1 + 0.5} = 0.66$$



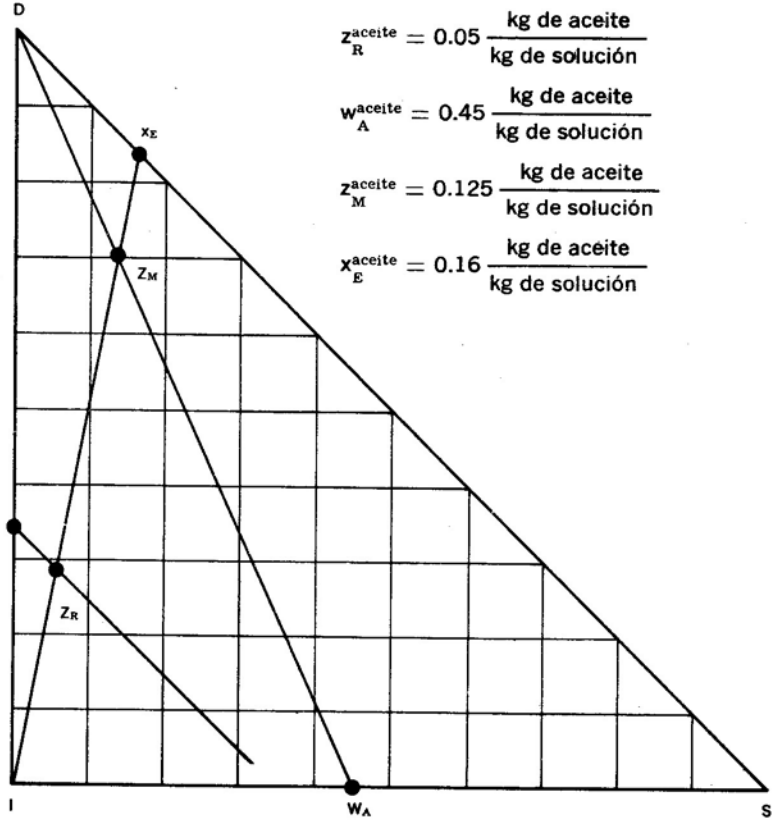
Por lo tanto, la línea de flujo inferior se dibuja paralela a la hipotenusa a partir de $x = 0.66$ de inerte o 0.33 de solvente.

Z_R se coloca sobre esta línea con el punto de aceite $Z_R = 0.05$

3.2 Obtención de los flujos

Para resolver gráficamente este problema se deberá recordar que por el punto de extracto pasa una línea que partiendo de I va hasta la hipotenusa o región del flujo superior. Esta línea, al cortar la línea de mezcla de alimentación con disolvente, dará el punto de mezcla M.

De la gráfica



Por lo tanto

$$2\,500 + L_D = M_M$$

$$2\,500\ (0.45) = M_M\ (0.125)$$

$$\therefore \quad M_M = 9\,000 \qquad L_D = 6\,500\ kg/h$$

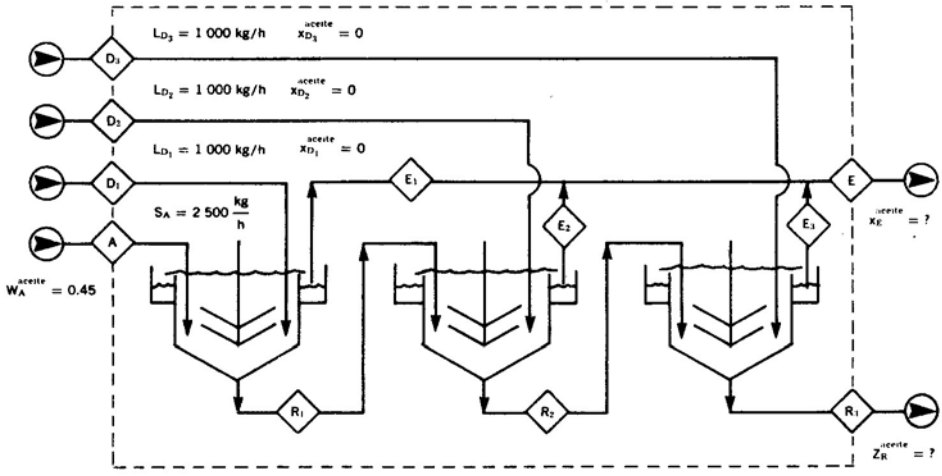
4. Resultado

Se requieren 6 500 kg/h para tratar 2 500 kg/h de aceite de pescado.

Problema 6.3

Si el sistema tratado en el ejemplo anterior se lleva a cabo en tres etapas de corriente directa y si se usan 1 000 kg de benceno en cada etapa, ¿Cuál será la composición del refinado procedente de la última etapa?, ¿Qué porcentaje de aceite se recuperará?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Se usará el método gráfico.

En este caso, la línea correspondiente al flujo inferior es paralela a la hipotenusa.

2.2 Balance

En el primer lixiviador:

$$S_A + L_{D1} = L_{E1} + M_{R1} = M_{M1}$$

$$S_A w_A = M_M z_{M1} \qquad M_M z_{M1} = L_{E1} x_{E1} + M_{R1} z_{R1}$$

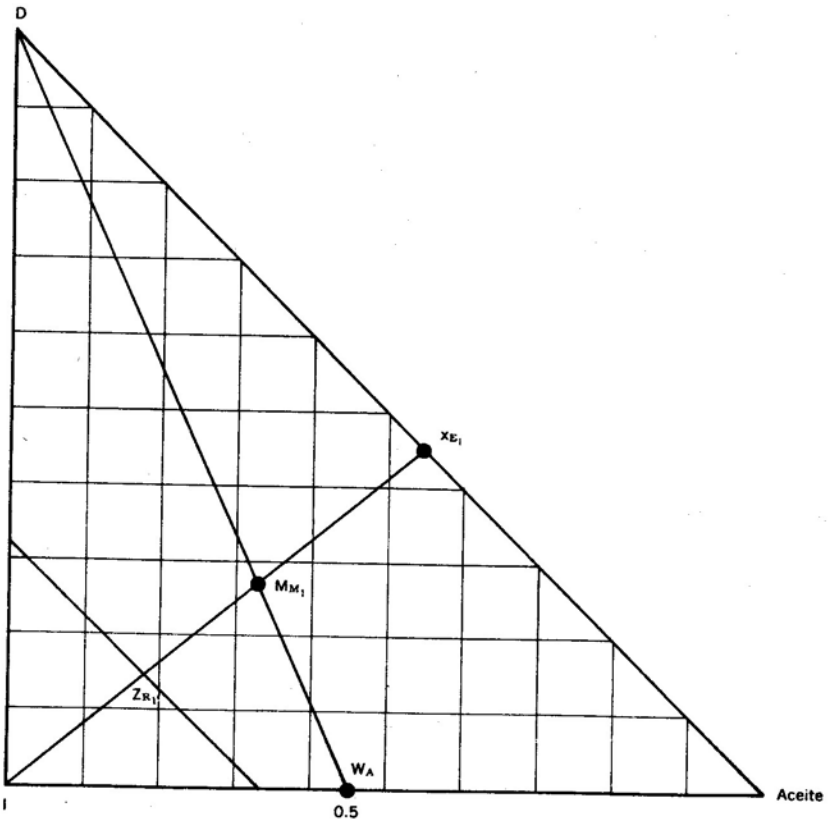
Esto se repite para cada lixiviador.

3. Cálculos

3.1 Diagrama

El diagrama empleado será el del ejemplo anterior.

3.2 Primer lixiviador



El primer lixiviador se trata como el ejemplo anterior.

El punto M_{M_1} está dado por:

$$2\,500 + 1\,000 = 3\,500$$

$$2\,500\,(0.45) = 3\,500\,z_{M_1}$$

$$z_{M_1}^{\text{aceite}} = 0.321$$

De la gráfica

$$Z_{R_1} = 0.185 \qquad X_{E_1} = 0.55$$

$$3\,500\,(0.321) = M_{R_1}\,(0.185) + L_{E_1}\,(0.55)$$

$$3\,500 = M_{R_1} + L_{E_1}$$

$$M_{R_1} = 2\,191.78 \text{ kg/h} \qquad L_{E_1} = 1\,308.2 \text{ kg/h}$$

3.3 Segundo lixiviador

En este lixiviador se trata M_{R1} con L_{D2}

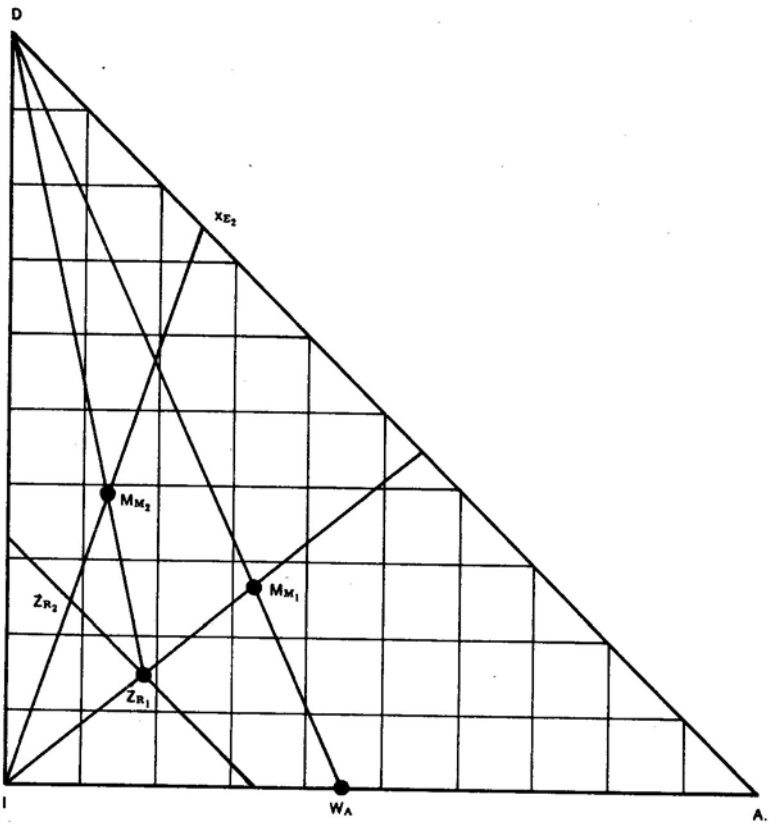
El punto M_{M2} está dado por:

$$2\,191.78 + 1\,000 = 3\,191.78$$

$$2\,191.78\,(0.185) = 3\,191.78\,z_{M_2}^{\text{aceite}}$$

$$z_{M_2}^{\text{ac}} = 0.127$$

De la gráfica



Con ello se localiza el punto M_{M2} uniendo Z_{R1} con D.

De la gráfica $z_{R_2} = 0.08$ $x_{E_2} = 0.24$

$$3\,191.78 = M_{R_2} + L_{E_2}$$

$$3\,191.78\,(0.1270) = M_{R_2}\,(0.08) + L_{E_2}\,(0.24)$$

$$405.35 = (3\,191.78 - L_{E_2})\,(0.08) + L_{E_2}\,(0.24)$$

$L_{E_2} = 937.5$ kg/h $M_{R_2} = 2\,254.28$ kg/h

3.4 Tercer lixiviador

En este lixiviador se trata M_{R2} con L_{D3}

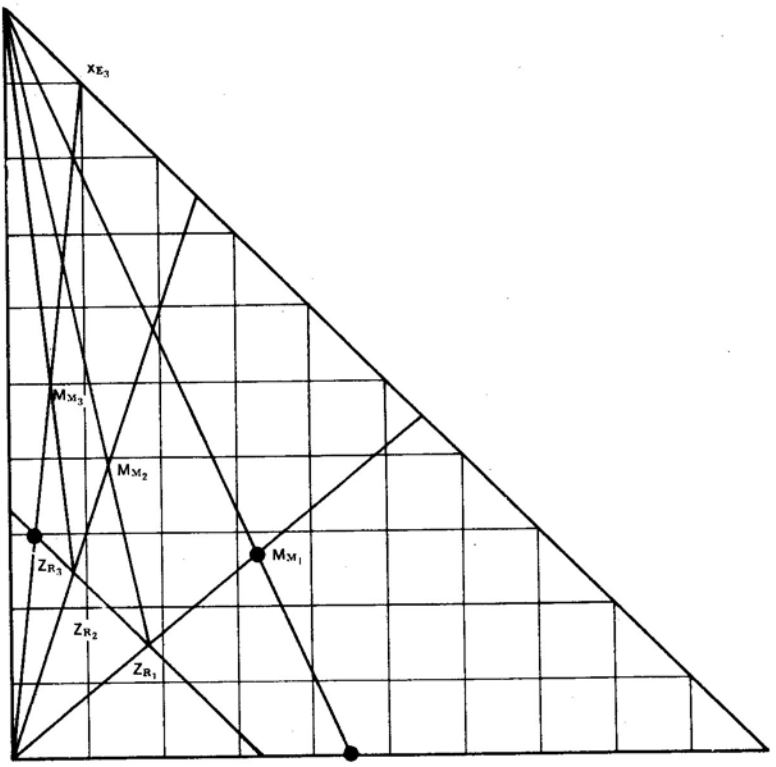
El punto M_{M3} quedará en

$$2\,254.28 + 1\,000 = 3\,254.28 = M_{M_3}$$

$$2\,254.28\,(0.08) = 3\,254.28\,z_{M_3}^{\text{aceite}}$$

$$z_{M_3}^{\text{aceite}} = 0.055$$

El punto M_{M_3} se localizará uniendo M_{R_2} con L_{D_3}. La línea que los une dará el punto $z_{M_3}^{\text{aceite}}$



De la gráfica $z_{R_3} = 0.035$ $x_{E_3} = 0.1$

$$3\,254.28 = L_{E_3} + M_{R_3}$$

$$3\,254.28\,(0.055) = L_{E_3}\,(0.10) + M_{R_3}\,(0.035)$$

$$\therefore \quad M_{R_3} = 2\,252.92 \text{ kg/h}$$

$$L_{E_3} = 1\,001.35 \text{ kg/h}$$

3.5 Composición global del flujo superior

$$L_{E_1} + L_{E_2} + L_{E_3} = 1\,308.2 + 937.5 + 1\,001.35 = 3\,247.05 \text{ kg/h}$$

Aceite recuperado

$$1\,308.2\,(0.55) + 937.5\,(0.24) + 1\,001.35\,(0.1) = 1\,044 \text{ kg aceite/h}$$

$x_{E\,\text{Global}} = 1\,044.64/3\,247.05 = 0.3217$ kg de aceite/kg de extracto

3.6 Porcentaje de aceite recuperado

$$\frac{1\,044.64}{2\,500\,(0.45)}\,(100) = 92.85\%$$

4. **Resultados**

La composición global del flujo superior es del 0.3217 kg de aceite/kg de extracto.

El refinado procedente de la última etapa tendrá una composición de 0.035.

Se recuperará el 92.85% del aceite.

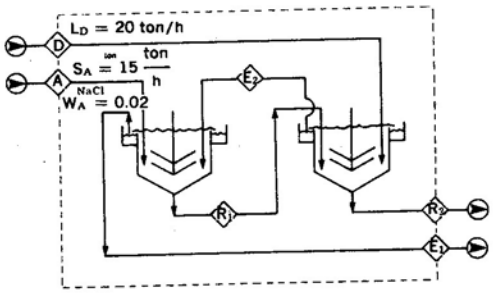
Problema 6.4

En la producción de arena se parte de arena de mar, la cual contiene 2% de NaCl en peso. Como la sal es indeseable, la arena se mete a dos lavadores en serie, en los que se introduce agua a contracorriente con la arena.

Si se quieren lavar 15 toneladas por hora de arena con 20 toneladas de agua dulce, ¿cuál será la cantidad de sal que arrastre la arena final?

En los lavadores, la arena y el agua se mezclan perfectamente y la arena descargada retiene dos partes de arena por una de solución.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Balance total

$$S_A + L_D = M_{R_2} + L_{E_1}$$

Balance de arena

$$S_A (1 - w_A^{NaCl}) = M_{R_2} z_{R_2}^{arena}$$

Balance de NaCl

$$S_A w_A^{NaCl} = M_{R_2} (1 - z_{R_2}^{arena}) X_2^{sal} + L_{E_1} X_{E_1}^{sal}$$

2.2 Balance en el segundo lixiviador

$$M_{R_1} + L_D = L_{E_2} + M_{R_2}$$

$$M_{R_1} (1 - z_{R_1}^{arena}) X_1^{sal} = L_{E_2} X_{E_2}^{sal} + M_{R_2} (1 - z_{R_2}^{arena}) X_2^{sal}$$

3. Cálculos

3.1 Balance total

$$15 + 20 = M_{R_2} + L_{E_1}$$

Balance de arena

$$15\ (0.98) = 14.7 \text{ ton/día} \qquad z_{R_2}^{arena} = 14.7/22.05 = 0.66$$

Del enunciado

$$M_{R_2} = 14.7 + 14.7\,(0.5) = 22.05 \text{ ton/h}$$

$$L_{E_1} = 35 - 22.05 = 12.95 \text{ ton/h}$$

Balance de NaCl

$$15\,(0.02) = 14.7\,(0.5)\,X_2^{sal} + 12.95\,X_1^{sal}$$

3.2 Balance en el segundo lixiviador

$$M_{R_1} + 20 = L_{E_2} + 22.05$$

Ahora bien, $M_{R_1} = M_{E_2} = 22.05$ y $L_{E_2} = 20$

$$7.35\,X_1^{sal} = 20\,X_2^{sal} + 7.35\,X_2^{sal}$$

3.3 Obtención de las concentraciones

$$0.3 = 7.35\,X_2^{sal} + 12.95\,X_1^{sal}$$

$$7.35\,X_1^{sal} = 20\,X_2^{sal} + 7.35\,X_2^{sal}$$

$X_1^{sal} = 0.02$ $\qquad$ $X_2 = 0.0054$ kg sal/kg de solución

3.4 Sal arrastrada final

$$7.35\,(0.0054) = 0.03969 \text{ ton/h}$$

4. **Resultado**

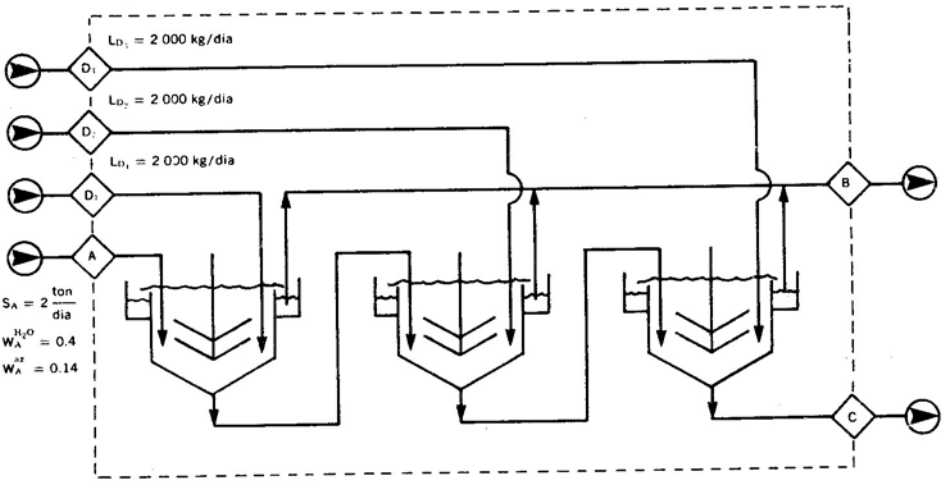
La sal final que va con la arena es de 39.69 kg/h, la que acompaña a 14.7 ton/h de arena.

Problema 6.5

Para extraer el azúcar contenida en la remolacha se emplea un sistema de extracción de tres etapas en corriente directa. Si se tratan dos toneladas diarias de remolacha de composición 14% de azúcar, 40% de agua y 46% de inertes, ¿cuál será la cantidad de azúcar recuperada en el agua, si se trata cada etapa con 2 000 kg de agua?

Experimentalmente se ha encontrado que cada kg de sólido inerte retiene 2.5 kg de disolución.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Se resolverá el problema gráficamente.

2.2 Diagrama

La línea de flujo inferior dada por $x^1 = 1/3.5 = 0.28$ es paralela a la hipotenusa.

Como las concentraciones están muy bajas, conviene hacer una ampliación del diagrama.

2.3 Balances

En el primer lixiviador

$$S_A + L_{D_1} = M_{M_1} = L_{E_1} + M_{R_1}$$

$$S_A w_A^{azu} = M_{M_1} z_{R_1}^{azu} = L_{E_1} x_{E_1}^{azu} + M_{R_1} z_{R_1}^{azu}$$

Balance en el segundo lixiviador

$$M_{R_1} + L_{D_2} = M_{M_2} = L_{E_2} + M_{R_2}$$

$$M_{R_1} z_{R_1}^{azu} = M_{M_2} z_{M_2}^{azu} = L_{E_2} x_{E_2}^{azu} + M_{R_2} z_{R_2}^{azu}$$

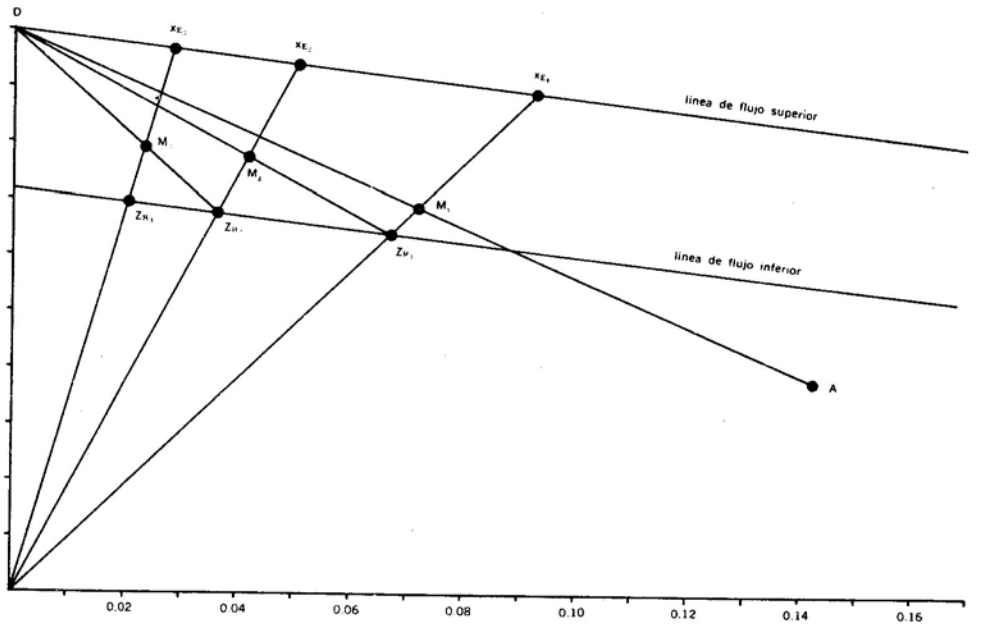
3. Cálculos

3.1 Primer lixiviador

$$2 + 2 = 4 \qquad 4 = M_{M_1}$$

$$2\,(0.14) = 4\, z_{M_1}^{azu}$$

$$z_{M_1}^{azu} = 0.07$$



Del diagrama $z_{R_1}^{azu} = 0.065$ $x_{E_1}^{azu} = 0.091$

$$4\,(0.07) = M_{R_1}\,(0.065) + L_{E_1}\,(0.091)$$

$$4 = L_{E_1} + M_{R_1}$$

$$0.28 = (4 - L_{E_1})\,(0.065) + L_{E_1}\,(0.091)$$

$$0.28 = 0.26 - 0.065\,L_{E_1} + L_{E_1}\,(0.091)$$

$$L_{E_1} = 0.7692 \text{ ton/día} \qquad M_{R_1} = 3.23 \text{ ton/día}$$

3.2 Segundo lixiviador

$$3.23 + 2 = 5.23 \text{ ton/día}$$

$$3.23\,(0.065) = 5.23\,z_{M_2}$$

$$z_{M_2}^{azu} = 0.040$$

Del diagrama

$$5.23\,(0.049) = L_{E_2}\,(0.0485) + M_{R_2}\,(0.0345)$$

$$5.23 = L_{E_2} + M_{R_2}$$

$$M_{R_2} = 3.1753 \text{ ton/día}$$

$$L_{E_2} = 2.0547 \text{ ton/día}$$

3.3 Tercer lixiviador

$$3.1753 + 2 = 5.1753 \text{ ton/día}$$

$$3.1753\,(0.0345) = 5.1753\,z_{M_3}$$

$$z_{M_3} = 0.0211$$

De la gráfica

$$z_{R_3}^{Azu} = 0.019 \qquad x_{E_3}^{Azu} = 0.026$$

Balance

$$5.1753 = L_{E_3} + M_{R_3}$$

$$5.1753\,(0.0211) = L_{E_3}(0.026) + M_{R_3}(0.019) = 0.13455 - 0.026\,M_{R_3} + M_{R_3}(0.019)$$

$$M_{R_3} = 3.623 \text{ ton/día} \qquad L_{E_3} = 1.552 \text{ ton/día}$$

3.4 Agua recuperada

$$1.552\ (0.026) + 2.0547\ (0.0485) + 0.7692\ (0.091)$$

$$= 0.04035 + 0.0996 + 0.06999 = 0.2099 \text{ ton/día}$$

$$\% = \frac{0.2099}{2\ (0.14)}\ (100) = 74.93$$

4. **Resultado**

Se recupera el 74.96% del azúcar, o sea, 0.2099 ton/día.

Problema 6.6

Se necesita someter a la lixiviación 50 ton/h de un mineral que contiene 0.4 kg de carbonato de sodio por kg de mineral inerte. Para ello se tratan con 200 000 l/h de agua a contracorriente en dos etapas.

El material inerte que sale de cada etapa contiene 1 kg de solución por cada kg de material inerte.

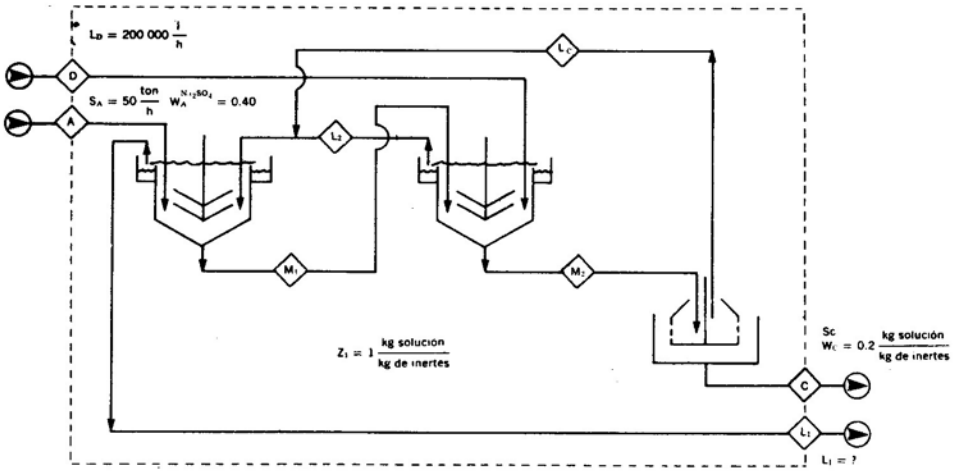
El mineral saliente del segundo lixiviador se manda a una centrífuga, de donde sale con 0.2 kg de solución por kg de inerte.

La solución recuperada se manda al primer lixiviador.

¿Qué cantidad de carbonato se recupera?

¿Cuál es el valor de cada corriente?

1. Traducción



2. Planteamieto

2.1 Discusión

Los problemas de lixiviación se plantean mejor con base en los inertes.

2.2 Balance total

$$S_A + L_D = S_C + L_1$$

Balance de inerte total

$$S_A w_A^I = S_C w_C^I = S_I$$

Balance de carbonato de sodio

$$S_A w_A^{Na_2CO_3} = S_1 W_C X_C^{Na_2CO_3} + L_1 X_1^{Na_2CO_3}$$

$$X_C^{Na_2CO_3} = \text{kg } Na_2CO_3/\text{kg de solución}$$

2.3 Balance en el primer lixiviador

$$S_A + L_C + L_2 = M_1 + L_1$$

Balance de carbonato de sodio

$$S_A w_A^{Na_2CO_3} + L_C X_C^{Na_2CO_3} + L_2 X_2^{Na_2CO_3} = M_1 \ (1 - z_{M_1}^I) \ X_1^{Na_2CO_3} + L_1 X_1^{Na_2CO_3}$$

2.4 Balance en el segundo lixiviador

$$M_1 + L_D = M_2 + L_2$$

$$M_1 \ (1 - z_{M_1}^I) \ X_1^{Na_2CO_3} = M_2 \ (1 - z_{M_2}^I) \ X_2^{Na_2CO_3} + L_2 X_2^{Na_2CO_3}$$

3. Cálculos

3.1 Balance total

$$50 + 200 = S_C + L_1$$

Balance inerte

$$50 \left(\frac{0.4}{1 + 0.4} \right) = 14.285 \text{ ton de carbonato}$$

$$\therefore S_1 = (50 - 14.285) = 35.714 \text{ ton de inertes}$$

Balance de carbonato de sodio

$$14.285 = 35.714\ (0.2)\ X_C^{Na_2CO_3} + L_1 X_1^{Na_2CO_3}$$

Solución que va con $S_C = 35.714\ (0.2) = 7.1428$ ton

$$S_C = 35.714 + 7.1428 = 42.8568 \text{ ton}$$

3.2 Balance en el primer lixiviador

$$50 + L_C + L_2 = M_1 + L_1 \qquad M_1 = 2\ (35.714) = 71.428 \text{ ton}$$

Balance de carbonato

$$14.285 + L_C X_C^{Na_2CO_3} + L_2 X_2^{Na_2CO_3} = 35.714\ X_1^{Na_2CO_3} + L_1 X_1^{Na_2CO_3}$$

3.3 Balance en el segundo lixiviador

$$71.428 + 200 = 71.428 + L_2$$

$$L_2 = 200 \text{ ton}$$

$$35.714\ X_1^{Na_2CO_3} = 35.714\ X_2^{Na_2CO_3} + 200\ X_2^{Na_2CO_3}$$

$$\therefore \qquad X_1^{Na_2CO_3} = \frac{235.714}{35.714} X_2^{Na_2CO_3} = 6.6\ X_2^{Na_2CO_3}$$

3.4 Resolución de ecuaciones

$$L_1 = 250 - 42.8568 = 207.1432 \text{ ton}$$

$$14.285 = 7.1428\ X_C^{Na_2CO_3} + 207.14\ X_1^{Na_2CO_3}$$

$$X_1^{Na_2CO_3} = 6.6\ X_2^{Na_2CO_3} \qquad X_C = X_2$$

$$14.285 = 7.1428\ X_2^{Na_2CO_3} + 207.1432\ (6.6\ X_2^{Na_2CO_3})$$

$$14.285 = (7.1428 + 1367.14)\ X_2^{Na_2CO_3}$$

$$X_2^{Na_2CO_3} = 0.01039 \text{ kg } Na_2CO_3/\text{kg de solución}$$

$$X_1^{Na_2CO_3} = 6.6\ (0.01039) = 0.068574 \text{ kg } Na_2CO_3/\text{kg de solución}$$

3.5 Disolución de Na_2CO_3 recuperada

$$L_1X_1 = 207.1432\ (0.068574) = 14.204\ \text{ton/h}$$

3.6 Valor de L_C

$$50 + L_C + 200 = 71428 + 207.1432$$

$$L_C = 28.5712\ \text{ton/h}$$

4. **Resultados**

Se recuperan 14.204 ton/h de Na_2CO_3

Tabla

	S_A	L_1	M_1	L_2	M_2	L_C	S_C
ton	50	207.14	71.418	200	71.428	28.5712	42.8568

Problema 6.7

Los datos de equilibrio para el sistema ácido acético, benceno, agua a 25 °C y 1 atm son los siguientes:

Ac. acético	Benceno	Agua	Ac. acético	Benceno	Agua
0.15	99.85	0.001	4.56	0.04	95.4
1.4	98.56	0.04	17.7	0.2	82.1
3.27	96.62	0.11	29	0.4	70.6
13.3	86.4	0.4	56.9	3.3	39.8
19.9	79.4	0.7	63.9	6.5	29.6
31.0	67.1	1.9	65.8	18.1	16.1

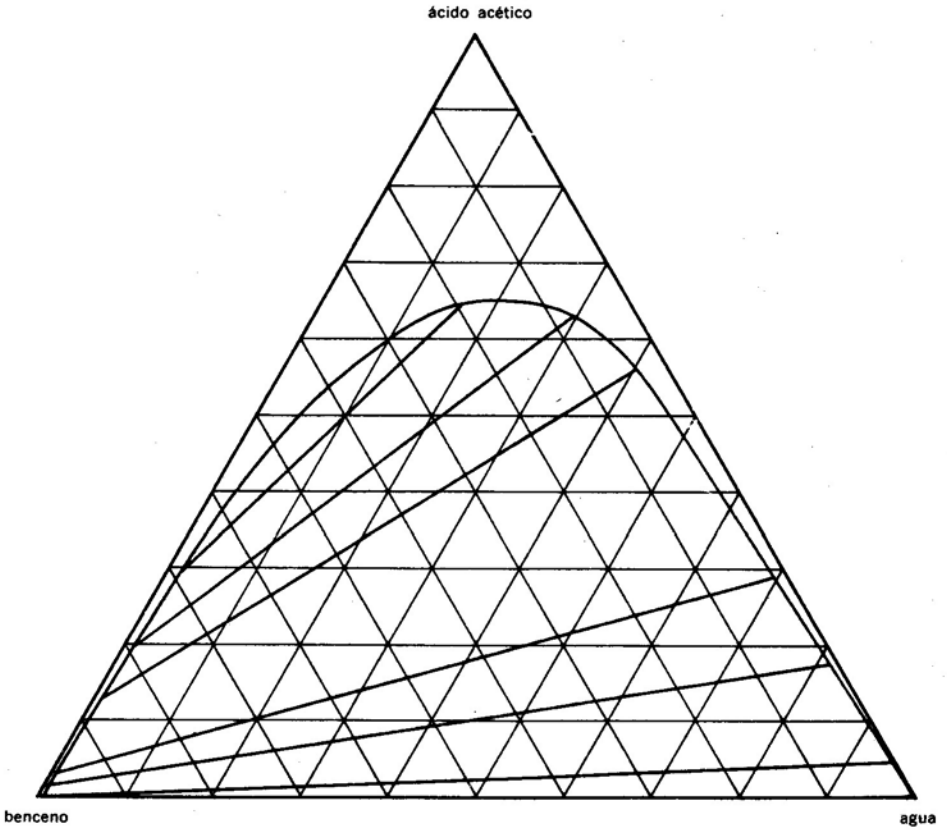
Con los datos anteriores construya el diagrama triangular que represente el equilibrio líquido-líquido.

1. Planteamiento

1.1 Discusión

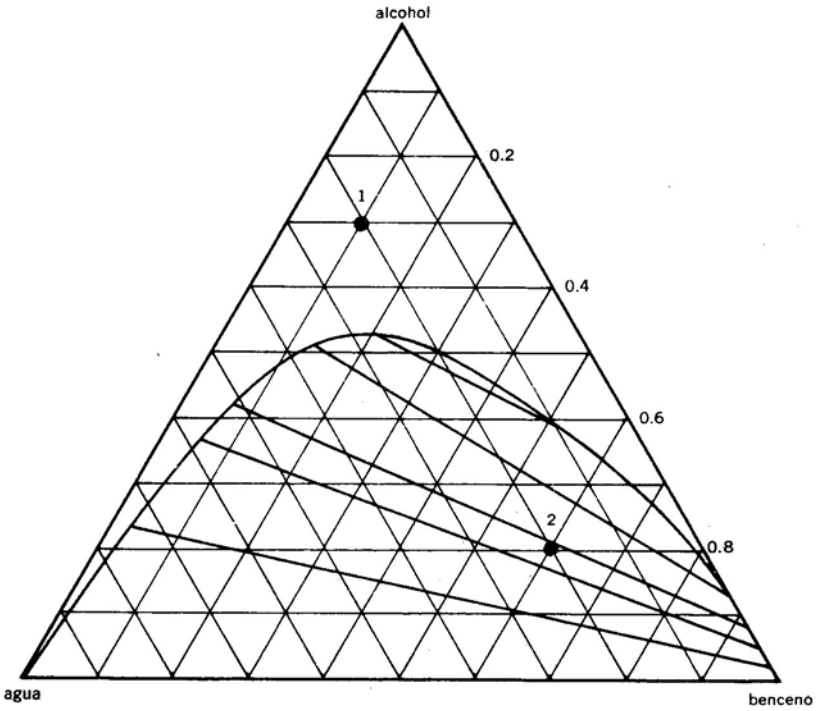
Con los datos anteriores se puede construir la curva binodal. Las líneas de unión están dadas por los datos de los diferentes renglones. Por ejemplo, la fase ligera con una concentración de 3.27 en peso de acético está en equilibrio con la fase pesada con una concentración de 29% en peso de acético.

2. Construcción



Problema 6.8

En el sistema alcohol, benceno, agua que se presenta a continuación se pide que indique las concentraciones en fracción masa de alcohol, benceno y agua para los puntos 1 y 2. ¿A cuántas fases darán origen los puntos 1 y 2?, ¿cuál será la composición de dichas fases?



Fuente: E.J. Henley y H. Bieber. **Chemical Engineering Calculations.** Mc Graw Hill. Nueva York, N.Y., 1959.

1. Planteamiento

1.1 Discusión

De acuerdo con lo indicado en el texto, todo punto situado afuera de la curva binodal dará sólo una sola fase, mientras que un punto situado dentro de la curva dará origen a dos fases, cuyas composiciones se pueden obtener por medio de las líneas de reparto.

2. Cálculos

2.1 Composición del punto 1

El punto 1 sólo contiene una fase con composición igual a

$$x_1^{\text{alcohol}} = 0.7 \qquad x_1^{\text{benceno}} = 0.1 \qquad x_1^{H_2O} = 0.2$$

2.2 Composición del punto 2

La composición del punto 2 es la siguiente:

$$x_2^{\text{alcohol}} = 0.2 \qquad x_2^{\text{benceno}} = 0.6 \qquad x_2^{H_2O} = 0.2$$

La mezcla en este punto se dividirá en dos fases, cuyas composiciones serán:

fase rica en alcohol	fase pobre en alcohol
$x^{\text{alcohol}} = 0.38$	$x^{\text{alcohol}} = 0.08$
$x^{\text{benceno}} = 0.38$	$x^{\text{benceno}} = 0.92$
$x^{\text{agua}} = 0.54$	$x^{\text{agua}} = 0$

3. **Resultados**

La composición del punto 1 es de $x_1^{\text{alcohol}} = 0.7$

La del punto 2 es $x_2^{\text{alcohol}} = 0.2$

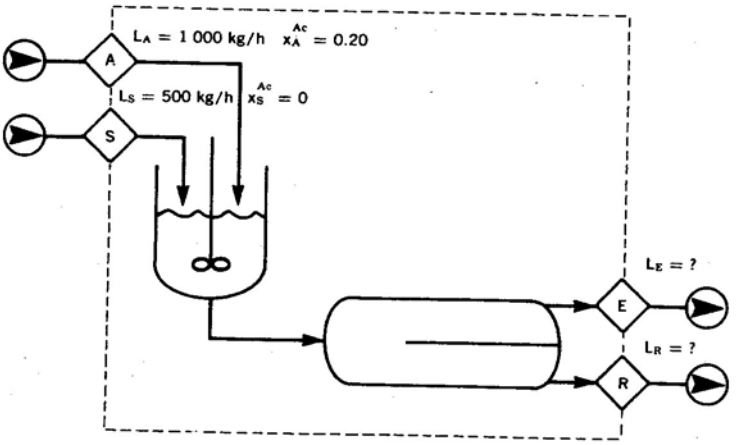
El punto 1 consta de una sola fase. El punto 2 da origen a dos fases de composición.

$$x_E^{\text{alcohol}} = 0.38 \qquad x_R^{\text{alcohol}} = 0.08$$

Problema 6.9

Para extraer el ácido acético contenido en una corriente de benceno se trata ésta con agua. La corriente de benceno-acético contiene 20% de acético y un flujo de 1 000 kg/h. Esta corriente se tratará con 500 kg/h de agua. ¿Qué cantidad de extracto y refinado se obtiene?, ¿qué % de acético quedará en el refinado?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Se utilizarán los datos de equilibrio, dibujados en el ejemplo anterior.

2.2 Balance

$$L_A + L_S = L_E + L_R = L_M$$

$$L_A x_A^{Ac} + L_S x_S^{Ac} = L_E x_E^{Ac} + L_R x_R^{Ac} = L_M x_M^{Ac}$$

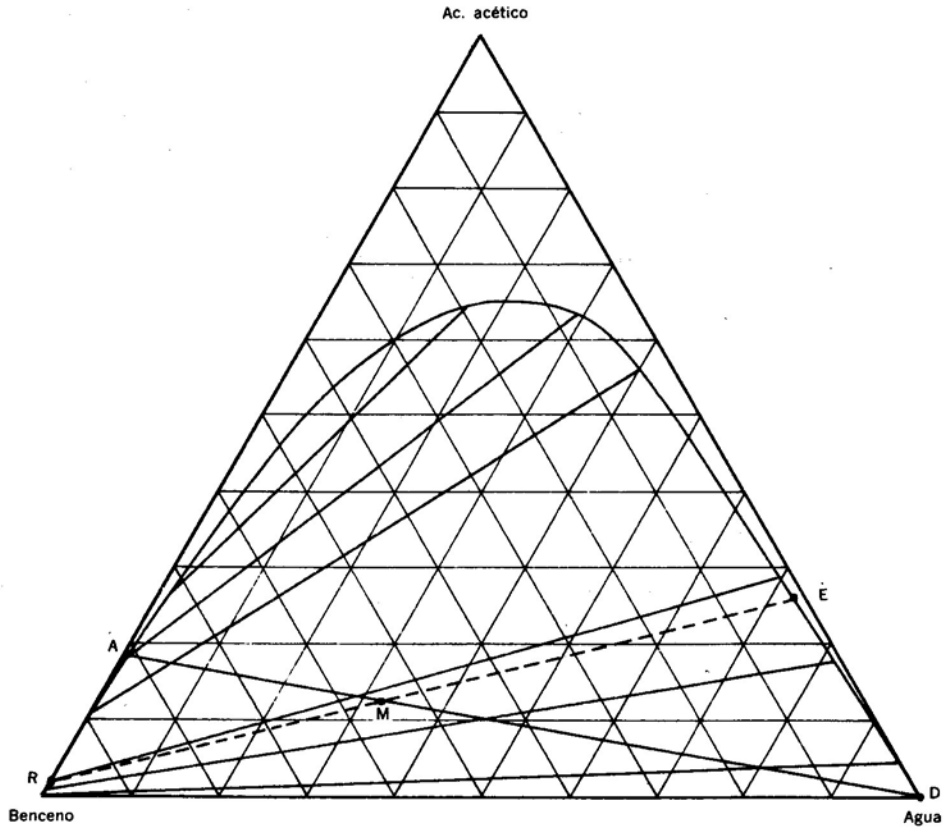
3. Cálculos

3.1 Balance

$$1\,000 + 500 = 1\,500 = L_M$$

$$1\,000\,(0.2) + 0 = 1\,500\, x_M^{Ac}$$

$$x_M^{Ac} = 0.133$$



Balance de benceno

$$1\,000\,(0.8) = 1\,500\,x_M^B$$

$$x_M^B = 0.533$$

3.2 Extracto y refinado

Con x_M^B y x_M^{Ac} se localiza el punto de mezcla.

Las composiciones del extracto y el refinado se obtienen del diagrama

$$x_E^{Ac} = 0.21 \qquad x_R^{Ac} = 0.03$$

Balance de acético

$$1\,500\,(0.133) = L_R\,(0.03) + L_E\,(0.21)$$

$$1\,500 = L_R + L_E$$

$$199.5 = L_R\,(0.03) + (1\,500 - L_R)\,(0.21)$$

$$199.5 = 0.03\,L_R + 315 - 0.21\,L_R$$

$$-115.5 = -0.18\,L_R$$

$$L_R = 641.66$$

$$L_E = 858.33$$

3.3 Recuperación

$$\frac{858.33\,(0.21)}{1\,000\,(0.2)}\,(100) = \frac{180.24}{200} = 90.12\%$$

4. **Resultados**

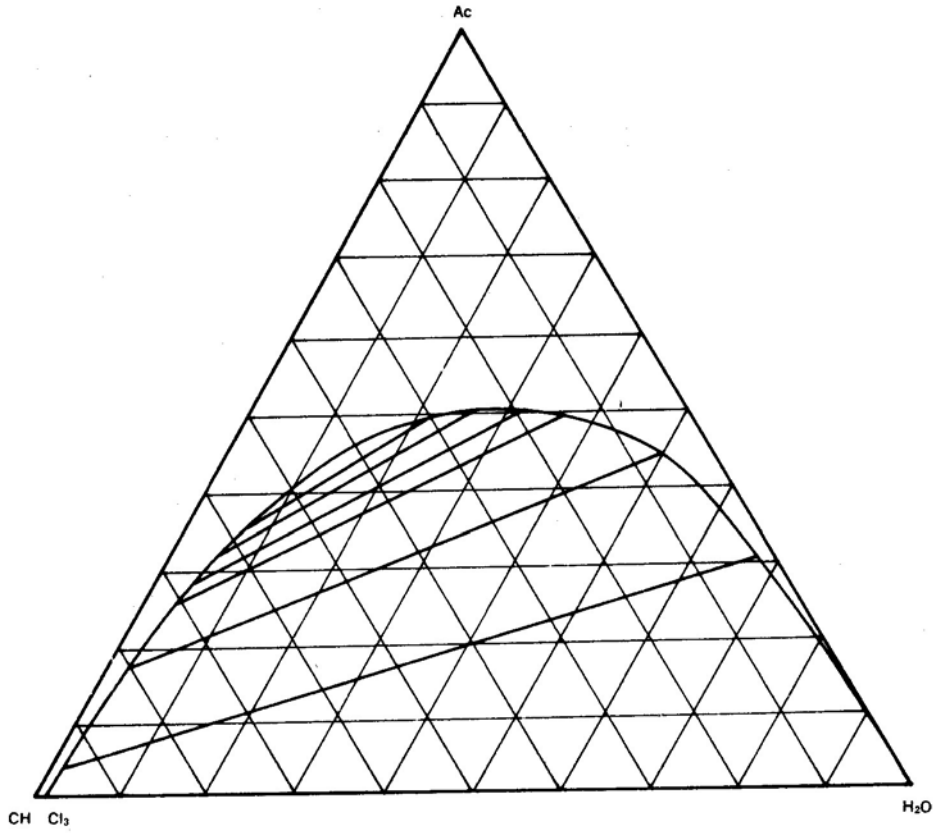
Se obtienen 641.66 kg/h de refinado y 858.33 kg/h de extracto.

Se recuperará el 90.12%.

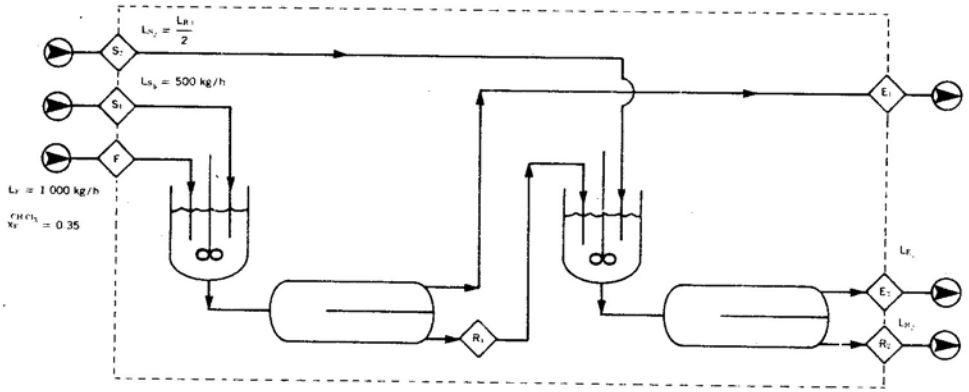
Problema 6.10

Una mezcla de 1 000 kg/h de cloroformo y ácido acético a 18 °C se va a tratar con agua para recuperar el ácido. La mezcla tiene una composición de 35% en peso de $CHCl_3$ y se trata con 500 kg/h de agua en una etapa. ¿Cuáles son las composiciones y masas del refinado y el extracto? Si el refinado obtenido se trata con la mitad de su peso de agua, ¿cuál será la composición de las capas salientes?

El equilibrio viene dado por:



1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Se utilizará el diagrama triangular para resolver el problema.

2.2 Balance en el primer extractor

$$L_F + L_S = M_{M_1}$$

$$L_F x_F^{Ac} = M_{M_1} x_{M_1}^{Ac} \qquad M_{M_1} = L_{E_1} + L_{R_1}$$

2.3 Balance en el segundo extractor

$$L_{R_1} + L_{S_1} = M_{M_2}$$

3. Cálculos

3.1 Balance en el primer extractor

$$1\,000 + 500 = 1\,500$$

$$650 = 1\,500\, x_{M_1}^{Ac}$$

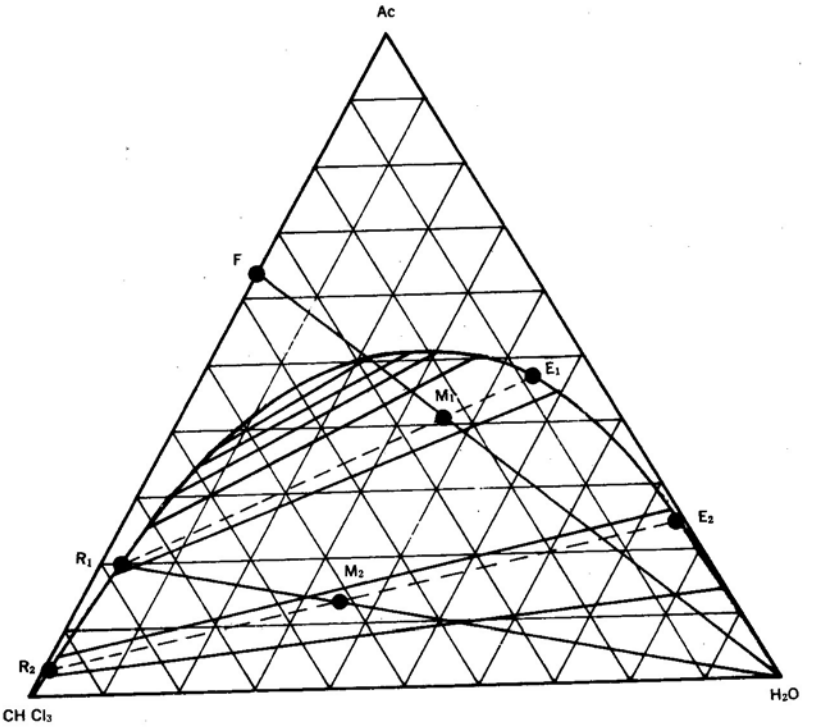
$$x_{M_1}^{Ac} = 0.433$$

$$350 = 1\,500\, x_{M_1}^{\text{cloroformo}}$$

$$x_{M_1}^{\text{cloroformo}} = 0.233$$

Con esto se localiza el punto M_1. De allí, a partir de las rectas de reparto, se obtienen las composiciones de R_1 y E_1.

Del diagrama



$$x_{E_1}^{Ac} = 0.47$$

$$x_{R_1}^{Ac} = 0.22$$

$$1\,500 = L_{E_1} + L_{R_1}$$

$$1\,500\,(0.43) = L_{E_1}\,(0.47) + L_{R_1}\,(0.27)$$

$$R_1 = 220\,\frac{kg}{h}$$

3.2 Balance en el segundo extractor

$$R_1 = 220 \text{ kg/h} \qquad L_{S_1} = 220/2 = 110 \text{ kg/h}$$

$$L_{M_2} = 220 + 110 = 330 \text{ kg/h}$$

$$354\ x_{M_2}^{Ac} = 220\,(0.22)$$

$$x_{M_2}^{Ac} = 0.136$$

Del diagrama

$$x_{E_2}^{Ac} = 0.26 \qquad x_{R_2}^{Ac} = 0.05$$

4. **Resultados**

Composición del primer extracto 47% de ácido acético. Composición del primer refinado 22% de acético y 220 kg/h.

Composición del segundo extracto 26% de acético y 5% de acético en el segundo refinado.

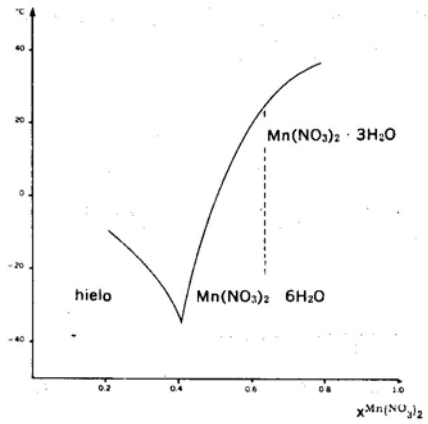
Problema 6.11

Los datos de equilibrio para el sistema $Mn(NO_3)_2$ – agua son los siguientes:

Temperatura °C	$Mn(NO_3)_2$ g/100 g solución	Fases
−10	21.3	Hielo
−20	33.0	Hielo
−36	40.5	Hielo
−29	42.3	Hielo + $Mn(NO_3)_2\ 6H_2O$
−16	45.5	$Mn(NO_3)_2\ 6H_2O$
0	50.5	$Mn(NO_3)_2\ 6H_2O$
11	54.6	$Mn(NO_3)_2\ 6H_2O$
23.5	62.4	$Mn(NO_3)_2\ 6H_2O$
25.8	64.6	$Mn(NO_3)_2\ 6H_2O$ + $Mn(NO_3)_2\ 3H_2O$
27	65.6	$Mn(NO_3)_2\ 3H_2O$
30	67.4	$Mn(NO_3)_2\ 3H_2O$
35.5	76.8	$Mn(NO_3)_2\ 3H_2O$

Construya a partir de los datos anteriores el diagrama de equilibrio en °C contra porcentaje de $Mn(NO_3)_2$.

1. Diagrama



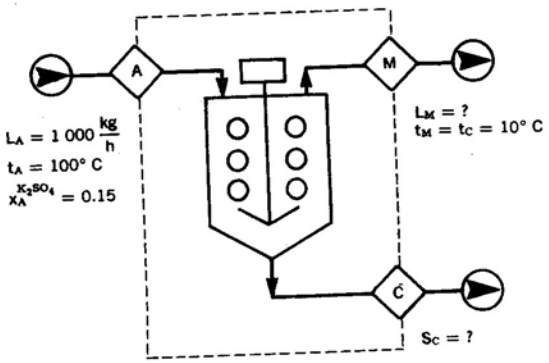
Problema 6.12

Para recuperar el K_2SO_4 de una solución al 15%, se meten 1 000 kg/h de esta solución a un cristalizador, la solución entrante a 100 °C se enfría en el cristalizador hasta 10 °C. ¿Qué cantidad de sulfato de potasio se recuperará?

Datos de equilibrio

Temperatura °C	0	10	20	30	40	60
g de K_2SO_4/1 000 g de H_2O	73.68	92.32	117.2	129	147.7	181.34

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Para resolver el problema se usarán los datos del equilibrio. De allí se obtendrán las concentraciones de C y M.

2.2 Balances

$$L_A = L_M + S_C$$

$$L_A x_A^{K_2SO_4} = L_M x_M^{K_2SO_4} + S_C w_C^{K_2SO_4}$$

3. Cálculos

3.1 Concentración de las aguas madres

De los datos de equilibrio a 10 °C la concentración de K_2SO_4 es de:

$$92.32 \text{ g}/1\,000 \text{ g } H_2O$$

$$x_M^{K_2SO_4} = \frac{92.32}{92.32 + 1\,000} = 0.08451 \frac{\text{g } K_2SO_4}{\text{g totales}}$$

3.2 Balance

$$1\,000\,(0.15) = L_M\,(0.0845) + S_C\,(1)$$

$$1\,000\,(0.15) = 0.08451\,L_M + 1\,000 - L_M$$

$$L_M = 928.46 \text{ kg/h}$$

$$S_C = 71.54 \text{ kg/h}$$

3.3 Recuperación

$$\% = (71.54/150)\,(100) = 47.69$$

4. **Resultados**

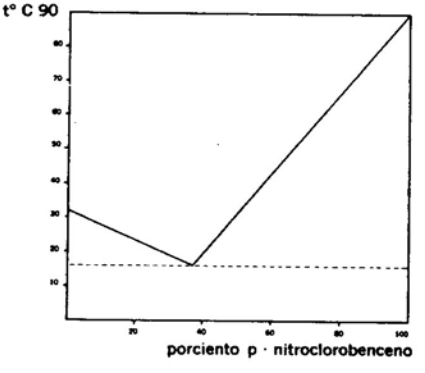
Se recuperan 71.54 kg/h de sulfato de potasio en forma de cristales

Se recupera el 47.69% del sulfato de potasio inicial

Problema 6.13

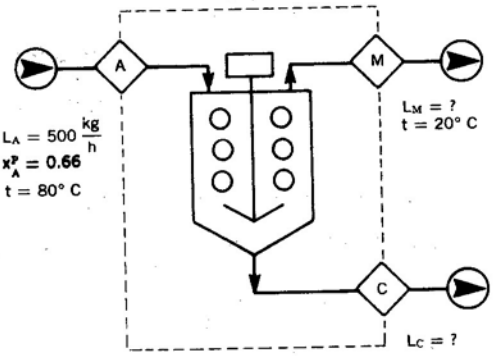
Para separar una mezcla de nitroclorobencenos que contiene 66.66% del isómero **para,** se introduce ésta a 80 °C a un cristalizador, allí se enfría la mezcla hasta 20 °C y se precipita el **para**-nitroclorobenceno. Si se introducen 500 kg/h de la mezcla, ¿qué cantidad de cristales se precipitan? ¿Qué porcentaje de **para**-nitroclorobenceno se recupera?

El equilibrio de este sistema es el siguiente:



Fuente: Henley, Bieber. **Chemical Engineering Calculations.** Mc. Graw Hill. Nueva York, 1959.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Este problema de cristalización se resolverá usando el diagrama de equilibrio. En ese diagrama se colocarán las condiciones de entrada y salida.

2.2 Balance

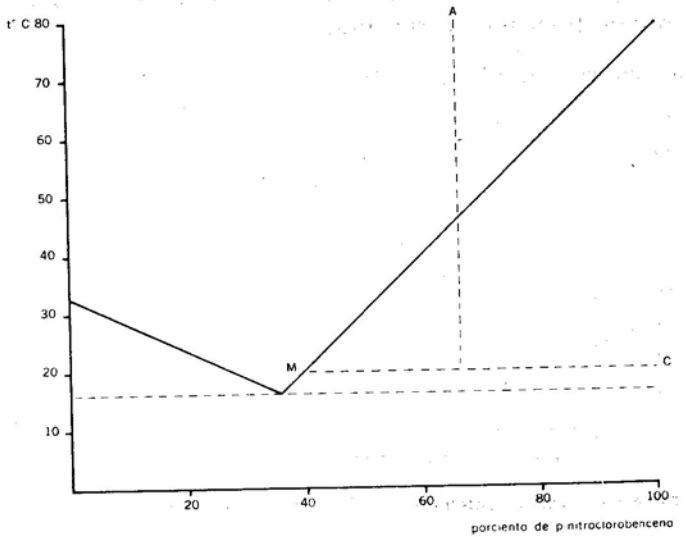
$$L_1 = L_M + L_C$$

$$L_1 x_1^P = L_M x_M^P + L_C x_C^P$$

Los datos se obtienen del diagrama de equilibrio.

3. Cálculos

3.1 Del diagrama de equilibrio



(I) 500 (0.66) = L_M (0.4) + L_C

(II) 500 = L_M + L_C

$\therefore L_C = 222.2$ kg/h

3.2 Porcentaje recuperado

$$(222.2/333.3)\,(100) = 66.6\%$$

4. Resultado

Se precipitan 222.2 kg/h de cristales y se recupera el 66.6% del para-nitro clorobenceno.

Problema 6.14

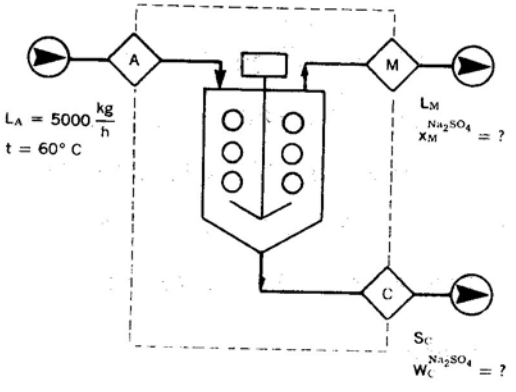
Se introducen en un cristalizador 5 000 kg/h de una solución saturada de sulfato de sodio a 60 °C.

¿Hasta qué temperatura se deberá enfriar la solución para que precipite el 25% del sulfato de sodio presente en la solución?

	$Na_2SO_4 \cdot 10\,H_2O$					Na_2SO_4			
Temperatura	0	10	20	25	30	35	40	45	60
$\frac{\text{g de } Na_2SO_4}{1\,000 \text{ g de } H_2O}$	48.56	93.72	188	278	409	490	483	465	453

Fuente: Hougen y Watson. **Chemical Process Principles,** tomo 1. John Wiley, Nueva York, 1959.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Por medio del balance se obtendrá la concentración final de la solución madre y usando los datos de equilibrio se obtendrá la temperatura final.

2.2 Balance

$$L_A = S_C + L_M$$

$$L_A x_A^{Na_2SO_4} = S_C w_C^{Na_2SO_4} + L_M x_M^{Na_2SO_4}$$

2.3 Recuperación

$$\frac{S_C w_C^{Na_2SO_4}}{L_A x_A^{Na_2SO_4}} (100) = 25$$

3. Cálculos

3.1 Concentración inicial

$$x_A^{Na_2SO_4} = \frac{453}{(1\,000 + 453)} = 0.3117 \frac{\text{g } Na_2SO_4}{\text{g totales}}$$

3.2 Na_2SO_4 entrante

$$L_A x_A^{Na_2SO_4} = 5\,000\ (0.3117) = 1\,558.5 \text{ kg } Na_2SO_4/h$$

3.3 Na_2SO_4 saliente

$$0.25 = S_C w_C^{Na_2SO_4}/1\,558.5$$

$$S_C w_C^{Na_2SO_4} = 389.625 \text{ kg } Na_2SO_4/h$$

$$w_C = \frac{142}{142 + 180} = 0.4409$$

$$S_C = 389.625/0.4409 = 883.7 \text{ kg/h}$$

$$L_M = 5\,000 - 883.7 = 4\,116.29 \text{ kg/h}$$

$$L\, x_M^{Na_2SO_4} = 1\,558.5 - 389.625 = 1\,168.87 \text{ kg/h}$$

$$x_M^{Na_2SO_4} = 1\,168.87/4\,116.29 = 0.2839 \text{ kg } Na_2SO_4/\text{kg}$$

3.4 Concentración saliente

$$x_M^{Na_2SO_4} = 0.2839$$

$$X_M^{Na_2SO_4} = \frac{0.2839}{1 - 0.2839} = 0.396 \frac{\text{g de } Na_2SO_4}{\text{g } H_2O}$$

$$X_M^{Na_2SO_4} = 396 \text{ g } Na_2SO_4/100 \text{ g de } H_2O$$

Estará entre 25 y 30 °C.
Interpolando la temperatura es de 29.5 °C.

4. **Resultado**

Se debe enfriar la solución hasta 29.5 °C.

PROBLEMAS PROPUESTOS

Problema 6.15

Quinientos kilogramos de un mineral de cobre (20% $CuSO_4$, 5% H_2O, 75% inertes) se someten a extracción con 1 500 kg de agua en un contacto sencillo.

Experimentalmente se encuentra que los lodos retienen 0.8 kilogramos de solución por kilogramo de inerte.

Calcúlese:

a) la composición del flujo superior o extracto y del inferior o refinado.
b) las cantidades de extracto y refinado.
c) el porcentaje de $CuSO_4$ extraído.

Usese el método gráfico.

Resultados

La composición del extracto es de 0.062 kg $CuSO_4$/kg total y las del refinado 0.027. La cantidad del extracto es de 1 314 kg/min y la del refinado 685.7 kg/min.

Problema 6.16

Cien kilogramos por hora de sólidos que contienen 0.15 kg de soluto por kg de sólido se van a tratar con disolvente para extraer el soluto.

¿Con qué cantidad de disolvente se tendrán que tratar para que los sólidos finales contengan 0.01 kg de soluto por kg de sólido?

Nota: Se ha encontrado que los lodos contienen 1.5 kg de disolución por kg de soluto.

Resultado

Se requieren 810 kg/h de disolvente.

Problema 6.17

Unos lodos contienen 1 000 kg de Na_2CO_3, 1 000 kg de materia insoluble y 2 000 kg de agua. Para extraer el carbonato de sodio de estos lodos se usarán 10 000 kg de agua y tres extractores en serie con flujo a contracorriente. El agua entra en el tercer lixiviador; los lodos al primero. Los lodos retienen 3 kg de solución por cada kg de insolubles. Calcule el peso de carbonato de sodio recuperado. Tome la base de 1 h.

Resultado

Se pierden 15.651 kg/h de carbonato.

Problema 6.18

Se van a tratar 5 000 kg/h de un material que contiene 25% de $CuSO_4$, 25% de inertes y 50% de agua, con agua para extraer el sulfato que forma parte de los lodos.

La extracción se va a llevar en dos tanques. El agua entra en el segundo tanque y el material en el primero. Experimentalmente se sabe que los lodos retienen 3 kg de solución por cada kg de material insoluble. Calcule el peso de sulfato de cobre recuperado, suponiendo que todo el sulfato se disuelve para formar una solución uniforme en cada tanque y el porcentaje recuperado.

Se emplearán 6 000 kg/h de agua, y los lodos del primer tanque se mandan al segundo, mientras el extracto del segundo se manda al primero para mejorar la recuperación.

Resultado

El peso de sulfato de cobre recuperado es de 1 008 kg $CuSO_4$/h y se recupera el 80.64%.

Problema 6.19

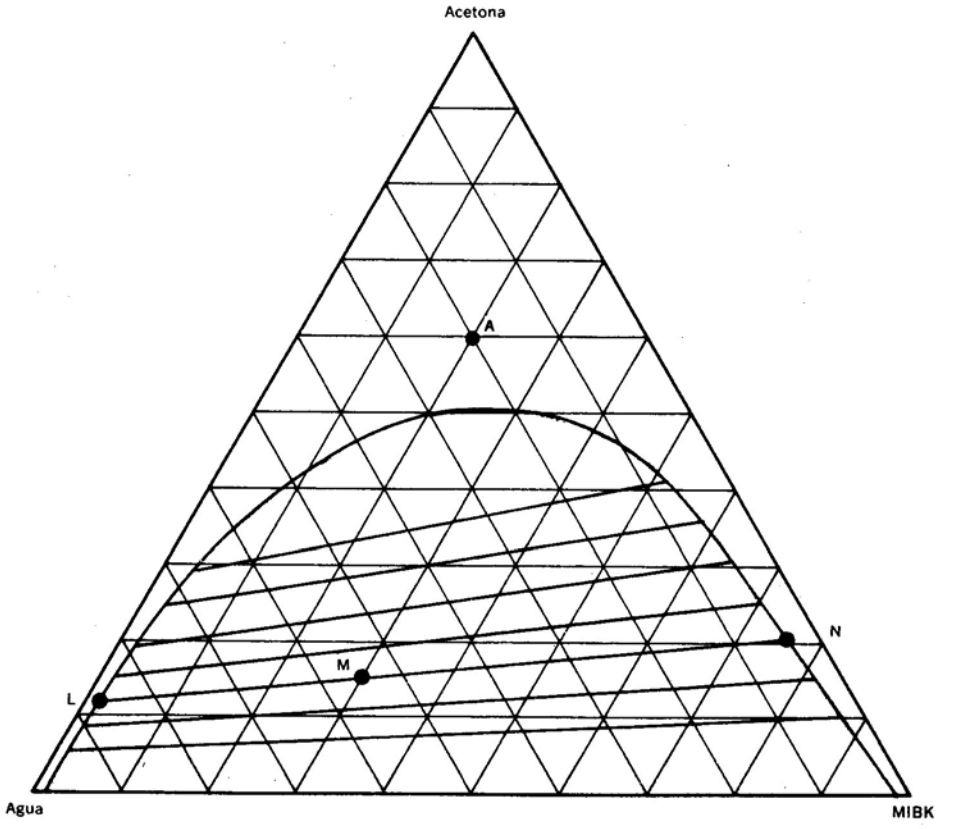
Diez toneladas de piezas de maquinaria que contienen 1% de aceite en peso se han de lavar con 10 toneladas por h de gasolina libre de aceite, pasándolas a contracorriente de las piezas en dos lavadores. Suponiendo que la mezcla del aceite y la gasolina es perfecta en cada lavador y que las piezas descargadas de cada clasificador contienen un 10% de líquido, determine el contenido de aceite en las piezas, si éstas se secan al dejar el segundo lavador.

Resultado

El contenido de aceite en la maquinaria final es de 0.0009692 ton. por 9.9 ton. de metal.

Problema 6.20

El siguiente diagrama de fases corresponde al sistema acetona, agua y metil isobutil cetona.



Fuente: D.F. Othmer, R.E. White. **Ind. Eng. Chem.** 33, 1 240, 1 941.

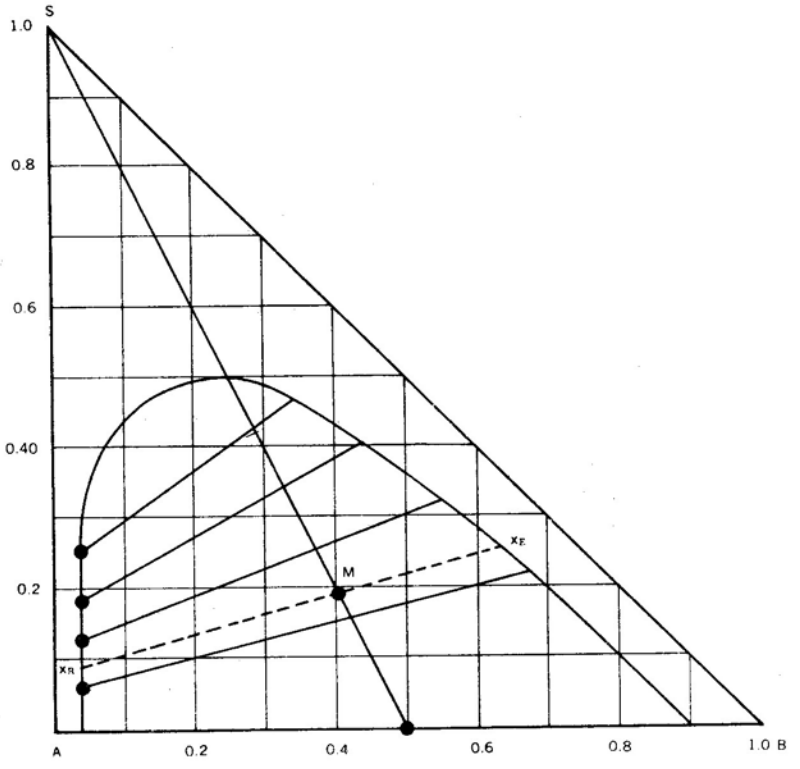
En relación con la mezcla cuya composición se presenta en el punto M del diagrama, ¿qué representan los puntos L y N?, ¿qué composición aproximada tendrá el punto de pliegue?, ¿cuántas fases se presentarían en mezclas cuya composición cayera en la región A del diagrama?

Resultados

Los puntos L y N representan la composición de las fases que resultarían al dejar reposar la mezcla M. La composición aproximada del punto de pliegue es de 47% de acetona, 18% de MIBK y 35 de agua.

Problema 6.21

Cien kg de una mezcla de 50% de A y B se quieren extraer con 25 kg del disolvente S. Calcule la concentración del extracto y el refinado, así como los pesos de cada uno.



Problema 6.22

Construya el diagrama de equilibrio para el sistema cloroformo, ácido acético y agua a 18 °C a partir de los siguientes datos en % en peso:

cloroformo	agua	ácido	cloroformo	agua	ácido
99.01	0.99	0.00	0.84	99.16	0.00
91.85	1.38	6.77	1.21	73.69	25.10
80	2.28	17.72	7.3	48.58	44.12
70.13	4.12	25.75	15.11	34.71	50.18
67.15	5.2	27.65	18.33	31.11	50.56
59.99	9.93	32.08	25.20	25.39	49.41
55.81	9.58	34.61	28.85	23.28	47.87

Problema 6.23

Para separar la piridina contenida en 500 kg/h de una solución acuosa del 30% en peso de piridina, se extrae ésta con clorobenceno a 25 °C empleando 150 kg de clorobenceno.

Calcúlese: la cantidad total de piridina extraída, la composición del extracto y el refinado.

Datos a 25 C

Capa de C_6H_5Cl		Capa acuosa	
C_6H_5Cl	Piridina	C_5H_5Cl	Piridina
99.95	0	0.08	0
88.3	11.1	0 1	5
80.0	19	0.2	11
74.4	24.1	0.5	19.9
69.3	28.6	1.0	25.5
64.8	31.5	2.1	36.1
60.2	35.1	4.2	45
53.1	40.6	9.5	53.2
37.8	49.0	37.8	49

Resultados

La piridina extraída es de 45.5 kg/h. La composición del extracto es de 0.26 y la del refinado 0.22 en fracción masa de piridina.

Problema 6.24

Para extraer la piridina contenida en 500 kg/h de una solución acuosa del 30% en peso de piridina, se extrae ésta con clorobenceno a 25 °C en un sistema de extracción en tres etapas y en corriente directa. Se emplean 150 kg/h de clorobenceno en cada etapa.

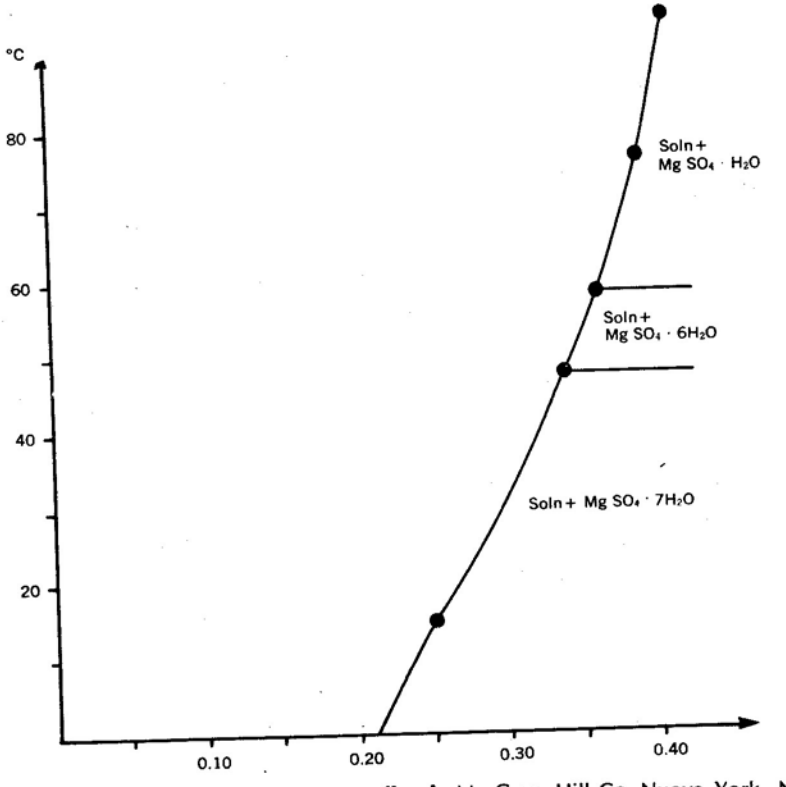
Calcúlese: **a)** la cantidad total de piridina extraída, **b)** la composición global del extracto y **c)** el porcentaje de piridina extraída.

Resultados

Se extraen 115.69 kg/h de piridina. La composición del extracto es del 20.9% de piridina; el porcentaje de recuperación es del 77%.

Problema 6.25

Una disolución acuosa contiene 40% de $MgSO_4$ en peso a 93 °C y se enfría hasta 76 °C, luego hasta 60 °C y por último hasta 15 °C. ¿Cuál será la composición de los sólidos y soluciones presentes a las diferentes temperaturas? Si la solución fuera de 100 kg/min, ¿qué cantidad se obtendría en cada caso? ¿Qué recuperación de $MgSO_4$ se obtendría en cada caso?



Fuente: J.H. Perry. **Chemical Engineering Handbook.** Mc Graw Hill Co. Nueva York, N.Y., 1950.

Resultados

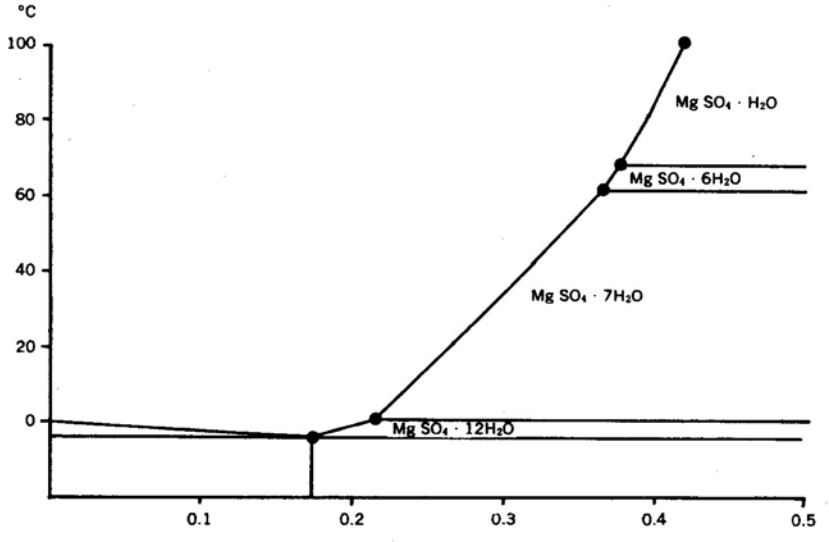
A 76 °C se obtienen 4 kg/h de cristales con 8.87% de recuperación. A 60 °C se obtienen 24 kg/h de cristales con 31.56% de recuperación. A 15 °C se obtienen 63.7 kg/h de cristales con 77.7% de recuperación.

Problema 6.26

Una solución que consiste en 30% de $MgSO_4$ y 70% de H_2O, y que está a 90 °C se enfría hasta 20 °C. Durante el enfriamiento, el 5% del agua total en el sistema se evapora. ¿Cuántos kg de cristales se obtienen por tonelada de mezcla inicial?

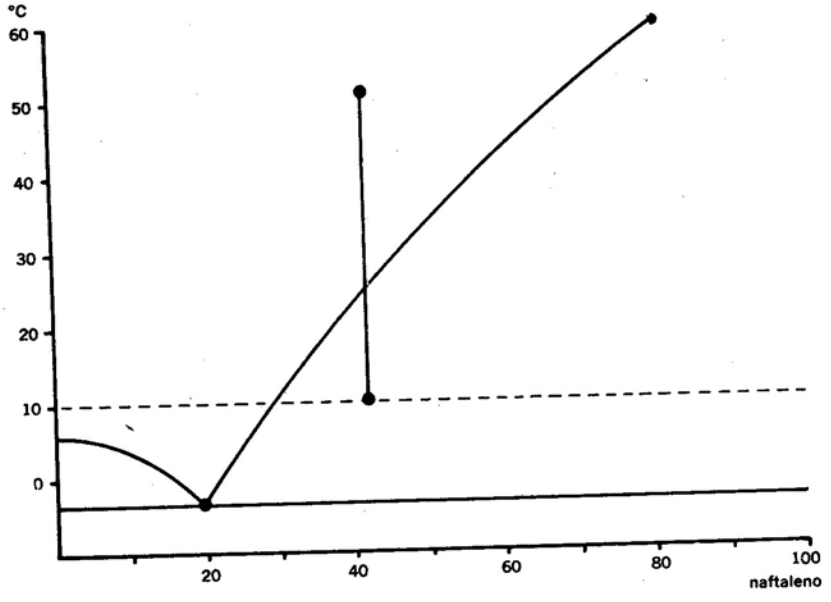
Resultado

Se obtienen 215 kg/h de cristales de $MgSO_4 \cdot 7\ H_2O$.



Problema 6.27

500 kg/h de una solución que contiene 40% de naftaleno y 60% de benceno a 50 °C se enfría hasta 10 °C. ¿Cuánto naftaleno cristaliza?



Fuente: Hougen, Watson y Ragatz. **Chemical Process Principles.** Tomo I. John Wiley. Nueva York, N.Y., 1954.

Resultado

Se cristalizan 83.3 kg/h.

Problema 6.28

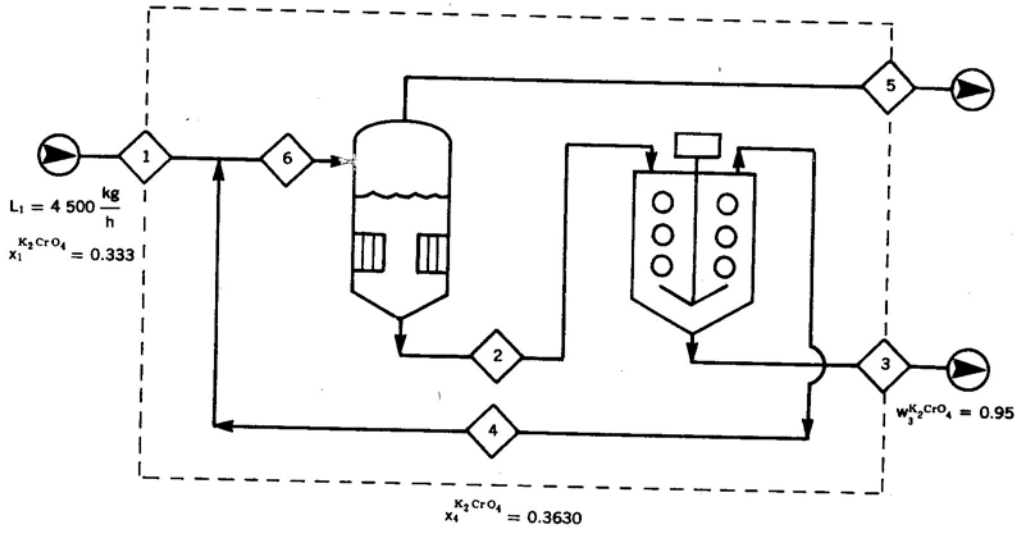
Una solución de sulfato de sodio está saturada a 60 °C. A esta temperatura la solubilidad es de 31.5 kg de Na_2SO_4 por 100 kg de solución. Si se enfrían 1 000 kg de esta disolución hasta 10 °C con solubilidad de 8 kg Na_2SO_4/ 100 kg de solución. ¿Cuál será la cantidad de $Na_2SO_4 \cdot 10\ H_2O$ formada?

Resultado

Se forman 651 kg/h de cristales.

Problema 6.29

El siguiente diagrama muestra el proceso para recuperar cromato de potasio en forma cristalina a partir de una solución acuosa de esta sal.



¿Cuál es la cantidad de agua removida en el evaporador en kg/h?

¿Cuánto se produce de K_2CrO_4 en forma de cristales en kg/h?

¿Cuál es la relación de recirculación a alimentación (kg recirculados/kg alimentados al proceso)?

¿A qué capacidad en kg/h debe diseñarse el cristalizador considerando un 8% de sobre diseño?

Resultados

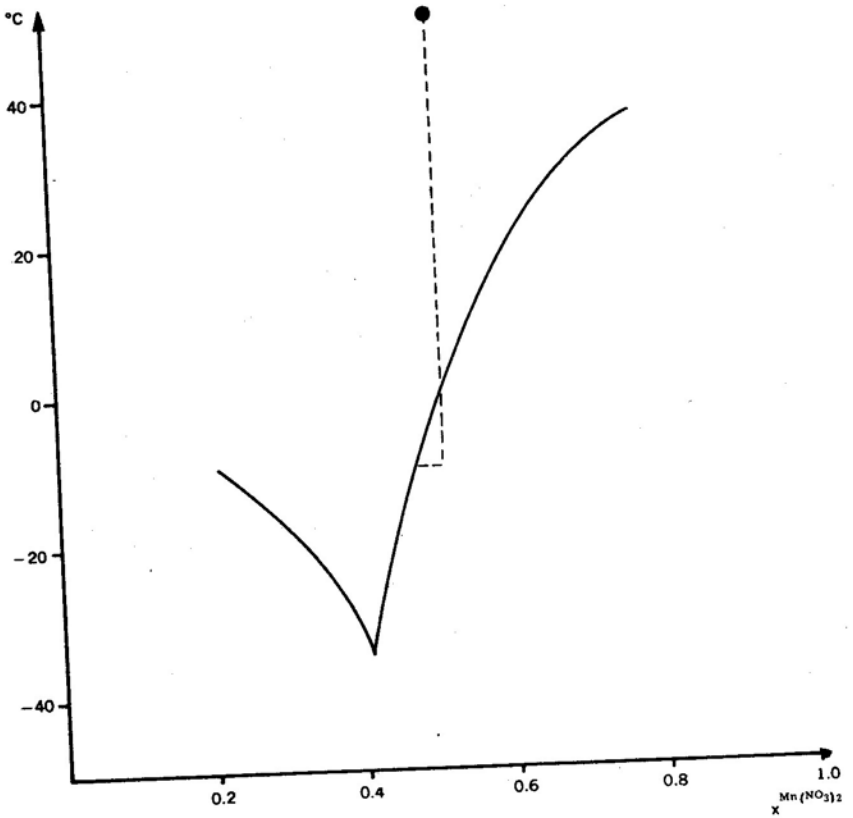
El agua evaporada es de 2 921.2 kg/h y se producen 1 578 kg/h de cristales. La relación es de 0.8156. El cristalizador se debe diseñar a 7 713 kg/h.

Problema 6.30

Si se quiere obtener hexahidrato puro a partir de 2 000 kg/h de una solución al 50% de Mn $(NO_3)_2$ a 50 °C y si se baja la temperatura hasta −10 °C. ¿Qué cantidad de cristales se obtendrían? ¿Qué recuperación del $Mn(NO_3)_2$ se obtendría?

Resultados

Se obtienen 405 kg/h de cristales y se recupera el 25% de Mn $(NO_3)_2$ entrante.


°C
40
20
0
−20
−40
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
$x_{Mn(NO_3)_2}$

CAPÍTULO 7

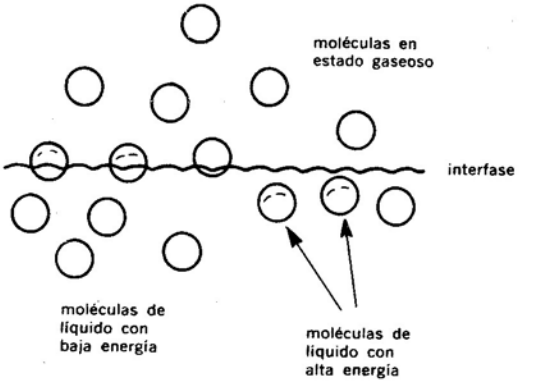
BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA EN LA OPERACIÓN UNITARIA DE DESTILACIÓN

OBJETIVOS

Al concluir el estudio de este capítulo el lector será capaz de: **a)** Calcular las presiones de vapor de las sustancias. **b)** Utilizar las presiones de vapor para calcular el equilibrio. **c)** Se presentará al lector la forma de efectuar balances de energía en la operación unitaria de destilación. **d)** Tras de leer y estudiar el capítulo, el lector estará capacitado para efectuar balances de materia y energía en procesos que involucran el uso de la destilación.

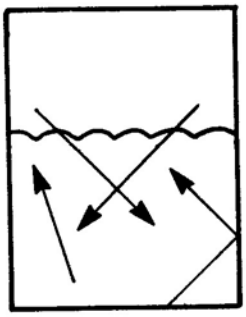
BREVE INTRODUCCION TEORICA

Las moléculas de un líquido están en movimiento, pero su movimiento toma la forma de vibración aunque ocasionalmente las moléculas que están cerca de la superficie del líquido vencen a las fuerzas de atracción y salen al espacio gaseoso.



Se llama vaporización al paso del estado líquido al gaseoso. La vaporización se puede producir a muy diversas temperaturas y presiones, y se debe a que las moléculas de un líquido que tienen energía cinética mayor que la promedio logran escapar del seno del líquido dando lugar a la formación de vapor.

Si se coloca un líquido en un recipiente cerrado y aislado térmicamente, se producirá este mismo fenómeno, pero desde el momento en que el espacio por encima del líquido se llena con moléculas de vapor se produce un flujo inverso al líquido, ya que las moléculas del vapor en su movimiento desordenado chocan contra la superficie del líquido y se condensan.



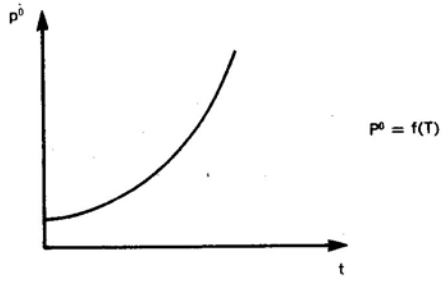
Si N_A = moles de líquido que se evaporan por unidad de tiempo y área.

$-N_A$ = moles del vapor que se condensan por unidad de tiempo y área.

Cuando $N_A > -N_A$ la concentración del vapor aumentará y la T del líquido descenderá. Así, poco a poco N_A se va haciendo igual a $-N_A$.

Cuando se ha alcanzado el equilibrio, el número de moléculas que salen del líquido (vaporizan) es igual al de las que entran (condensa) y la presión que existe en la fase gaseosa es la presión de vapor saturado a la temperatura de operación.

Un aumento en la temperatura hará crecer a N_A haciendo que se aumente la concentración en el vapor hasta que se alcance el equilibrio de nueva cuenta. La nueva presión de vapor será mayor que la anterior. La relación que existe entre presión de vapor y la temperatura toma la forma



Ecuación de Clausius-Clapeyron

Todas las ecuaciones para calcular la presión de vapor están derivadas de la ecuación de Clausius-Clapeyron. Esta ecuación, que se deduce fácilmente de la termodinámica, es:

$$\ln \frac{P_2^\circ}{P_1^\circ} = \frac{\Delta \tilde{H}}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

Ecuación de Antoine

Una de las correlaciones más usadas para obtener la presión de vapor de una sustancia es la ecuación de Antoine:

$$\ln P^\circ = A - \frac{B}{T + \theta}$$

en donde A, B, θ son características de cada sustancia. θ generalmente igual a la temperatura normal de ebullición.

Gráficas de Cox

Son gráficas en las que se representan el logaritmo de la presión de vapor de cada sustancia contra el logaritmo de la presión de vapor de una sustancia de referencia (generalmente agua) a la misma temperatura. Por conveniencia, las escalas de las abscisas en estas gráficas se cambian a T (correspondientes a la presión de vapor del agua graficada).

Presión de vapor de soluciones líquidas ideales

En 1887, Raoult descubrió que si se mezclan dos o más líquidos para formar una solución, la presión de vapor de cada uno desciende.

$$\tilde{P}_A = P_A^\circ \tilde{x}_A$$

$\widetilde{P}_A$ = Presión parcial del componennte A en la solución.

$\tilde{x}_A$ = Fracción mol de A.

P°_A = Presión de vapor del componente A puro a la temperatura de la solución.

Esto es comprensible, ya que sólo una porción $\tilde{x}_A$ de la superficie del líquido estará cubierta por A, y el número de moléculas de A que escapen será menor que si fuera sólo A.

Sin embargo, el número de moléculas que regresará al líquido no se afecta, ya que las moléculas del gas se pueden condensar en cualquier punto de la superficie líquida.

TEMPERATURA DE EBULLICION DE SOLUCIONES LIQUIDAS IDEALES

La temperatura de ebullición en una mezcla ideal de líquidos se alcanzará cuando la suma de las presiones parciales iguale a la presión total de operación.

$$P_T = P^\circ_A \tilde{x}_A + P^\circ_B \tilde{x}_B$$

La temperatura se obtiene por tanteos, seleccionando una temperatura, obteniendo la presión de vapor de los componentes puros y verificando que la suma de presiones parciales sea igual a la total.

EQUILIBRIO VAPOR-LIQUIDO

Se dice que una solución líquida está en equilibrio con sus vapores cuando las presiones parciales de sus componentes en fase líquida y vapor sean iguales.

$$\widetilde{P}_{AL} = \widetilde{P}_{AG}$$

$\widetilde{P}_{AL}$ = Presión parcial de A en la fase líquida.

$\widetilde{P}_{AG}$ = Presión parcial de A en la fase gaseosa.

Usando las leyes de Raoult y Dalton tendremos:

$P^\circ_A \tilde{x}_A = P_T \widetilde{y}_A$ $\widetilde{y}_A$ = Fracción mol de A en la fase gaseosa.

Presión de vapor de líquidos inmiscibles

Si los componentes de un sistema líquido-líquido son inmiscibles o casi inmiscibles, cada uno ejerce su propia presión de vapor, sin que ésta sea disminuida por la presencia del otro. La mezcla líquida así formada hervirá cuando la presión total equivalga a la presión de trabajo, y la composición del vapor será proporcional a la presión de vapor de cada componente a la temperatura de ebullición.

$$P_T = P_A^\circ + P_B^\circ$$

$$P_T \tilde{y}_A = P_A^\circ$$

La destilación es un proceso de separación que consiste en eliminar uno o más de los componentes de una mezcla volátil por medio de la transferencia simultánea de calor y masa.

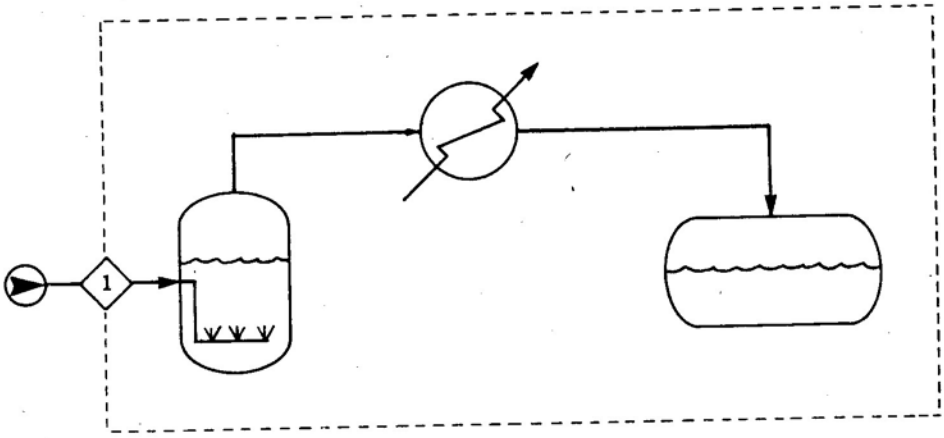
Para llevar a cabo la destilación se aprovecha la diferencia de volatilidades de los constituyentes de la mezcla, separando, o como se dice más frecuentemente, fraccionando estos constituyentes en función de su temperatura de ebullición.

La destilación se ha usado durante siglos para concentrar mezclas alcohólicas, para destilar aceites esenciales y para separar los componentes del petróleo.

Existen varios tipos de destilación, entre los que se cuentan:

Destilación con vapor

En ella se emplea vapor vivo para provocar el arrastre de la sustancia volátil que se desea concentrar; esta sustancia debe ser insoluble en el agua. Por este medio se abate la temperatura de ebullición y, así, aqueilos compuestos que pudieran descomponerse si se los llevara a su temperatura de ebullición se logran separar con éxito. Se usa principalmente para obtener esencias aromáticas

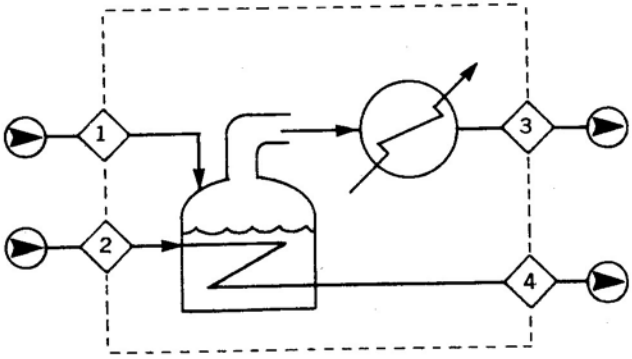


1 = vapor

Destilación diferencial

Es el método de destilación más antiguo que se conoce. En él se hace hervir el líquido que se va a destilar y el vapor generado se separa del líquido, condensándolo tan rápidamente como se genera.

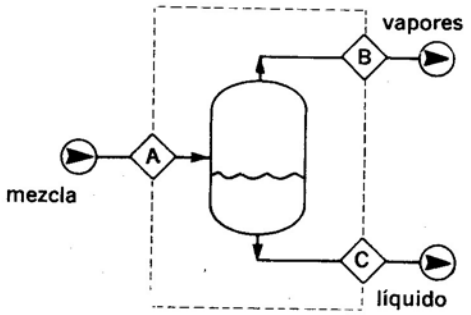
Los aparatos usados para este fin reciben el nombre de alambiques



1 = alimentación
2 = vapor de calentamiento
3 = destilado
4 = condensado

Destilación instantánea

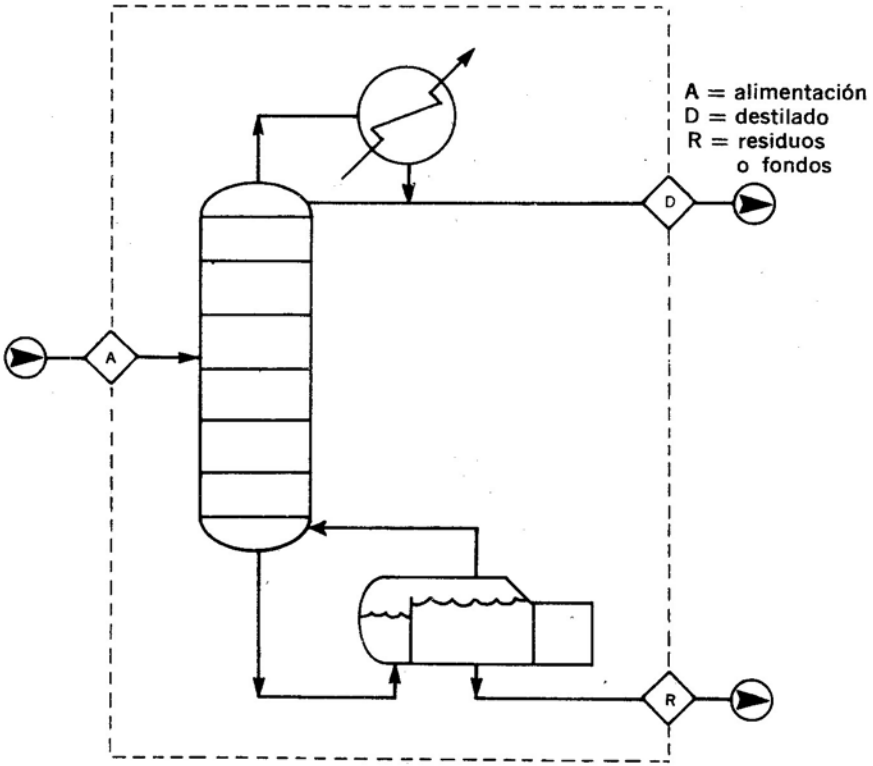
Implica la vaporización de una fracción del líquido, generalmente por calentamiento a alta presión, manteniendo al vapor y al líquido el tiempo necesario para que el vapor alcance el equilibrio con el líquido y separando ambos finalmente. Este método se usa, sobre todo, con mezclas de multicomponentes en la refinación del petróleo

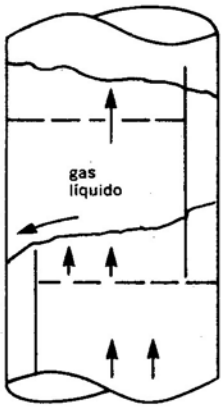


Rectificación o fraccionamiento

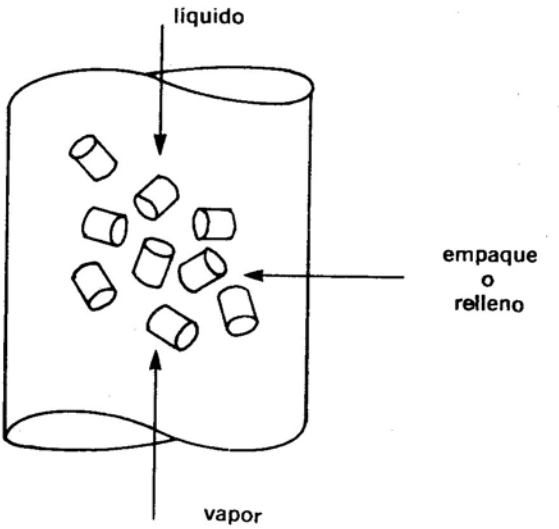
Es el método más empleado actualmente para separar los componentes de una mezcla líquida. Este método incluye el retorno de una parte del vapor condensado al equipo, de tal manera que el líquido que se regresa entra en contacto íntimo a contracorriente con los vapores que se dirigen al condensador. La palabra fraccionamiento se generó en la industria de la refinación del petróleo, ya que allí se "fracciona" el petróleo en sus componentes principales. El nombre de rectificación se emplea en la industria del alcohol. Este tipo de destilación es continua y permite manipular grandes cantidades de materiales, y el reflujo hace posible alcanzar purezas elevadas en los productos que se destilan.

Las columnas de rectificación son cilindros metálicos por los que pasan los vapores y los líquidos generados. Dentro de estas columnas se pueden encontrar platos con perforaciones, u otro tipo de sistema, que ponen en contacto íntimo al vapor con el líquido. Suelen ser comunes las llamadas columnas empacadas, que están rellenas de pequeñas piezas de cerámica que hacen el mismo trabajo que los platos.

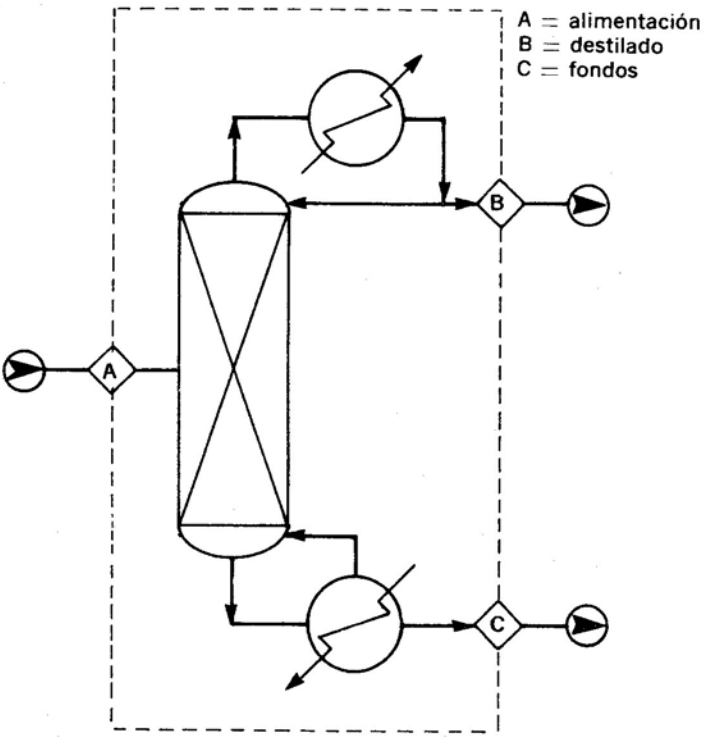




TORRE DE PLATOS
CON PERFORACIONES



corte de una torre empacada



columna empacada

La destilación se lleva a cabo proporcionando energía a una mezcla de varios líquidos, de los que se evaporan más rápidamente aquellos que tengan la presión de vapor más alta. A los vapores salientes de los equipos se les deberá eliminar el calor latente de evaporación para pasarlos a fase líquida, la que tendrá una mayor proporción de líquidos con la presión de vapor más alta que la que tenía el líquido original.

Para lograr la destilación se deberá proporcionar calor a la mezcla líquida, llevar ésta a la temperatura de ebullición y además proporcionar el calor latente para que pasen al estado gaseoso.

La temperatura de ebullición de las disoluciones líquidas ideales se alcanzarán cuando la suma de las presiones parciales iguale a la presión total de operación.

$$P_T = P^0_A \tilde{x}_A + P^0_B \tilde{x}_B$$

En donde $\tilde{x}_A$, fracción mol de A en la fase líquida.

En el equilibrio $\tilde{P}_{AL} = \tilde{P}_{AG}$

$$P^0_A \tilde{x}_A = P_T \tilde{y}_A$$

donde

$\tilde{y}_A$ = fracción mol de A en la fase gaseosa.

La temperatura de ebullición de una disolución recibe el nombre de temperatura de burbuja.

Por definición

$$\sum_1^n \tilde{y}_i = \sum_1^n \tilde{x}_i P^0_i / P_T$$

Para obtener el punto de burbuja se supone una temperatura; a esa temperatura se obtiene la presión de vapor de los componentes y se hace la suma indicada en la ecuación anterior; si es igual a 1, la temperatura hallada es la de burbuja; si no se continúan los tanteos. La composición de la primera burbuja formada estará dada por:

$$\tilde{y}_i = \tilde{x}_i P_i^0 / P_T$$

El punto de rocío es aquella temperatura a la cual se formará la primera gota de líquido si partimos de un vapor:

$$\sum_i^n \tilde{x}_i = 1 = \sum_i^n \tilde{y}_i P_T / P_i^0$$

Este punto se obtiene a partir de tanteos. La primera gota formada tendrá la composición dada por:

$$\tilde{x}_i = \tilde{y}_i P_T / P_i^0$$

Mezclas no ideales

Para aquellas mezclas en las que no se puede suponer la idealidad, o para el cálculo de mezclas multicomponentes, se suele usar el llamado coeficiente de distribución definido por:

$$K_i = \tilde{y}_i / \tilde{x}_i$$

Los valores de K para algún compuesto en particular son función de la temperatura, la presión y la composición de la mezcla.

Estos coeficientes pueden obtenerse en la gráfica del apéndice XIX.

El punto de rocío usando los coeficientes K, estará dado por:

$$\Sigma \tilde{y}_i / K_i = 1$$

y el de burbuja por:

$$\Sigma K_i \tilde{x}_i = 1$$

DIAGRAMAS DE EQUILIBRIO PARA MEZCLAS BINARIAS IDEALES

A partir de las leyes de Raoult y Dalton y usando las presiones de vapor, se pueden construir los diagramas de equilibrio vapor-líquido.

Estos son:

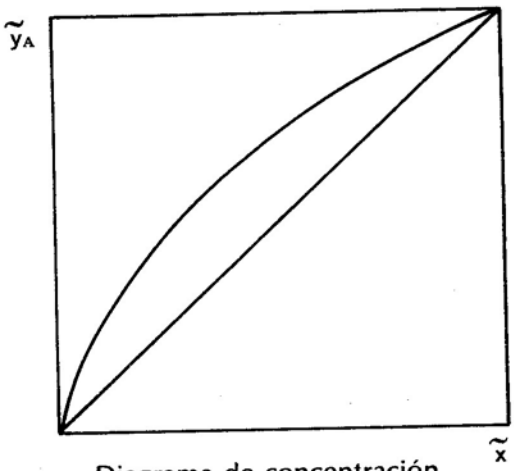


Diagrama de concentración

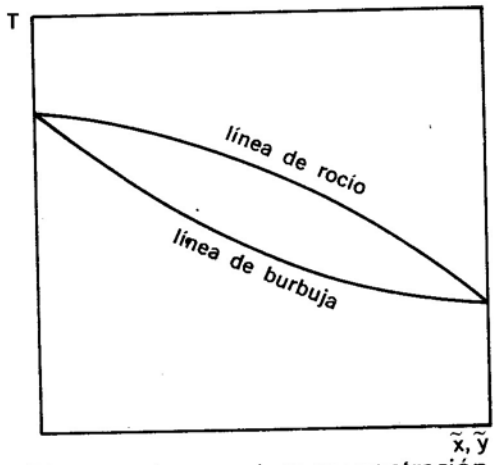


Diagrama temperatura-concentración

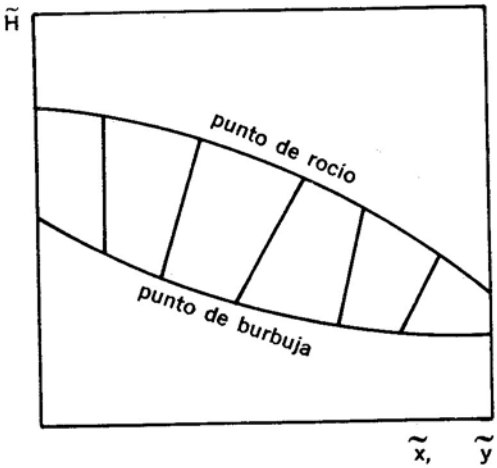


Diagrama entalpía-concentración

Los diagramas anteriores se utilizan para los cálculos de equipos de destilación que emplean mezclas binarias.

DIAGRAMAS DE ENTALPIA-CONCENTRACION

Ciertos cálculos en destilación requieren del conocimiento de la variación de las entalpías del líquido y del vapor con la composición, lo que es posible saber mediante un diagrama entalpía-concentración.

La construcción de este tipo de diagramas se hace tomando como base un estado de referencia, usualmente 0 °C a una presión determinada.

La línea de punto de burbuja se calcula mediante la ecuación

$$\tilde{H} = \tilde{x}_A [\tilde{C}p_{LA} (t_e - t_o)] + (1 - \tilde{x}_A) [\tilde{C}p_{LB} (t_e - t_o)] + \Delta H_m$$

en donde

$\tilde{x}_A$ = Fracción mol de A

$\tilde{C}p_{LA}$ = Capacidad calorífica molar de A

t_o = Temperatura base para el cálculo de entalpías

t_e = Temperatura de ebullición

ΔH_m = Entalpía de mezcla

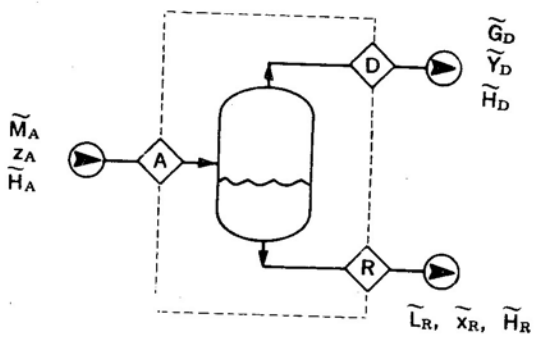
La línea de punto de rocío se calcula mediante la ecuación:

$$\tilde{H} = \tilde{y}_A [\tilde{C}p_{LA} (t_e - t_o) + \tilde{\lambda}_{A,\,te}] + (1 - \tilde{y}_A) [\tilde{C}p_{LB} (t_e - t_o) + \lambda_{B,\,te}] + \Delta H_m$$

Si los líquidos son ideales, $\Delta H_m = 0$

$\tilde{\lambda}_{A,\,te}$ = Calor latente de ebullición de A

BALANCES EN DESTILACION INSTANTANEA



$\tilde{G}_D$ = Moles de vapores/h

$\tilde{y}_D$ = Fracción mol del componente i en la corriente D

$\tilde{H}_R$ = Entalpía de la corriente de líquido que sale del recipiente, o residuo

Balances

$$\widetilde{M}_A = \widetilde{G}_D + \widetilde{L}_R \qquad \text{Total}$$

$$\widetilde{M}_A \tilde{z}^i_A = \widetilde{G}_D \tilde{y}^i_D + \widetilde{L}_R \tilde{x}^i_R \qquad \text{Parcial}$$

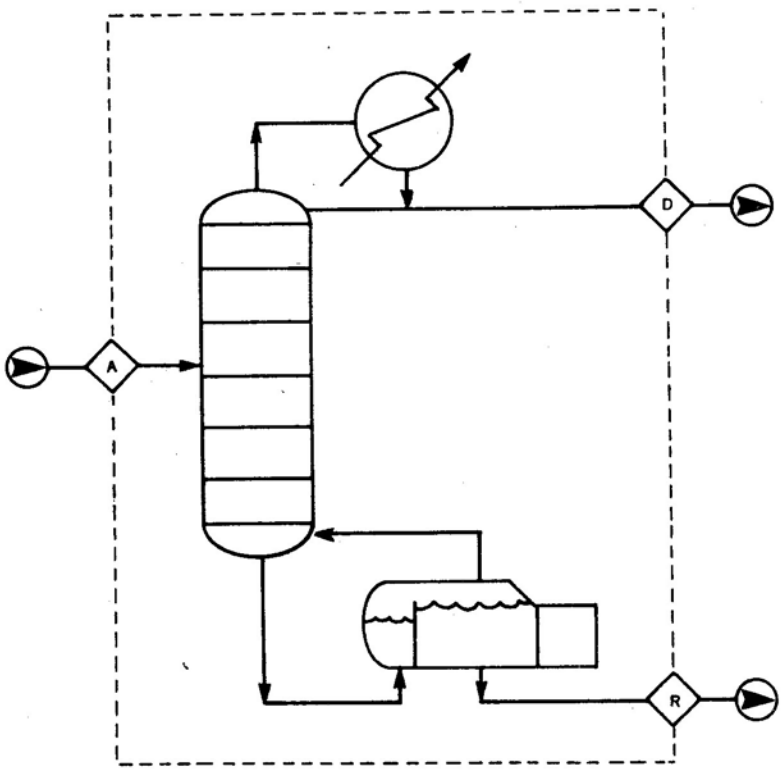
$$\widetilde{M}_A \widetilde{H}_A + Q = \widetilde{G}_D \widetilde{H}_D + \widetilde{L}_R \widetilde{H}_R \qquad \text{Entalpía}$$

BALANCES EN RECTIFICADORES

$$\widetilde{M}_A = \widetilde{L}_D + \widetilde{L}_R$$

$$\widetilde{M}_A \tilde{z}^i_A = \widetilde{L}_D \tilde{x}^i_D + \widetilde{L}_R \tilde{x}^i_R$$

$$\widetilde{M}_A \widetilde{H}_A + Q_R - Q_C = \widetilde{L}_R \widetilde{H}_R + \widetilde{L}_D \widetilde{H}_D$$



Q_C = calor eliminado en el condensador

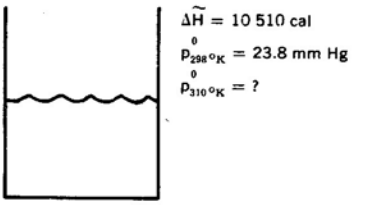
Q_R = calor transmitido al rehervidor

PROBLEMAS RESUELTOS

Problema 7.1

Si la presión de vapor del agua a 298 °K es de 23.8 mm de Hg, calcule la presión del vapor a 310 °K si $\Delta\tilde{H} = 10{,}510$ cal usando la ecuación de Clausius-Clapeyron.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Ecuación de Clausius-Clapeyron

$$\ln\ (P_2/P_1) = \Delta\tilde{H}_{vap}\ [(1/T_1) - (1/T_2)]/R$$

3. Cálculos

3.1 Presión de vapor a 310 °K

$$\ln\ (P_2/23.8) = 10510\ [(1/298) - (1/310)]/(1.98)$$

$$P_2/23.8 = 1.9853 \qquad \therefore\quad P_2 = 47.25\ \text{mm Hg}$$

4. Resultado

De acuerdo con la ecuación, la presión de vapor será de 47.25 mm de Hg a 310 °K.

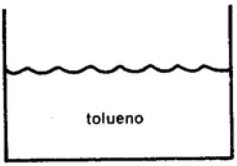
De tablas, la presión es de 55.2 mm Hg; la diferencia se debe a que consideramos $\Delta\tilde{H}$vap constante. (Ver apéndice VII).

Problema 7.2

Obtenga las constantes de Antoine para el tolueno a partir de los datos siguientes de presión de vapor:

$$P^0_{31.8\,°C} = 40\ \text{mm Hg} \qquad P^0_{40.3\,°C} = 60\ \text{mm de Hg}$$

1 Traducción



2. Planteamiento

Ecuación de Antoine

$$\log P^0 = A - \frac{B}{(T + \theta)} \qquad \therefore \quad A = \log P^0 + \frac{B}{(T + \theta)}$$

$$B = \{\log (P^0_1/P^0_2) \; |(T_1 + \theta) \; (T_2 + \theta)|\}/(T_1 - T_2)$$

Como hay tres incógnitas, se fija una, por ejemplo $\theta = 230$ °C.

3. Cálculos

Constantes de Antoine

$$B = \frac{|\log \frac{60}{40}| \; |(273 + 31.8) + 230)| \; |273 + 40.3 + 230|}{(273 + 40.3) - (273 + 31.8)} = 6019.31$$

$$A = \log 40 + \frac{6019.31}{(304.8 + 230)} = 12.857$$

4. **Resultado**

La ecuación de Antoine para el tolueno es:

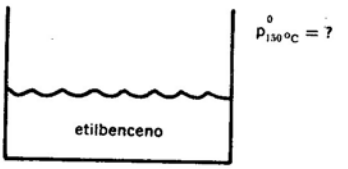
$$\log P^0 = 12.857 - \frac{6019.31}{(T + 230)}$$

En donde P^0 está en mm de Hg y T en °K

Problema 7.3

Obtenga la presión de vapor del etil benceno a 150 °C.

1. Traducción



2. Planteamiento

Ecuación de Antoine

$$\log P^0 = A - \frac{B}{(\theta + T)}$$

3. Cálculos

3.1 Constantes

Del apéndice VIII, los valores de las constantes

$A = 6.87041$ $B = 1\,384.036$ $\theta = 215.128$

3.2 Presión de vapor

$$\log P^0 = 6.87041 - [(1384.036)/(215.128 + 150)]$$

$$P^0 = 1\,201.9 \text{ mm de Hg}$$

4. **Resultado**

La presión de vapor a 150 °C es de 1 201.9 mm Hg

Problema 7.4

Desarrollar las ecuaciones que llevan al uso de las gráficas de Cox.

1. Planteamiento

A partir de la ecuación de Clausius-Clapeyron y aplicándola a una sustancia de la que se conoce la relación P^0 y T, tendremos (ejemplo agua)

$$d \ln P^0_{H_2O} = \Delta\tilde{H}_{agua}\, d T/(RT^2)$$

Dividiendo esto entre una sustancia a la que se le desconoce la relación P^0 y T

$$d \ln P^0_x/(d \ln P^0_{H_2O}) = \Delta\tilde{H}_x/\Delta\tilde{H}_{H_2O} \text{ (a la misma T)}$$

Integrando

$$\ln P^0_x = \frac{\Delta\tilde{H}_x}{\Delta\tilde{H}_{H_2O}} + \ln P^0_{H_2O} + C$$

Esta ecuación sugiere que se obtendrá una línea recta si se grafica el logaritmo de P^0_x vs el log $P^0_{H_2O}$, en donde para cada punto se toman las presiones de las dos sustancias a la misma temperatura.

Othmer demostró la utilidad de este método mostrando que tales líneas son casi rectas sobre grandes rangos de presión debido al hecho de que aunque $\Delta\tilde{H}_{H_2O}$ y $\Delta\tilde{H}_x$ varían con la temperatura, su relación es casi constante.

En gráficas de este tipo se grafican el log P^0_x de cada sustancia contra el log P^0 del agua a una misma temperatura. Por conveniencia, las escalas de abscisas de estas gráficas se cambian a T (correspondientes a la presión de vapor del agua graficado). Estas gráficas son las llamadas de Cox y pueden ser representadas también en nomogramas.

Problema 7.5

A partir de los siguientes datos construya la gráfica de Cox para el tolueno.

Agua	Tolueno	
P^o_{vapor}	$P^o_{vapor\ mm\ Hg}$	Temperatura °C
149.4	139.5	60
233.7	202.4	70
355.1	289.4	80
525.8	404.6	90
760.0	557.2	100

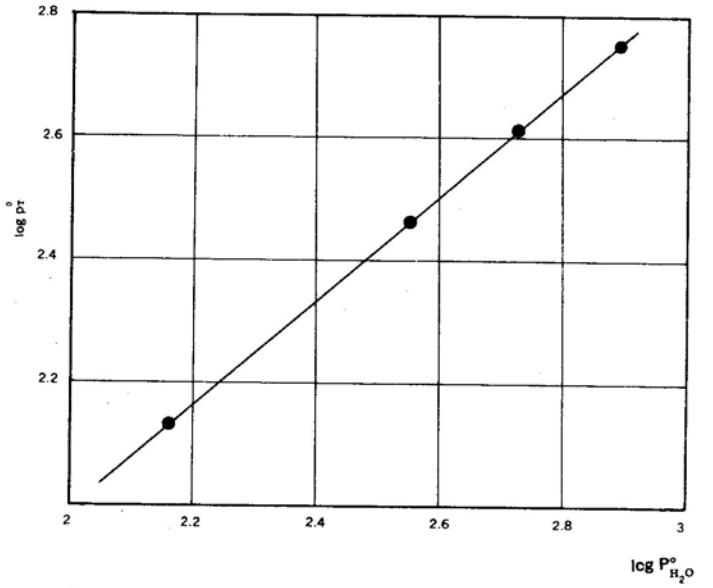
1. Planteamiento

1.1 Discusión

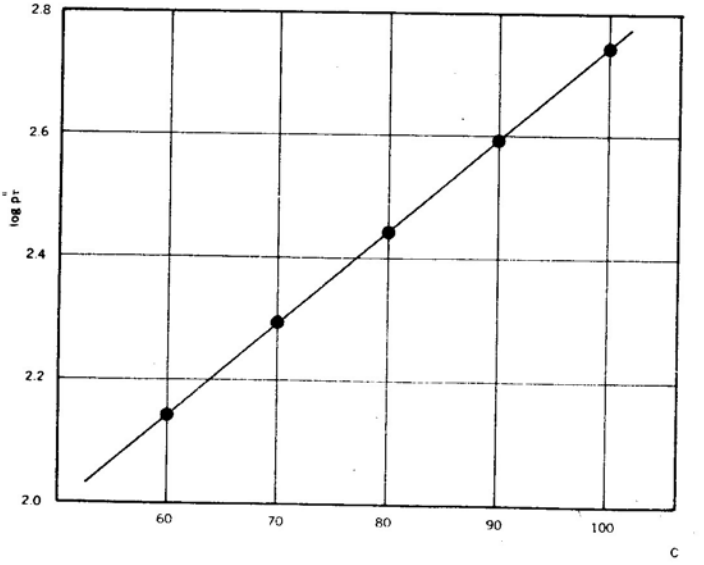
En las gráficas de Cox se debe presentar el logaritmo de la presión de vapor de una sustancia contra el logaritmo de la presión de vapor de la sustancia de referencia, y esto debe dar una línea recta.

2. Cálculos

T	log P^o_T	log P^o agua
60	2.1445	2.1743
70	2.3062	2.3886
80	2.4614	2.5505
90	2.607	2.7208
100	2.746	2.8808



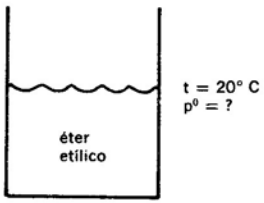
Se ve que da una línea recta. Ahora bien, en las gráficas de Cox, se grafica el log de la presión de vapor de la sustancia contra la T. Para la temperatura, se sustituye la presión de vapor del agua por su temperatura.



Problema 7.6

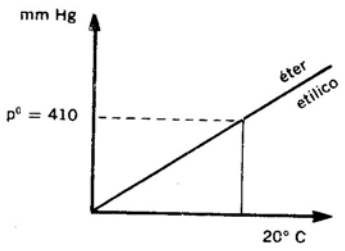
Usando las gráficas de Cox, obtenga la presión de vapor del éter etílico a 20 °C.

1. Traducción



2. Cálculos

2.1 Del apéndice VI



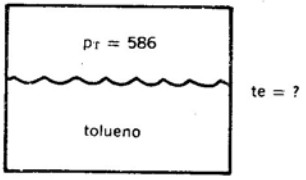
3. **Resultado**

De acuerdo con la gráfica de Cox, la presión de vapor del éter etílico es de alrededor de 410 mm de Hg.

Problema 7.7

Si la presión de trabajo es de 586 mm de Hg, ¿a qué temperatura hervirá el tolueno puro? Use la ecuación de Antoine desarrollada en el problema 7.3.

1. Traducción



$$\log P^{o} = 12.857 - \frac{6019.31}{T + 230}$$

2. Planteamiento

2.1 Temperatura de ebullición

De acuerdo con la ecuación obtenida,

$$\text{Log } P^0 = 12.857 - 6019.31/(T + 230)$$

3. Cálculos

3.1 Temperatura de ebullición

$$\log 586 = 12.857 - 6019.31/(T + 230) \qquad T = 366.6\ ^\circ K$$

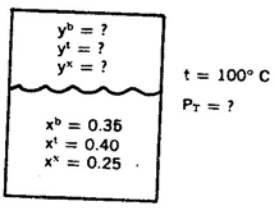
4. **Resultado**

La temperatura de ebullición a 586 mm de Hg es de 366.6 °K, 93.6 °C

Problema 7.8

Calcule la presión total y la composición de los vapores que están en contacto con una solución a 100 °C, que contiene 35% de benceno, 40% de tolueno y 25% de **orto**xileno en peso.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Los vapores de las sustancias deben estar en equilibrio con el líquido.

2.2 Ley de Raoult

$$\tilde{P}_B = P^0_B \tilde{x}_B \qquad P_T = \tilde{P}_B + \tilde{P}_{To} + \tilde{P}_x$$

2.3 Composiciones en el líquido

$$P_T \tilde{y}_B = P^0_B \tilde{x}_B$$

3. Cálculos

3.1 Presiones de vapor a 100 °C

$$P^0_B = 1\,340 \text{ mm de Hg}$$

$$P^0_{To} = 560$$

$$P^0_X = 210$$

3.2 Fracciones mol en el líquido

$$\tilde{x}_B = (x_B/PM_B)/[(x_B/PM_B) + x_{To}/(PM_{To}) + (x_x/PM_x)] =$$

$$= (35/78)/[(35/78) + (40/92) + (25/106)] = 0.4$$

$$\tilde{x}_{To} = 0.388 \qquad \tilde{x}_x = 0.2106$$

3.3 Presión total

$$\tilde{P}_B = 1\,340\,(0.4) = 536;\ \tilde{P}_{To} = 560\,(0.388) = 217.28;\ \tilde{P}_x = 210\,(0.2106) = 44.22$$

$$P_T = 536 + 217.28 + 44.22 = 797.5 \text{ mm de Hg}$$

3.4 Fracciones mol en la fase gaseosa

$$\tilde{y}_B = \frac{P^0_B \tilde{x}_B}{P_T} = \frac{\tilde{P}_B}{P_T} = \frac{536}{797.5} = 0.673$$

$$\tilde{y}_T = 217.28/797.5 = 0.272$$

$$\tilde{y}_x = 44.22/797.5 = 0.055$$

4. **Resultados**

La presión total es de 797.5 milímetros de mercurio.

La composición molar de los vapores es 67.3% de benceno, 27.2% de tolueno y 5.5% de xileno. Nótese que los vapores son más ricos en el benceno que en el líquido de que provino.

Problema 7.9

La presión de vapor del benceno y del tolueno están dadas por

$$\log_{10} P^0 = A - \frac{B}{(\theta + T)}$$

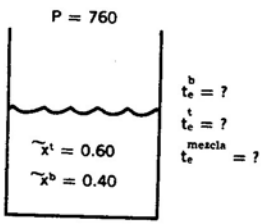
P^0 = presión de vapor en mm Hg
A, B, θ = constantes de Antoine
T = °C

	A	B	θ
Benceno	7.42912	1628.32	279.56
Tolueno	6.95334	1343.943	219.38

A partir de estos datos, determine el punto normal de ebullición del tolueno y el benceno puros.

¿Cuál será el punto normal de ebullición de una mezcla del 40% de benceno y 60% de tolueno en mol?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Puntos de ebullición

Usando las ecuaciones de Antoine con P^0 = 760 mm de Hg.

2.2 Punto de ebullición de la mezcla

Por ley de Raoult

$$P_T = P^0_B \tilde{x}_B + P^0_{To} \tilde{x}_{To}$$

La temperatura de ebullición deberá estar entre la de los dos compuestos puros.

3. Cálculos

3.1 Temperatura de ebullición del tolueno

$$\log_{10} 760 = 6.95334 - \frac{1343.943}{(219.38 + t)}$$

$$t = 110.6\ ^\circ C$$

Del benceno

$$\log_{10} 760 = 7.42912 - \frac{1628.32}{(279.56 + t)} \quad \therefore t = 78.44\ ^\circ C$$

3.2 Temperatura de ebullición de la mezcla

Tanteo a 90 °C $P^0_{To} = 406.7$ P^0_B 1 054.42

$$P_T = 406.7\ (0.6) + 1\ 054.42\ (0.4) = 665.78$$

Tanteo a 95 °C $P^0_{To} = 476.91$ $P^0_B = 1\ 207.34$

$$P_T = 476.91\ (0.6) + 1207.34\ (0.4) = 769$$

4. **Resultados**

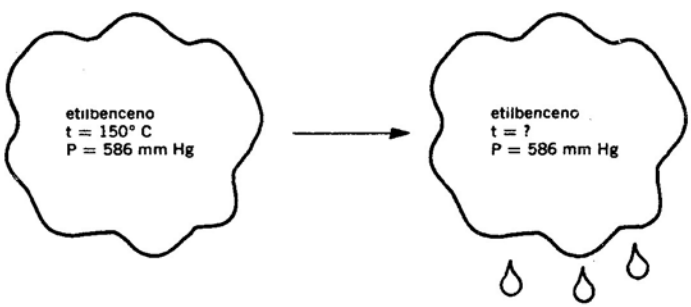
La temperatura de ebullición normal del tolueno es de 110.6 °C y la del benceno 78.44 °C.

La temperatura de ebullición normal de una mezcla de 60% de tolueno y 40% de benceno es de alrededor de 95 °C.

Problema 7.10

Se tienen unos vapores de etilbenceno a 150 °C y a una presión de 586 mm de Hg. Si se enfría a presión constante, ¿cuál será la temperatura de rocío, o sea, aquella a la que se forma la primera gota de líquido?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Temperatura de rocío

A partir de la ecuación de Antoine

$$\log P^0 = 6.87041 - \frac{1\,384.036}{(215.128 + T)}$$

P^0 en mm Hg y T en °C

3. Cálculos

3.1 Temperatura de rocío

$$\log 586 = 6.87041 - \frac{1\,384.036}{(215.128 + T)}$$

$$T = 122.23\ ^\circ C$$

4. **Resultado**

Las primeras gotas se forman a los 122.23 °C.

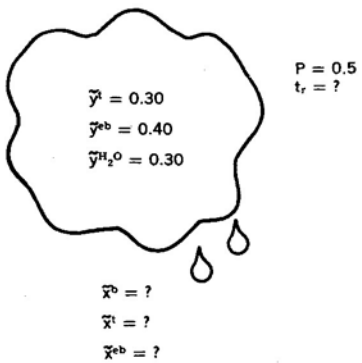
Problema 7.11

Si se tuviera una mezcla gaseosa de etilbenceno, tolueno y agua a 0.5 atm, ¿a qué temperatura se formaría la primera gota y cuál sería su composición, si la composición de los vapores es de 30% de tolueno, 40% etilbenceno y 30% de agua en mol?

Datos

	Presión de vapor en mm de Hg		
Temperatura °C	Etilbenceno	Tolueno	Agua
70	113	202.4	233.7
80	160	289.4	355.1
90	233.1	404.6	525.8
100	307	557.2	760

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

La primera gota se obtendrá al ir bajando la temperatura poco a poco y llegar a la de rocío, en donde se forma la primera gota. La composición de la primera gota debe dar

$$\Sigma \tilde{x} = 1$$

2.2 Punto de rocío

En el gas

$$P = \tilde{P}_{To} + \tilde{P}_{eb} + \tilde{P}_{H_2O}$$

En el equilibrio

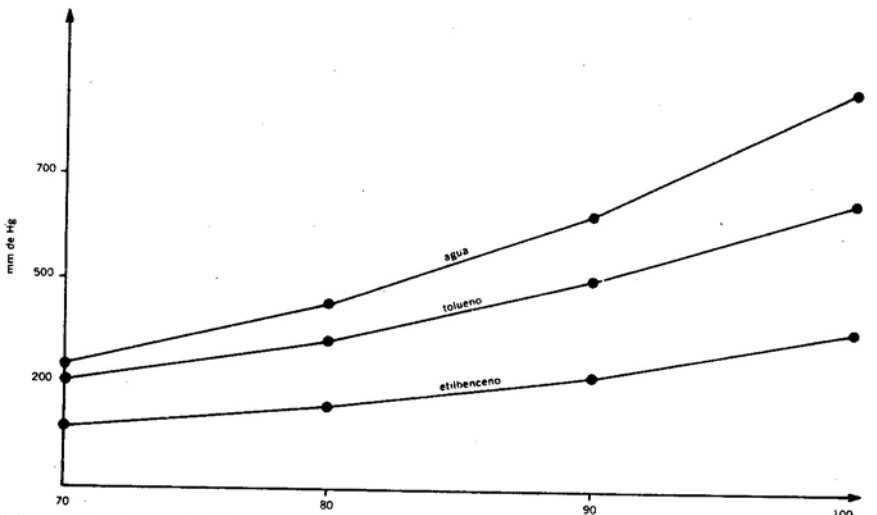
$$P\tilde{y}_i = P_i^0 \tilde{x}_i \qquad \Sigma \tilde{x}_i = 1$$

$$(P/P^o_{To})\ \tilde{y}_{To} + (P/P^o_{eb})\ \tilde{y}_{eb} + (P/P^o_{H_2O})\ \tilde{y}_{H_2O} = 1$$

3. Cálculos

3.1 Temperatura de rocío

Los datos de presión se grafican para obtener interpolaciones.



Primer tanteo 90 °C

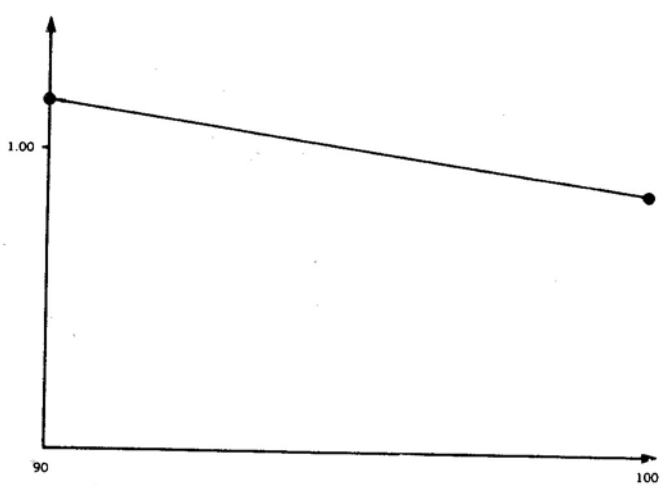
$$P^0_{eb} = 160 \qquad P^0_{To} = 289.4 \qquad P^0_{H_2O} = 355.1$$

$$\frac{380}{409.6}(0.3) + \frac{380}{223.1}(0.4) + \frac{380}{525.8}(0.3) = 1.1764$$

Segundo tanteo 100 °C

$$\frac{380}{557.2}(0.3) + \frac{380}{307}(0.4) + \frac{380}{760}(0.3) = 0.8495$$

Para el tercer tanteo haremos una gráfica:



De la gráfica tercer tanteo 95 °C

Presiones de vapor (interpolando)

$$P^0_{eb} = 265 \qquad P^0_{To} = 475 \qquad P^0_{H_2O} = 640$$

$$\frac{380}{475}(0.3) + \frac{380}{265}(0.4) + \frac{380}{640}(0.3) = 0.9916$$

3.2 Composición de la primera gota

$$\tilde{x}_{H_2O} = 0.1781$$

$$\tilde{x}_{eb} = 0.5735$$

$$\tilde{x}_{To} = 0.24$$

En este caso se formarán dos fases líquidas.

En la fase acuosa

$$\tilde{x}_{H_2O} = 1$$

En la fase hidrocarburos

$$0.5735 + 0.24 = 0.81 \text{ moles}$$

$$\tilde{x}_{To} = 0.295$$

$$\tilde{x}_{eb} = 0.705$$

4. **Resultados**

La primera gota se formará a los 95 °C.

La composición global de la gota sería de 17.81% de H_2O, 57.35% etilbenceno y 24% de tolueno.

Se formarán dos capas. En la acuosa el agua estará sola. En la de hidrocarburos el etilbenceno estará en un 70.5% y el tolueno en un 29.5%.

Problema 7.12

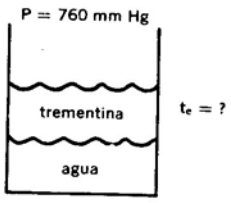
¿A qué temperatura hervirá una solución que contiene turpentina y agua, si la presión de trabajo es de 760 mm de Hg? La turpentina y el agua son inmiscibles:

Datos

P vapor de la turpentina mm Hg	T °C
26.5	60
33.6	65.5
41.8	71
52.2	76.6
66.1	82.2
82.2	87.7
101.8	93.3
125.1	98.8
153.0	104.4

Fuente: Brown G.G, M. Souders, **Ind. Eng. Chem.** 27:383 (1935).

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Como el agua y la turpentina no son miscibles, cada cual ejerce su presión de vapor, como si el otro no estuviera.

2.2 Presión total

$$P_T = P^0_{H_2O} + P^0_{Turp}$$

La ecuación anterior se tiene que resolver por tanteos.

3. Cálculos

3.1 Temperatura de ebullición

Primer tanteo: 82.2 °C

$$P^0_{Tur} = 66.1 \text{ mm Hg} \qquad P^0_{H_2O} = 388.3$$

$$P_T = 388.3 + 66.1 = 454.4$$

Segundo tanteo: 93.3 °C

$$P^0_{Tur} = 101.8 \qquad P^0_{H_2O} = 595.9$$

$$P_T = 697.7 \text{ mm Hg}$$

Tercer tanteo: 95.0 °C

$$P^0_{H_2O} = 651 \qquad P^0_{Tur} = 109$$

$$P_T = 760 \text{ mm Hg}$$

4. **Resultado**

La temperatura de ebullición es de 95 °C.

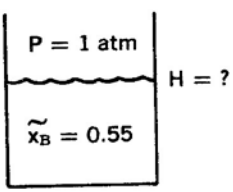
Se pueden purificar sustancias de alto punto de ebullición por medio de arrastre con vapor. Si la turpentina se destilara a su punto normal de ebullición, correría el riesgo de descomponerse, por ser éste muy alto.

Problema 7.13

Una mezcla líquida de benceno y tolueno tiene una composición de 55 por 100 en mol de benceno y está a su punto de ebullición a 1 atm.

¿Cuál es su entalpía molar?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Para encontrar la entalpía es preciso hallar primero la temperatura de ebullición, o temperatura de burbuja.

2.2 Temperatura de burbuja

$$1 = \Sigma \tilde{x}_i P_i / P_T = (\tilde{x}_B P^0_B + \tilde{x}_T P^0_T)/P_T$$

2.3 Entalpía del líquido

$$\tilde{H}_L = \tilde{x}_A \, \tilde{C}p_A \, (t_e - t_o) + (1 - \tilde{x}_A) \, \tilde{C}p_B \, (t_e - t_o) + \Delta H_m$$

3. Cálculos

3.1 Temperatura de burbuja

$$\log_{10} P^0_{Ben} = 6.90565 - 1\,211.033/(220.79 + t)$$
$$\log_{10} P^0_{Tol} = 6.95464 - 1\,344.8/(219.482 + t)$$

Primer tanteo $T = 90\ ^\circ C$

$$P^0_B = 1\,021 \text{ mm Hg} \qquad P^0_T = 406 \text{ mm Hg}$$
$$\therefore \quad [0.55\ (1\,021) + 0.45\ (406)]/760 = 0.9792$$

Segundo tanteo $T = 95\ ^\circ C$

$$P^0_B = 1\,176 \qquad P^0_T = 476.8$$

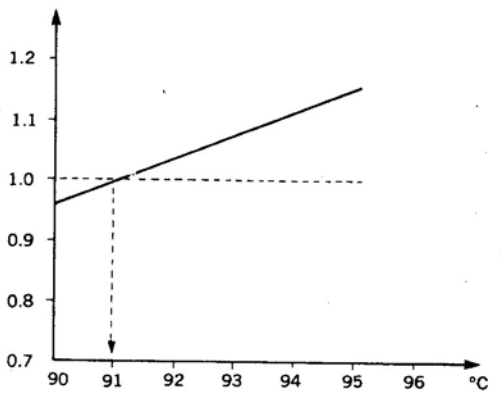
$$[0.55\ (1\,176) + 0.45\ (476.8)]/760 = 1.1322$$

Para el siguiente tanteo es mejor usar una gráfica

$$T = 91\ ^\circ C$$

$$P^0_B = 1\,050 \qquad P^0_T = 420$$

$$[0.55\ (1\,050) + 420\ (0.45)]/760 = 1.009$$



Tomaremos esta temperatura como punto de ebullición.

3.2 Capacidad calorífica a la temperatura de ebullición

$$Cp_B = 0.43 \text{ kcal/(kg °C)} \qquad Cp_T = 0.46 \text{ kcal/(kg °C)}$$

3.3 Entalpía

$$\Delta H_m = 0 \qquad \text{Mezcla ideal}$$

$$\widetilde{H} = 0.55\ (0.43)\ (91 - 0)\ (78) + 0.45\ (0.46)\ (91 - 0)\ 92$$

$$\widetilde{H} = 3\,411 \text{ kcal/kg mol}$$

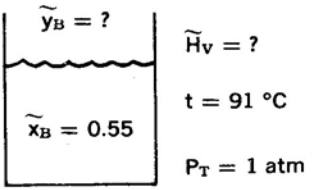
4. **Resultado**

La entalpía molar es de 3 411 kcal/kg mol.

Problema 7.14

¿Cuál sería la entalpía de los vapores resultantes de la mezcla anterior?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Para calcular la entalpía de los vapores se deberá obtener la composición de éstos por medio del equilibrio.

2.2 Composición de los vapores

$$\widetilde{P}^0_{BL} = \widetilde{P}^0_{BV}$$

$$P^0_B\, \tilde{x}_B = P_T\, \tilde{y}_B$$

2.3 Entalpía de los vapores

$$\tilde{H}_V = \tilde{y}_B [(\tilde{C}p_B)(t_e - t_o) + \tilde{\lambda}_B] + (1 - \tilde{y}_B) [(\tilde{C}p_T)(t_e - t_o) + \tilde{\lambda}_T]$$

3. Cálculos

3.1 Composición de los vapores

$$1\,050\ (0.55) = 760\ (\tilde{y}_B)$$

$$\tilde{y}_B = 0.759 \qquad \tilde{y}_T = 0.241$$

3.2 Calores latentes

$$\lambda_B = 90 \text{ kcal/kg} \qquad \lambda = 92 \text{ kcal/kg}$$

3.3 Entalpía del vapor

$$\tilde{H}_V = 0.759\ [0.43\ (91 - 0) + 90]\ 78 + 0.241\ [0.46\ (91 - 0) + 92]\ 92$$

$$\tilde{H}_V = 10\,648.3 \text{ kcal/kg mol}$$

4. **Resultado**

La entalpía de los vapores es de 10 648.5 kcal/kg mol.

Problema 7.15

Calcule el punto de rocío y el de burbuja a 13.6 atm para una mezcla multicomponente que contiene 8 por 100 de etano, 22 por 100 propano, 53 por 100 de butano normal y 17 por 100 de pentano normal en mol. Use el diagrama de K.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Temperatura de burbuja

$$K = \tilde{y}/\tilde{x}$$

$$\Sigma K_i \tilde{x}_i = 1$$

Se resuelve por tanteos.

2.2 Temperatura de rocío

$$\Sigma \tilde{y}_i / K_i = 1$$

Esta ecuación se resuelve por tanteos.

3. Cálculos

3.1 Temperatura de burbuja

Componente	$\tilde{z}$	T = 38 °C		T = 66 °C		T = 65 °C	
		K	$K\tilde{z}$	K	$K\tilde{z}$	K	$K\tilde{z}$
C_2	0.08	2.7	0.216	3.92	0.314	3.91	0.313
C_3	0.22	0.945	0.208	1.52	0.334	1.5	0.33
n-C_4	0.53	0.339	0.180	0.605	0.321	0.597	0.317
n-C_5	0.17	0.111	0.019	0.041	0.041	0.238	0.04
			0.623		1.010		1.000

3.2. Temperatura de rocío

Componente	$\tilde{z}$	T = 93 °C		T = 96 °C	
		K	$\tilde{z}/K$	K	$\tilde{z}/K$
C_2	0.08	5.5	0.015	5.6	0.014
C_3	0.22	2.16	0.102	2.24	0.098
n-C_4	0.53	0.96	0.552	1.01	0.525
n-C_5	0.17	0.45	0.378	0.47	0.362
			1.047		0.999

4. **Resultados**

La temperatura de burbuja es de 65 °C.

La temperatura de rocío es de 96 °C.

Problema 7.16

Obtenga una ecuación para calcular la composición de la mezcla de dos líquidos A y B que están en equilibrio con sus vapores. La ecuación debe poder resolverse sin tanteos.

1. Planteamiento

1.1 Ecuación deseada

A partir de la ley de Raoult

$$P_T = \tilde{P}_A + \tilde{P}_B = P^0_A \tilde{x}_A + P^0_B \tilde{x}_B$$

y en el equilibrio

$$P^0_A \tilde{x}_A = P_T \tilde{y}_A$$

pero

$$\tilde{x}_A + \tilde{x}_B = 1$$

$$\therefore\ P_T = P^0_A \tilde{x}_A + P^0_B (1 - \tilde{x}_A) = P^0_A \tilde{x}_A + P^0_B - P^0_B \tilde{x}_A$$

$$\tilde{x}_A = (P_T - P^0_B)/(P^0_A - P^0_B)$$

$$\tilde{y}_A = \tilde{P}_A/P_T = P^0_A \tilde{x}_A/P_T$$

2. **Resultado**

Las ecuaciones anteriores nos darán la composición $\tilde{x}$ e $\tilde{y}$ para una mezcla binaria. Para su cálculo, sólo se requieren los valores de las presiones de vapor a cada temperatura.

Problema 7.17

Calcular y graficar el diagrama temperatura-concentracion a presión constante para una mezcla de **n**-heptano **n**-octano, suponiendo que forman una solución ideal. Sus puntos de ebullición a 1 atm son, para **n**-heptano, 98.4 °C, y para **n**-octano 125.6 °C. Sus presiones de vapor en función de la temperatura están en la siguiente tabla

t °C	mm de Hg	
	$P^{\circ}_{n\text{-hept.}}$	$P^{\circ}_{n\text{-oct.}}$
98.4	760	333
105.0	940	417
110.0	1 050	484
115.0	1 200	561
120.0	1 350	650
125.6	1 540	760

1. Planteamiento

1.1 Discusión

Al conocer la presión total, las presiones de vapor a diferentes temperat
ras y haberse considerado sistema ideal, podemos usar las ecuaciones de
arrolladas con anterioridad.

1.2 Cálculo de la composición del líquido

Aplicando la ecuación

$$\tilde{x}_{n\text{-hep}} = \left(P_T - P^{\circ}_{n\text{-oct}}\right)/\left(P^{\circ}_{n\text{-hep}} - P^{\circ}_{n\text{-oct}}\right)$$

1.3 Cálculo de la composición en el vapor

$$\tilde{y}_{n\text{-hept}} = P^{\circ}_{n\text{-hep}}\tilde{x}_{n\text{-hep}}/P_T$$

2. Cálculos

Debido a que los cálculos son repetitivos, se hará un solo cálculo para
105.0 °C, y los demás datos se tabularán.

2.1 Cálculo de la composición del líquido; temperatura a 105 °C.

$$\tilde{x}_{n\text{-hept}} = (760 - 417)/(940 - 417) = 0.655$$

2.2 Cálculo de la composición del vapor; temperatura a 105 °C

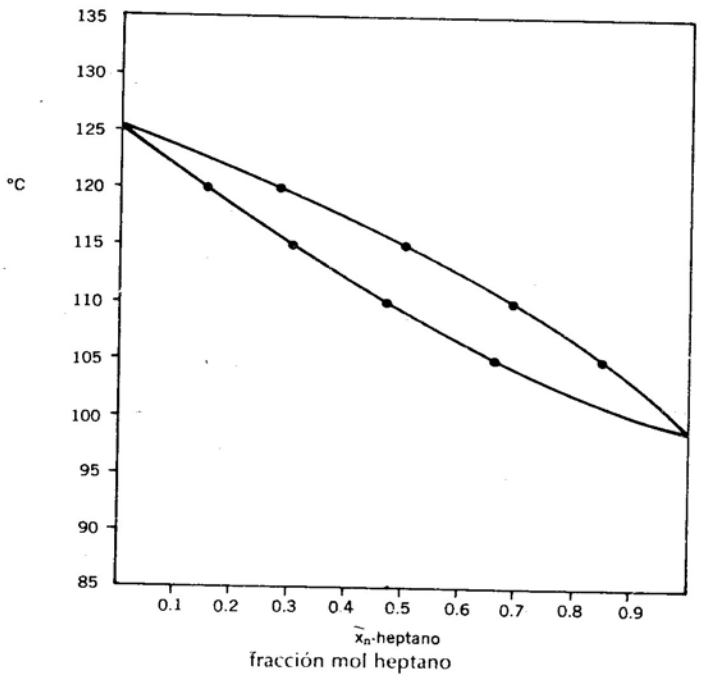
$$\tilde{y}_{\text{n-hept}} = 940\ (0.655)/760 = 0.810$$

3. Resultados

Datos

t °C	$\tilde{x}_{\text{n-hept.}}$	$\tilde{y}_{\text{n-hept.}}$
98.4	1.0	1.0
105.0	0.655	0.810
110.0	0.487	0.672
115.0	0.311	0.491
120.0	0.157	0.278
125.6	0.00	0.00

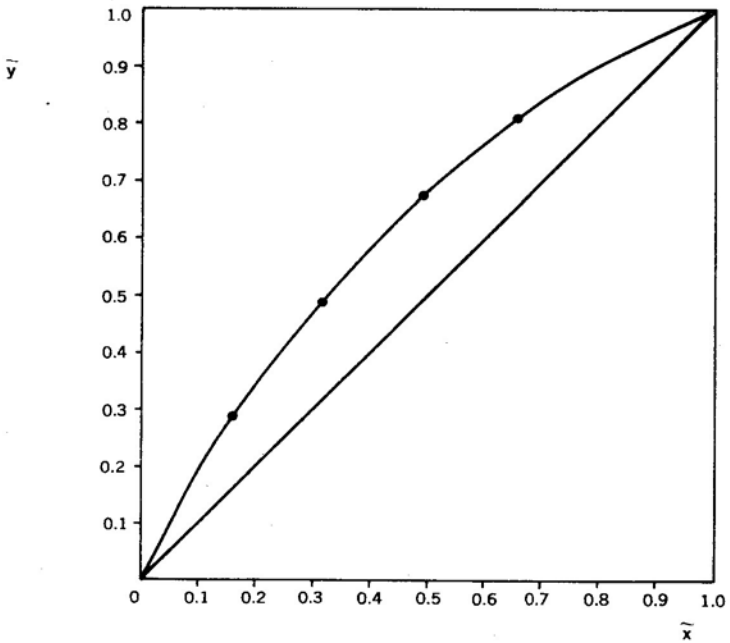
Gráfica



Problema 7.18

En la mayor parte de los casos, en destilación es de mayor utilidad representar el equilibrio de una mezcla binaria en un diagrama $\tilde{x}$-$\tilde{y}$, o sea, graficando la concentración del componente más volátil en la fase líquida ($\tilde{x}_i$) contra la concentración del mismo componente en la fase vapor ($\tilde{y}_i$). Un ejemplo de este tipo de diagramas se ve en la gráfica siguiente, que se obtuvo al graficar los resultados del problema anterior.

En estos diagramas podemos notar la dificultad que se tendrá para llevar a cabo la destilación, que se evidencia al advertir la distancia entre la línea diagonal de 45° y la curva de equilibrio; mientras mayor sea esta distancia, mayor será la diferencia entre las composiciones del líquido y del vapor, y será más fácil lograr cada separación por destilación. Una medida de esta facilidad está dada por lo que se llama volatilidad relativa.



Problema 7.19

Construya el diagrama entalpía-concentración para la mezcla heptano-etilbenceno a 760 mm de Hg. Use el líquido a 0 °C como estado de referencia y suponga cero el calor de mezcla ($\Delta H_m = 0$), dibuje el diagrama sobre la base fracción mol a partir de los siguientes datos:

Datos de equilibrio para la mezcla heptano-etil benceno a 760 mm de Hg		
t °C	$\tilde{x}_{hept.}$	$\tilde{y}_{hept.}$
136.2	0.0	0.0
129.5	0.080	0.233
122.9	0.185	0.428
119.7	0.251	0.514
116.0	0.335	0.608
110.8	0.487	0.729
106.2	0.651	0.834
103.0	0.788	0.904
100.2	0.914	0.963
98.5	1.0	1.0

1. Planteamiento

1.1 Discusión

Los puntos en el diagrama entalpía-concentración se calculan para cada temperatura y sus correspondientes concentraciones en el equilibrio; sólo se calcularán algunos puntos debido a que son repetitivos, y los resultados de los demás cálculos sólo se tabularán.

1.2 Cálculo de la entalpía del líquido a la temperatura t y conc. $\tilde{x}_{hept.}$

$$\tilde{H}_L = \tilde{x}_h [\tilde{C}p_{Lh} (t - t_o)] + (1 - \tilde{x}_h) [\tilde{C}p_{Leb} (t - t_o)]$$

1.3 Cálculo de la entalpía del vapor

$$\tilde{H}v = \tilde{y}_h [\tilde{C}p_{Lh} (t - t_o) + \tilde{\lambda}_{h,t}] + (1 - \tilde{y}_h) [\tilde{C}p_{Leb} (t - t_o) + \tilde{\lambda}_{eb,t}]$$

2. Cálculos

2.1 Cálculo de la entalpía del líquido; temperatura 136.2 °C

$$\tilde{x}_h = 0 \qquad \tilde{x}_{eb} = 1$$

Datos:

$$\widetilde{Cp}_{Lh} = 51.9 \text{ cal/g mol °C} \qquad \widetilde{Cp}_{Leb} = 43.8 \text{ cal/g mol °C}$$

$$\widetilde{\lambda}_h = 7\,575 \text{ cal/g mol} \qquad \widetilde{\lambda}_{eb} = 8\,600 \text{ cal/g mol}$$

$$\widetilde{H}_L = 0 + (1 - 0)\,[43.4\,(136.2)] = 5\,911 \text{ cal/g mol}$$

2.2 Cálculo de la entalpía del vapor; temperatura 136.2 °C

$$\widetilde{y}_h = 0 \qquad \widetilde{y}_{eb} = 1$$

$$\widetilde{H}_V = 0 + (1 - 0)\,[43.4\,(136.2) + 8\,600] = 14\,511 \text{ cal/g mol}$$

2.3 Cálculo de la entalpía del líquido; temperatura 129.5 °C

$$\tilde{x}_h = 0.08 \qquad \tilde{x}_{eb} = 0.92$$

$$\widetilde{H}_L = 0.08\,[51.9\,(129.5)] + 0.92\,[43.4\,(129.5)] = 5\,708.35 \text{ cal/g mol}$$

2.4 Cálculo de la entalpía de vapor; temperatura 129.5 °C

$$\widetilde{y}_h = 0.233 \qquad \widetilde{y}_{eb} = 0.767$$

$$\widetilde{H}_V = 0.233\,[51.9\,(129.5) + 7\,575] + 0.767\,[43.4\,(129.5) + 8\,600]$$

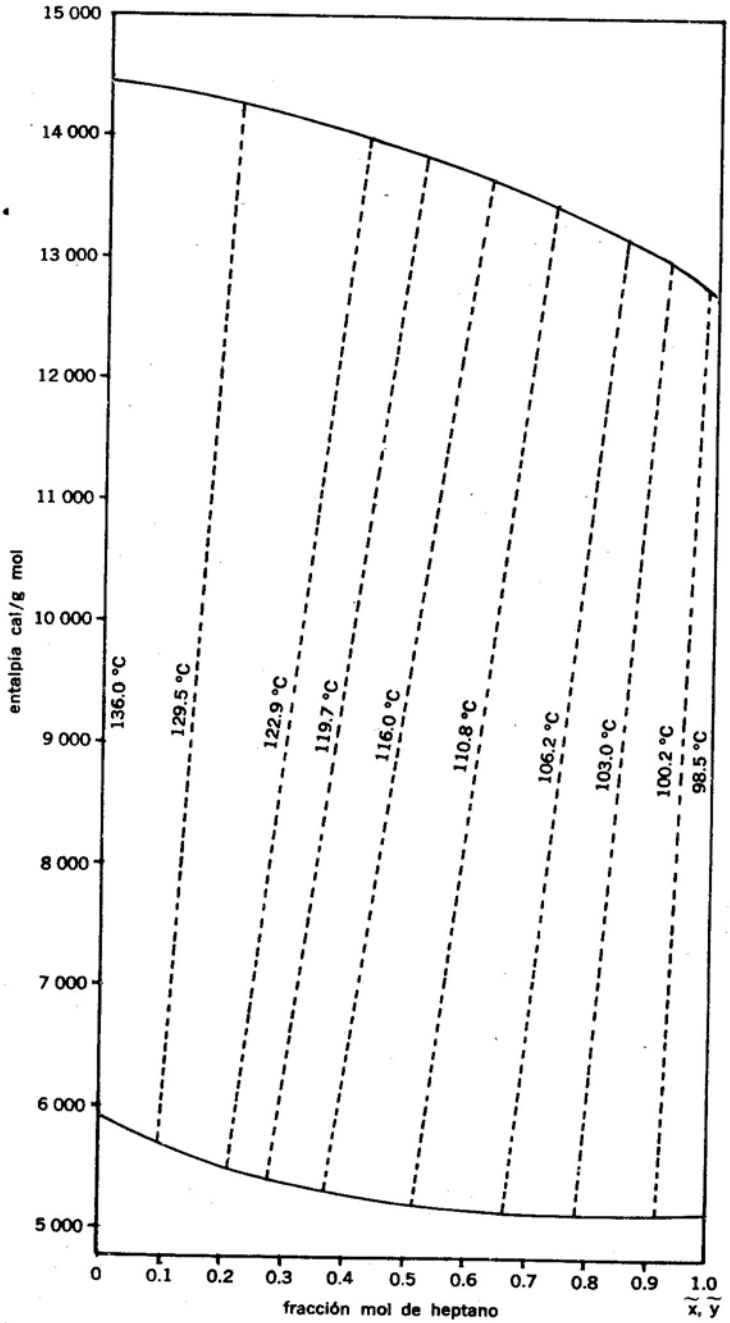
$$\widetilde{H}_V = 14\,238 \text{ cal/g mol}$$

3. **Resultados**

Tabla:

t °C	$\tilde{x}_h$	$\widetilde{y}_h$	$\widetilde{H}_L$ cal/g mol	$\widetilde{H}_V$ cal/g mol
136.2	0.000	0.000	5 911	14 511
129.5	0.080	0.233	5 708	14 238
122.9	0.185	0.428	5 527	13 942
119.7	0.251	0.514	5 450	13 790
116.0	0.335	0.608	5 364	13 610
110.8	0.487	0.729	5 267	13 367
106.2	0.651	0.839	5 196	13 128
103.0	0.788	0.904	5 160	12 951
100.2	0.914	0.963	5 130	12 793
98.5	1.000	1.000	5 110	12 687

Gráfica:



Las líneas punteadas representan el equilibrio y se llaman líneas de unión.

Problema 7.20

Una mezcla líquida de heptano-octano que contiene 35 por 100 en mol de heptano se somete a una destilación instantánea a la presión atmosférica y a una temperatura constante, hasta que el 40 por 100 del líquido inicial pasa a la fase vapor.

Determínese:

a) La temperatura de operación

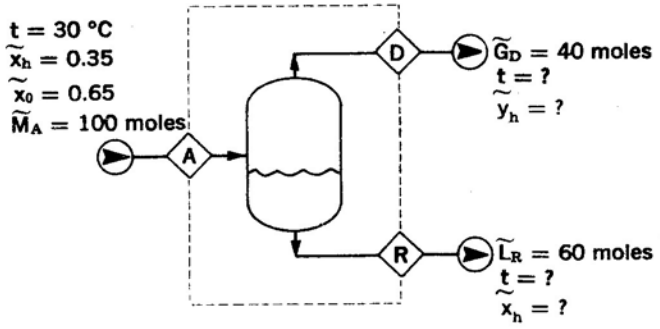
b) Las composiciones del líquido residual y del vapor separado

c) La cantidad de calor necesario para llevar a cabo la operación, si la alimentación entra a 30 °C

Datos de equilibrio heptano-octano

t °C	125.6	122	118	114	110	106	102	98.4
$\tilde{x}$	0.0	0.097	0.220	0.352	0.495	0.647	0.824	1.0
$\tilde{y}$	0.0	0.184	0.375	0.541	0.681	0.801	0.912	1.0

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Las composiciones del líquido residual y la del vapor destilado estarán en equilibrio y a la temperatura correspondiente a ese equilibrio. Se han tomado como base 100 moles de alimentación. Como se desconocen las

temperaturas de operación y las concentraciones en el equilibrio, y sólo se conoce la relación $\tilde{L}_R/\tilde{G}_D$, se buscará la solución de la ecuación por medio de tanteos.

2.2 Concentraciones del destilado y del residuo

Aplicando un balance total y un balance parcial del componente más volátil al sistema y combinando las ecuaciones, obtenemos:

$$\tilde{M}_A = \tilde{G}_D + \tilde{L}_R$$

$$\tilde{M}_A \tilde{x}_A = \tilde{G}_D \tilde{y}_D + \tilde{L}_R \tilde{x}_R$$

$$(\tilde{G}_D + \tilde{L}_R)\, \tilde{x}_A = \tilde{G}_D \tilde{y}_D + \tilde{L}_R \tilde{x}_R$$

$$\tilde{L}_R\, (\tilde{x}_A - \tilde{x}_R) = \tilde{G}_D\, (\tilde{y}_D - \tilde{x}_A)$$

$$\tilde{L}_R/\tilde{G}_D = (\tilde{y}_D - \tilde{x}_A)/(\tilde{x}_A - \tilde{x}_R)$$

Esta expresión es la relación entre la cantidad de líquido residual $\tilde{L}_R$ y la cantidad de vapor separado $\tilde{G}_D$ en función de la concentración de la alimentación $\tilde{x}_A$, las concentraciones en el equilibrio y la presión y la temperatura de operación.

De las ecuaciones anteriores podemos deducir la siguiente expresión:

$$\tilde{y}_D = -\tilde{L}_R \tilde{x}_R/\tilde{G}_D + \tilde{M}_A \tilde{x}_A/\tilde{G}_D$$

que es la ecuación de una recta con pendiente $-\tilde{L}_R/\tilde{G}_D$ y que en un diagrama de equilibrio pasará por los puntos $(\tilde{x}_A, \tilde{x}_A)$, $(\tilde{y}_D, \tilde{x}_R)$, por lo que podemos deducir que las concentraciones en equilibrio son función de la relación $\tilde{L}_R/\tilde{G}_D$.

Debido a que la diferencia $\tilde{x}_A - \tilde{x}_R$ es pequeña, la separación que se logra por este proceso es pobre.

Para resolver la ecuación anterior se supone una temperatura de operación, y de los datos de equilibrio se obtienen las concentraciones para esta temperatura y se sustituyen en la ecuación, hasta encontrar una pareja de datos que concuerde con la relación $\tilde{L}_R/\tilde{G}_D$.

2.3 Temperatura de operación

Será la correspondiente a los datos de equilibrio.

2.4 La cantidad de calor necesario se puede obtener a partir de la ecuación

$$Q + \tilde{M}_A \tilde{H}_A = \tilde{G}_D \tilde{H}_D + \tilde{L}_R \tilde{H}_R$$

en donde, al tomar como temperatura de referencia la temperatura de alimentación, la entalpía de la mezcla de alimentación se reduce a cero, con lo que la cantidad de calor se convierte en:

$$Q = \tilde{G}_D \tilde{H}_D + \tilde{L}_R \tilde{H}_R$$

2.5 Entalpía del vapor

La entalpía del vapor se calculará a partir de la ecuación

$$\tilde{H}_D = \tilde{y}_D [\tilde{C}_{Lh} (t - t_o) + \tilde{\lambda}_{h,t}] + (1 - \tilde{y}_D) [\tilde{C}_{Lo} (t - t_o) + \tilde{\lambda}_{o,t}]$$

3. Cálculos

3.1 Concentraciones del destilado y del residuo

$$\tilde{M}_A = 100 \text{ moles} \qquad \tilde{G}_D = 40 \text{ moles}$$

$$\tilde{L}_R/\tilde{G}_D = 60/40 = 1.5$$

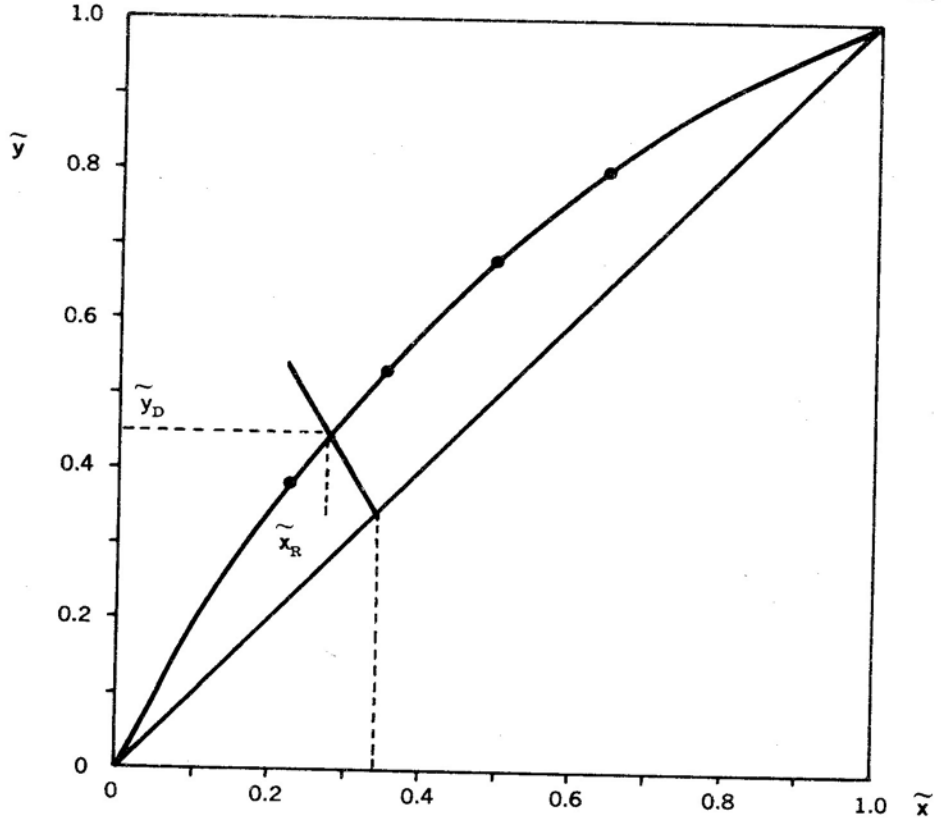
$$\tilde{L}_R/\tilde{G}_D = (\tilde{y}_D - \tilde{x}_A)/(\tilde{x}_A - \tilde{x}_R) = (0.375 - 0.35)/(0.35 - 0.22) = 0.192$$

$$t = 116 \text{ °C}$$

$$\tilde{L}_R/\tilde{G}_D = (0.45 - 0.35)/(0.35 - 0.284) = 1.51 \cong 1.5$$

por lo que se puede considerar como la temperatura de operación.

En un diagrama de equilibrio, la ecuación representa una línea recta con pendiente $\tilde{L}_R/\tilde{G}_D$, que pasa por los puntos $\tilde{x}_A$ y corta a la curva de equilibrio en $\tilde{y}_D$, $\tilde{x}_R$, lo que se aprecia en la siguiente figura



3.2 Entalpía del líquido

Datos:	C_L kcal/kg °C	λ 116 °C kcal/kg	P.M. kg/kmol
Heptano	0.582	73	100
Octano	0.560	74	114

$$\tilde{H}_L = 0.284\ [0.582\ (100)\ (116 - 30)] + 0.716\ [(0.56)\ (114)\ (116 - 30)]$$

$$\tilde{H}_L = 5\,352.4 \text{ kcal/kg mol}$$

3.3 Entalpía del vapor

$$\tilde{H}_D = 0.45\ [(100)\ (0.582)\ (116 - 30) + 73\ (100)] + (0.55)$$
$$[114\ (0.56)\ (116 - 30) + 74\ (100)]$$

$$\tilde{H}_D = 12\,626.6 \text{ kcal/kg mol}$$

3.4 Cantidad de calor total

Si se toman como base 100 moles de alimentación

$$Q = [(40)\ (12\ 626.6) + 60\ (5\ 352.4)]/100$$

$$Q = 8\ 262 \text{ kcal/mol}$$

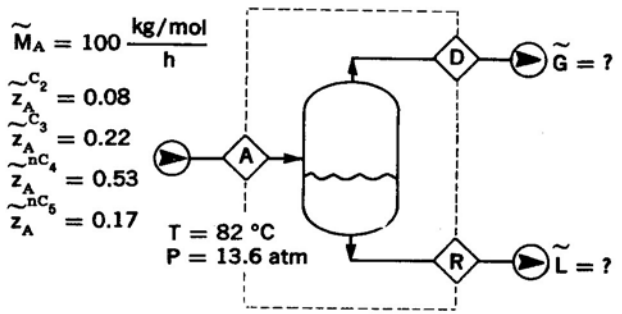
4. **Resultados**

Temperatura de operación 116 °C.
Composición del líquido 0.284 fracción mol.
Composición del vapor 0.45 fracción mol.
Cantidad de calor necesario 8 262 kcal.

Problema 7.21

A un tanque de destilación instantánea se alimenta una solución con la siguiente composición: etano 8%, propano 22%, **n**-butano 53, **n**-pentano 17%, en mol. Si esta solución entra a 13.6 atm y 82 °C, ¿cuál es la cantidad de vapores que puede esperarse y cuál será su composición si se alimentan 100 kg mol/h?

1. Traducción



2. Planteamiento
2.1 Discusión

Este es un caso de destilación instantánea de multicomponentes. Para resolverlo se deberán usar los coeficientes de distribución K a las condiciones dadas. Estos se pueden obtener del diagrama de Depriester. (Véase apéndice XIX).

2.2 Balance

$$\tilde{M}_A = \tilde{G} + \tilde{L}$$
$$\tilde{M}_A \tilde{z}_i = \tilde{G}\tilde{y}_i + \tilde{L}\tilde{x}_i$$

Para 1 kg mol

$$\tilde{z}_i = \tilde{G}\tilde{y}_i + \tilde{L}\tilde{x}_i$$

y como

$$\tilde{x}_i = \tilde{y}_i/K_i$$
$$\tilde{z}_i = \tilde{G}\tilde{y}_i + \tilde{L}\tilde{y}_i/K_i$$

Resolviendo para $\tilde{y}_i$ y multiplicando ambos lados por $\tilde{G}$:

$$\tilde{y}_i \tilde{G} = \frac{\tilde{z}_i}{(1 + \frac{\tilde{L}}{\tilde{G} K_i})} = \tilde{G}_i$$

como $\Sigma \tilde{y}_i = 1$

$$\Sigma \tilde{G}_i = \tilde{G}$$

$$\therefore \tilde{G} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\tilde{z}_i}{(1 + \frac{\tilde{L}}{\tilde{G} K_i})}$$

y la concentración del componente en la fase vapor se calcula por

$$\tilde{y}_i = \frac{\frac{\tilde{z}_i}{(1 + \tilde{L}/\tilde{G} K_i)}}{\Sigma \frac{\tilde{z}_i}{(1 + \frac{\tilde{L}}{\tilde{G} K_i})}}$$

La cantidad de líquido por kg mol de alimentación es

$$\tilde{L} = \tilde{1} - \tilde{G}$$
$$\tilde{x}_i = \frac{\tilde{z}_i - \tilde{G}\tilde{y}_i}{\tilde{L}}$$

3. Cálculos

3.1 Constantes de equilibrio a 13.6 atm y 82 °C

$K_{13,6}^{82\ °C} = 4.78$ para el C_2

$K = 1.87$ para el C_3

$K = 0.805$ para el n-C_4

$K = 0.35$ para el n-C_5

3.2 Primera suposición

$$\Sigma \tilde{G}_i = \tilde{G} \pm 0.001$$

Si $\tilde{G} = 0.5$ $\tilde{L}/\tilde{G} = 1$

	$\tilde{z}_i$	K	$1 + \tilde{L}/\tilde{G}\, K_i$	$\tilde{z}/(1 + \tilde{L}/\tilde{G}\, K_i)$
C_2	0.08	4.78	1.209	0.0665
C_3	0.22	1.87	1.535	0.1432
n-C_4	0.53	0.805	2.242	0.2365
n-C_5	0.17	0.35	3.86	0.044
	1.00			0.4902

$\tilde{G}$ esperado $= 0.5 \pm 0.001 = 0.501$ ó 0.499

3.3 Segunda suposición

$\tilde{G} = 0.4$ $\tilde{L}/\tilde{G} = 1.5$

	$\tilde{z}_i$	K	$1 + \tilde{L}/\tilde{G}\, K_i$	$\tilde{z}/(1 + \tilde{L}/\tilde{G}\, K_i)$
C_2	0.08	4.78	1.314	0.0609
C_3	0.22	1.87	1.801	0.1221
n-C_4	0.53	0.805	2.863	0.1851
n-C_5	0.17	0.35	5.29	0.0321
				0.4002

$\tilde{G}$ esperado $0.4 \pm 0.001 = 0.401$ ó 0.399, por lo tanto el valor de 0.4002 es aceptable.

3.4 Composición de los vapores

$$\tilde{y}_{iC_2} = 0.0609/0.4002 = 0.152$$

$$\tilde{y}_{C_3} = 0.122/0.4002 = 0.304$$

$$\tilde{y}_{n\text{-}C_4} = 0.1851/0.4002 = 0.462$$

$$\tilde{y}_{n\text{-}C_5} = 0.0322/0.4002 = 0.0804$$

4. **Resultados**

Se producirán 40 kg mol de vapores.

La composición de los vapores, expresada en porcentajes, será: 15.2 de etano, 30.4 de propano, 46.2 de butano normal y 8.04 de pentano normal.

Problema 7.22

Una mezcla que consiste en 50 por 100 de heptano e igual porcentaje de etilbenceno en peso se va a destilar a 1 atm de presión. Se alimentará a razón de 1 000 kg/h a la temperatura de ebullición del líquido alimentado. Se desea que el destilado consista en 95 por 100 en mol de heptano y los fondos en 5 por 100 de heptano en mol. Se utilizará un reflujo de 4. El condensador eliminará solamente el calor latente de los vapores, por lo que éstos saldrán como líquido saturado. El vapor del calderín utilizado será de 2.5 kg/cm^2 manométricos.

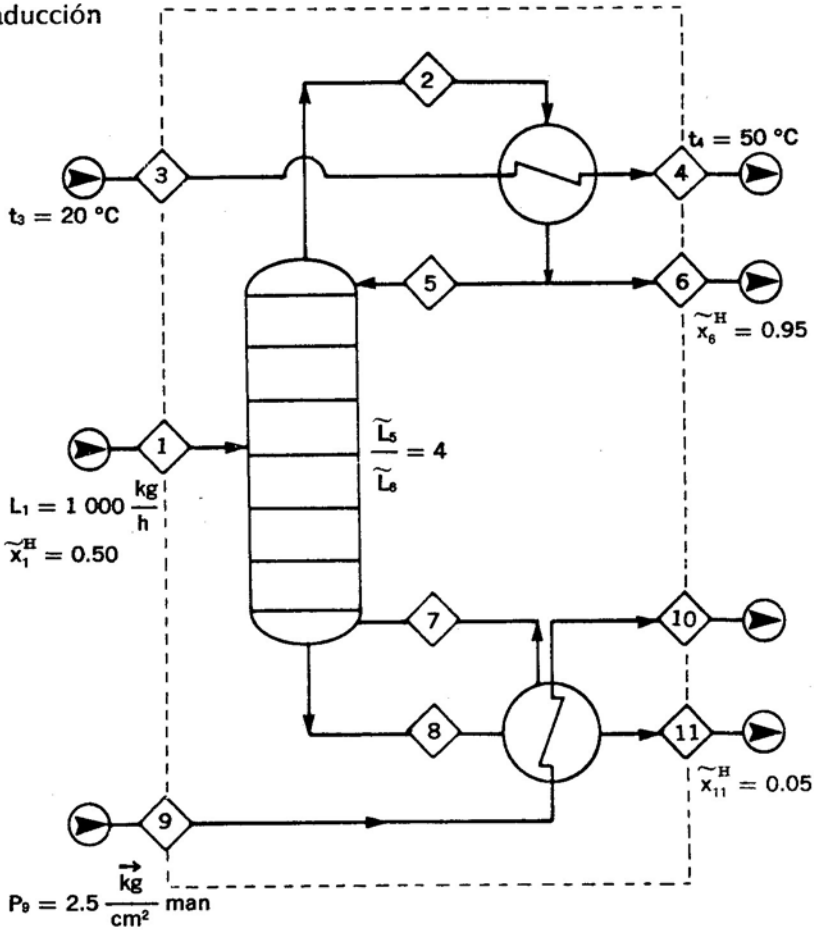
Calcule:

a) Las corrientes de destilado y fondos

b) El vapor y el agua necesarios, si el agua entra a 20 °C y sale a 50 °C

c) La temperatura de cada corriente: $P_T = 760$ mm Hg

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Balances de masa

$$\tilde{L}_1 = \tilde{L}_6 + \tilde{L}_{11}$$

$$\tilde{L}_1 \tilde{x}_1^H = \tilde{L}_6 \tilde{x}_6^H + \tilde{L}_{11} \tilde{x}_{11}^H \qquad \tilde{L}_5/\tilde{L}_6 = 4$$

2.2 Balances de energía

Total

$$\tilde{L}_1 \tilde{H}_1 + \tilde{L}_9 \tilde{H}_9 + \tilde{L}_3 \tilde{H}_3 = \tilde{L}_{11} \tilde{H}_{11} + \tilde{L}_4 \tilde{H}_4 + \tilde{L}_6 \tilde{H}_6 + \tilde{L}_{10} \tilde{H}_{10}$$

En el condensador

$$\tilde{L}_2 \tilde{H}_2 + \tilde{L}_3 \tilde{H}_3 = \tilde{L}_4 \tilde{H}_4 + \tilde{L}_6 \tilde{H}_6 + \tilde{L}_5 \tilde{H}_5$$

3. Cálculos

3.1 Balance de masa

$$PM_H = 100 \qquad PM_{EB} = 106 \qquad PM_1 = 103$$

$$\tilde{L}_1 = 1\,000/103 = 9.7 \text{ kg mol/h} \qquad \tilde{x}_1^H = 0.51$$

$$9.7 = \tilde{L}_6 + \tilde{L}_{11}$$

$$9.7\,(0.516) = \tilde{L}_6\,(0.95) + \tilde{L}_{11}\,(0.05)$$

Resolviendo,

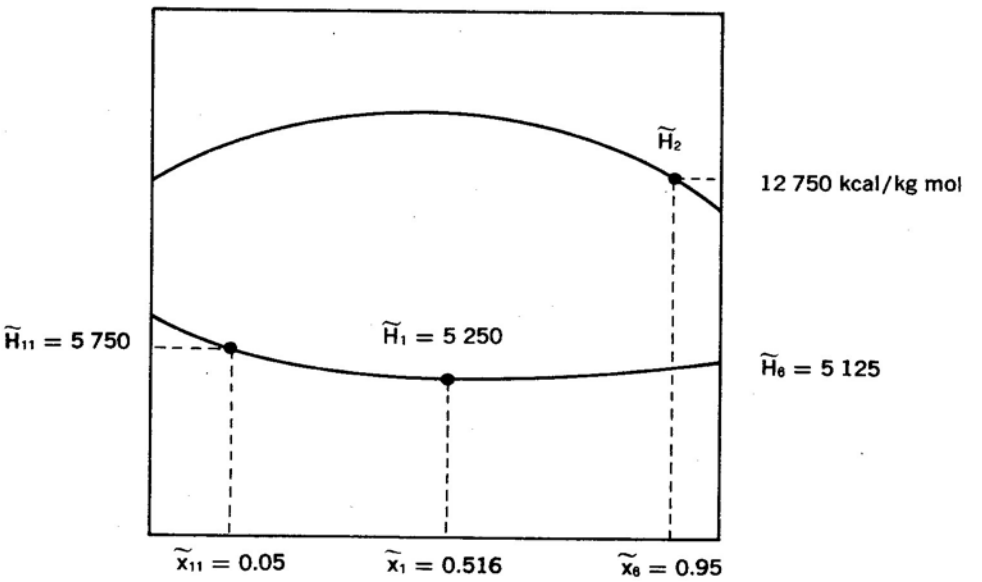
$$\tilde{L}_{11} = 4.683 \text{ kg mol/h} \qquad \tilde{L}_6 = 5.017 \text{ kg mol/h}$$

$$\tilde{L}_5 = 4\,\tilde{L}_6 = 4\,(5.017) = 20.06 \text{ kg mol/h}$$

$$\tilde{L}_2 = \tilde{L}_5 + \tilde{L}_6 = 20.06 + 5.017 = 25.077 \text{ kg mol/h}$$

3.2 Balances de energía

Para hacer los balances de energía obtendremos las entalpías directamente del diagrama de entalpía-concentración para este sistema. Ver pág. 383.



Corriente	kcal/kg mol	Temperatura °C	Heptano
$\tilde{H}_{11}$	5 750	132	0.05
$\tilde{H}_1$	5 250	109	0.516
$\tilde{H}_2$	12 750	100	0.95
$\tilde{H}_6$	5 125	100	0.95

La entalpía del vapor de calentamiento se obtiene de las tablas de vapor:

$\tilde{H}_{10}$	2 498.4	138 °C	P absoluta = 3.5 $\vec{kg}/cm^2$
$\tilde{H}_9$	11 736	138 °C	
$\tilde{H}_3$	360	20 °C	
$\tilde{H}_4$	900	50 °C	

a) Balance en el condensador

$$\tilde{L}_2 \tilde{H}_2 + \tilde{L}_3 \tilde{H}_3 = \tilde{L}_4 \tilde{H}_4 + \tilde{L}_6 \tilde{H}_6 + \tilde{L}_5 \tilde{H}_5$$

$$(25.077)\ (12\,750) + \tilde{L}_3\ (360) = \tilde{L}_4\ (900) + 5.017\ (5\,125) + 20.06\ (5\,125)$$

$$\tilde{L}_4 = \tilde{L}_3 \qquad \therefore\ \tilde{L}_4 = 354 \text{ kg mol/h} = 6\,373 \text{ kg de agua/h}$$

b) Total

$$\tilde{L}_1 \tilde{H}_1 + \tilde{L}_9 \tilde{H}_9 + \tilde{L}_3 \tilde{H}_3 = \tilde{L}_4 \tilde{H}_4 + \tilde{L}_5 \tilde{H}_5 + \tilde{L}_{10} \tilde{H}_{10} + \tilde{L}_{11} H_{11}$$

$$9.7\ (5\,250) + \tilde{L}_9\ (11\,736) + 354\ (360) = 354\ (900) + 5.017\ (5\,125) +$$

$$+ \tilde{L}_{10}\ (2\,498) + 4.683\ (5\,750)$$

$$\tilde{L}_9 = \tilde{L}_{10} \qquad \therefore\ \tilde{L}_9 = 20.87 \text{ kg mol/h} = 375.8 \text{ kg/h}$$

4. Resultados

Corriente destilada: 5.017 kg mol/h; corriente de fondos 4.683 kg mol/h

Vapor necesario: 375 kg/h; agua necesaria 6 373 kg/h

Temperaturas

Corriente	T °C
1	109
2	100
3	20
4	50
5	100
6	100
7	132
8	132
9	138
10	138
11	132

Problema 7.23

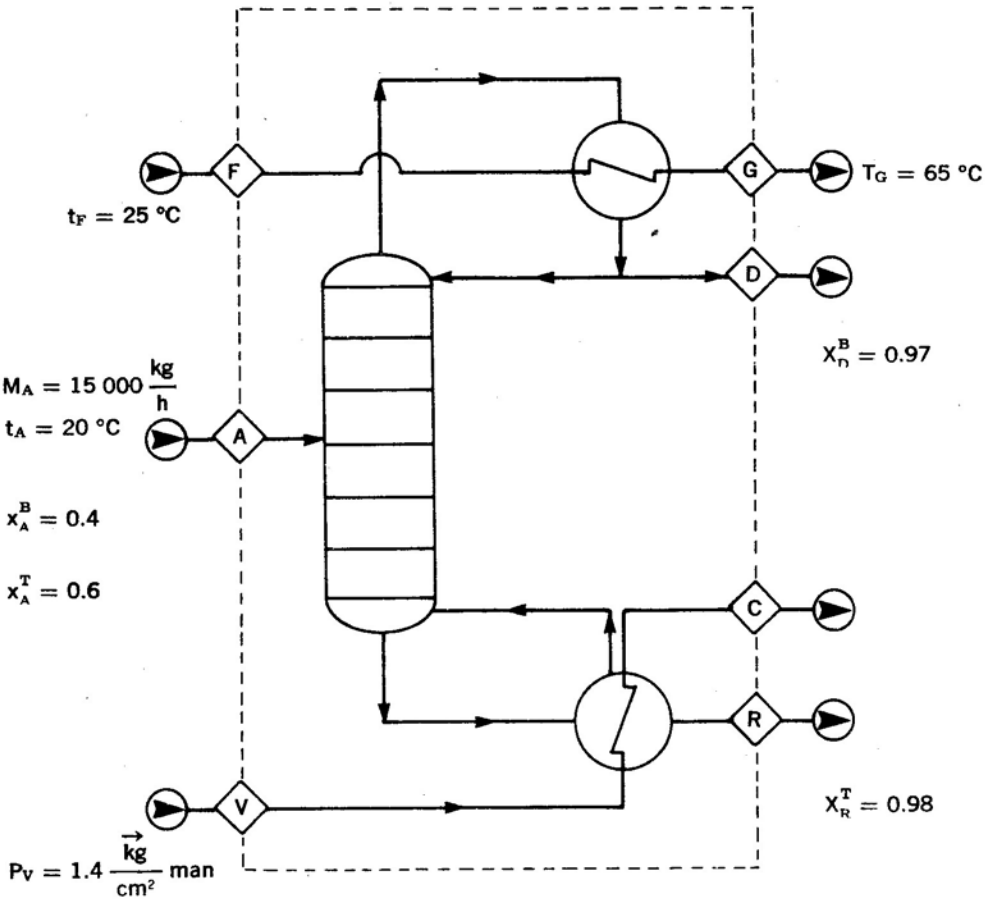
Se desea diseñar una columna de rectificación para separar 15 000 kg/h de una mezcla a 20 °C y 1 atm que contiene 40 por 100 de benceno y 60 por 100 de tolueno, con el fin de obtener un producto destilado de 97 por 100 de benceno y uno de fondos del 98 por 100 de tolueno (en peso). Se usará un reflujo de 3.5 kg por kg de producto destilado.

a) Calcule la cantidad de destilados y fondos.

b) El vapor necesario en el rehervidor si se usa vapor de 1.40 $\vec{kg}/cm^2$ manométrico.

c) El calor que se debe eliminar en el condensador, y el agua requerida si ésta entra a 25 °C y sale a 65 °C.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

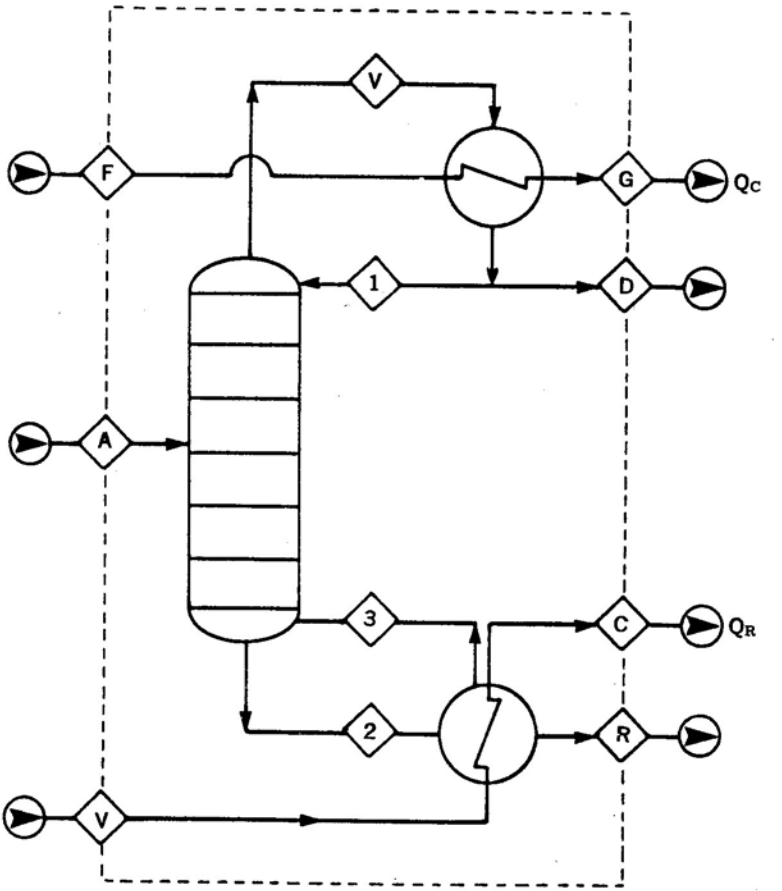
De acuerdo con el enunciado del problema, el vapor que sale de la torre será igual al líquido destilado. El problema se puede resolver con base en balances de masa y balances de entalpía. La entalpía del líquido destilado será igual a la de un líquido saturado. La de vapor que llega al condensador, a la de un vapor saturado. Debido a la alta cantidad de benceno en esos vapores, la entalpía puede hacerse igual a la del benceno puro y simplificar los cálculos.

En el fondo, se puede considerar tolueno puro; el líquido sale a su temperatura de ebullición.

2.2 Balance de masa

$$M_A = L_D + L_R \qquad \therefore\ M_A x_A = L_D x_D + L_R x_R$$

2.3 Balance de energía



Balance total

$$H_A L_A + Q_R = H_R L_R + L_D H_D + Q_C$$

Balance del condensador

$$H_V G = H L_1 + H L_D + Q_C; \qquad Q_C = L_{H_2O}\, Cp\, \Delta t$$

Balance en el rehervidor

$$H L_2 + Q_R = H L_3 + L_R H_R; \qquad Q_R = G_{vapor} (\lambda)$$

3. Cálculos

3.1 Balance de masa

$$15\,000 = L_D + L_R$$

$$15\,000\ (0.4) = L_D\ (0.97) + L_R\ (0.02)$$

Resolviendo simultáneamente,

$$L_R = 9\,000 \text{ kg/h} \qquad L_D = 6\,000 \text{ kg/h}$$

$L_1 = 3.5\ (6\,000) = 21\,000 \qquad \therefore \quad G = 21\,000 + 6\,000 = 27\,000$ kg/h

3.2 Constantes físicas

Calores latentes a la temperatura de ebullición

$$\lambda_{\underset{80\ °C}{\text{Benceno}}} = 98 \text{ kcal/kg} \qquad \lambda_{\underset{110\ °C}{\text{Tolueno}}} = 83 \text{ kcal/kg}$$

Capacidades caloríficas

$$Cp_{\underset{80\ °C}{\text{Benceno}}} = 0.51 \qquad Cp_{\underset{110\ °C}{\text{Tolueno}}} = 0.51$$

$$Cp_{\underset{20\ °C}{\text{Benceno}}} = 0.41 \qquad Cp_{\underset{20\ °C}{\text{Tolueno}}} = 0.41$$

3.3 Entalpías

$$H_A = 0.41\ (20 - 0) = 8.2 \text{ kcal/kg}$$

$H_D = H_1 = 0.51\ (80 - 0) = 40.8$ líquido a su punto de ebullición

$$H_R = 0.51\ (110 - 0) = 56.1$$

$H_V = 0.51\ (80 - 0) + 98 = 138.8$ vapor saturado

3.4 Balance en el condensador

$$P_T = 1.4 + 1 = 2.4 \text{ kg/cm}^2 \qquad \lambda = 522 \text{ kcal/kg}$$

$$27\,000\ (138.8) = 21\,000\ (40.8) + 6\,000\ (40.8) + Q$$

$$Q = 2\,646\,000 \text{ kcal/h}$$

$$2\,646\,000 = L_{H_2O}\ (1)\ (65 - 25) \qquad L_{H_2O} = 66\,150 \text{ kg/h}$$

3.5 Balance total

$$8.2\ (15\,000) + Q_R = 56.1\ (9\,000) + 6\,000\ (40.8) + 2\,646\,000$$

$$Q_R = 3\,272\,700 \qquad G_{vapor} = 3\,272\,700/522 = 6\,269 \text{ kg/h}$$

4. **Resultados**

Se requieren 66 150 kg/h de agua.

Se necesitan 6 269 kg/h de vapor.

La cantidad de destilados será de 6 000 kg/h y la de fondos 9 000 kg/h.

PROBLEMAS PROPUESTOS

Problema 7.24

Un líquido contiene 50 por 100 en mol de benceno, 25 por 100 de tolueno y 25 por 100 de **orto** xileno. Obtenga su punto de burbuja y la composición del vapor en equilibrio con ese líquido. La solución es ideal. La presión es de 1 atm.

Resultados

La temperatura de burbuja es de 95 °C.

Los vapores tendrán un 78.9 por 100 en mol de benceno, 15.6 por 100 de tolueno y 5.45 por 100 de **orto** xileno.

Problema

Para el etilbenceno se tienen los datos de presión de vapor siguientes

P ° mm Hg	T °C
78.6	60
113	70

¿Cuál será la presión de vapor a 80 °C si se usa el método de Antoine?

Resultado

La presión de vapor es de 160.1 mm de Hg.

Problema 7.25

Una solución está constituída por 40% de alcohol y 60% de agua en peso.

¿Cuál será su temperatura de ebullición, si la presión atmosférica es de 730 mm de Hg? Suponga comportamiento ideal.

Resultado

La temperatura será de 92 °C.

Problema 7.26

La presión de vapor del oxígeno líquido y del nitrógeno (puntos de ebullición −183 y −195.8 °C) se puede obtener por

$$\log_{10} P^0_{O_2} = -\frac{398}{T} + 7.3 \qquad \log_{10} P^0_{N_2} = -\frac{300}{T} + 6.76$$

P^0 está en mm de Hg y T en °K

¿A qué temperatura hervirá el aire líquido (79% N_2 y 21% O_2) a 1 atm de presión?

¿Qué composición tendrá la primera burbuja formada?

Resultados

El líquido hervirá a 79 °K. La composición de la primera burbuja será de 95% de N_2 y 5% de O_2 en mol.

Problema 7.27

¿Cuál será la temperatura de ebullición de una solución compuesta por 30% en mol de tolueno, 30% en mol de agua y 40% de etilbenceno? Si el líquido está sujeto a una presión de trabajo de 0.5 atm, ¿cuál será la composición de la primera burbuja? La mezcla de etilbenceno y tolueno sigue la ley de Raoult y son inmiscibles en agua.

Temperatura °C	Presión de vapor en mm de Hg		
	etilbenceno	tolueno	agua
60	78.6	139.5	149.4
70	113	202.4	233.7
80	160	289.4	355.1
90	223.1	404.6	525.8
100	307	557.2	760

Resultados

El líquido hervirá a 70 °C. La composición de la primera burbuja será de 16.77% de etilbenceno, 22.53% de tolueno y 60.71% de agua.

Problema 7.28

En destilación, el equilibrio vapor-líquido se calcula por medio de los valores de las K, en donde $\tilde{y} = K\tilde{x}$

$\tilde{y}$ fracción mol de un componente particular en el vapor.
$\tilde{x}$ fracción mol del mismo componente en el líquido.
K constante de equilibrio.

Una mezcla de 10% en mol de propano, 48.4% de **n**-butano y 41.6% de **n**-pentano hierve a 38 °C a la presión de 3 atm. Los valores de las K son 2.7, 1.2 y 0.36, respectivamente, a esas condiciones. Calcule la composición del vapor en equilibrio con este líquido.

Resultado

La composición de los vapores es 27% de propano, 58% de **n**-butano y 15% de **n**-pentano.

Problema 7.29

¿Cuál será la presión parcial que ejercerá el benceno en una solución líquida formada por 45% de benceno y 55% de tolueno en mol a 30 °C? ¿Cuál será la presión total?

Resultados

La presión parcial del benceno es de 54.09 mm de Hg. La presión total es de 74.275 mm de Hg.

Problema 7.30

Una mezcla de A y B (mutuamente inmiscibles) se destila a 1 atm. Calcule la fracción de A en el destilado si la presión de vapor de A puro es 450 mm de Hg a la temperatura de destilación. Suponga comportamiento ideal de los gases.

Resultado

La fracción de A en el destilado es de 59.2% en fracción mol.

Problema 7.31

Calcule el punto de rocío de una mezcla gaseosa que contiene 20 por 100 de benceno, 30 por 100 de tolueno y 50 por 100 en mol de **orto** xileno a 1 atm de presión.

Resultado

La temperatura de rocío estará alrededor de 128 °C.

Problema 7.32

Calcule el punto de burbuja y de rocío para una mezcla compuesta po 15 por 100 en mol de etano, 25 por 100 de propano, 30 por 100 de butano y 30 por 100 de pentano a una presión de 175 psia (libras por pulgad cuadrada absoluta).

Resultados

Punto de burbuja 45 °C. Punto de rocío 94 °C.

Problema 7.33

¿Cuál será la temperatura de burbuja de una mezcla formada por 6 por 100 de isobutano, 17 por 100 de **n** butano, 32 por 100 de isopentano y 45 por 100 de **n** pentano en mol, si aquella está a una presión de 6.87 atm?

Resultado

Temperatura de burbuja, 96 °C.

Problema 7.34

Para la mezcla benceno-tolueno cuyas presiones de vapor están en la siguiente tabla, calcular los datos de equilibrio a la presión de 1 atm, a partir de las presiones de vapor (T vs y, x).

Datos

t °C	$P^{\circ}_{\text{benceno}}$ (mm Hg)	P°_{tol} (mm de Hg)
80.0	760	300
84.0	852	333
88.0	957	380
92.0	1 078	432
96.0	1 204	493
100.0	1 344	559
108.0	1 659	741
110.4	1 748	760

Problema 7.35

Hacer los diagramas de $\tilde{x}_A$ vs $\tilde{y}_A$; T vs $\tilde{x}_A$, $\tilde{y}_A$; H vs $\tilde{x}_A$, $\tilde{y}_A$; del sistema hexano-heptano a una presión de 586 mm de Hg.

Datos

Constantes de Antoine

	A	B	C
Hexano	15.8366	2 697.55	− 48.48
Heptano	15.8737	2 971.32	− 56.51

$$\ln P^\circ = A - B/(T + C)$$

P° = mm Hg $\qquad$ T = °K

Problema 7.36

Se desea producir un destilado que contenga 80 por 100 en mol de benceno a partir de una mezcla de 70 por 100 en mol de benceno y 30 por 100 en mol de tolueno. Si se usa una destilación instantánea o "flash", ¿cuál será la cantidad de destilados y de fondos por 100 kg mol alimentados? Presión de trabajo 1 atm.

Resultado

Se destilan 44.5 kg mol/h y los fondos son 55.5 kg mol/h.

Problema 7.37

Una corriente de hidrocarburos de 5 000 kg mol/h tiene la siguiente composición en porcentajes en mol: metano 2, etano 8, propano 25, isobutano 5, **n**-butano 30, **n**-pentano 30. Esta corriente se somete a destilación instantánea con el fin de recuperar el 50 por 100 en mol del **n**-butano de la alimentación en la corriente de vapor; la destilación se llevará a cabo a 7 atmósferas. Determinar:

1. Temperatura de rocío y de burbuja de la mezcla
2. La temperatura de operación del tanque
3. Las composiciones del vapor y del líquido
4. Los gastos de vapor y líquido en (m^3/h) y (l/min), respectivamente. considerando $\rho_L = 0.45$ kg/l

Resultados

Temperatura de rocío 75 °C; temperatura de burbuja 8 °C; temperatura de operación 58 °C.

Composiciones	$\tilde{x}$	$\tilde{y}$
C_1	0.0011	0.0335
C_2	0.0194	0.1155
C_3	0.1476	0.3375
C_{i_4}	0.0402	0.0531
C_{ii_4}	0.3275	0.2858
C_{ii_5}	0.4764	0.1578

Gasto de vapor 6 995 m^3/h.

Gasto de líquido 5 314 l/min.

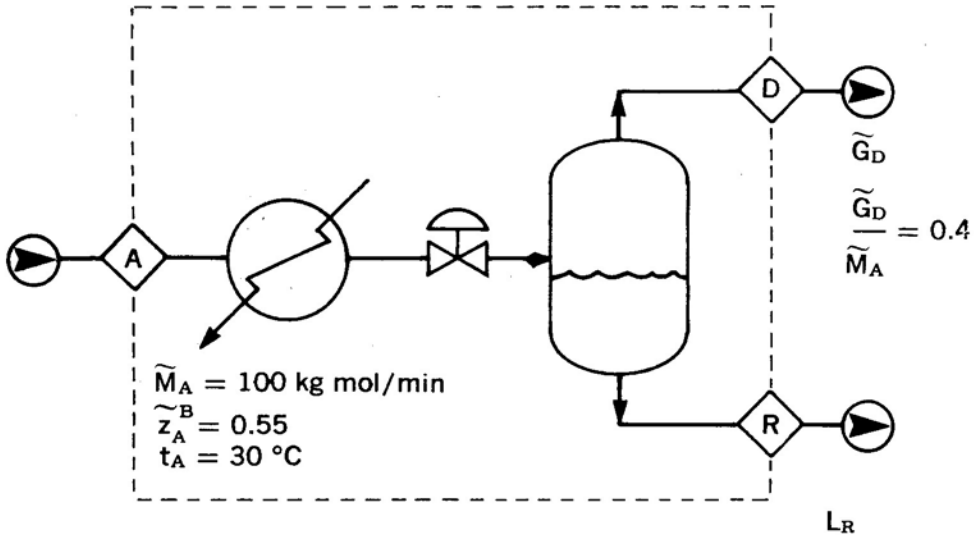
Problema 7.38

Una mezcla de 100 kg mol min de tolueno y benceno de composición $\tilde{z}_B$ 0.55 en fracción molar de benceno, entra a 30 C en el tanque de destilación instantánea indicado en la figura, y ha de pasar al estado de vapor el 40 por 100 de la alimentación. Determinar:

a) La composición del vapor separado y del líquido residual

b) La temperatura a que se efectúa la vaporización

c) La cantidad de calor necesario



Los datos de equilibrio a 1 atm, son:

$\widetilde{x}_B$	$\widetilde{y}_B$	t °C
0	0	110.4
0.1	0.209	106.2
0.22	0.404	101.4
0.3	0.5075	98.5
0.42	0.64	94.6
0.5	0.714	92.2
0.62	0.8054	89
0.7	0.8545	86.95
0.82	0.9215	84.1
0.94	0.9765	81.45
1.0	1.0	80.3

Resultados

La composición del vapor es de 0.68 en mol y la del líquido 0.464 en mol de benceno.

La temperatura de vaporización es de 93.3 °C.

Se deben proporcionar 538 000 kcal/h en el cambiador.

Problema 7.39

Una mezcla formada por 80 kg mol/h de etano, 50 kg mol/h de propano y 225 kg mol/h de isobutano, se encuentra a 13.6 atm y 42 °C ¿Cuál será la cantidad de vapor formado si se somete la mezcla a una destilación instantánea?

Resultado

Se producen 71 kg mol/h de vapores.

Problema 7.40

Un rectificador se alimenta con 2 000 kg/h de una solución de etanol y agua, que contiene 60 por 100 en peso de etanol a su temperatura de ebullición y 586 mm de Hg. Se pretende obtener un destilado que contenga 90 por 100 de etanol y un residuo con 10 por 100 de etanol en peso.

El destilado se condensa totalmente y el líquido y reflujo salen a su punto de ebullición. Se va a utilizar un reflujo de 2.

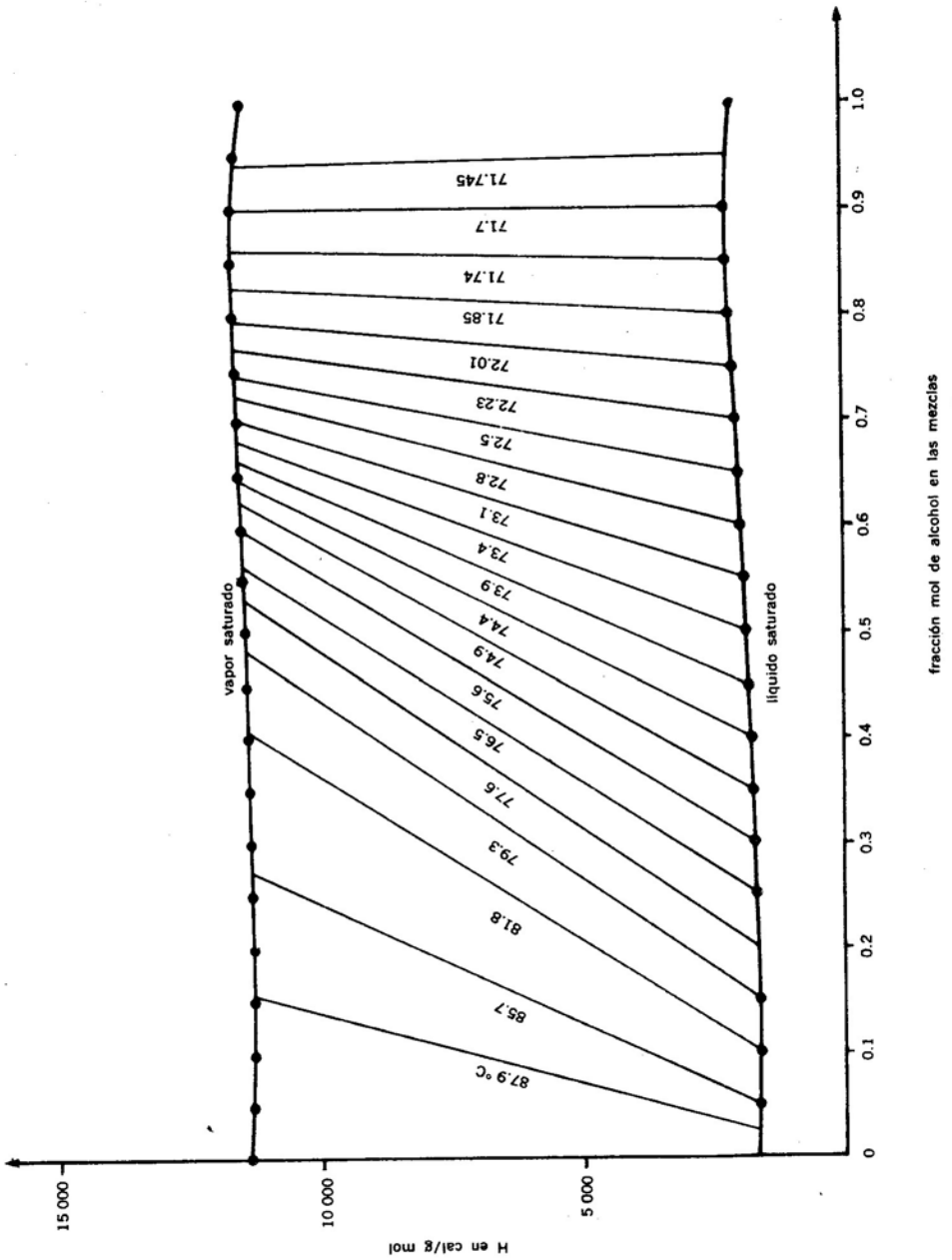
Determine los productos obtenidos y las variaciones de calor en el condensador y rehervidor. Para resolver el problema use el diagrama entalpía-concentración que encontrará en la página siguiente.

Resultados

Se obtienen 31.44 kg mol/h de destilados y 39.09 kg mol/h de fondos.

Se deben eliminar 899 900 kcal/h en el condensador.

Se deben proporcionar 900 000 kcal/h al rehervidor.



Fuente: J. Torres, **Prácticas de laboratorio de transferencia de masa,** Facultad de Química, UNAM, México, D.F., 1978.

Problema 7.41

Una columna de destilación separa 10 000 lb/h de una solución líquida a 70 °F que contiene 40% de benceno y 60% de cloroformo. El producto líquido del domo de la columna tiene 99.5% de benceno, mientras que el producto de fondos contiene 1% de benceno en peso. El condensador usa agua, la cual entra a 60 °F y sale a 140 °F, y el recalentador utiliza vapor de agua saturado a 280 °F. La relación de reflujo, o sea, la relación del líquido del domo que se regresa a la columna con respecto al producto que se obtiene del domo es de 6 a 1. La presión de trabajo es de 1 atm y la temperatura calculada para el condensador es de 178 °F, y para el recalentador 268 °F.

Calcule:

a) Las libras de destilado y fondos por hora

b) Las libras de reflujo por hora

c) Las libras de vapor de agua y del agua de enfriamiento por hora

Resultados

Destilados 3 960 lb/h, fondos 6 040 lb/h.

Reflujo 23 760 lb/h.

Vapor requerido 5 866 lb/h.

Agua necesaria 58 801 lb/h.

CAPÍTULO 8

BALANCES EN OPERACIONES AIRE-AGUA

OBJETIVOS

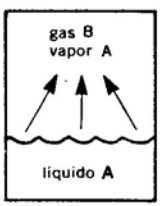
a) Tras de leer y estudiar este capítulo, el lector será capaz de hacer balances en procesos que involucran el uso de vapores condensables. **b)** Podrá usar la carta psicrométrica para calcular propiedades del aire húmedo. **c)** Usará los datos de las cartas psicrométricas para efectuar balances de energía en operaciones aire-agua.

Muchas operaciones unitarias requieren del manejo apropiado de mezclas de vapores condensables con gases incondensables; el ejemplo más común de estas mezclas es la mezcla de vapor de agua con aire, aunque no es raro encontrar algunas otras como benceno-nitrógeno, acetona-bióxido de carbono, etcétera.

Entre las principales operaciones unitarias que entran dentro del grupo de las llamadas operaciones aire-agua están el secado, la humidificación, el acondicionamiento de aire, el enfriamiento de agua con aire, etcétera.

EQUILIBRIO ENTRE UN LIQUIDO Y UN GAS INSOLUBLE EN EL LIQUIDO

Si ponemos un líquido volátil en contacto con un gas, se producirá la difusión del líquido volátil, cuyo vapor se difunde en el gas, saturándolo cuando el espacio es limitado.



Cuando el gas se satura ya no hay más transferencia de masa y se establece el equilibrio. En ese momento, el número de moléculas de líquido que se evaporan es igual al de las que se condensan.

Hay, pues, un límite en la cantidad de vapor que puede pasar a la fase gaseosa, y éste está dado por la presión de vapor del líquido puro.

Un gas que contiene la cantidad máxima posible de un vapor se dice que está saturado.

$$\text{En el equilibrio} \qquad P^0_A = P_T \tilde{y}_A = \tilde{P}_A$$

$$\text{Ahora bien} \qquad \tilde{P}_A/\tilde{P}_B = \tilde{m}_A/\tilde{m}_B = P^0_A/(P_T - P^0_A) = \tilde{Y}_{sat}$$

En donde $\tilde{Y}_s$ = Relación molar del componente volátil A en el gas G, también conocida como humedad molar de saturación.

$\tilde{P}_B$ = Presión parcial del gas.

$\tilde{P}_A$ = Presión parcial del vapor = P^0_A = Presión de vapor a la temperatura del sistema.

$\tilde{m}_A$ = Moles de A en la fase gaseosa.

Un gas en contacto con un líquido volátil, que contiene menor cantidad del vapor que el correspondiente al equilibrio, se dice que está saturado parcialmente. Si la fase líquida sigue presente, el sistema, al no estar en equilibrio, hará que el líquido tienda a evaporarse.

Este tipo de situaciones se presenta, sobre todo, en las llamadas operaciones de aire-agua. En esas operaciones se usan términos especiales, como:

Humedad absoluta molar

$$\tilde{Y} = \text{moles de vapor/moles de gas} = \tilde{P}_A/(P_T - \tilde{P}_A)$$

$\tilde{P}_A$ = Presión parcial del vapor A

Humedad absoluta másica

$$Y = \frac{\text{masa de vapor}}{\text{masa del gas}} = \frac{\tilde{P}_A}{(P_T - \tilde{P}_A)} \quad \frac{\text{PM vapor}}{\text{PM gas}}$$

Humedad relativa

$$Y_R = \frac{\tilde{P}_A}{P^0_A} \ (100)$$

Humedad porcentual

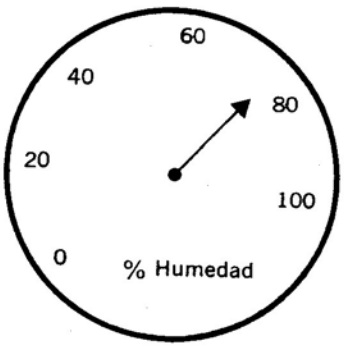
$$Y\% = \frac{Y}{Y_{sat}} \ (100)$$

Volumen húmedo

Es el volumen de la unidad de masa del gas, más el volumen de todo el vapor que contenga el gas a la presión y a la temperatura a que se encuentre el sistema.

$$V_H = \left[\frac{1}{PM_{gas}} + \frac{Y}{PM_{vapor}} \right] \frac{RT}{P_T}$$

La humedad relativa y la porcentual se pueden medir mediante aparatos llamados higrómetros.



$$Y\% = \frac{P_T Y_R - P_A^0 Y_R}{P_T - Y_R P_A^0} = \frac{(1 - \frac{P_A^0}{P_T})\ Y_R}{1 - Y_R\ (\frac{P_A^0}{P_T})}$$

Similarmente

$$Y_R = \frac{Y\%\ P_T}{P_T - (1 - Y\%)\ P_A^0}$$

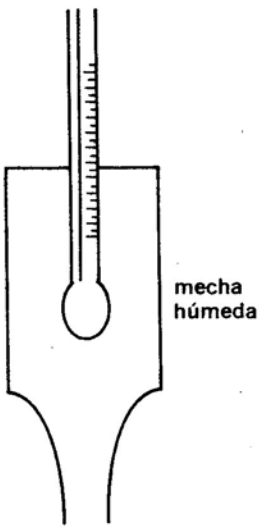
Otras propiedades son:

Temperatura de bulbo seco

Es aquella temperatura que se mide con un termómetro común y corriente.

Temperatura de bulbo húmedo

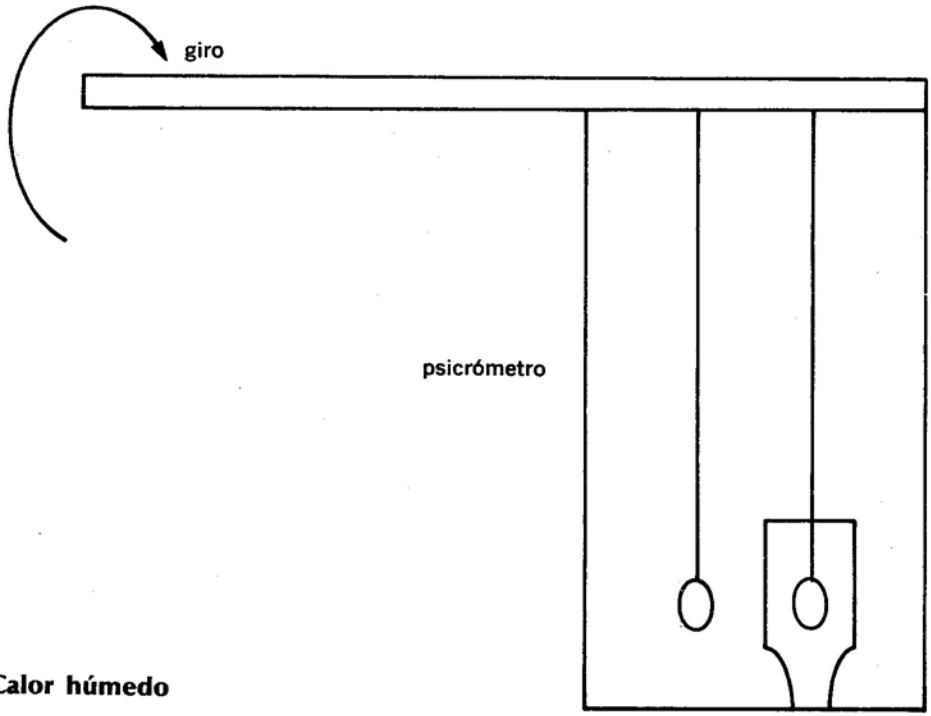
Es la temperatura que se mide con un termómetro provisto de una mecha, que está humedecida de líquido que se evapora en el gas cuando el termómetro se agita en el gas.



Tanto la temperatura de bulbo seco como la de bulbo húmedo se miden con un aparato llamado psicrómetro.

Temperatura de rocío

Es la temperatura a la cual se condensa la primera gota de vapor.



Calor húmedo

Es la capacidad calorífica que tiene una mezcla de un gas más el vapor que lo acompaña.

$$C_H = Cp\ gas + Cp\ vapor\ (Y)$$

En el caso del aire-agua

$$C_H = 0.24 + 0.46\ Y = kcal/kg\ de\ aire\ seco\ °C$$

Entalpía

Es la entalpía que contiene el gas más la del vapor que lo acompaña.

$$H = C_H\ (t - t_0) + \lambda_0\ Y$$

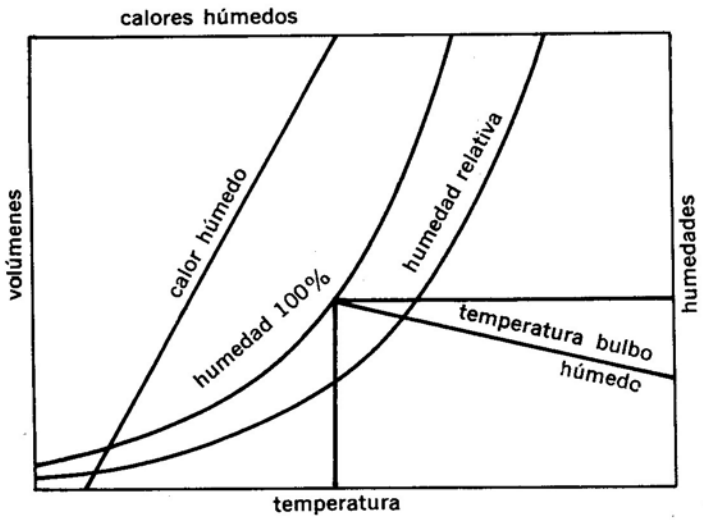
t_0 = temperatura base para computar las entalpías, generalmente 0 °C.

λ_0 = calor latente de vaporización del vapor a la temperatura base.

En el caso de las mezclas de vapor de agua-aire

$$H = [0.24 + 0.46\ Y]\ (t - 0) + 596\ Y\ kcal/kg\ de\ aire\ seco$$

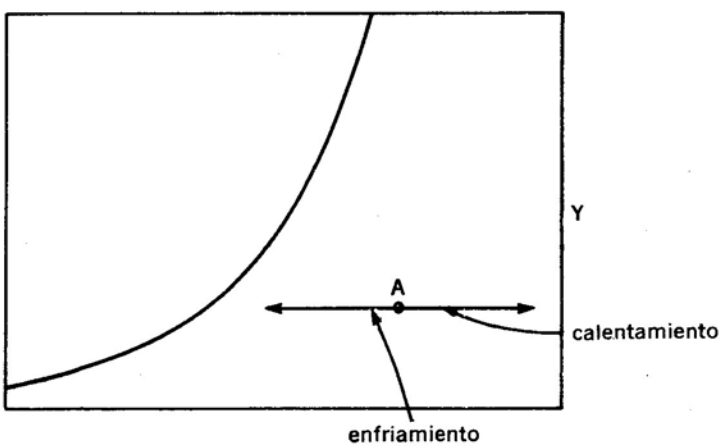
En el caso de las mezclas de vapor de agua-aire, casi todas las propiedades anteriores se han colocado en una gráfica llamada carta psicrométrica.



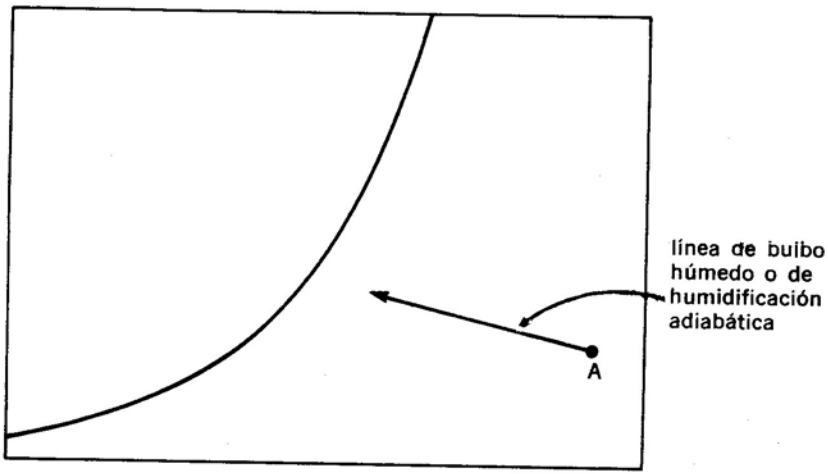
Las tablas psicrométricas sirven para obtener rápidamente las propiedades del aire húmedo a una presión dada. Existen tantas tablas psicrométricas como presiones de trabajo.

Otro de los usos de las tablas psicrométricas es que con ellas pueden seguirse algunos procesos simples, como:

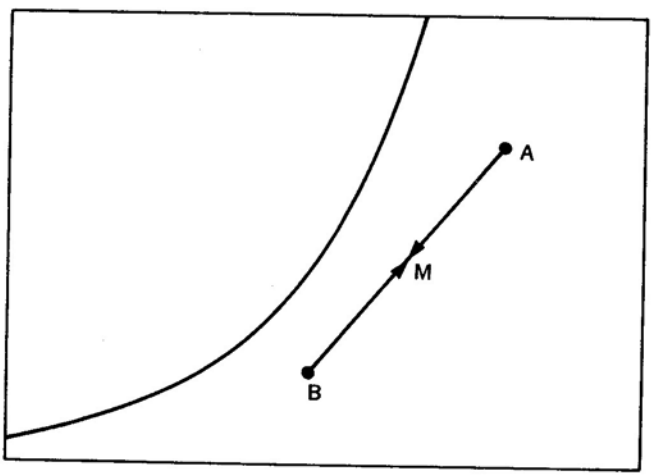
a) Calentamiento o enfriamiento a humedad y presión constante



b) Humidificación adiabática



c) Mezclas de aires



La unión de dos o más de estos procesos da origen a los procesos industriales que requieren el acondicionamiento de aire.

ACONDICIONAMIENTO DE AIRE

El acondicionamiento de aire tiene por objeto la producción de un aire con la humedad y temperatura requeridas para su uso en centros industriales o en espectáculos, oficinas y casas. En los últimos casos se suelen

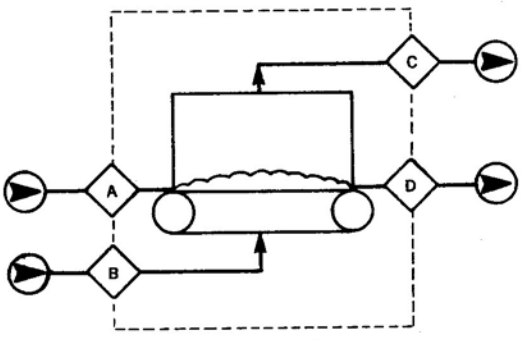
utilizar equipos paquetes de acondicionamiento. En los primeros, los equipos son más complejos por el volumen operado.

SECADO

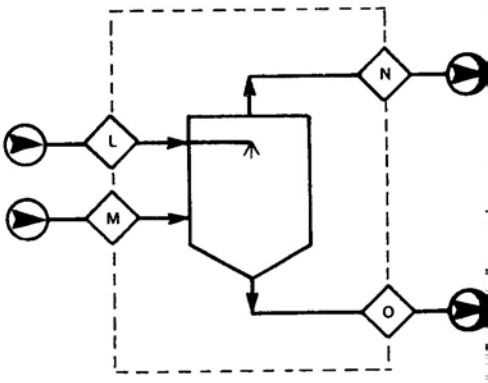
Esta operación unitaria tiene como objeto eliminar la humedad residual que contienen los productos sólidos, para hacerlos así más aceptables para su comercialización o su empleo posterior.

Equipos empleados

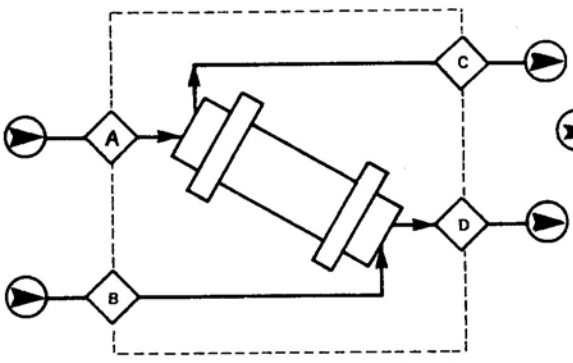
Los aparatos utilizados en secado pueden tener innumerables formas, cada una adecuada al tipo de material que se va a secar. Entre los tipos más corrientes están:



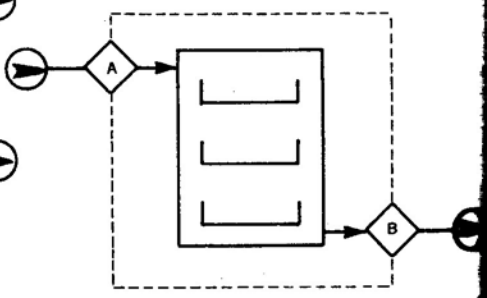
SECADOR DE BANDA



SECADOR POR ATOMIZACION



SECADOR ROTATORIO (O CALCINADOR)



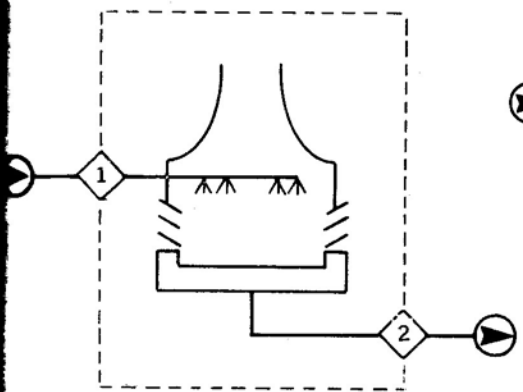
SECADOR DE CHAROLAS (BANDEJAS)

ENFRIAMIENTO DE AGUA

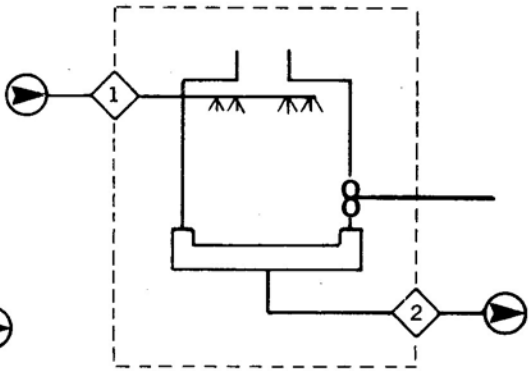
El agua es uno de los elementos más utilizados en la industria como sustancia de enfriamiento en condensadores y enfriadores. Sin embargo, es una sustancia que no debe desperdiciarse y por esa razón el agua caliente se suele enfriar por medio del contacto directo con aire en equipos llamados torres de enfriamiento. En estos equipos el agua se enfría y evapora, mientras el aire se calienta y humidifica.

Equipos usados

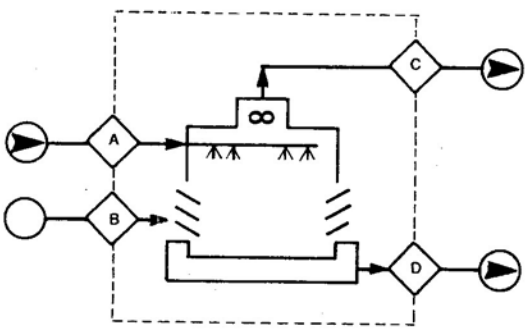
Las torres de enfriamiento más comunes son:



torre atmosférica



torre de tiro forzado

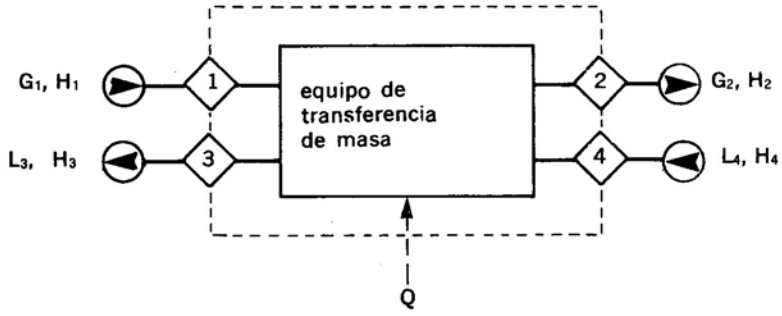


torre de tiro inducido

Balances de energía en los equipos

En general, al hacer los balances de energía para los equipos de enfriamiento de aire, secado y acondicionamiento de aire, se desprecian los términos de energía cinética y potencial por ser muy poco importantes frente a los cambios entálpicos.

Así, en general, a régimen permanente.



{rapidez de salida de energía con la masa} − {rapidez de entrada de energía con la masa} = {energía que se transfiere sin masa}

$$G_2 H_2 + L_3 H_3 - G_1 H_1 - L_4 H_4 = Q$$

Si no se transfiere calor (proceso adiabático)

$$G_2 H_2 + L_3 H_3 = G_1 H_1 + L_4 H_4$$

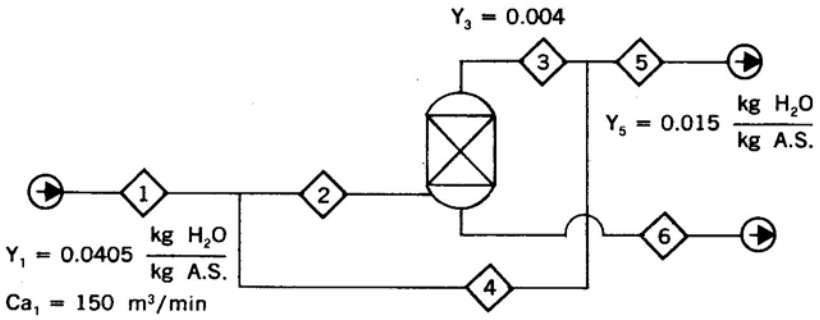
En donde la entalpía se calcula según los métodos ya expuestos.

PROBLEMAS RESUELTOS

Problema 8.1

Se desea secar el aire ambiente con una humedad de 0.0405 kg H_2O/kg A.S. para lo cual se hace pasar el aire a través de un equipo de secado. El aire a la salida de ese equipo tiene una humedad de 0.004 kg H_2O/kg A. Seco. Sin embargo, se desea que el aire contenga solamente 0.015 kg de H_2O/kg A.S. por ello se derivará parte del aire. Si se procesan 150 m^3/minuto de aire ambiente, calcule la masa y el volumen de aire a la entrada, a la salida y el porcentaje de derivación.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Balances de materia

Balance de aire seco

$$G_{s1} = G_{s5} \quad \therefore \quad G_{s1} = G_{s2} + G_{s4}$$

$$G_{s2} = G_{s3}$$

Balance de agua

$$G_{s1}\, Y_1 = G_{s5}\, Y_5 + L_6 \;;\; G_{s2}\, Y_2 = G_{s3}\, Y_3 + L_6$$

3. Cálculos

3.1 Aire seco a la entrada (suponiendo 1 atm. de presión y 15° C)

$$V_H = \left(\frac{0.0405}{18} + \frac{1}{29}\right) \frac{0.082\ (298)}{1}$$

$V_H = 0.8976$ m³/kg A. seco $\quad \therefore \quad G_{s1} = 150/0.8976 = 167.11$ kg

3.2 Balance alrededor de todo el proceso

$$G_{s1} = 167.11 = G_{s5}$$

$$167.11\ (0.0405) = 167.11\ (0.015) + L_6$$

$$L_6 = 4.261 \text{ kg/min}$$

3.3 Balance alrededor del equipo de secado

$$G_{s2} = G_{s3}$$

$$G_{s2}\,(0.0405) + G_{s3}\,(0.004) + 4.261$$

$$G_{s2} = 116.739 \text{ kg A.S./min}$$

3.4 Balances en la unión

$$116.739\,(0.004) + G_{s4}\,(0.405) = 167.11\,(0.015)$$

$$G_{s4} = 50.3628 \text{ kg A.S./min}$$

3.5 Volumen de aire a la salida

$$V_H = \left(\frac{0.015}{18} + \frac{1}{29}\right)\frac{0.082\,(298)}{1} = 0.8629832 \text{ m}^3\text{/kg A.S.}$$

$$G_{a5} = 144.213 \text{ m}^3\text{/h}$$

3.6 Porcentaje de derivación

$$(50.3628/116.739) \times 100 = 43.14\%$$

4. Resultados

A la entrada del proceso hay 167.11 kg/min de aire seco y un volumen de 150 m³/min. A la salida salen 167.11 kg/min de aire seco y un volumen de 144.213 m³/h. Se deriva el 43.14 porciento de la corriente.

Problema 8.2

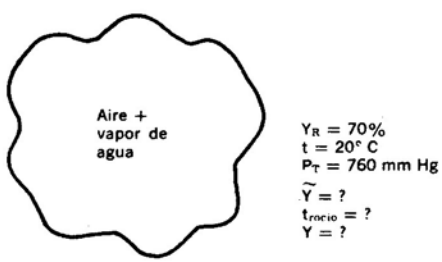
Una mezcla de aire y vapor de agua que está a 20 °C y 760 mm de Hg tiene una humedad relativa del 70%.

Calcule la humedad molar del aire.

La temperatura de rocío.

La humedad absoluta.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

En este problema estamos tratando con mezclas de gases y vapores condensables, por lo que

$$\tilde{Y}_{sat} = \frac{P^0_A}{(P_T - P^0_A)}$$

2.2 Humedad relativa porciento

$$Y_R = \frac{\tilde{P}_A}{P_A{}^0} (100)$$

2.3 Humedad absoluta

$$Y = \frac{\tilde{P}_A}{(P_T - \tilde{P}_A)} \left[\frac{\text{PM vapor}}{\text{PM gas}}\right]$$

3. Cálculos

3.1 Humedad molar

De tablas de vapor $P^0_{H_2O}$ a 20 °C = 17.5 mm de Hg

$$\tilde{P}_A = P^0_A\, Y_R/100 = 17.5\ (0.7) = 12.2 \text{ mm de Hg}$$

$$\tilde{Y} = \frac{12.2}{(760 - 12.2)} = 0.0163 \frac{\text{moles de agua}}{\text{moles de aire seco}}$$

3.2 Humedad absoluta

$$Y = 0.0163\ (18)/29 = 0.01011 \text{ g de } H_2O/\text{g de aire seco}$$

3.3 Temperatura de rocío

La temperatura de rocío se alcanza bajando la temperatura a humedad y presión constante, o sea, cuando la humedad a P constante sea igual a la humedad del aire.

$$\tilde{Y}_{sat} = \frac{P_A{}^0}{(P_T - P_A{}^0)} = \tilde{Y}$$

$$0.0163 = \frac{P_A{}^0}{(760 - P_A{}^0)} \qquad P_A{}^0 = 12.1893 \text{ mm Hg}$$

Ahora buscamos en las tablas de presión de vapor de agua hasta encontrar la temperatura a la cual la presión de vapor es de 12.1893 mm de Hg, y esa será la temperatura de rocío. De apéndice VII, 14.3 °C.

4. **Resultados**

La humedad molar del aire es

0.0163 moles de agua/mol de aire seco

La temperatura de rocío es de 14.3 °C

La humedad absoluta es de 0.01011

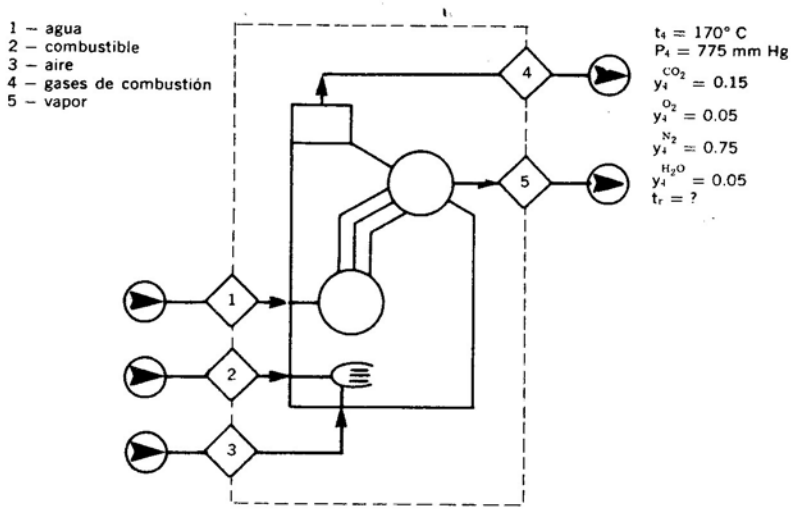
Problema 8.3

Los gases de chimenea salientes de un quemador tienen una temperatura de 170 °C y el análisis que se muestra a continuación:

CO_2	15% en peso
O_2	5 "
N_2	75 "
H_2O	5 "

Si la presión barométrica es de 775 mm de Hg, determine la temperatura a la cual el vapor de agua comenzará a condensarse al ascender en la atmósfera.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Este es un problema de gases condensables y de no condensables. Hay que aplicar, pues, las ecuaciones adecuadas.

2.2 Humedad de saturación

$$\tilde{Y}_{sat} = \frac{P^0_{H_2O}}{(P_T - P^0_{H_2O})} = \frac{\text{moles de } H_2O}{\text{moles de gases secos}}$$

2.3 Fracción mol

$$\tilde{y}_i = (y_i/PM_i)/(y_i/PM_i + y_a/PM_a + y_L/PM_b + \ldots)$$

3. Cálculos

3.1 Fracciones mol

Base: 100 kg de mezcla

sustancia	masa	moles	fracción mol
CO_2	15	0.34	0.1
O_2	5	0.156	0.05
N_2	75	2.678	0.75
H_2O	5	0.277	0.08

3.2 Humedad

$$\frac{0.277}{3.453 - 0.277} = 0.0872 = \frac{P^0_{H_2O}}{775 - P^0_{H_2O}}$$

$$P^0_{H_2O} = 62.16 \text{ mm Hg}$$

Del apéndice XXVII: $T_R = 42.2$ °C

4. **Resultado**

El vapor de agua comenzará a condensarse a los 42.2 °C.

Problema 8.4

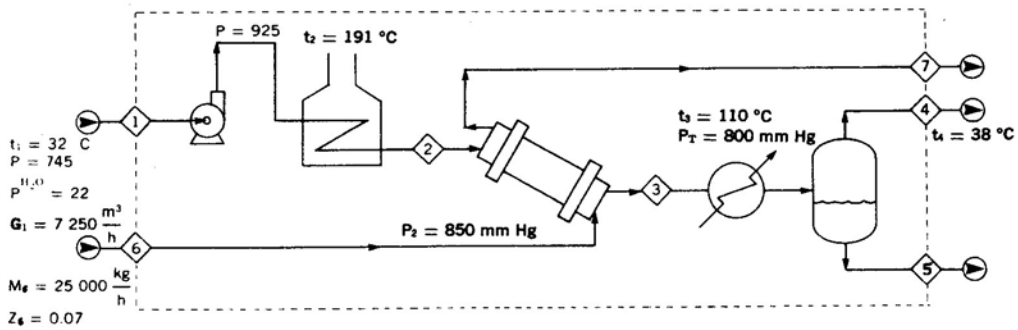
El siguiente diagrama muestra el proceso utilizado para secar un cereal en una planta de alimentos. Primero se filtra el aire atmosférico (7 250 m³/h) a 32 °C y 745 mm de Hg, y luego se comprime éste hasta 925 mm de Hg. El aire se manda a un cambiador, de donde sale a 191 °C y 850 mm de Hg, antes de pasarse al secador. En el secador el aire caliente pasa sobre el sólido húmedo (25 000 kg/h). El sólido tiene una humedad del 70% y sale casi seco. El gas sale del secador a 110 °C y 800 mm de Hg, y se le pasa a través de un cambiador de calor, que enfría la corriente hasta 38 °C para quitarle algo de la humedad, antes de ser lanzado a la atmósfera. La presión parcial del vapor de agua en la corriente entrante al sistema es de 22 mm de Hg y la del saliente 175 mm de Hg.

a) Complete el balance molar de materiales para las corrientes indicadas, sabiendo que el sólido seco tiene un peso molecular de 310.

b) Determine la humedad relativa % para las corrientes 1, 2, 3 y 4.

c) Determine el % de humedad del cereal saliente del secador.

1. Traducción



2. Planteamiento

Para resolver este problema se deberán usar los conceptos de humedad porciento y punto de rocío. El aire seco no cambia a través del proceso, así que se toma como sustancia de correlación.

2.1 Moles de agua en las corrientes.

$$\tilde{y}_{H_2O} = \frac{\tilde{m}_{H_2O}}{\tilde{m}\ \text{totales}} = \frac{\tilde{P}_{H_2O}}{P_T}$$

$$\frac{\tilde{m}_{H_2O}}{\tilde{m}_{aire}} = \frac{\tilde{P}_{H_2O}}{P - \tilde{P}_{H_2O}} = \tilde{G}\,\tilde{y}_{H_2O}/\tilde{G}$$

2.2 Humedad relativa porciento en las corrientes.

$$Y_R = \frac{\tilde{P}_{H_2O}}{P^0_{H_2O}}\ (100)$$

2.3 Balance de agua en las corrientes.

$$\tilde{G}_{H_2O}\ \text{entrante} = \tilde{G}_{H_2O}\ \text{saliente}$$

3. Cálculos

3.1 Moles totales en la corriente (1)

$$Ca_1 = 7\,250\ m^3/h$$

$$Ca_1\ \text{estándar} = 7\,250 \left(\frac{273}{305}\right)\left(\frac{745}{760}\right) = 6\,371\ \frac{m^3}{h}$$

$$\tilde{G}_1 = 6\,371/22.4 = 284\ \text{kg mol/h}$$

3.2 Moles de agua en la corriente (1)

$$\tilde{G}_1 \tilde{y}_1^{H_2O} = 284\ \frac{22}{745} = \tilde{G}_1\ \frac{\tilde{P}_{H_2O}}{P_T} = 8.38\ \frac{\text{kg mol}}{h}$$

$$\tilde{G}_1 \tilde{y}_1^{aire} = 284 - 8.38 = 275.6\ \text{kg mol/h}$$

$$\tilde{Y}_{R_1} = \frac{\tilde{P}_{H_2O}}{P^0}\ (100) = \frac{22}{36.1\ \text{(tablas)}}\ (100) = 61\%$$

3.3 Corriente (2)

$$P^0_{19\,1\,°C} = 9\,520\ \text{mm Hg}$$

$$\tilde{P}_2 = P\ \frac{\tilde{m}_2\ H_2O}{\tilde{m}\ \text{totales}} = 850\ \frac{8.3}{287} = 25.1\ \text{mm Hg}$$

$$Y_R\% = (25.1/9\,520)\ (100) = 0.26\%$$

3.4 Corriente (3)

$$P^0_{H_2O\ 110\,^\circ C} = 1\,090 \text{ mm Hg} \qquad \tilde{p}_{H_2O} = 175 \text{ mm Hg}$$

$$\tilde{G}_3^{H_2O} = \tilde{G}_3^{aire}\left(\frac{\tilde{P}_{H_2O}}{P_T - \tilde{P}_{H_2O}}\right) = 275.6\left(\frac{175}{800 - 175}\right) = 77.18$$

$$Y_R = \frac{175}{1\,090}\ (100) = 16\%$$

3.5 Corriente (4)

$$\tilde{p}_{H_2O} = P^0_{38\,^\circ C} \text{ (sale saturado)} = 65.8 \text{ mm Hg}$$

$$\tilde{G}_4^{H_2O} = 275.6\ \frac{65.8}{745 - 65.8} = 26.7\ \frac{\text{kg mol}}{\text{h}} \qquad Y_R = 100\%$$

3.6 Corriente (5)

$$\tilde{G}_3^{H_2O} = \tilde{G}_4^{H_2O} + \tilde{L}_5^{H_2O}$$

$$77.18 = 26.7 + \tilde{L}_5^{H_2O} \qquad \tilde{L}_5^{H_2O} = 50.46 \text{ kg mol/h}$$

3.7 Corriente (6)

$$L_6^{H_2O} = 25\,000\ (0.07) = 1\,750 \text{ kg/h} \qquad S_6 = 25\,000\ (0.93) = 23\,250 \text{ kg/h}$$

$$\tilde{L}_6^{H_2O} = 1\,750/18 = 97 \text{ kg mol/h} \qquad \tilde{S}_6 = 23\,250/310 = 75 \text{ kg mol/h}$$

3.8 Corriente (7)

$$\tilde{L}_7 = \tilde{L}_6 - (\tilde{G}_3^{H_2O} - \tilde{G}_2^{H_2O})$$

$$\tilde{L}_7 = 97 - (77.18 - 8.38) = 28.4 \text{ kg mol/h}$$

$$\therefore \quad \frac{L_7}{L_7 + S_6} = \frac{28.4\ (18)\ (100)}{23\,250 + 28.4\ (18)} = 2.1\% \text{ de humedad en los sólidos}$$

4. **Resultados**

Corriente	1	2	3	4	5	6	7
Aire	275.66	275.66	275.66	275.66			
Agua	8.38	8.38	77.18	26.7	50.46	97	28.4
Sólido						75	75
T °C	32	191	110	38			
P mm Hg	745	850	800	745			

Problema 8.5

Una corriente gaseosa formada principalmente por nitrógeno, circula en un sistema cerrado para eliminar el benceno que se utiliza como solvente de una mezcla de polímeros. El polímero entra al secador a la razón de 10 000 kg mol/h y contiene 1.04% en mol de C_6H_6.

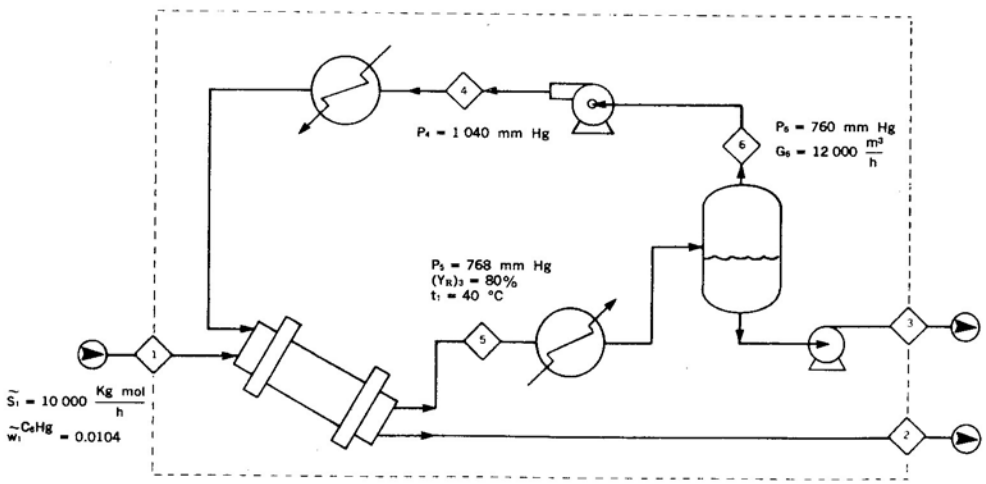
El gas saliente del secador está a 768 mm de Hg y 40 °C y la humedad relativa porciento es de 80. Esta corriente pasa a través de un enfriador para condensar la mayor parte del benceno. Las fases se separan en un tambor de separación.

El vapor saliente del tambor se hace pasar mediante un ventilador a través de un cambiador de calor, y de allí al secador. El ventilador operará a una presión de succión de 760 mm de Hg. Una lectura a la descarga del mismo indica una temperatura de rocío de 11.1 °C y una presión de 1 080 mm de Hg. El gas circulante alrededor de este sistema es de 12 000 m^3/h estándar en base seca de benceno.

Se pregunta:

a) ¿Cuál será la temperatura en el tambor para que no exista un aumento de benceno en la corriente de vapor reciclado?
b) ¿Cuál es el porciento en mol de benceno en la mezcla polimérica saliente del secador?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Este problema requiere del uso de los conocimientos adquiridos en este capítulo.

2.2 Humedad relativa

$$Y_R = \frac{\tilde{P}_{C_6H_6}}{P^0_{C_6H_6}} (100)$$

2.3 Humedad absoluta

$$Y = \frac{\tilde{P}_{C_6H_6}}{(P_T - \tilde{P}_{C_6H_6})} \frac{PM_{C_6H_6}}{PM_{N_2}}$$

$$\tilde{Y} = \frac{\tilde{P}_{C_6H_6}}{(P_T - \tilde{P}_{C_6H_6})}$$

2.4 Balances

$$\tilde{G}_6 \tilde{y}^{C_6H_6}_6 = \tilde{G}_4 \tilde{y}^{C_6H_6}_4$$

$$\tilde{G}_5 \tilde{y}^{C_6H_6}_5 = \tilde{G}_6 \tilde{y}^{C_6H_6}_6 + \tilde{L}_3 \tilde{x}^{C_6H_6}_3$$

$$\tilde{S}_1 \tilde{w}^{C_6H_6}_1 + \tilde{G}_4 \tilde{y}^{C_6H_6}_4 = \tilde{G}_5 \tilde{y}^{C_6H_6}_5 + \tilde{S}_2 \tilde{w}^{C_6H_6}_2$$

3. Cálculos

3.1 Kg mol de N_2

$$\tilde{G} = 12\,000 \frac{m^3}{h} \frac{1 \text{ kg mol}}{22.4 \text{ m}^3} = 535.7 \frac{\text{kg mol } N_2}{h}$$

3.2 Corriente (5)

$$P^0_{40\,^\circ C} = 175 \text{ mm de Hg (de apéndice VII)}$$

$$\tilde{P}_{C_6H_6} = \frac{P^0_{C_6H_6}}{100} Y_R = \frac{175\ (0.8)}{100} = 140 \text{ mm Hg}$$

$$\tilde{Y} = \frac{140}{(768 - 140)} = 0.223 \frac{\text{kg mol de benceno}}{\text{kg mol de } N_2}$$

$$\tilde{G}_5 \tilde{y}^{C_6H_6}_5 = 535.7\ (0.223) = 119.4 \text{ kg mol benceno/h}$$

3.3 Corriente (4)

A partir de la temperatura de rocío se obtiene que la presión de vapor a 11.1 °C es de 45 mm Hg. Esta es la presión parcial en (4)

$$\tilde{Y}_4 = \frac{45}{(1\,080 - 45)} = 0.0435 \ \frac{\text{kg mol } C_6H_6}{\text{kg mol de } N_2}$$

$$\tilde{G}_4 \tilde{y}_4^{C_6H_6} = 535.7\ (0.0435) = 23.9 \text{ kg mol de benceno/h}$$

3.4 Corriente (6)

$$\tilde{G}_4 \tilde{y}_4^{C_6H_6} = \tilde{G}_6 \tilde{y}_6^{C_6H_6}$$

El nitrógeno está saturado debido a que sale de un tambor de separación que deja salir el gas en equilibrio con el líquido.

$$\therefore \ \tilde{G}_6 \tilde{y}_6^{C_6H_6} = 23.4 \text{ kg mol de benceno/h}$$

$$\tilde{G}_6 \tilde{y}_6^{N_2} = 535.7 \text{ kg mol } N_2/\text{h}$$

$$\tilde{y}_6^{C_6H_6} = \frac{23.4}{(23.4 + 535.7)} = 0.0416 \ \frac{\text{kg mol de } C_6H_6}{\text{kg mol totales}}$$

$$\tilde{P}_6^{C_6H_6} = P_T \, \tilde{y}_6^{C_6H_6} = 760\ (0.0416) = 31.6 \text{ mm de Hg}$$

Esta presión parcial corresponde a la presión de vapor.
De tablas de vapor $t_6 = 5\ ^\circ C$.

3.5 Corriente (3)

$$\tilde{G}_5 \tilde{Y}_5^{C_6H_6} = \tilde{G}_6 \tilde{Y}_6^{C_6H_6} + \tilde{L}_3$$

$$119.4 = 23.29 + \tilde{L}_3$$

$$\tilde{L}_3 = 96.11 \text{ kg mol de benceno/h}$$

3.6 Corriente (1)

Benceno en (1)

$$10\,000\ (0.0104) = 104 \text{ kg mol/h}$$

Sólido en (1)

$$10\,000 - 104 = 9\,896 \text{ kg mol/h}$$

3.7 Corriente (2)

Balance de benceno

$$104 + 23.29 = 119.4 = \tilde{S}_2 \tilde{w}_2^{C_6H_6}$$

$$\tilde{S}_2 \tilde{w}_2^{C_6H_6} = 7.89 \text{ kg mol de benceno h}$$

$$\tilde{w}_2^{C_6H_6} = \frac{7.89}{7.89 + 9\,896} = 0.000800$$

4. **Resultados**

La temperatura del tambor de separación es de 5 °C.
La concentración en % en mol de benceno en la mezcla polimérica saliente del secador es 0.08%.

Problema 8.6

Se va a deshumidificar aire a 43 °C saturado con vapor de agua. Parte del aire se manda a la unidad de deshumidificación, en donde se enfría y se condensa parte del agua. El aire sale a 15.5 °C, y se mezcla con aire que se deriva ("by pass"). El aire final contiene 0.02 kg de vapor de agua/kg de aire seco. La presión del vapor de agua a 43 °C es de 70.000 mm de Hg y a 15.5 °C es de 13.2563 mm de Hg.

La presión total es de 1 atm.

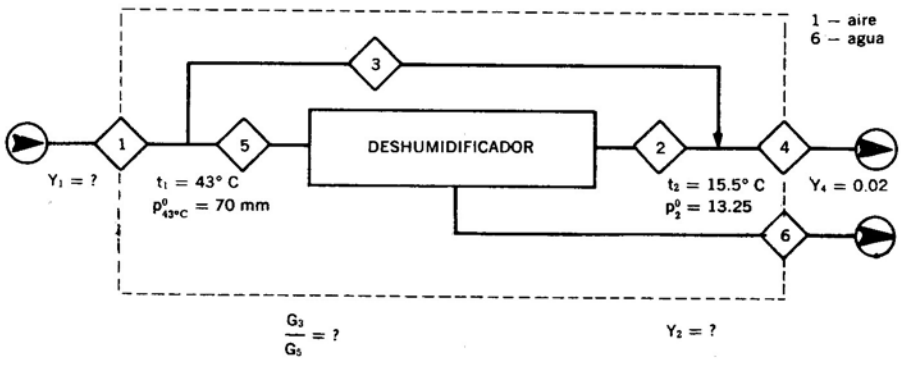
Calcule lo siguiente:

a) La humedad del aire.

b) La humedad del aire saturado que sale del deshumidificador a 15.5 °C.

c) La relación de kg de aire derivado por kg de aire que pasa al deshumidificador.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Balances

Total de aire seco

$$G_1 = G_4 \qquad G_5 = G_2$$

En la separación

$$G_1 = G_5 + G_3$$

$$G_1Y_1 = G_5Y_5 + G_3Y_3$$

En la unión

$$G_3 + G_2 = G_4$$

$$G_3Y_3 + G_2Y_2 = G_4Y_4$$

2.2 Humedades

$$Y = \frac{\widetilde{P}_{H_2O}}{(P_T - \widetilde{P}_{H_2O})}\left[\frac{PM_{H_2O}}{PMA\ .S}\right]$$

$$Y_{sat} = \frac{P^0_{H_2O}}{(P_T - P^0_{H_2O})}\ \frac{PM_{H_2O}}{PMA\ .S}$$

3. Cálculos

3.1 Cálculos de humedades

$$Y_1 = \left(\frac{70}{760 - 70}\right)\frac{18}{29} = 0.0629$$

$$Y_2 = \frac{13.25}{(760 - 13.25)}\left(\frac{18}{29}\right) = 0.011$$

3.2 Balance

$$\text{Si } G_1 = 1 \text{ kg de aire seco}$$

$$1\,(0.02) = G_3\,(0.0629) + G_2\,(0.011)$$

$$1 = G_2 + G_3$$

Resolviendo simultáneamente

$$G_2 = 0.8265$$

$$G_3 = 0.1735$$

$$\frac{G_3}{G_5} = \frac{0.1735}{0.8265} = 0.2098$$

4. **Resultados**

La humedad del aire a 43 °C es de 0.0629 kg H_2O/kg A.S.

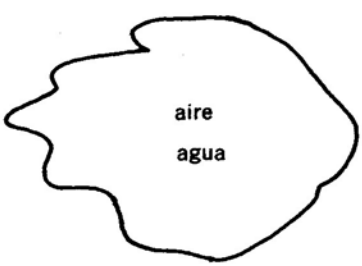
La humedad del aire a 15.5 °C es de 0.011.

Se derivan 0.2098 kg de aire por kg de aire que entra, o sea, el 21%.

Problema 8.7

Para una presión barométrica de 25.92 pulgadas de mercurio, una temperatura de bulbo seco de 90 °F y una temperatura de bulbo húmedo de 70 °F, determine cuál será la humedad absoluta, la relativa y el volumen húmedo.

1. Traducción



$T = 90$ °F

$T_H = 70$ °F

$P_T = 25.92$ pulgadas de Hg

$Y = ?$ $Y_R = ?$ $V_H = ?$

2. Planteamiento

2.1 Discusión

La carta psicrométrica que se anexa en el apéndice está construida a 760 mm de Hg o sea 29.92 pulgadas de Hg, por lo que los datos obtenidos con ella se deben corregir.

2.2 Humedad absoluta

$$Y = \frac{P_{H_2O}}{P_T - P_{H_2O}} \times \frac{PM_{H_2O}}{PM_{aire}}$$

2.3 Humedad relativa

$$Y_R = \frac{P_{H_2O}}{P^0_{H_2O}} \times 100$$

2.4 Volumen húmedo

$$VH = \left(\frac{1}{29} + \frac{Y}{18}\right) \frac{RT}{P}$$

3. Cálculos

3.1 Presión parcial del vapor de agua

De la tabla psicrométrica a 760 mm de Hg

$$Y = 0.0114 \frac{\text{kg vapor de agua}}{\text{kg de aire seco}}$$

$$\therefore \quad 0.0114 = \frac{\tilde{P}_{H_2O}}{760 - \tilde{P}_{H_2O}} \left(\frac{18}{29}\right)$$

$$\tilde{P}_{H_2O} = 13.7069 \text{ mm de Hg}$$

3.2 Humedad a la presión de 25.92 pulgadas

25.92 pulgadas de Hg = 658.368 mm de Hg

$$Y = \frac{13.7069}{658.368 - 13.7069} \left(\frac{18}{29}\right) = 0.1319 \frac{\text{kg de vapor } H_2O}{\text{kg de aire seco}}$$

3.3 Humedad relativa

a 90 °F = 32.22 °C $\qquad P^0_{H_2O} = 36.1179$ mm Hg

$$Y_R = \frac{13.7069}{36.1174} \times 100 = 37.95\%$$

3.4 Volumen húmedo

$$V_H = \left(\frac{1}{29} + \frac{0.01319}{18}\right) \left(\frac{0.082 \times (273 + 32.22)}{\frac{658.368}{760}}\right) = 1.0173 \frac{m^3}{\text{kg A.S.}}$$

4. Resultados

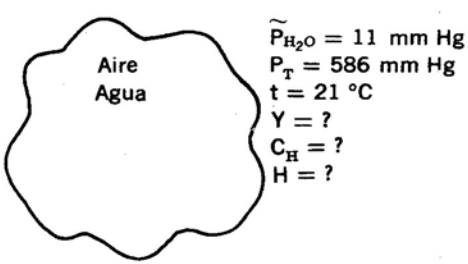
La humedad absoluta será de 0.01319 kg de vapor de agua por kg de aire seco, la humedad relativa de 38% y el volumen húmedo de 1.0173 m^3/kg de aire seco.

Problema 8.8

La presión del vapor de agua en una mezcla aire-agua es de 11 mm de Hg cuando la temperatura de la mezcla es de 21 °C. ¿Cuál será la humedad de la mezcla, la humedad relativa, su calor húmedo, su volumen húmedo y su entalpía?

Presión atmosférica, 586 mm de Hg.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Para resolver el problema se deberán usar las definiciones usadas en este capítulo.

2.2 Humedad absoluta

$$Y = [\tilde{P}_{H_2O}/(P_T - \tilde{P}_{H_2O})]\ (PM_{H_2O}/PM_{aire})$$

2.3 Humedad relativa

$$Y_R = (\tilde{P}_{H_2O}/P^0_{H_2O})\ (100)$$

2.4 Volumen húmedo

$$V_H = (1/PM_{aire} + Y/PM_{H_2O})\ RT/P$$

2.5 Calor húmedo

$$C_H = 0.24 + 0.46\ Y$$

2.6 Entalpía

$$H = (0.24 + 0.46\ Y)\ t + 597\ Y$$

3. Cálculos

3.1 Humedad

$Y = [11/(586 - 11)]\ (18/29) = 0.0118$ kg de agua/kg de aire seco

3.2 Humedad relativa

A partir de las constantes de Antoine:

$$P^0_{21\ °C} = 19 \text{ mm de Hg}$$

$$Y_R = (11/19)\ (100) = 57.89\%$$

3.3 Volumen húmedo

$$V_H = \left(\frac{1}{29} + \frac{0.0118}{18}\right)\frac{0.082\ (273 + 21)}{586/760}$$

$$V_H = (0.0344 + 0.000655)\ (0.082/0.771)\ (294) = 1.096 \text{ m}^3\text{/kg aire seco}$$

3.4 Calor húmedo

$$C_H = 0.24 + 0.46\ (0.0118) = 0.2454 \text{ kcal/kg aire seco °C}$$

3.5 Entalpía

$$H = (0.2454)\ (21) + 597\ (0.0118) = 5.1534 + 7.0446 =$$
$$= 12.198 \text{ kcal/kg aire seco}$$

4. **Resultados**

Humedad = 0.0118 kg de H_2O/kg aire seco
Humedad relativa 57.89%
Volumen húmedo 1.096 m^3/kg aire seco
Calor húmedo 0.2454 kcal/kg aire seco °C
Entalpía 12.198 kcal/kg aire seco

Problema 8.9

La temperatura de bulbo seco y la temperatura de bulbo húmedo de un aire que va a entrar a un secador son, respectivamente, 50 y 30 °C cuando la presión atmosférica es de 760 mm de Hg.

¿Qué datos adicionales se pueden obtener de la carta de humedad?

1. Traducción

$t = 50$	Aire-agua
$t_H = 30$ °C	$Y = ?$
$P = 760$ mm Hg	C_H, V_H

2. Planteamiento

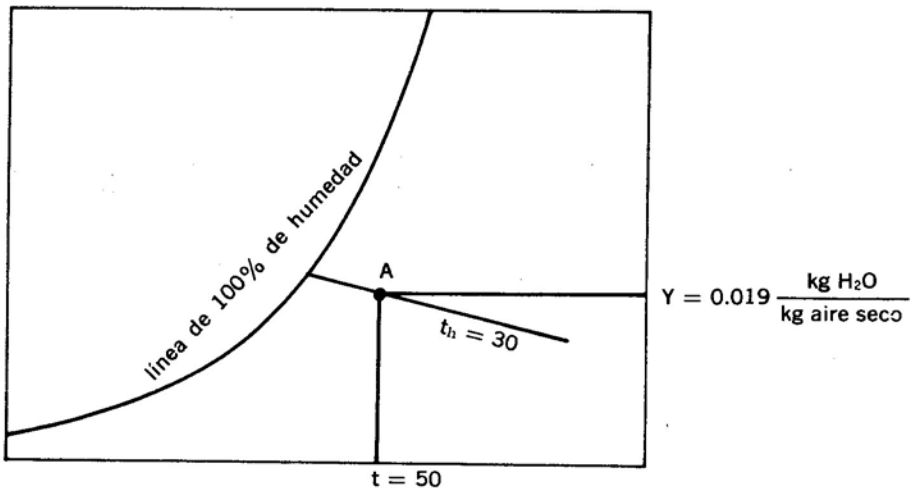
2.1 Discusión

El problema indica que se debe usar la carta de humedad a 760 mm de Hg.

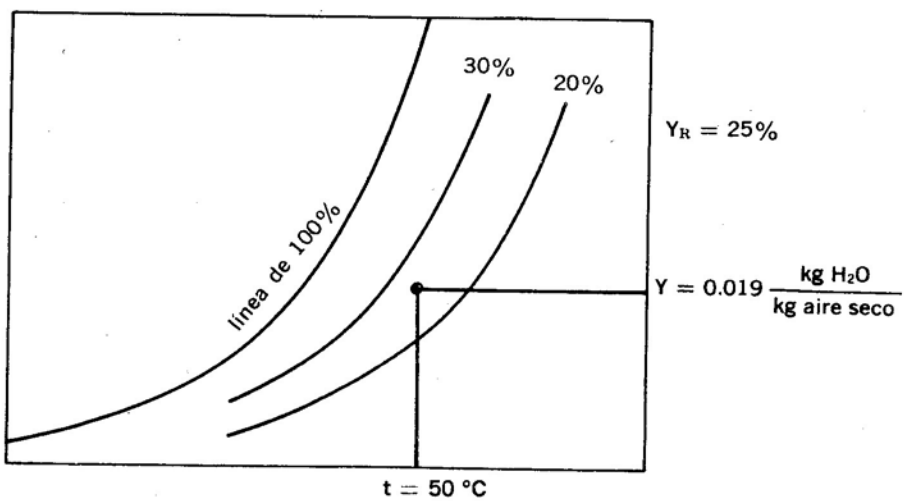
3. Cálculos

3.1 Humedad

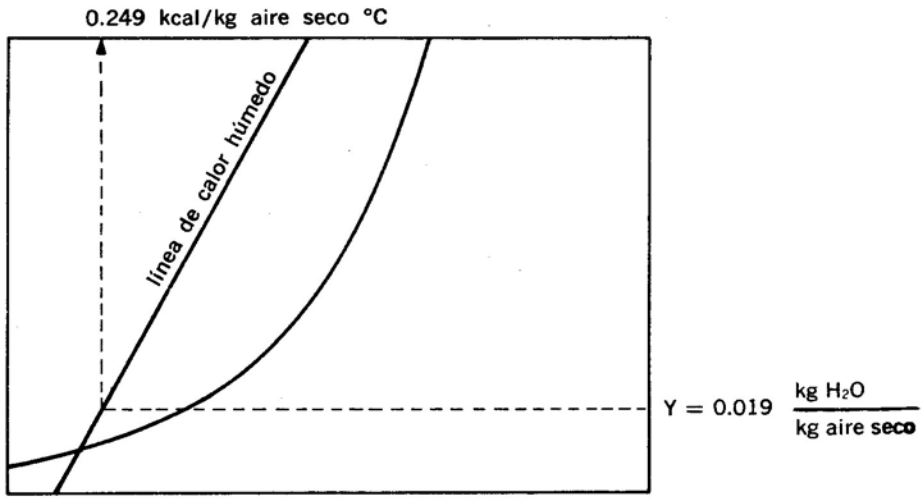
Ver tabla psicrométrica



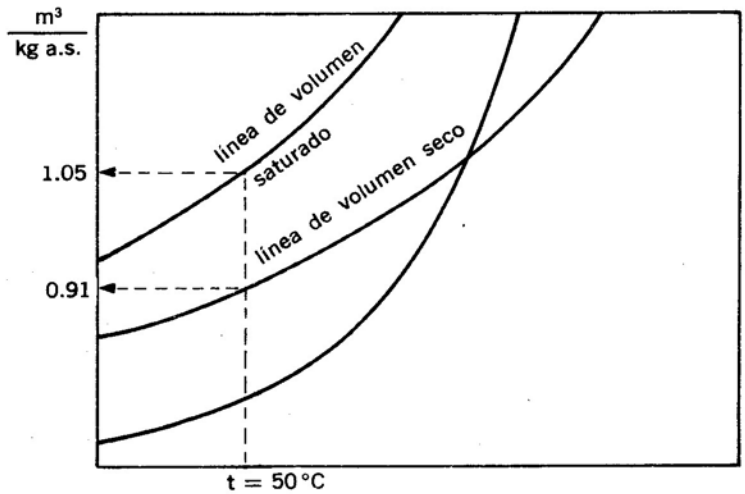
3.2 Humedad relativa



3.3 Calor húmedo



3.4 Volumen húmedo

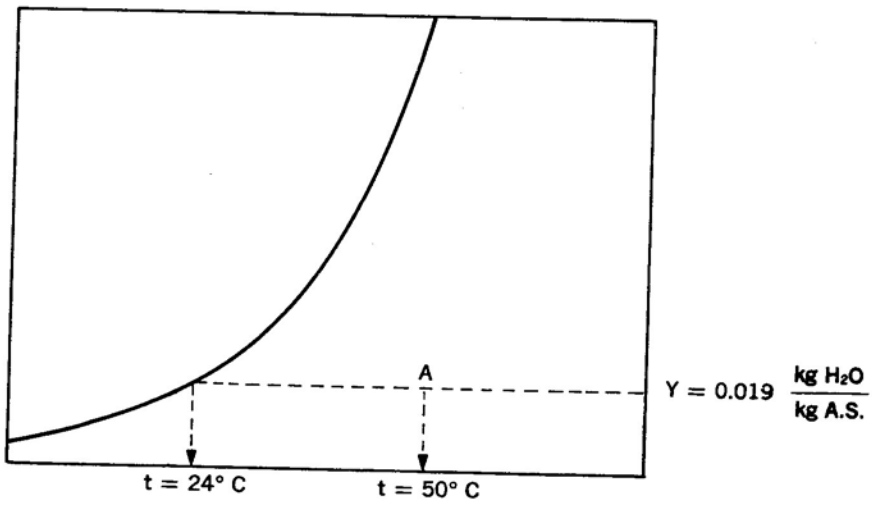


$$V_{sat} = 1.05 \text{ m}^3/\text{kg A.S.}$$

$$V_{seco} = 0.91 \text{ m}^3/\text{kg A.S.}$$

$$V_H = V_{seco} + V_R (V_{sat} - V_{seco}) = 0.91 + 0.25\,(1.05 - 0.91) = 0.945 \text{ m}^3/\text{kg A.S.}$$

3.5 Temperatura de rocío



4. Resultados

De la carta psicrométrica se pueden obtener los siguientes resultados

$Y = 0.019$ kg de agua/kg de aire seco; $Y_R = 25\%$;

$C_H = 0.249$ kcal/kg A.S. $V_H = 0.945$ m³/kg A.S. $T_R = 24$ °C

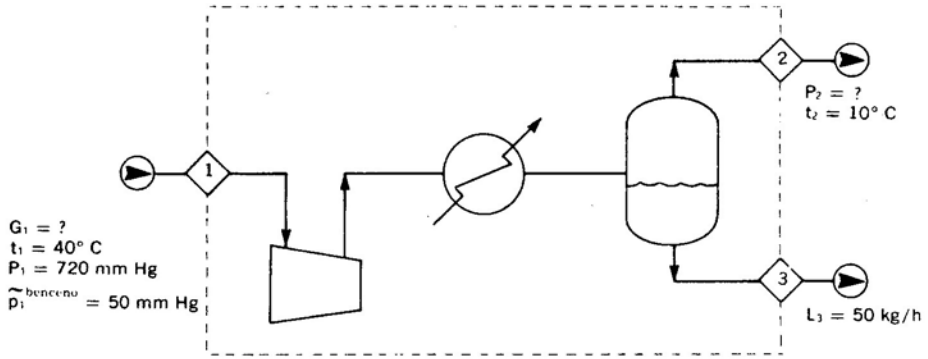
Problema 8.10

En una mezcla de benceno y nitrógeno, que está a 40 °C y 720 mm de Hg, la presión parcial del benceno es de 50 mm de Hg. Para separar el 80 por 100 del benceno la mezcla se somete a enfriamiento y compresión. Calcúlese:

a) La presión final si se enfría hasta 10 °C.

b) El volumen inicial de mezcla para condensar 50 kg/h de benceno.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Como hay condensación la masa gaseosa quedará saturada a la temperatura final de enfriamiento.

2.2 Balances de masa

total

$$G_1 = L_3 + G_2$$

parcial de benceno

$$G_1 y_1^B = L_3 x_3^B + G_2 y_2^B$$

En las operaciones de vapores con gases se usa más el término humedad que el de fracción peso.

$$Y_1 = \frac{y_1}{1 - y_1}$$

$$G_s = G_1 (1 - y_1)$$

$$\frac{G_s}{(1 - y_1)} y_1^B = L_3 x_3^B + \frac{G_s}{(1 - y_2)} y_2^B$$

$$G_s Y_1^B = L_3 X_3^B + G_s Y_2^B$$

$$L_3 = G_s (Y_1^B - Y_2^B) \; ; \; G_s = L_3/(Y_1^B - Y_2^B)$$

$$G_1 = G_s V_H$$

3. Cálculos

3.1 Humedad inicial

$$Y_1 = [50/(720 - 50)]\,(78/28) = 0.208 \text{ kg de benceno/kg de nitrógeno}$$

3.2 Humedad final

Como se condensa el 80 por 100 del benceno entrante

$$Y_2 = 0.208\,(0.2) = 0.0416 \text{ kg de benceno/kg de nitrógeno}$$

3.3 Presión de vapor del benceno en la corriente (3)

P° benceno a 10 °C, por Antoine

$$\log P = A - B/(t + c) \qquad A = 7.429$$
$$\log P = 7.429 - 1\,628.32/(10 + 279.56) \qquad B = 1\,628.32$$
$$\log P = 1.8055 \qquad C = 279.56$$
$$P° = 63.91 \text{ mm de Hg}$$

3.4 Presión final

$$Y_2 = 0.0416 = [63.91/(P_T - 63.91)]\,(78/28)$$
$$P_T = 4\,343.6 \text{ mm Hg} = 5.715 \text{ atm}$$

3.5 Benceno condensado por kg de nitrógeno

$$\Delta Y = 0.208 - (0.0416) = 0.1664 \text{ kg benceno/kg } N_2$$

3.6 Volumen húmedo en la corriente (1)

$$V_H = \left(\frac{1}{28} + \frac{0.208}{78}\right)\frac{0.082\,(313)}{720/760} = 1.04\,\frac{m^3}{kg\ N_2}$$

3.7 Volumen inicial

$$V = \frac{50 \text{ kg benceno/h}}{0.1664\,\dfrac{\text{kg benceno}}{\text{kg } N_2}}\left(1.04\,\frac{m^3}{kg\ N_2}\right) = 312.5 \text{ m}^3 \text{ de mezcla/h}$$

4. **Resultados**

Presión final 5.716 atm.

Volumen de mezcla requerida para condensar 50 kg/h de benceno 375 m^3/h.

Problema 8.11

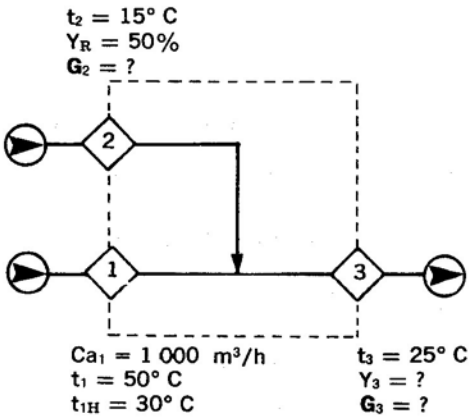
Se quieren mezclar 1 000 m^3/h de aire a 50 °C y 30 °C de bulbo húmedo con aire a 15 °C y $Y_R = 50$ por 100. Si la mezcla resultante está a 25 °C, calcule:

a) la humedad del aire resultante

b) el volumen de aire adicionado

c) el volumen de aire resultante

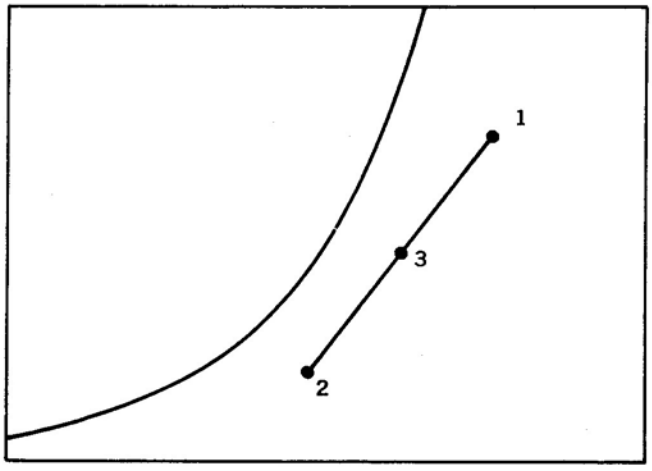
1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Este problema se puede resolver por medio de la carta psicrométrica. Si se localizan las condiciones de la corriente (1) y se unen con las condiciones de la corriente (2), la mezcla resultante se encontrará sobre la línea que une los dos puntos y allí, a 25 °C, se encontrarán las condiciones de esta mezcla.



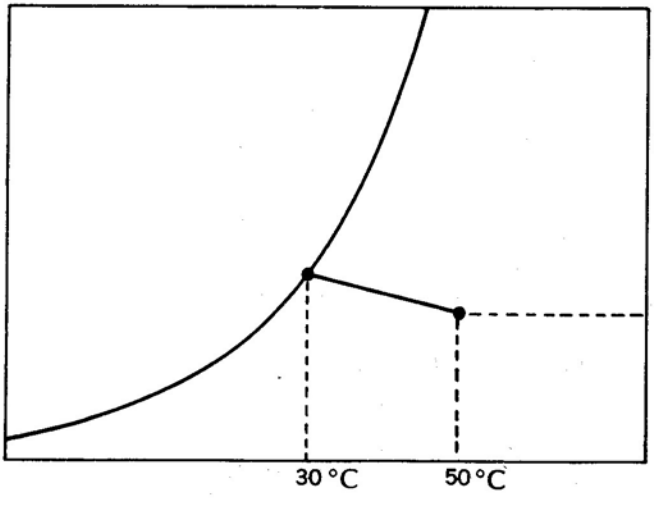
2.2 Balances de masa

$$G_{s_1} + G_{s_2} = G_{s_3}$$

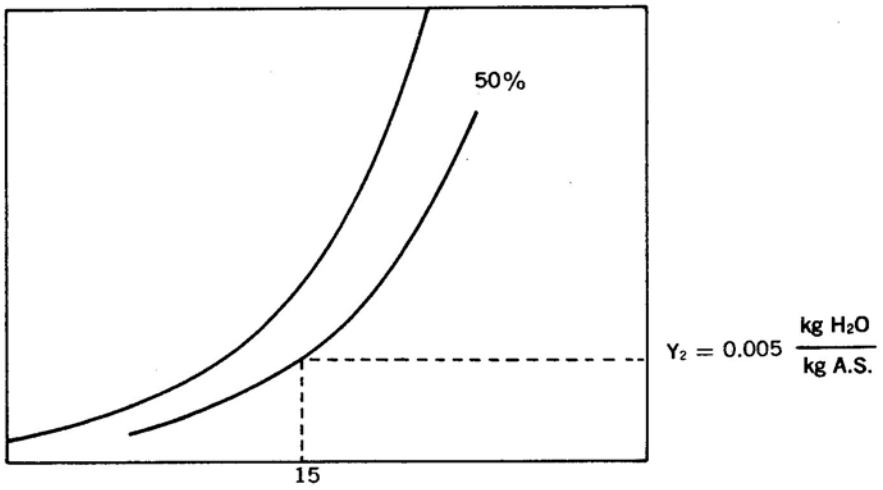
$$G_{s_1} Y_1 + G_{s_2} Y_2 = G_{s_3} Y_3$$

3. Cálculos

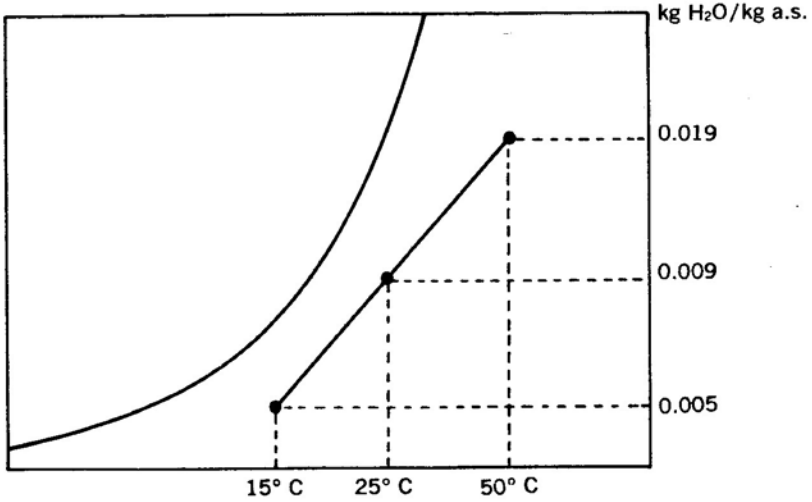
3.1 Humedades



$$Y_1 = 0.019 \frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg A.S.}}$$



3.2 Aire de mezcla



3.3 Volumen húmedo del aire en la corriente (1)

$$V_H = (1/29 + 0.019/18)\, 0.082\, (323) = 0.94 \text{ m}^3/\text{kg}$$

3.4 Aire seco inicial

$$G_{s_1} = 1\,000/0.94 = 1\,064 \text{ kg/h}$$

3.5 Balance de masa

$$G_{s_1} + G_{s_2} = G_{s_3}$$

$$1\,064 + G_{s_2} = G_{s_3}$$

$$1\,064\,(0.019) + G_{s_2}\,(0.005) = G_{s_3}\,(0.009)$$

$$20.216 + G_{s_2}\,(0.005) = (1\,064 + G_{s_2})\,(0.009)$$

$$20.216 + G_{s_2}\,(0.005) = 9.576 + (0.009)\,G_{s_2}$$

$$10.640 = 0.004\,G_2$$

$$G_2 = 2\,660 \text{ kg/h}$$

3.6 Volumen húmedo en la corriente (2)

$$V_{H} = (1/29 + 0.005/18)\,0.082\,(288)/1 = 0.821 \text{ m}^3/\text{kg}$$

3.7 Volumen de aire adicionado

$$G_2 = 2\,660\,(0.821) = 2\,183 \text{ m}^3/\text{h}$$

3.8 Volumen de aire resultante

$$V_{H_3} = (1/29 + 0.009/18)\,0.082\,(298) = 0.855 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$G_{s_3} = 2\,660 + 1\,064 = 3\,724 \text{ kg/h}$$

$$G_3 = 3\,724\,(0.855) = 3\,184 \text{ m}^3/\text{h}$$

4. Resultados

Humedad del aire resultante 0.009 kg H_2O/kg de aire seco.

Volumen del aire adicionado 2 183 m^3/h.

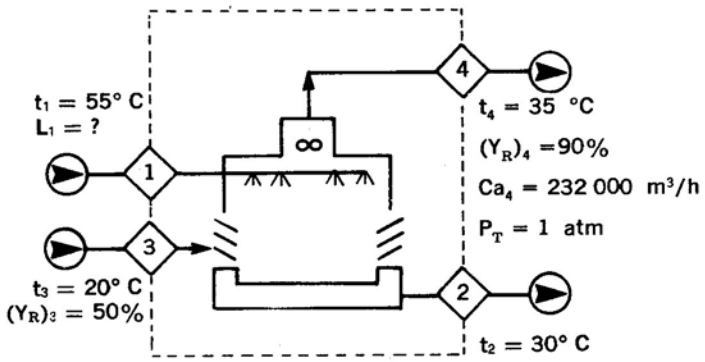
Volumen del aire resultante 3 184 m^3/h.

Problema 8.12

Se requiere enfriar agua por medio de aire en una torre de enfriamiento de agua desde 55 °C hasta 30 °C. El aire entra a la torre a 20 °C con una humedad relativa del 50 por 100 y sale de ella a 35 °C y con una humedad relativa del 90 por 100. El ventilador de la torre puede mover 232 000 m^3/h a 1 atm de presión a las condiciones de salida del aire.

¿Qué cantidad de m^3 de agua puede enfriar dicha torre cada hora?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

El calor perdido por el agua es el calor que gana el aire; éste es un calor latente y calor sensible de vaporización.

2.2 Balance de energía

$$G_s (H_4 - H_3) = L\, Cp\, (t_1 - t_2)$$

$$L_1 = L/\rho \qquad G_s = \mathbf{G}_4/V_{H_4}$$

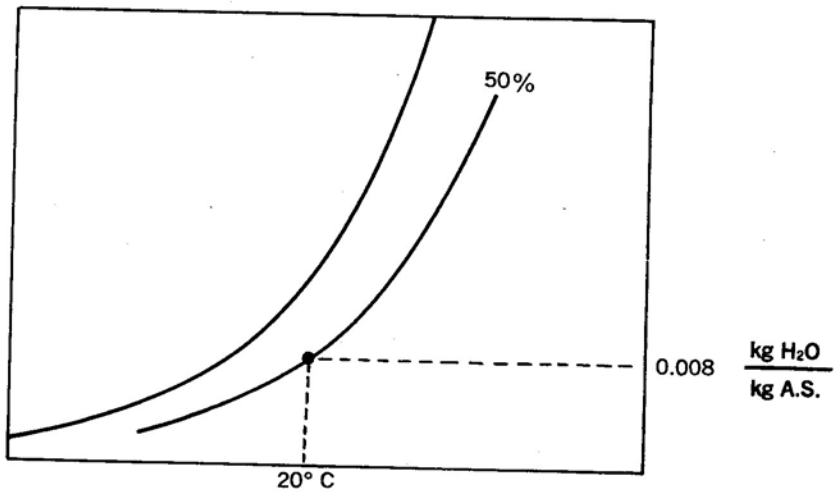
3. Cálculos

3.1 Entalpía del aire de entrada

$$Y_3 = 0.008$$

$$H_3 = |(0.24 + 0.46\,(0.008)|\,20 + 597\,(0.008)$$

$$H_3 = 9.6496 \text{ kcal/kg aire seco}$$



3.2 Entalpía del aire de salida

$$Y_4 = 0.0335$$

$$H_4 = [(0.24) + .046\ (0.0335)]\ 35 + 597\ (0.0335) = \mathbf{28.93}\ \text{kcal/kg aire seco}$$

$$V_{H_4} = (1/29 + 0.0335/18)\ (0.082\ (308)/1) = 0.92\ \text{m}^3\text{/kg aire seco}$$

3.3 Aire seco aspirado por el ventilador

$$G_s = \frac{232\,000\ \text{m}^3\text{/h}}{0.92\ \text{m}^3\text{/kg A.S.}} = \mathbf{252\,173}\ \frac{\text{kg aire seco}}{\text{h}}$$

3.4 Balance de energía

$$252\,173\ (28.75 - 9.64) = L\ (1)\ (55 - 30)$$

$$L = 191\,652\ \text{kg/h}$$

3.5 Volumen de agua enfriada

$$\rho = 998.2\ \text{kg/m}^3$$

$$L = 191\,652/998.2 = 191.99\ \text{m}^3\text{/h}$$

4. **Resultado**

La torre puede enfriar **191.99** m^3/h de agua.

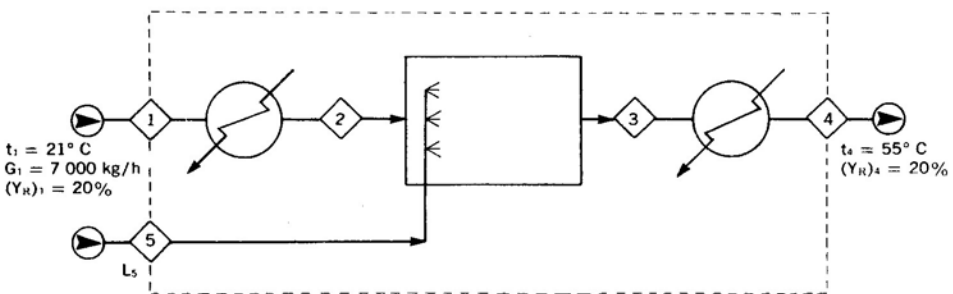
Problema 8.13

Para un cierto proceso de temperatura y humedad controladas se necesitan 7 000 kg/h de aire seco con 20 por 100 de humedad y 55 °C. El aire seco se puede obtener acondicionando aire con 20 por 100 de humedad y 21 °C, calentándolo primero y luego humidificándolo adiabáticamente hasta la humedad deseada, y finalmente recalentándolo hasta 55 °C.

El proceso de humidificación se lleva a cabo en una cámara de lluvia. El aire saliente de esta cámara está 4 °C más caliente que la temperatura de saturación adiabática.

¿A qué temperatura debe precalentarse, a qué temperatura saldrá de la cámara y cuánto calor se necesitará dar para precalentar el aire? P = 1 atm. ¿Cuánta agua se debe adicionar?

1. Traducción

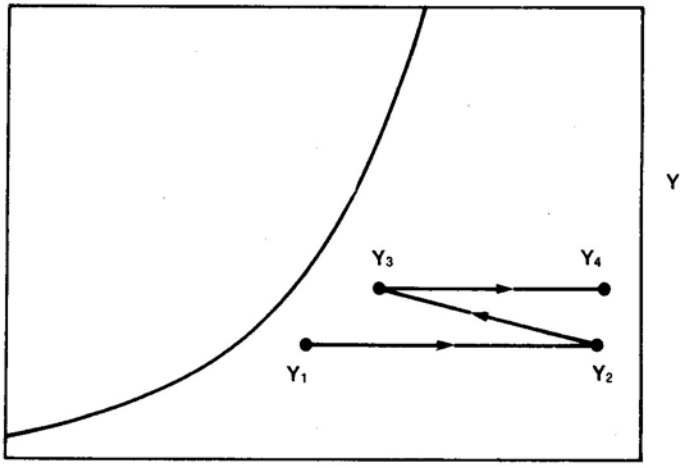


2. Planteamiento

2.1 Discusión

El paso del aire se puede seguir en la carta psicrométrica.

En ella, Y_4, es la humedad del aire a 20 por 100 y 55 °C, Y_3 es la salida del aire de la cámara de humidificación, Y_2 es la humedad del aire saliendo del precalentador.



2.2 Balance de humedad

$$L_5 = G_I (Y_4 - Y_1)$$

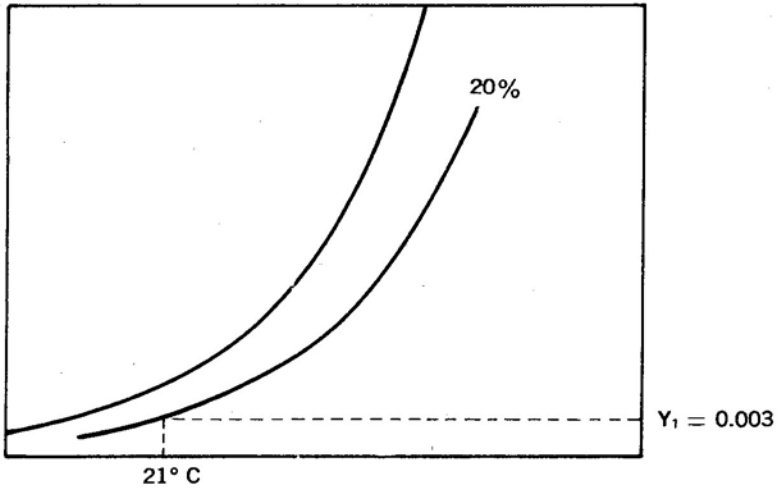
2.3 Balance de calor

$$Q = G_I (H_2 - H_1) + G_I (H_4 - H_3) = G_I C_{H_1} (t_2 - t_1) + G_I C_{H_4} (t_4 - t_3)$$

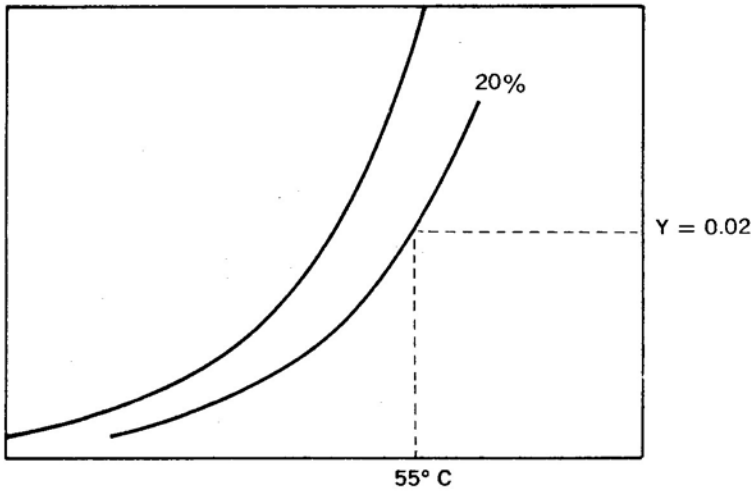
El proceso H_2 a H_3 es adiabático.

3. Cálculos

3.1 Humedad final e inicial

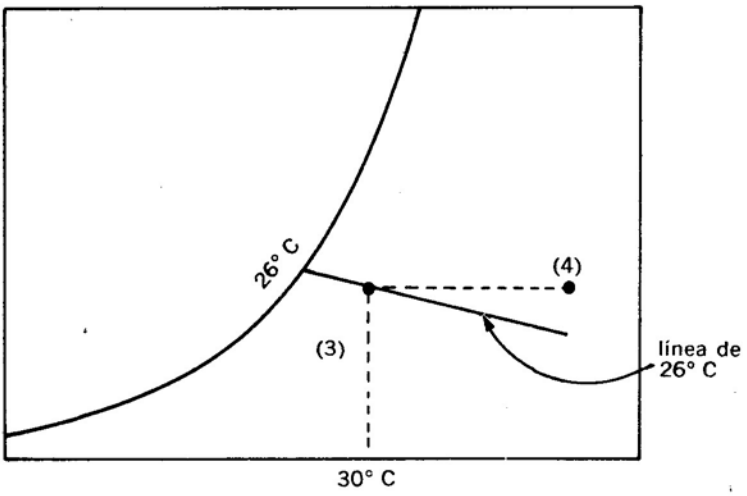


$$Y_4 \Big|_{20\%}^{55\ ^\circ C} = 0.02 \text{ kg } H_2O/\text{kg aire seco}$$



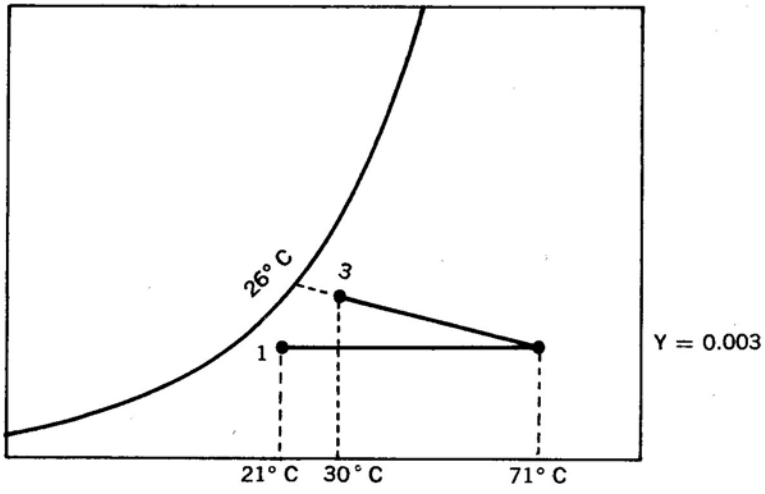
3.2 Temperatura y humedad en el humidificador adiabático

La temperatura de salida del humidificador t_3 se obtiene con la humedad de 0.02 kg H_2O/kg aire seco, pero 4 °C antes del final de la línea de enfriamiento adiabático. En la gráfica, la temperatura adiabática es de 26 °C.



3.3 Temperatura de entrada al humidificador

El aire original tiene una humedad de 0.003. Para llegar a la línea adiabática de 26 °C se debe precalentar hasta 71 °C



3.4 Calores húmedos

Calor húmedo en la corriente (1)

$$C_H = 0.242$$

Calor húmedo en la corriente (4)

$$C_H = 0.25$$

3.5 Calor necesario

$$Q = 7\,000\,(0.242)\,|71 - 21| + 7\,000\,(0.25)\,(55 - 30) = 84\,700 + 43\,750 =$$
$$= 128\,450 \text{ kcal/h}$$

3.6 Agua necesaria

$$L_5 = 7\,000 \frac{\text{kg aire seco}}{\text{h}} (0.02 - 0.003) \frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg aire seco}} = 119 \text{ kg/h}$$

4. Resultados

El aire se debe precalentar hasta 71 °C.

El aire sale de la cámara a 30 °C.

Se requieren 128 450 kcal/h.

Se deben adicionar 119 kg/h de agua.

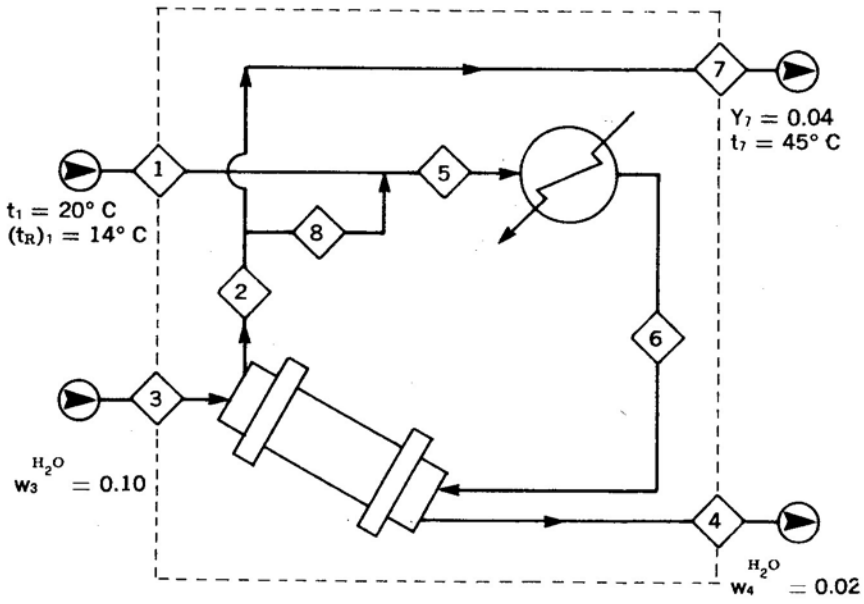
Problema 8.14

Se utiliza aire caliente para secar un mineral desde un 10 por 100 de humedad inicial hasta el 2 por 100 de humedad final. Este aire de secado se puede obtener a partir de un aire fresco a 20 °C y una temperatura de rocío de 14 °C y el 50 por 100 del aire saliente del secador.

La mezcla se pasa a un calentador, de donde sale lista para entrar al secador. El secado es adiabático. El aire saliente del secador está a 45 °C y Y = 0.04 kg H_2O/kg aire seco.

¿Cuántos m^3 de aire fresco se necesitan por cada 1 000 kg/h de material entrante?, ¿a qué temperatura deberá entrar el aire al secador?, ¿cuáles son las condiciones del aire de la mezcla?, ¿cuánta agua se evapora? y ¿qué cantidad de calor se deberá transmitir al precalentador?

1. Traducción

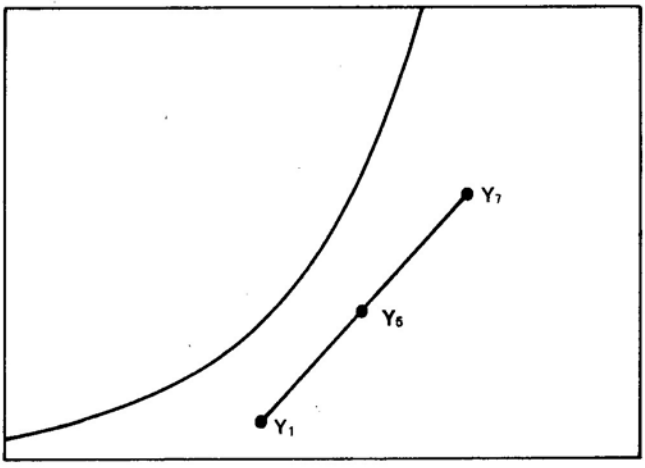


2. Planteamiento

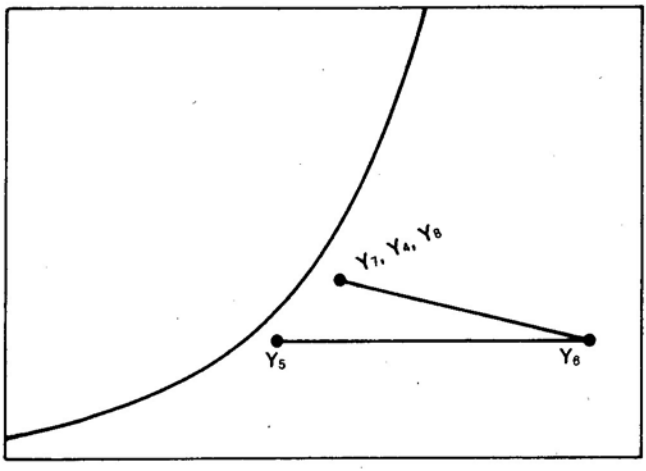
2.1 Discusión

El proceso se puede seguir en una carta psicrométrica.

Aire de mezcla



Secado



2.2 Balance de materia

Balance de agua

$$S_s (W_3 - W_4) = G_s (Y_2 - Y_5)$$

S_s = sólido seco entrante

$W_3^{H_2O}$ = kg de H_2O/kg sólido seco en la entrada

G_s = aire seco

$Y_j^{H_2O}$ = kg de H_2O/kg de aire seco a la salida

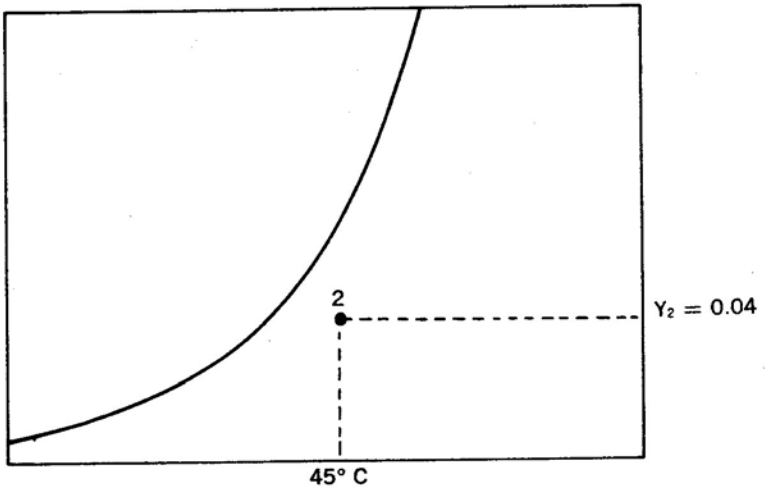
2.3 Calor requerido en el precalentador

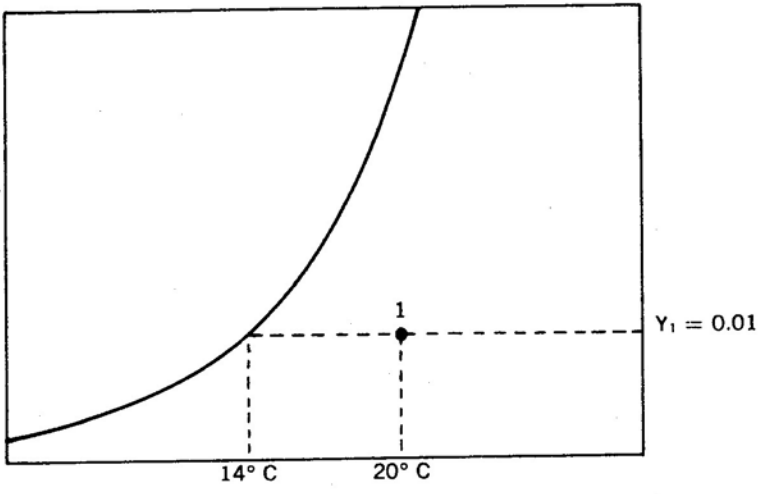
$$Q = G_s C_{H_5} (t_6 - t_5)$$

3. Cálculos

3.1 Humedades Y_2 y Y_1

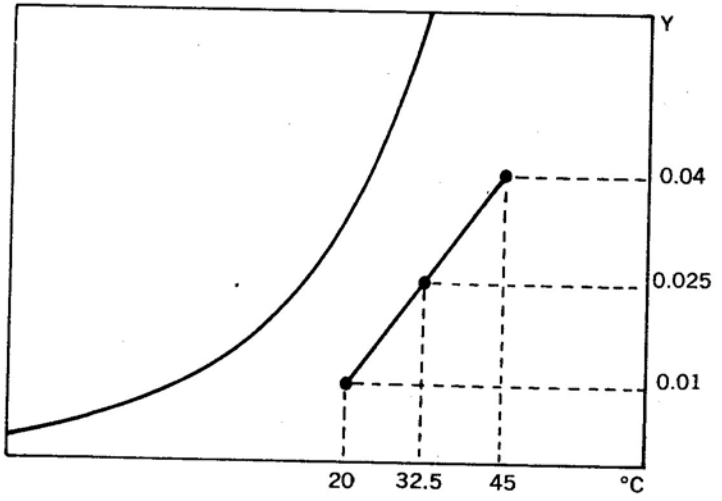
De la tabla psicrométrica





3.2 Aire de mezcla

En la carta psicrométrica se localizan las condiciones del aire de la corriente (1) y el de la corriente (7), se unen los dos puntos y las condiciones del aire de mezcla quedarán a la mitad de la línea, ya que se introduce un 50 por 100 de cada aire



$Y_2 = 0.04$

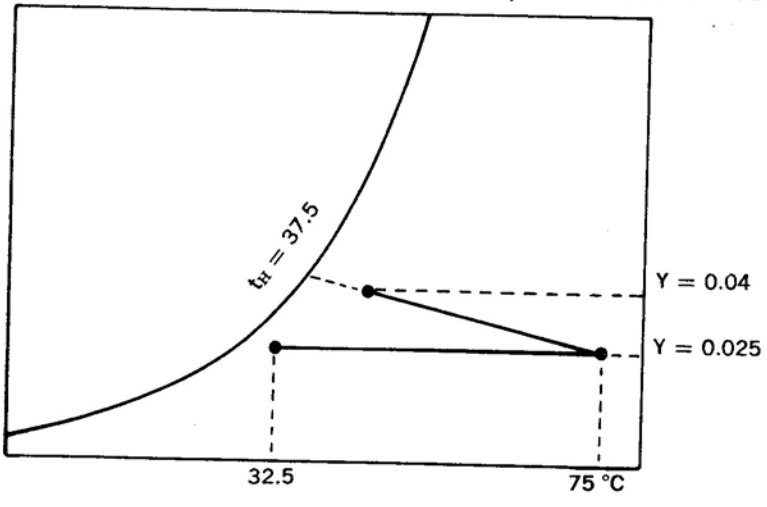
$Y_5 = 0.025$

$Y_7 = 0.01$

$t_5 = 32.5$

3.3 Proceso en el secador

Como el proceso de secado es adiabático, tendremos que seguir la línea de bulbo húmedo de las condiciones del aire en la corriente (7) hasta cruzar la humedad de 0.025, ya que el aire se precalienta a humedad constante.



3.4 Balance de material

Base 1 kg de material húmedo

$$W_3 = 10/90 = 0.111 \text{ kg } H_2O/\text{kg sólido seco}$$
$$W_4 = 2/98 = 0.0204 \text{ kg } H_2O/\text{kg sólido seco}$$

Agua evaporada por kg de material seco

$$\Delta W = 0.111 - 0.0204 = 0.0906 \text{ kg } H_2O/\text{kg sólido seco}$$

Material seco entrante

$S_s = 1\,000$ kg (0.9 kg sólido seco/kg de material) $= 900$ kg sólido seco/h

Agua total evaporada $= 900\ (0.0906) = 81.54$ kg H_2O/h

Aire seco $900\ (0.111 - 0.0204) = G_s\ (0.04 - 0.025)$

$$G_s = 81.54/0.015 = 5\,436 \text{ kg aire seco/h}$$

3.5 Calor en el precalentador

$$C_{H_5} = 0.252 \text{ kcal/kg aire seco °C}$$

$$Q = 0.252\ (5\,436)\ (75 - 32.5) = 58\,219.56 \text{ kcal/h}$$

3.6 Metros cúbicos de aire fresco requeridos por 1 000 kg de material húmedo

$$G_1 = 5\,436/2 = 2\,718 \text{ kg/h}$$

se requiere sólo la mitad del que entra al secador.

$$V_{H_1} = \left(\frac{1}{29} + \frac{0.01}{18}\right)\frac{0.082\ (293)}{1} = (0.03448 + 0.000555)\ 24.026 =$$

$$= 0.841 \text{ m}^3/\text{kg aire seco}$$

$$Ca = 2\,718 \frac{\text{kg}}{\text{h}}\ (0.841)\ \frac{\text{m}^3}{\text{kg aire seco}} = 2\,285.8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

4. **Resultados**

Se requieren 2 285.8 m^3/h.

El aire entra a 75 °C.

El aire de mezcla está a 32.5 °C y Y = 0.025.

Se evaporan 81.54 kg/h.

Se requieren 58 219.56 kcal/h.

Problema 8.15

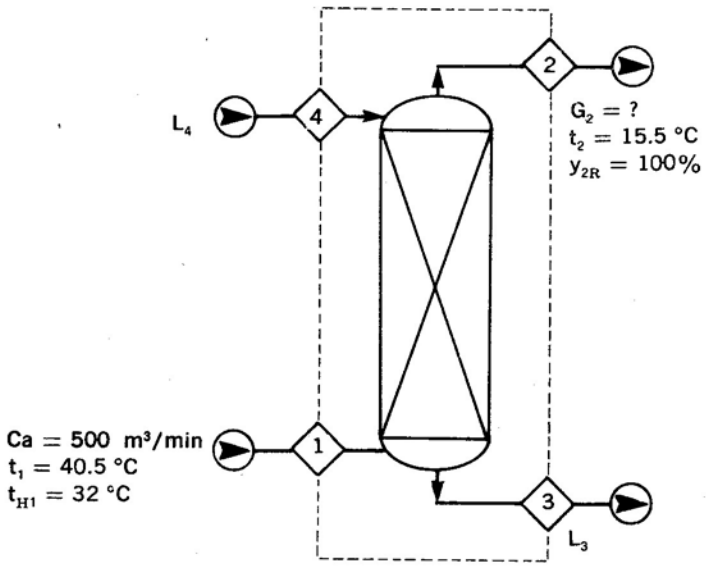
Se planea deshumidificar 500 m^3/min de aire en una torre empacada que estará instalada al nivel del mar. El aire se hallará inicialmente a 40.5 °C con una temperatura de bulbo húmedo de 32 °C. El aire saldrá con una temperatura de bulbo húmedo de 15.5 °C y saturado.

Calcular:

a) la cantidad de agua condensada en kg/h.

b) el gasto volumétrico de aire a la salida de la torre en m^3/min.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Agua condensada

$$L_3 = G_s (Y_1 - Y_2)$$

2.2 Gasto de aire seco

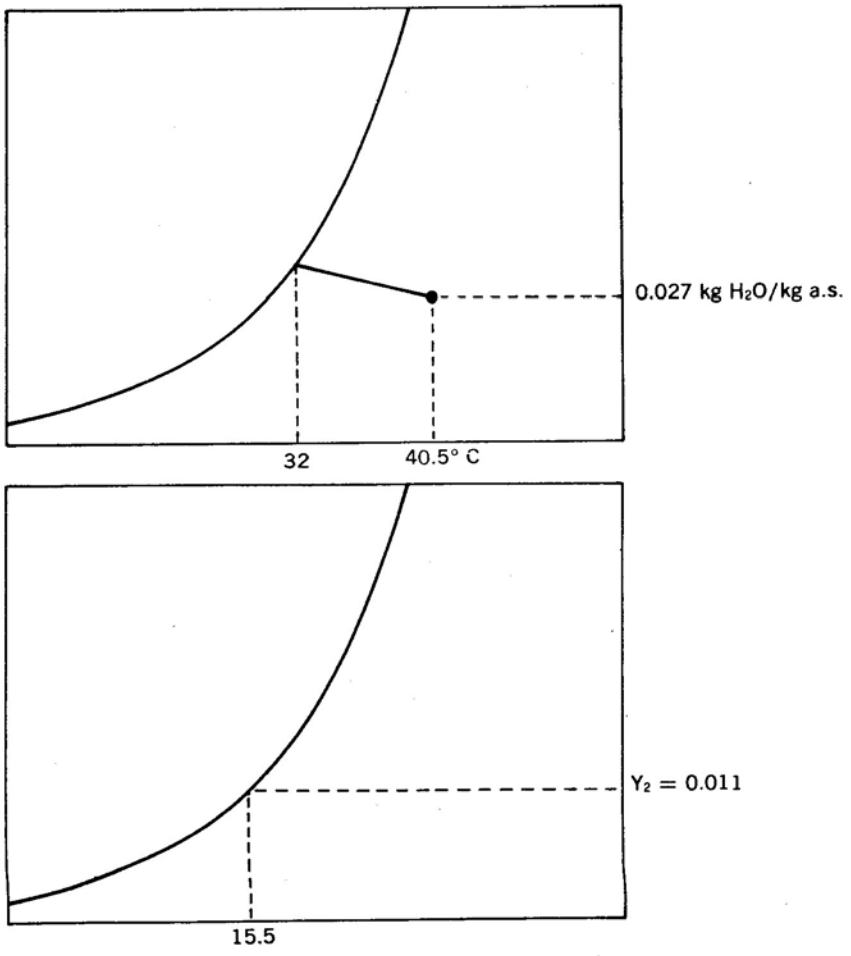
$$G_s = G_1/V_{H_1}$$

2.3 Volumen de aire a la salida

$$Ca_2 = G_s V_{H_2}$$

3. Cálculos

3.1 Humedades



3.2 Volúmenes húmedos

$$V_{H_1} = (1/29 + 0.027/18)\, 0.082\, (273 + 40.5)/1 = 0.9256 \text{ kg aire seco/m}^3$$

$$V_{H_2} = (1/29 + 0.011/18)\, 0.082\, (273 + 15.5)/1 = 0.831 \text{ kg aire seco/m}^3$$

3.3 Gasto másico de aire

$$G_s = 500/0.9256 = 540.19 \text{ kg aire seco/min}$$

3.4 Agua condensada

$$L_3 = 540.19\, (0.027 - 0.011) = 8.64 \text{ kg/min} \times 60 = 518.6 \text{ kg/h}$$

3.5 Gasto volumétrico a la salida

$$Ca_2 = 540.19\, (0.831) = 448.8 \text{ m}^3/\text{min}$$

4. **Resultados**

Agua condensada 518 kg/h.

Gasto volumétrico de aire a la salida igual a 448.8 m^3/min.

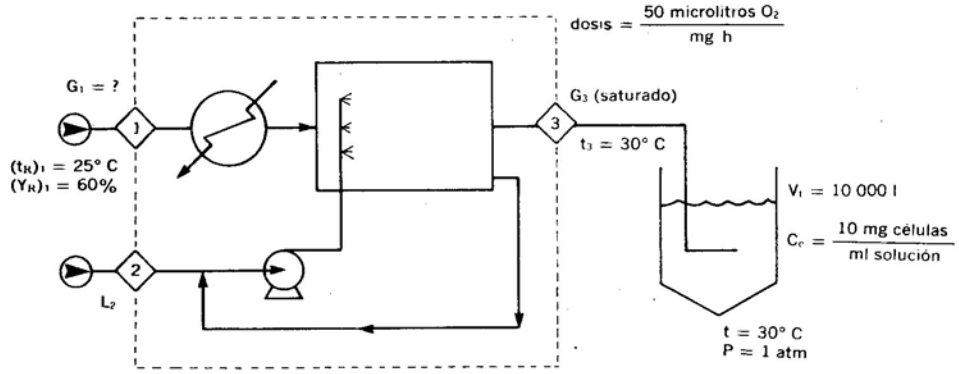
Problema 8.16

En un proceso para producir antibióticos se usa un fermentador intermitente, en el que se esteriliza el medio de cultivo "in situ" usando un serpentín de vapor.

Una vez esterilizado se inocula y se empieza a oxigenar con aire estéril hasta que se ha llevado a cabo la fermentación completa.

El aire usado en el fermentador, que tiene un volumen de 10 000 l, debe estar saturado para evitar problemas de acarreo de agua, que aumentan la concentración de sales en el fermentador. Por esa razón, el aire atmosférico (que está a 25 °C y 60 por 100 de saturación) debe humidificarse adiabáticamente. El requerimiento de oxígeno por el cultivo es de 50 microlitros de oxígeno/mg de células/h y se tiene una concentración de 10 mg de células/ml de solución. El caldo se encuentra a 30 °C y 1 atm y el aire debe inocularse a la misma temperatura. Determine cuánto aire se necesita alimentar al fermentador, cuánta agua debe introducirse al humidificador y cuánto calor se requiere para precalentar el aire.

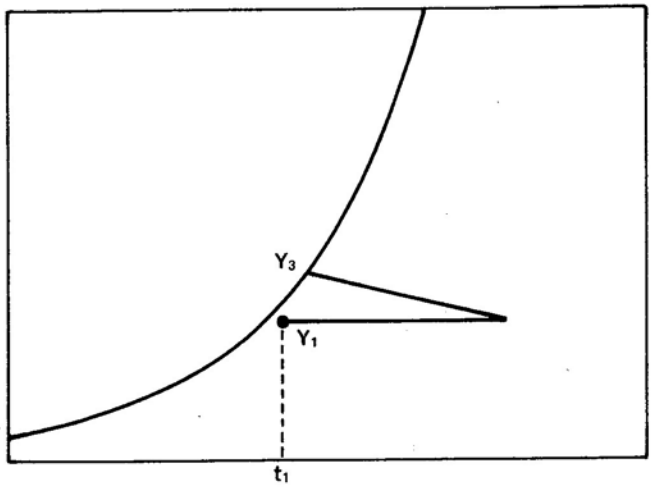
1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

El aire entrante debe calentarse hasta que la humedad de entrada alcance una temperatura tal que al humidificarse adiabáticamente salga con una temperatura de 30 °C y saturado.



2.2 Balance de aire

$$V_T C_c = \text{Masa de células}$$

$$\text{Aire} = V_T C_c\ (\text{Dosis})\left(\frac{1}{\%\ \text{oxígeno en aire}}\right) = \text{volumen de aire} = \mathbf{G_3}$$

$$G_s = G_3 V_H = \text{aire seco}$$

2.3 Agua requerida en el humidificador

$$L_2 = G_s\ (Y_3 - Y_1)$$

3. Cálculos

3.1 Balance de aire

$$Ca_3 = 10\,000\ l\left(\frac{10\ \text{mg células}}{\text{ml solución}}\right)\left(\frac{1\,000\ \text{ml}}{l}\right)\left(\frac{50\ \mu l\ O_2}{\text{mg células}}\right)\left(\frac{l}{0.21}\right)$$

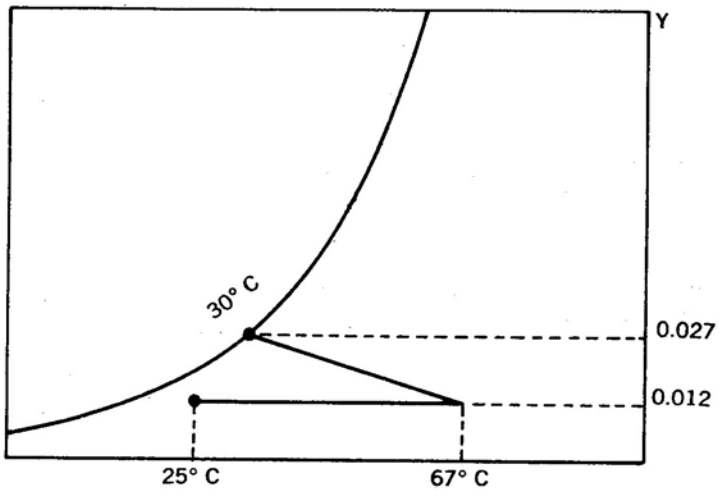
$$Ca_3 = 23\,809\,000\,000\ \mu l = 23\,809\ l \text{ de aire}$$

3.2 Humedad del aire de entrada y salida

$Y_1 = 0.12$ kg H_2O/kg aire seco $\qquad$ $Y_3 = 0.027$ kg H_2O/kg aire seco

3.3 Temperatura a la que se debe calentar el aire antes de introducirlo al humidificador.

Siguiendo la carta psicrométrica tal como se indica en la figura que sigue



3.4 Aire necesario

$$V_{H_3} = (1/29 + 0.027/18)\,(273 + 30)\,(0.082)/1 = 0.892\ m^3/kg$$

$$V_{H_3} = 0.892\ m^3/kg$$

$$G_s = \frac{23.809\ m^3/h}{0.892\ m^3/kg} = 26.692\ kg/h$$

3.5 Agua necesaria

$$L_2 = 26.692\ [(0.027) - (0.012)] = 0.4000\ kg/h$$

3.6 Calor para precalentar

$$C_{H_1} = 0.246$$

$$Q = (0.246)\ (26.692)\ (67 - 25) = 275.78\ kcal/h$$

4. **Resultados**

Se necesitan 23 809.51/h de aire, 0.4 kg/h de agua y 275.78 kcal/h para precalentar.

Problema 8.17

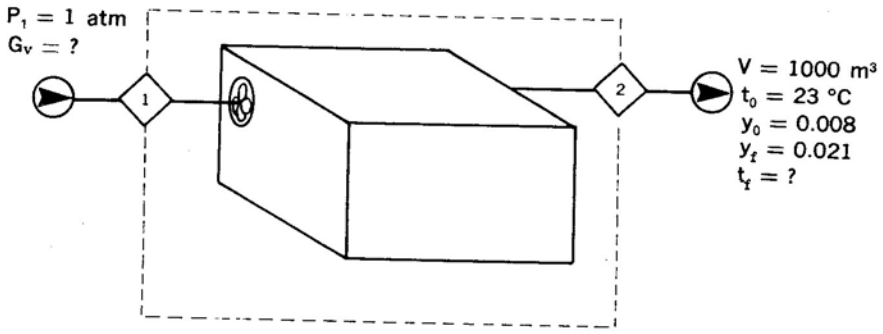
Un recinto de 1 000 m^3 que contiene aire a 23 °C con una humedad absoluta de 0.008 kg de agua/kg de aire se humidifica adicionándole vapor de agua saturado a 1 atm, en cantidad tal que la humedad final obtenida después de la adición del vapor de agua es de 0.021 kg agua/kg de aire seco.

Suponiendo que se homogeneiza perfectamente la mezcla, sin haber condensación de vapor de agua en las paredes y sin pérdidas de calor al exterior, calcule:

a) La cantidad de vapor de agua adicionado

b) La temperatura final de la mezcla

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Si adicionamos la masa G_v de vapor saturado a una masa G_0 de gas húmedo en las condiciones t_o, Y_o, H_o, el estado final se puede obtener mediante un balance de masa y de entalpía.

2.2 Balance de masa

$$G_s Y_o + G_v = G_s Y_f$$

$$G_s (Y_f - Y_o) = G_v$$

G_s = masa de aire seco

2.3 Balance de energía

$$G_s H_o + G_v H_v = G_s H_f$$

$$G_s (H_f - H_o) = G_v H_v$$

$$G_s (H_f - H_o) = G_s (Y_f - Y_o) H_v$$

$$H_f = H_o + (Y_f - Y_o) H_v$$

$$H_f = C_H (T_f - T_o) + \lambda_o Y_f$$

3. Cálculos

3.1 Masa del aire seco en el recinto

$$G_s = \mathbf{G}/V_H$$

$$V_H = (1/29 + 0.008/18)\,(0.082)\,(296) = 0.8476 \text{ m}^3/\text{kg aire seco}$$

$$G_s = 1\,000/0.8476 = 1\,179.7 \text{ kg}$$

3.2 Masa de vapor

$$G_v = 1\,179.7\,(0.021 - 0.008) = 15.3361 \text{ kg de vapor}$$

3.3 Entalpía del aire húmedo inicial

$$H_o = |0.24 + 0.46\,(0.008)|\,(23) + 597\,(0.008) = 10.38 \text{ kcal/kg aire seco}$$

3.4 Entalpía del vapor saturado

De tablas de vapor

$$H_v = 638.5 \text{ kcal/kg}$$

3.5 Entalpía del aire final

$$H_f = 10.38 + (0.021 - 0.008)\,(638.5)$$

$$H_f = 18.68 \text{ kcal/kg aire seco}$$

3.6 Temperatura de la mezcla final

$$18.68 = |0.24 + 0.46\,(0.021)|\,T_f + 597\,(0.021)$$

$$18.68 = 0.24\,T_f + 0.00966\,T_f + 12.537$$

$$6.143 = 0.24966\,T \quad ; \quad T_f = 24.6\ ^\circ C$$

4. **Resultados**

Cantidad de vapor de agua adicionado, 15.33 kg de vapor.

Temperatura de la mezcla final 24.6 °C.

PROBLEMAS PROPUESTOS

Problema 8.18

En un salón de clase se observa que la temperatura de bulbo seco del aire es de 25 °C y la de bulbo húmedo de 20 °C. ¿Cuál es la humedad absoluta, la relativa, la entalpía del aire y el volumen húmedo?

a) A la presión de 760 mm de Hg

b) A la presión de 586 mm de Hg

Resultados

Presiones en mm Hg	Y kg/kg	Y_R %	H kcal/kg	V_H m³/kg aire seco
760	0.013	70	13.91	0.86
586	0.017	65	16.3445	1.1226

Problema 8.19

La presión parcial del vapor de agua en una masa de aire húmedo a 30 °C y 740 mm de Hg es de 14 mm de Hg. Calcúlese:

a) El punto de rocío
b) La humedad absoluta
c) El calor húmedo
d) El volumen húmedo
e) La entalpía
f) La humedad relativa

Resultados

Temperatura de rocío: 16.4 °C.
Humedad absoluta: 0.012 kg H_2O/kg aire.
Calor húmedo: 0.2455 kcal/kg aire °C.
Volumen húmedo: 0.897 m³/kg aire seco.
Entalpía: 14.52 kcal/kg.
Humedad relativa: 44%.

Problema 8.20

A un secador rotatorio se le alimentan 3 000 kg/h de arena con una humedad del 50 por 100. La arena que sale del secador tiene una humedad del 3 por 100 (en base húmeda). Para secar la arena se usa una corriente de aire caliente a 100 °C y 0.007 kg H_2O/kg aire seco, que entra a contracorriente y sale a 40 °C. La arena entra a 20 °C y sale a 35 °C. La capacidad calorífica de la arena es constante e igual a 0.21 kcal/kg °C. Si el secador está perfectamente aislado, determine la cantidad de aire necesario y la humedad del aire a la salida del secador.

Resultados

Se requieren 59 814 kg/h de aire seco.

La humedad del aire saliente es de 0.0313.

Problema 8.21

Se quiere volver a diseñar una torre de enfriamiento cuyo ventilador tiene una capacidad de 2.28 (10^5) m^3/h de aire húmedo a 25 °C y 18 °C de bulbo húmedo. El aire de descarga sale a 35 °C con una t_H de 32 °C.

¿Qué cantidad de agua puede enfriarse en kg/h si dicha agua entra a 49 °C y sale a 32 °C?, ¿qué porcentaje del agua entrante se pierde en el proceso?

Resultados

Se enfrían 2.22 (10^5) kg/h de agua.

Se pierde el 2.279% del agua.

Problema 8.22

En un secador adiabático entran 1 000 kg/h de un material que está a la misma temperatura de bulbo húmedo del aire entrante en el mismo. Las humedades del material, medidas sobre base seca, son 60 por 100 a la entrada y 5 por 100 a la salida. Para el secado se dispone de aire a 15 °C con una presión parcial de vapor de 2 mm de Hg, que se calienta antes de entrar en el secador. A la salida del secador el aire se encuentra a 30 °C y su humedad relativa es del 85 por 100. Calcúlese:

a) La temperatura de precalefacción

b) El volumen de aire entrante al secador

c) La cantidad de calor suministrado

Resultados

La temperatura de precalefacción es de 80 °C.

El volumen de aire entrante al secador es de 16 085.63 kg/h.

El calor suministrado será de 251 719 kcal/h.

Problema 8.23

Para un cierto proceso se necesitan 6 000 m^3/h de aire a 40 °C y con una humedad relativa del 30 por 100. Para obtener ese aire se parte de aire a 18 °C con una humedad del 45 por 100, el cual se calienta, se satura adiabáticamente y recalienta hasta 40 °C. Calcúlese:

a) La temperatura a la que sale el aire del humidificador

b) La temperatura de precalefacción del aire

c) La cantidad total de calor suministrado

Resultados

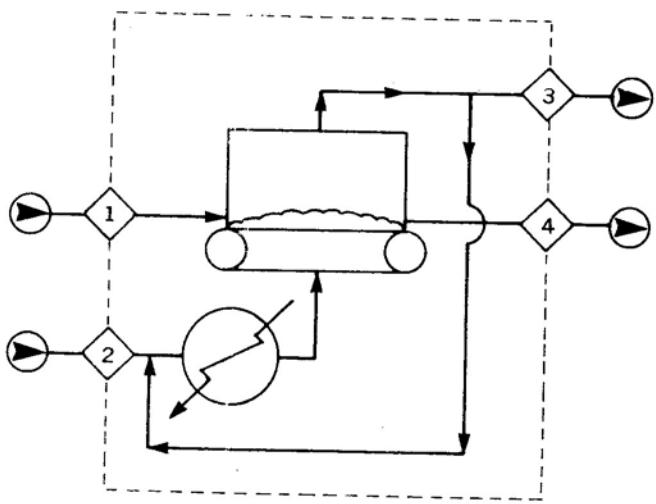
El aire sale del humidificador a 19 °C.

El aire se debe precalentar hasta 42 °C.

Se requiere suministrar 72 891 kcal/h.

Problema 8.24

Para secar un cierto sólido se utiliza el siguiente dispositivo:



Los sólidos se secan con aire caliente. Este aire se obtiene a partir de aire atmosférico (32 °C y 15 °C de bulbo húmedo), y dos terceras partes en base seca de aire reciclado. La corriente combinada se calienta hasta

125 °C en un cambiador de calor. El aire saliente del secador tiene una humedad relativa del 85 por 100. La humedad inicial de los sólidos es de 1.5 kg H_2O/kg sólido seco y la final 0.2 kg H_2O/kg sólido seco. El secador trabaja adiabáticamente. Si se quieren tratar 1 000 kg/h de sólidos en las condiciones iniciales, ¿qué cantidad de aire atmosférico se debe utilizar?, ¿qué cantidad de calor se debe suministrar en el cambiador de calor?

Resultados

Se deben utilizar 5 591 kg/h de aire atmosférico.

El calor requerido es de 349 196 kg/h.

Problema 8.25

Necesitamos disponer de aire a 55 °C con una temperatura de bulbo húmedo de 35 °C, que preparamos en una instalación de acondicionamiento a partir de aire atmosférico a 20 °C con humedad relativa de 60 por 100. El proceso completo consta de una precalefacción seguida de una humidificación adiabática, hasta que su humedad relativa sea del 90 por 100, y calefacción final hasta las condiciones que nos interesan. Calcúlese:

a) La temperatura de salida del aire del humidificador.

b) La temperatura de precalefacción si el proceso se lleva a cabo a la presión de 586 mm de Hg (México, Distrito Federal).

c) La cantidad de calor suministrado por m^3 de aire en las condiciones finales.

Resultados

Temperatura de salida del humidificador 33 °C.

Temperatura de precalentamiento 99 °C.

Se requieren 19.55 kcal/m^3 de aire en las condiciones finales.

Problema 8.26

Se está diseñando una torre de enfriamiento con empaque de madera y de tiro inducido para enfriar 19 000 l min de agua desde 43.5 °C hasta 29.5 °C.

El aire tiene inicialmente una temperatura de 26.5 °C y bulbo húmedo de 21 °C. Con fines de diseño, se supone que el aire saldrá a la temperatura del agua caliente. Calcúlese:

a) El gasto másico del aire y el gasto volumétrico en m^3/h que se tendrá a la salida de la torre, es decir, el aire que pasará por el ventilador.

b) La relación de agua a aire que se tendrá en la torre en kg H_2O/kg de aire seco.

c) La cantidad de agua que es necesario agregar al sistema para reponer la que se pierde por evaporación durante el enfriamiento en l/min y cuando la presión de trabajo es de 1 atm.

Resultados

Gasto 8 775 kg/min.

Gasto volumétrico 8 538 m^3/min.

Relación 4.65.

Agua 368.55 kg/min.

Problema 8.27

En una planta se ha instalado una torre de tiro inducido para enfriar agua. Al hacerse una prueba en la torre se obtuvieron los siguientes datos:

Agua entrante: 7 m^3/min a 46 °C

Agua saliente: 25.5 °C

Aire entrante: 24 °C en bulbo seco; 15.5 °C en bulbo húmedo

Aire saliente: 38 °C

¿Cuál es la capacidad del ventilador en m^3/min si la torre está instalada en la ciudad de México, donde la presión atmosférica es de 586 mm de Hg?

Resultado

La capacidad del ventilador será de 5 780.83 m^3/min.

Problema 8.28

Un gas a 700 mm de Hg y 60 °C contiene 66% de N_2 y 34% de CO_2 en base seca, y además tiene 0.111 moles de vapor de agua por mol de gas seco.

Calcule el análisis en % en peso, el punto de rocío y la humedad relativa del mismo.

Resultados

El análisis es 52.1% de N_2, 42.2% de CO_2 y 5.63% de H_2O. El punto de rocío es de 44.5 °C. La humedad relativa es del 44.5%.

Problema 8.29

Se burbujea nitrógeno a través de benceno a la presión atmosférica. Si la temperatura es de 26.1 °C y la presión de vapor del benceno es de 100 mm de Hg, determine los moles de nitrógeno necesarios para vaporizar 10 kg mol de benceno.

Resultado

Se requieren 66 kg mol de N_2.

Problema 8.30

Una mezcla de octano y aire a 82 °C y una presión de 1 atm tiene una humedad relativa de 25% ¿Cuál es su humedad y su punto de rocío?

Resultados

El punto de rocío de la mezcla es de 48 °C. Y = 0.2488.

Problema 8.31

Para secar un material se usa aire seco. Al secador entra a 50 °C y 20% de humedad relativa, y sale del mismo a 80 °C y con 70% de humedad relativa. Si se quieren eliminar 50 kg/h de H_2O, ¿qué volumen de aire a las condiciones de entrada se deberá usar, si se trabaja a 700 mm de Hg?

Resultado

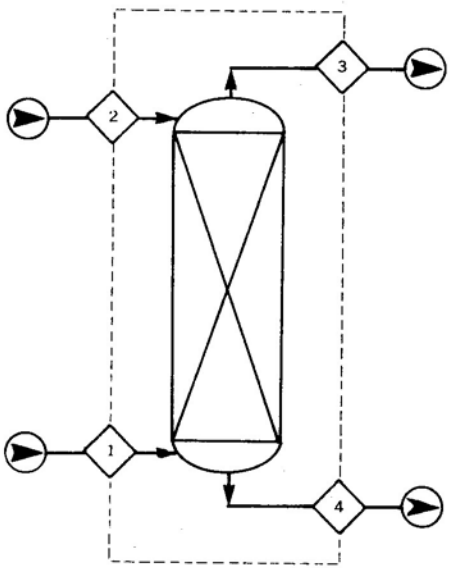
Se requieren 98.424 m^3/h de aire.

Problema 8.32

Una mezcla de amoniaco y aire (4.9% de NH_3 en volumen) a una presión de 745 mm de Hg y a una temperatura de 40 °C se pasa a una torre de absorción a razón de 283 m^3/min.

En la torre, esta mezcla se pone en contacto con una corriente de 68 litros por minuto de agua, que absorbe el NH_3 de la corriente de gases. Ningún otro constituyente gaseoso se disuelve en el agua. La corriente saliente de la torre emerge a 25.5 °C y 740 mm de Hg y está saturada con vapor de agua.

¿Cuál es el % en peso de NH_3 en la corriente acuosa saliente?



Resultado

El amoniaco sale con el 12.94% en peso.

Problema 8.33

En una mezcla de benceno-nitrógeno a 40 °C y 720 mm de Hg, la presión parcial del benceno es de 50 mm de Hg. Para separar el 80% del benceno se somete la mezcla a compresión y enfriamiento. Calcule: **a)** la presión final si se enfría hasta 10 °C, **b)** el volumen inicial para condensar 50 kg de benceno por hora.

Resultados

Se requiere comprimir hasta 4.08 atm. Se necesitan tratar 312 m^3/h de gases.

Problema 8.34

Se tiene un aire a 50 °C y 760 mm de Hg y 50% de humedad relativa. Se puede secar este aire por medio de tres procesos, que son: **a)** enfriamiento hasta 20 °C a presión constante, **b)** compresión hasta 5 atm a temperatura constante, **c)** compresión hasta 5 atm y enfriamiento hasta 20 °C.

Calcule para cada caso la fracción condensada.

Resultados

Con el enfriamiento se quita el 63.83% de humedad. Con la compresión el 61.7%. Con la combinación el 92.91%.

Problema 8.35

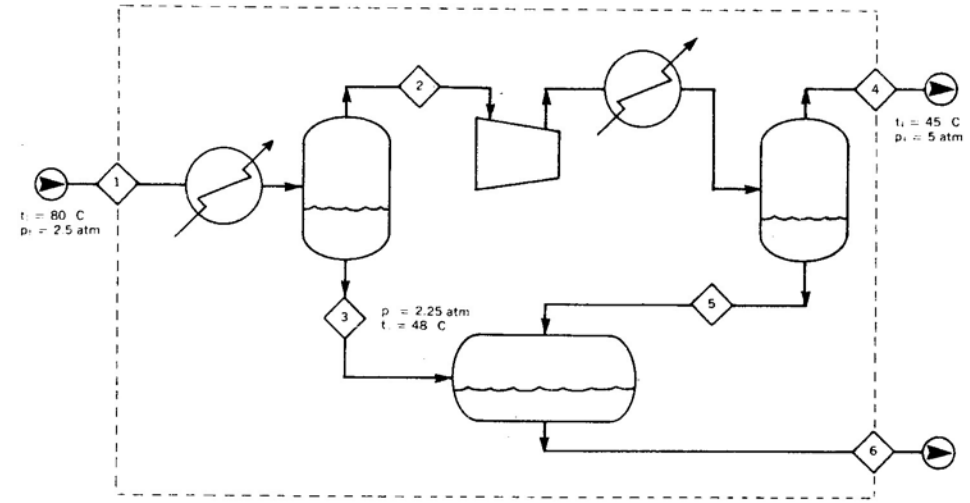
Por una tubería fluye aire húmedo. En un cierto punto de la misma la temperatura es de 26 °C y la presión total es de 753 mm de Hg, siendo la presión de vapor de agua en el aire de 12 mm de Hg. Para medir el flujo de aire húmedo se introducen a la tubería 15 kg mol/h de gases de combustión a 753 mm de Hg y 101 °C. Los gases tienen una composición de 18.2% de CO_2, 1.6% O_2 y 80.2% de N_2 en base seca. La presión parcial del vapor de agua en los gases de combustión es de 17 mm de Hg. Después de que los gases se han mezclado totalmente, se toma una muestra corriente abajo de la tubería. La muestra se extrae a 727 mm de Hg a 33 °C y tiene 7.2% de CO_2 en base seca. Calcule los kilos por hora de aire húmedo que se mueven por la tubería.

Resultado

Pasan 660.07 kg/h de aire húmedo.

Problema 8.36

Una mezcla de aire saturado con vapor de agua sale por arriba de una torre de lavado a razón de 250 m^3/min medidos a 80 °C y 2.5 atm. Esta mezcla se enfría para condensar algo de agua antes de ser comprimida y enfriada hasta las condiciones finales de 45 °C y 5 atm.



Haga el balance de materiales en moles/h en las cinco corrientes. ¿Cuál es la cantidad de m^3/h de gas saliente del último tanque separador?

Las corrientes líquidas salientes de los dos recipientes se dirigen a un tanque de almacenamiento. ¿Cuál será el tamaño de éste para tres horas de capacidad? Use $L/D = 4$.

Resultado

El volumen del tanque es de 13.2 m con diámetro de 1.61 m.

Problema 8.37

La presión de vapor del agua a 21 °C es 18.77 mm de Hg. ¿Cuál será la fracción mol de agua en aire saturado con vapor de agua a 21 °C y 763 mm de Hg? ¿Cuál será la fracción masa del vapor de agua?

Resultado

La fracción mol es de 0.0245. La fracción peso de 0.0154.

CAPÍTULO 9

BALANCES DE BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA EN REACCIONES QUÍMICAS

OBJETIVOS

Tras el estudio de este capítulo, el lector será capaz de: **a)** Efectuar balances de materia en sistemas con reacción química. **b)** Calcular los calores de reacción a cualquier temperatura. **c)** Hacer balances de energía en procesos con reacción química.

REACCIONES QUIMICAS

Las reacciones químicas en una planta industrial son de gran importancia, ya sea como parte principal del proceso de obtención de los productos o como generación de servicios. En este último caso están la combustión y el tratamiento de agua. La combustión se usa principalmente como fuente de energía.

Una reacción química es una transformación o cambio reversible o irreversible, originado por la interacción de moléculas, átomos, iones o radicales, para formar una o más sustancias nuevas.

CLASIFICACION DE REACCIONES

Las reacciones químicas pueden ser clasificadas como homogéneas si sólo interviene una fase o heterogéneas si hay más de una fase participando en la reacción.

Un sistema de reacciones se denomina complejo si ocurre más de una reacción, lo que origina que se formen varios productos, algunos de los cuales son más importantes que los otros. Entre las reacciones complejas se encuentran las consecutivas, en las que el producto de la primera reacción reacciona a su vez con alguno de los reactivos del sistema.

$$C_6H_6 + Cl_2 \longrightarrow C_6H_5Cl + HCl$$

$$C_6H_5Cl + Cl_2 \longrightarrow C_6H_4Cl_2 + HCl$$

$$C_6H_4Cl_2 + Cl_2 \longrightarrow C_6H_3Cl_3 + HCl$$

Otro tipo de reacciones complejas es el de las simultáneas, en las que a partir de los mismos reactivos se obtienen varios productos diferentes.

$$C + O_2 \longrightarrow CO_2$$

$$C + \tfrac{1}{2}O_2 \longrightarrow CO$$

REACTIVO LIMITANTE

Cuando en una reacción química el número de moles de uno de los reactivos es menor que el número de moles de otro reactivo, de acuerdo con la ecuación balanceada, el número de moles de los productos depende del número de moles del reactivo que se encuentra presente en menor cantidad. Este reactivo se denomina reactivo limitante.

RENDIMIENTO

En las reacciones reales efectuadas en los procesos industriales, la conversión no es total, pues dependen de las condiciones en las cuales se realiza la reacción y de la naturaleza de los reactivos y productos. A la relación entre la cantidad de productos formados en la reacción real y la cantidad de producto calculada según la ecuación balanceada multiplicada por 100 se le denomina rendimiento de la reacción.

$$\text{Rendimiento } \% = (\text{cantidad obtenida/cantidad calculada}) (100)$$

Conversión

Es la fracción de un reactivo que se ha convertido en productos.

$$\text{Conversión} = \frac{\text{concentración inicial de A} - \text{concentración final de A}}{\text{concentración inicial de A}}$$

REACTIVO EN EXCESO

En algunas reacciones químicas para asegurar un alto grado de rendimiento es conveniente introducir uno de los reactivos en mayor cantidad que la teóricamente necesaria. Este reactivo recibe el nombre de reactivo en exceso.

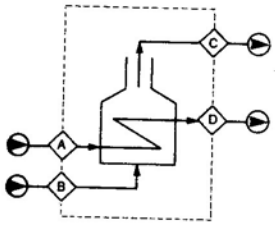
Selectividad

Son los moles formados de un producto por mol de reactivo que desaparece por reacción química.

REACTORES

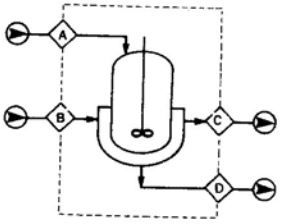
El corazón de una planta química es el reactor; para él se purifican y preparan los reactivos y de él depende el resto de la planta.

Los reactores químicos pueden tener infinidad de formas, pues depende de si la reacción es en fase gaseosa, líquida o sólida o si los productos se obtienen en forma intermitente o continua. El diseño de un reactor es uno de los más difíciles e importante trabajos a los que se puede enfrentar un ingeniero químico.



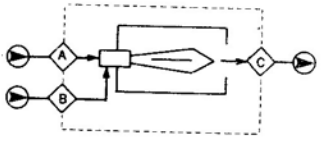
A – reactivos
B – combustible
C – gases de combustión
D – productos

REACTOR TUBULAR



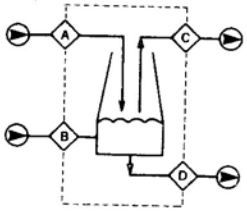
A – reactivos
B – medio de calentamiento caliente
C – medio de calentamiento frío
D – productos

REACTOR AGITADO CON CHAQUETA DE CALENTAMIENTO (O ENFRIAMIENTO)



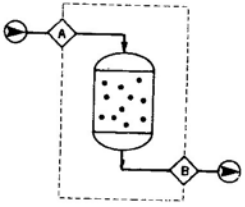
A – combustible
B – aire
C – gases de combustión

QUEMADOR DE ACEITE O GAS



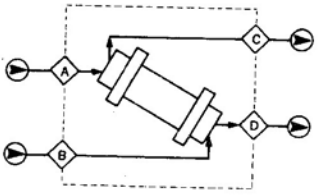
A – mineral, carbón y caliza
B – aire
C – gases de combustión
D – arrabio

ALTO HORNO



A – reactivos
B – productos

CAMARA CATALITICA



A – reactivos sólidos
B – gases calientes
C – gases fríos
D – producto sólido

TOSTADOR ROTATORIO

BALANCES

Como indicamos antes, los balances con reacción química se basan en la aplicación correcta de la ley general de la conservación de la materia.

$$\left\{\begin{array}{l}\text{rapidez de en-}\\ \text{trada de mate-}\\ \text{ria al sistema}\\ \text{termodinámico.}\end{array}\right\} - \left\{\begin{array}{l}\text{rapidez de sa-}\\ \text{lida de mate-}\\ \text{ria del sistema}\\ \text{termodinámico.}\end{array}\right\} + \left\{\begin{array}{l}\text{rapidez neta}\\ \text{de aparición}\\ \text{de materia en}\\ \text{el sistema ter-}\\ \text{modinámico.}\end{array}\right\} - \left\{\begin{array}{l}\text{rapidez neta}\\ \text{de acumula-}\\ \text{ción de mate-}\\ \text{ria en el sis-}\\ \text{tema termo-}\\ \text{dinámico.}\end{array}\right\} = 0$$

En el caso de reacciones químicas, el balance total es de poca utilidad, empleándose principalmente los balances parciales.

$$\left\{\begin{array}{l}\text{rapidez de en-}\\ \text{trada de la sus-}\\ \text{tancia i al siste-}\\ \text{ma termodiná-}\\ \text{mico.}\end{array}\right\} - \left\{\begin{array}{l}\text{rapidez de sa-}\\ \text{lida de la sus-}\\ \text{tancia i del sis-}\\ \text{tema termodi-}\\ \text{námico.}\end{array}\right\} + \left\{\begin{array}{l}\text{rapidez neta}\\ \text{de aparición}\\ \text{de la sustan-}\\ \text{cia i en el sis-}\\ \text{tema termodi-}\\ \text{námico.}\end{array}\right\} - \left\{\begin{array}{l}\text{rapidez neta}\\ \text{de acumula-}\\ \text{ción de la}\\ \text{sustancia i en}\\ \text{el sistema}\\ \text{termodinámi-}\\ \text{co.}\end{array}\right\} = 0$$

La masa generada en la ecuación anterior tendrá signo negativo si se crea y positivo si desaparece la sustancia i.

En la ecuación anterior la masa generada se calcula por medio de la estequiometría de la reacción. En caso de que la conversión en el reactor no sea la estequiométrica, se deberá multiplicar la conversión por la cantidad teórica para dar la cantidad real de masa i generada. En general, se debe recordar que:

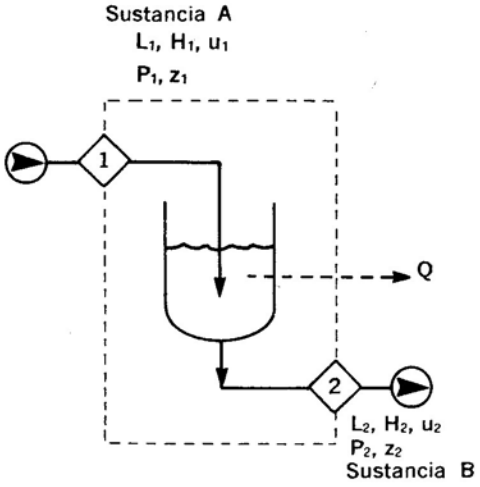
$$\text{Moles entrantes} \neq \text{moles salientes}$$

$$\text{átomos entrantes} = \text{átomos salientes}$$

Sin embargo, debe recordarse que las relaciones en que se combinan los átomos o moléculas son relaciones constantes.

LA REACCION QUIMICA Y LA ENERGIA

En aquellos procesos donde se producen reacciones químicas, los balances de materia deben tomar en cuenta la energía liberada o tomada por la reacción. En general, si la corriente 1 que entra a un reactor para dar lugar a la corriente 2 mediante la reacción química A $\longrightarrow$ B, tendremos:



El balance de energía queda

$$\left\{\begin{matrix}\text{rapidez de sali-}\\ \text{da de energía}\\ \text{con la masa}\end{matrix}\right\} - \left\{\begin{matrix}\text{rapidez de en-}\\ \text{trada de energía}\\ \text{con la masa}\end{matrix}\right\} + \left\{\begin{matrix}\text{rapidez de in-}\\ \text{cremento de}\\ \text{energía}\end{matrix}\right\} = \left\{\begin{matrix}\text{energía que se}\\ \text{transfiere sin ma-}\\ \text{sa}\end{matrix}\right\}$$

$$L_2 \left[z_2\, g/gc + \frac{u_2^2}{2\,gc} + H_2\right] - L_1 \left[z_1\, g/gc + \frac{u_1^2}{2\,gc} + H_1\right] +$$

$$+ \frac{d\,(ME)}{d\,\theta} = Q$$

Si no hay acumulación

$$\frac{d\,(ME)}{d\,\theta} = 0$$

En general, el término de cambio de entalpía es tan grande que los términos de energía cinética y energía potencial pueden despreciarse cuando ocurre una reacción química.

$$\therefore L_2\,(H_2) - L_1\,(H_1) = Q$$

y como

$$L_2 = L_1$$

$$\Delta H_R\, L = Q \qquad \Delta H_R = Q/L$$

En donde ΔH es, en este caso, el calor de reacción a las condiciones de operación ΔH_R. El cambio de entalpía asociado con una reacción química depende sólo de la naturaleza de los estados iniciales de los reactivos y del estado final de los productos.

CALOR ESTANDAR DE REACCION

Si una reacción se lleva a cabo a 25 °C y 1 atm con todos los reactivos y productos saliendo a estas condiciones, el calor desprendido o absorbido para que la reacción se complete de izquierda a derecha bajo condiciones estequiométricas recibe el nombre de calor de reacción estándar.

La palabra estequiométrico significa que la reacción usa las cantidades relativas de productos y reactivos especificadas por un balance de masa en la reacción química.

La entalpía es una función de estado, como la presión y temperatura. De la misma manera que la diferencia de temperatura de un sistema ($T_2 - T_1$) depende sólo de las condiciones iniciales y finales, la diferencia de entalpías ($H_2 - H_1$) dependerá sólo de las condiciones iniciales y finales. Por lo tanto, si se conoce la entalpía de cada producto y cada reactivo a una P y T dada, se puede determinar rápidamente el cambio de entalpía que ocurre durante una reacción sin conocer el mecanismo de reacción.

El calor estándar de reacción es la diferencia entre la suma de las entalpías de los productos (cada uno en su estado estándar) y la suma de las entalpías de los reactivos

$$\Delta \tilde{H}^\circ_R = \Sigma\, \Delta \tilde{H}^\circ_P - \Sigma\, \Delta \tilde{H}^\circ_r$$

El cero se refiere al estado estándar; éste se omite si $\Delta \tilde{H}_R$ se refiere a otras condiciones.

CALORES DE FORMACION

La entalpía es un término relativo y no puede expresarse en valores absolutos, sino sobre la base de unas condiciones de referencia.

A los elementos en su estado normal a 25 °C y 1 atm se les da una entalpía de cero; ahora si esos elementos reaccionan para dar compuestos:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 + \Delta \tilde{H}_R$$

la reacción se escribe como una ecuación química en la que se forma 1 mol de producto si todo se lleva a cabo a 25 °C y 1 atm. El calor de la reacción, en ese caso, será el calor de formación del producto

$$\Delta \tilde{H}^\circ_R = \Delta \tilde{H}^\circ_F$$

Los datos de los calores de formación de muchos compuestos se encuentran tabulados, para que puedan utilizarse (véase apéndice XXI).

Calores de reacción a partir de calores de formación

Los calores estándar de cualquier reacción, se pueden obtener a partir de los calores de formación. Si consideramos la reacción

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$$

$$\Delta\tilde{H}^0_R = \Delta\tilde{H}^0_{F\,CaO} + \Delta\tilde{H}^0_{F\,CO_2} - \Delta\tilde{H}^0_{F\,CaCO_3}$$

o en general

$$\Delta\tilde{H}^0_R = \sum_{p=1}^{n} n_p \Delta\tilde{H}^0_{Fp} - \sum_{r=1}^{n} n_r \Delta\tilde{H}^0_{Fr}$$

CALORES DE COMBUSTION

No siempre es posible tener los datos de los calores de formación, especialmente de los compuestos orgánicos; sin embargo, los calores de reacción se pueden determinar a partir de los calores de combustión

$$\Delta\tilde{H}^0_R = \sum_{R}^{n} n_R \Delta\tilde{H}^0_{C,R} - \sum_{P}^{n} n_P \Delta\tilde{H}^0_{C,P}$$

Estos calores se encuentran tabulados para las sustancias más comunes.

En donde $\Delta\tilde{H}^0_{C,R}$ son los calores estándar de combustión de los reactivos.

Regla de Hess

El cambio de entalpía de una reacción química a una temperatura y presión dadas es independiente de los pasos o forma en que se realice. Las reacciones químicas pueden operarse como entidades algebraicas; por ello, si se combina cierto número de reacciones algebraicamente, la $\Delta\tilde{H}$ de la reacción resultante se obtiene por una combinación algebraica de los calores de reacción $\Delta\tilde{H}_R$.

Calores de formación de compuestos en disolución

Combinando los datos de los calores de formación con los de disolución, es posible calcular el calor de formación de un compuesto en una solución acuosa de concentración especificada. Este calor de formación es la suma del calor de formación del soluto y su calor integral de disolución a una concentración dada.

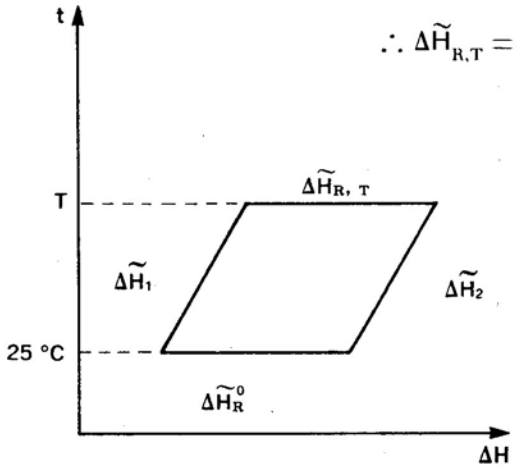
CALORES DE REACCION A UNA TEMPERATURA DIFERENTE DE LA ESTANDAR

Las entalpías de formación tabuladas se refieren a las entalpías de formación a la temperatura de 25 °C. Estas entalpías se pueden usar para obtener las entalpías de reacción a 25 °C. Sin embargo, se sabe experimentalmente que el calor de reacción depende de la temperatura, por lo que es necesario saber calcular la entalpía de reacción a cualquier temperatura.

Consideremos la reacción para convertir CO en CO_2. De acuerdo con la regla de Hess

$$\Delta\widetilde{H}^{0}_{R} = \Delta\widetilde{H}_{1} + \Delta\widetilde{H}_{R,T} + \Delta\widetilde{H}_{2}$$

$$\therefore \Delta\widetilde{H}_{R,T} = \Delta\widetilde{H}^{0}_{R} - \Delta\widetilde{H}_{1} - \Delta\widetilde{H}_{2}$$



En donde $\Delta\widetilde{H}_{R,T}$ = calor de reacción a una temperatura dada diferente de 25 °C. $\Delta\widetilde{H}^{0}_{R}$ = calor estándar de reacción.

$\Delta\widetilde{H}_1$ = calor necesario para calentar los reactivos de 25 a T °C.

$\Delta\widetilde{H}_2$ = calor necesario para enfriar los productos de T a 25 °C.

$$\therefore \Delta\widetilde{H}_{R,T} = \Delta\widetilde{H}^{0}_{R} - \int_{298}^{T} \widetilde{C}p \text{ (reactivos) } dT - \int_{T}^{298} \widetilde{C}p \text{ (productos) } dT$$

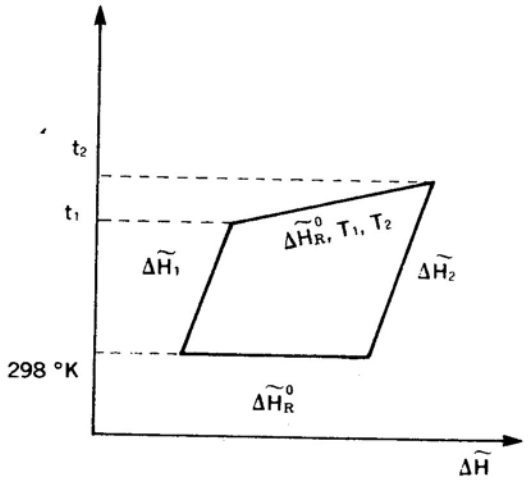
$$\text{ó, } \Delta\widetilde{H}_{R,T} = \Delta\widetilde{H}^{0}_{R} + \int_{298}^{T} \widetilde{C}p \text{ (productos) } dT - \int_{298}^{T} \widetilde{C}p \text{ (reactivos) } dT$$

$$\Delta\widetilde{H}_{R,T} = \Delta\widetilde{H}^{0}_{R} + \int_{298}^{T} \Delta\widetilde{C}p \, dT$$

En donde $\Delta\widetilde{C}p = \widetilde{C}p$ (productos) $- \widetilde{C}p$ (reactivos)

O sea, para calcular el calor de reacción a una temperatura dada se requiere conocer el calor de reacción a 25 °C y el cambio de la capacidad calorífica a presión constante de los reactivos y productos con la temperatura.

Reacciones en las que los reactivos y productos están a diferente temperatura

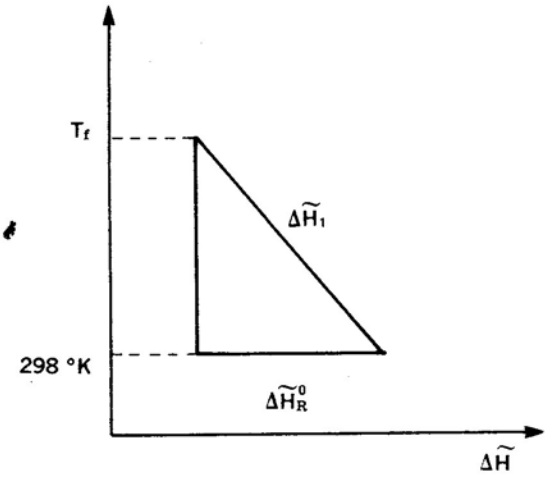


$$\Delta\widetilde{H}_R = \Delta\widetilde{H}^0_R + \int_{298}^{T_2} \widetilde{C}p \text{ (productos) } dT - \int_{298}^{T_1} \widetilde{C}p \text{ (reactivos) } dT$$

REACCIONES ADIABATICAS

Hasta ahora hemos supuesto que las reacciones desprenden o absorben calor; sin embargo, es posible llevar a cabo la reacción dentro de un recipiente que evite las pérdidas de calor. Bajo estas condiciones, la temperatura aumentará si la reacción es exotérmica (desprende calor) o disminuirá si es endotérmica (absorbe calor). En todo caso es deseable conocer la temperatura final a la que llegan los reactivos.

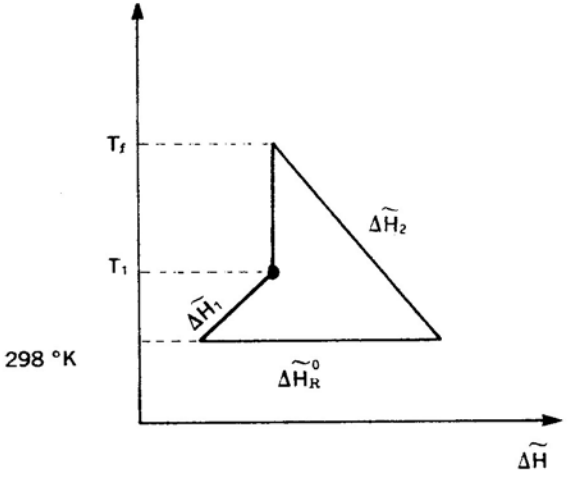
En estos casos, $\Delta\widetilde{H}_R = 0$ (o sea no hay cambio de entalpía en el sistema)



$$\Delta\widetilde{H}^0_R = \Delta\widetilde{H}_1 = \Delta\widetilde{H}_{\text{productos}}$$

$$\Delta\widetilde{H}^0_R = \int_{T_f}^{298} \widetilde{C}p \, dT$$

En caso de que los reactivos sean combustibles la temperatura final recibe el nombre de temperatura teórica de flama. En caso de que los reactivos no estuvieran a 25 °C tendríamos

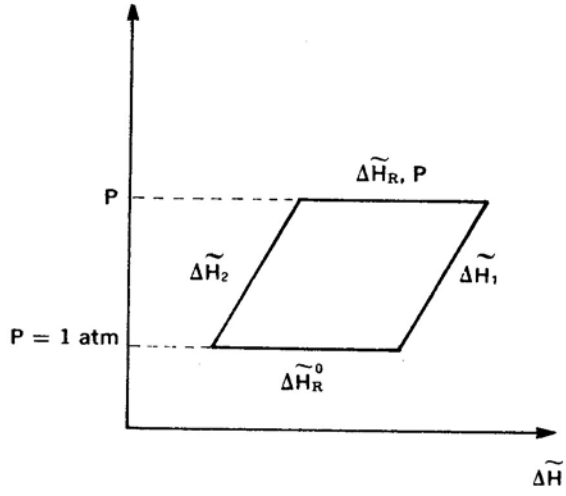


$$\Delta\tilde{H}^0_R = \Delta\tilde{H}_1 + \Delta\tilde{H}_2$$

$$\Delta\tilde{H}^0_R = \int_{298}^{T_1} \tilde{C}p \text{ (reactivos) } dT + \int_{T_f}^{298} \tilde{C}p \text{ (productos) } dT$$

Efecto de la presión en el calor de reacción

En los líquidos, la presión tiene poca influencia sobre la entalpía de reacción, así que para propósitos prácticos se ignora el efecto de la presión sobre líquidos y sólidos. En los gases ideales tampoco tendrá efecto la presión sobre la entalpía de reacción. Solamente en el caso de gases reales se tendría que



$$\Delta\tilde{H}^0_R = \Delta\tilde{H}_2 + \Delta\tilde{H}_{R,P} + \Delta\tilde{H}_1$$

$$\Delta\tilde{H}_{R,P} = \Delta\tilde{H}^0_R - \int_{P=1}^{P} (\delta\tilde{H}/\delta P)_T \, dP - \int_{P}^{1} (\delta\tilde{H}/\delta P)_T \, dT$$

$\Delta\tilde{H}_1$ y $\Delta\tilde{H}_2$ es el cambio de entalpía para pasar los reactivos y los productos de una presión a otra. En este libro consideraremos que la presión no afecta al calor de reacción.

CALORES DE REACCION A VOLUMEN CONSTANTE

La definición de calor estándar de reacción incluye la idea de presión constante a 1 atm, pero hay algunos casos en los que se requiere el calor a volumen constante.

$$Q_v = \Delta\tilde{U} \qquad Qp = \Delta\tilde{U} + \tau = \Delta\tilde{U} + p\,\Delta\tilde{V}$$

$$\therefore\ Qp - Q_v = \Delta\tilde{U} - \Delta\tilde{U} + p\,\Delta\tilde{V} = p\,\Delta\tilde{V}$$

En los líquidos y sólidos

$$\Delta\tilde{V} = 0$$

En los gases

$$p\,\Delta\tilde{V} = \Delta\tilde{m}\,RT \qquad \therefore\ Q_v = Qp - \Delta\tilde{m}\,RT$$

En donde $\Delta\tilde{m}$ es el cambio en el número de moles de materia gaseosa.

PODER CALORIFICO DE ACEITES COMBUSTIBLES, CARBONES Y MADERA

Para un combustible como el carbón, el petróleo o la madera, el calor de combustión estándar se conoce como "poder calorífico de combustible". Para determinar el poder calorífico, se quema un peso conocido del combustible con oxígeno en una bomba calorimétrica y la energía desprendida se mide mediante el aumento de temperatura de la bomba.

El valor que se determina en el calorímetro, es el poder calorífico total, también llamado alto o bruto, y es aquel en el que el agua producida por la reacción pasa al estado líquido cediendo su calor latente.

El poder calorífico neto o bajo de un combustible, es aquel en que toda el agua permanece en el estado gaseoso, consecuentemente la diferencia entre un poder calorífico alto y uno bajo es el calor latente del agua producida. Para obtener el poder calorífico de algunos carbones basta con análisis del mismo y la aplicación de la fórmula de Dulong para carbones secos.

$$\text{Poder calorífico alto} = 8\,079\ C + 34\,456\ (H - \frac{O}{8}) + 2\,250\ S$$

en kcal/kg de combustible

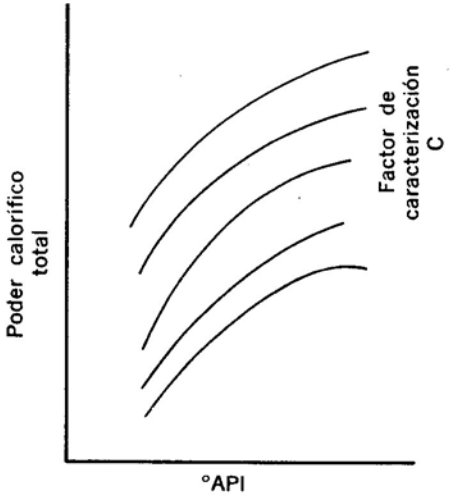
El petróleo es una mezcla compleja de hidrocarburos, que difieren en su contenido de hidrógeno y carbono, además suelen contener cantidades menores de compuestos que contienen azufre, oxígeno y nitrógeno.

Debido a la complejidad de las fracciones del petróleo, la determinación de los compuestos presentes no es práctica. Sin embargo, muchas de las propiedades del petróleo, y entre ellas el poder calorífico, se pueden obtener mediante un factor de caracterización desarrollada por la Universal

Oil Products Company, el cual puede determinarse empíricamente mediante pruebas simples.

$$C = \frac{\sqrt[3]{T_b}}{\rho_R \ 60/60}$$

C = factor de caracterización UOP.
T_B = Temperatura promedio de ebullición en grados Rankine a 1 atmósfera.
ρ_R = densidad relativa a 60 °F.



El poder calorífico de los alimentos también se obtiene mediante pruebas en calorímetros, pero debe recordarse que la caloría utilizada es equivalente a 1 kcal.

PROBLEMAS RESUELTOS

Problema 9.1

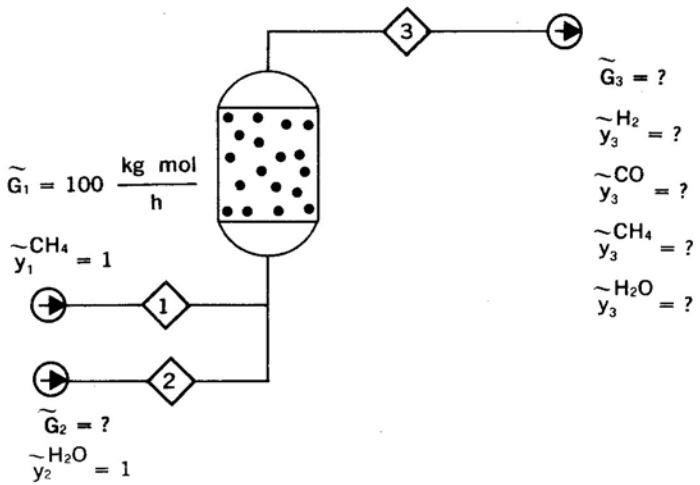
La reacción química

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$$

se lleva cabo en un reactor llamado reformador. A la entrada del reformador se tienen 100 kg mol/h de CH_4 y se opera con un 80% en exceso del agua estequiométrica. Si la conversión es del 80% calcule:

a) El flujo de agua a la entrada.
b) El flujo y la composición de los gases salientes del reactor.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Conversión

$$\text{Conversión} = \frac{\tilde{G}_1\tilde{y}_1^{CH_4} - \tilde{G}_3 y_3^{CH_4}}{\tilde{G}_1\tilde{y}_1^{CH_4}}$$

2.2 Balances

De acuerdo con la reacción

$$\tilde{G}_2 = \tilde{G}_1 \quad (1.8)$$

$$\tilde{G}_3\tilde{y}_3^{H_2} = \tilde{G}_1 \quad (3) \quad (0.8)$$

$$\tilde{G}_3\tilde{y}_2^{CO} = \tilde{G}_1 \quad (0.8)$$

$$\tilde{G}_3\tilde{y}_3^{H_2O} = \tilde{G}_2 - \tilde{G}_1 \quad (0.8)$$

3. Cálculos

3.1 Conversión

$$0.8 = \frac{100 - G_3 y_3^{CH_4}}{100}$$

$$\therefore \quad \tilde{G}_3 \tilde{y}_3^{CH_4} = 20 \text{ kg mol/h}$$

$$\tilde{G}_2 = 100\ (1.8) = 180 \text{ kg mol/h}$$

$$\tilde{G}_3 \tilde{y}_3^{H_2} = 100\ (3)\ (0.8) = 240 \text{ kg mol/h}$$

$$\tilde{G}_3 \tilde{y}_3^{CO} = 80 \text{ kg mol/h}$$

$$\tilde{G}_3 \tilde{y}_3^{H_2O} = 180 - 80 = 100 \text{ kg mol/h}$$

3.2 Composición de los gases de salida

$$\tilde{G}_3 \tilde{y}_3^{H_2} + \tilde{G}_3 \tilde{y}_3^{CO} + \tilde{G}_3 \tilde{y}_3^{CH_4} + \tilde{G}_3 \tilde{y}_3^{H_2O} = 440 \ \frac{\text{kg mol}}{\text{h}}$$

$$\tilde{y}_3^{H_2} = \frac{240}{440} = 0.545 \quad \therefore \quad \tilde{y}_3^{CO} = \frac{80}{440} = 0.1818$$

$$\tilde{y}_3^{H_2O} = \frac{100}{440} = 0.227 \quad \therefore \quad \tilde{y}_3^{CH_4} = \frac{20}{440} = 0.04545$$

3.3 Balance másico

Masa entrante		Masa saliente	
Metano	$100 \times 16 = 1\,600$ kg	Hidrógeno	$240 \times 2 = 480$
Agua	$180 \times 18 = 3\,240$ kg	Monóxido	$80 \times 28 = 2\,240$
	4 840	Agua	$100 \times 18 = 1\,800$
		Metano	$20 \times 16 = 320$
			4 840

4. **Resultados**

Se requieren 180 kg mol/h de agua a la entrada. A la salida se obtienen 440 kg mol/h de gases con la siguiente composición en porciento en mol: hidrógeno 54.5, agua 22.7, monóxido de carbono 18.18, metano 4.54.

Problema 9.2

En la producción de carbonato de sodio por el antiguo proceso de Le Blanc se llevan a cabo las siguientes reacciones químicas:

$$NaCl + H_2SO_4 \longrightarrow NaHSO_4 + HCl$$

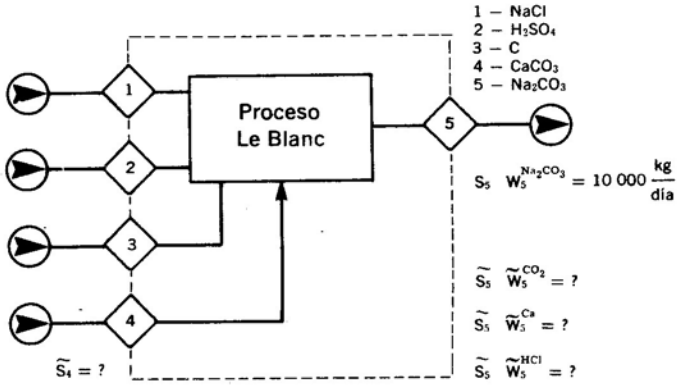
$$NaHSO_4 + NaCl \longrightarrow Na_2SO_4 + HCl$$

$$Na_2SO_4 + 2\,C \longrightarrow Na_2S + 2\,CO_2$$

$$Na_2S + CaCO_3 \longrightarrow Na_2CO_3 + CaS$$

Si se quisiera obtener 10 toneladas diarias de carbonato de sodio, ¿cuántas materias primas se necesitarán? Suponga un rendimiento del 100% para las reacciones. ¿Cuántos subproductos saldrían?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Se podrán efectuar los balances a partir de las ecuaciones químicas.

2.2 Cantidad necesaria de NaCl

Sumando las reacciones

$$NaCl + H_2SO_4 \longrightarrow NaHSO_4 + HCl$$

$$NaHSO_4 + NaCl \longrightarrow Na_2SO_4 + HCl$$

$$Na_2SO_4 + 2\,C \longrightarrow Na_2S + 2\,CO_2$$

$$Na_2S + CaCO_3 \longrightarrow Na_2CO_3 + CaS$$

$$2\,NaCl + H_2SO_4 + 2\,C + CaCO_3 \longrightarrow 2\,HCl + 2\,CO_2 + Na_2CO_3 + CaS$$

Se requieren 2 moles de NaCl por cada mol de Na_2CO_3 producido.

$$2\,S_5 w_5^{Na_2CO_3} = \widetilde{S}_1 \qquad \widetilde{S}_5 = S_5/PM_{Na_2CO_3}$$

$$S_1 = 2\,\tilde{S}_5\tilde{w}_5^{Na_2CO_3}\,(PM)_{NaCl}$$

2.3 Cantidad de H_2SO_4 (al 100%) requerida. De la reacción:

$$\tilde{L}_2 = \tilde{S}_5$$
$$L_2 = \tilde{S}_5\,(PM)_{H_2SO_4}$$

2.4 Cantidad de carbón

$$S_3 = \tilde{S}_5\tilde{w}_5^{Na_2CO_3}\,(2) \qquad \tilde{w}_3^{C} = 1$$
$$S_3 = 2\,S_5 w_5^{Na_2CO_3}\,(PM)_C$$

2.5 Cantidad de carbonato de calcio

$$S_4 = \tilde{S}_5\tilde{w}_5^{Na_2CO_3}$$
$$S_4 = \tilde{S}_5\tilde{w}_5^{Na_2CO_3}\,(PM)_{CaCO_3}$$

2.6 Cantidad de HCl producido

$$S_5\tilde{w}_5^{HCl} = 2\,\tilde{S}_5\tilde{w}_5^{Na_2CO_3}$$

3. Cálculos

3.1 Cantidad de cloruro de sodio

$$PM_{Na_2CO_3} = 106 \qquad PM_{NaCl} = 58.5$$
$$\tilde{S}_5\tilde{w}_5^{Na_2CO_3} = 10\,000/106 = 94.34 \text{ kg mol/día}$$
$$S_1 = 2\,(94.34)\,(58.5) = 11\,037.78 \text{ kg/día}$$

3.2 Cantidad de H_2SO_4

$$L_2 = 94.34\,(98) = 9\,245 \text{ kg/día}$$

3.3 Cantidad de carbón

$$S_3 = 2\,(94.34)\,(12) = 2\,264 \text{ kg/día}$$

3.4 Cantidad de carbonato de calcio

$$S_4 = 94.34\,(100) = 9\,434 \text{ kg/día}$$

3.5 Cantidad de CaS generado

$$\tilde{S}_5\tilde{w}_5^{CaS} = \tilde{S}_5\tilde{w}_5^{Na_2CO_3} = 94.34 \text{ kg mol/día}$$
$$S_5 w_5^{CaS} = 94.34\,(72) = 6\,792.5 \text{ kg/día}$$

3.6 Cantidad de HCl generado

$$\tilde{S}_5 \tilde{w}_5^{HCl} = 2\,\tilde{S}_5 \tilde{w}_5^{Na_2CO_3} = 94.34\ (2) = 188.68\ \text{kg mol/día}$$

$$S_5 w_5^{HCl} = 188.68\ (36.5) = 6\,886.8\ \text{kg/día}$$

3.7 Cantidad de CO_2 generado

$$\tilde{S}_5 \tilde{w}_5^{CO_2} = 2\,\tilde{S}_5 \tilde{w}_5^{Na_2CO_3} = 94.34\ (2) = 188.68\ \text{kg mol/día}$$

$$S_5 w_5^{CO_2} = 188.68\ (44) = 8\,301.92\ \text{kg/día}$$

4. **Resultados**

	Entradas			Salidas	
NaCl	11 037.78	kg/día	Na_2CO_3	10 000	kg/día
H_2SO_4	9 245	"	HCl	6 886.8	"
C	2 264	"	CO_2	8 301.92	"
$CaCO_3$	9 434	"	CaS	6 792.5	"
Total	31 980.78	"		31 981.22	"

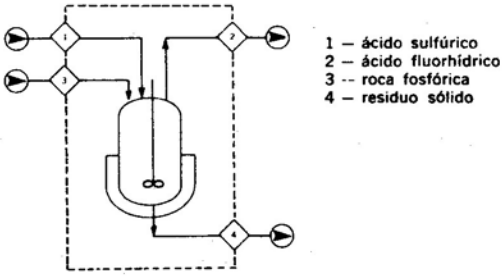
Problema 9.3

Para preparar los fertilizantes de superfosfato se trata la roca fosfórica con ácido sulfúrico, con objeto de hacer más solubles los fosfatos.

$$2\ Ca_5F(PO_4)_3 + 7\ H_2SO_4 + 3\ H_2O \longrightarrow 3\ CaH_4(PO_4)_2H_2O + 7\ CaSO_4 + 2\ HF$$

¿Qué cantidad de ácido sulfúrico se requerirá para reaccionar con 100 toneladas diarias de roca? ¿Qué cantidad de HF se producirá? ¿Cuál deberá ser la concentración de H_2SO_4?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

La obtención de las cantidades salientes y entrantes se hace a partir de las fórmulas químicas y la reacción.

2.2 Concentración del H_2SO_4 entrante de acuerdo con la reacción

$$x_1^{H_2SO_4} = \frac{7\ H_2SO_4}{(7\ H_2SO_4 + 3\ H_2O)}$$

2.3 Cantidad de H_2SO_4 necesaria

$$\tilde{L}_1 = \tilde{S}_3\,(7/2)$$

2.4 HF producido

$$\tilde{G}_2 = \tilde{S}_3$$

3. Cálculos

3.1 Concentración de H_2SO_4

$$\tilde{x}_1^{H_2SO_4} = 7/(3 + 7) = 0.7 \qquad x_1^{H_2SO_4} = \frac{7\,(98)}{7\,(98) + 3\,(18)} = 0.927$$

3.2 Cantidad necesaria de H_2SO_4

$$PM_{Ca_5F(PO_4)_3} = 504.3$$

$$\tilde{S}_3 = 100\,000/504.3 = 198.29 \text{ kg mol/día}$$

$$\tilde{L}_1 = \frac{7}{2}\,\frac{(198.29)}{0.7} = 991.45\ \frac{\text{kg mol}}{\text{día}}$$

$$\tilde{L}_1\tilde{x}_1^{H_2SO_4} = 991.47\ (0.7) = 693.7 \text{ kg mol/día de } H_2SO_4 \text{ puro}$$

$$L_1 x_1^{H_2SO_4} = 67\,982.6 \text{ kg/h de } H_2SO_4 \text{ puro}$$

$$L_1 = 73\,336.1 \text{ kg/h de } H_2SO_4 \text{ al } 92.7\%$$

3.3 HF producido

$$\tilde{G}_2 = 198.29 \text{ kg mol/día}; \qquad G_2 = 3\,965.8 \text{ kg/día}$$

4. **Resultados**

Se requiere de un ácido de 92.7% en masa

Se requieren 73 336.1 kg/día de ácido sulfúrico al 92.7%

Se producirán 198.29 kg mol/día de HF

Problema 9.4

Para obtener HF, comercialmente, se hace reaccionar la fluorita con ácido sulfúrico en un reactor enchaquetado y se calienta a 200 °C y una atmósfera (la reacción es endotérmica). De ese reactor salen una mezcla de gases, que son HF, H_2SiF_6, H_2SO_4, H_2O y CO_2. Por la base del reactor se obtiene $CaSO_4$. Las reacciones que se efectúan son:

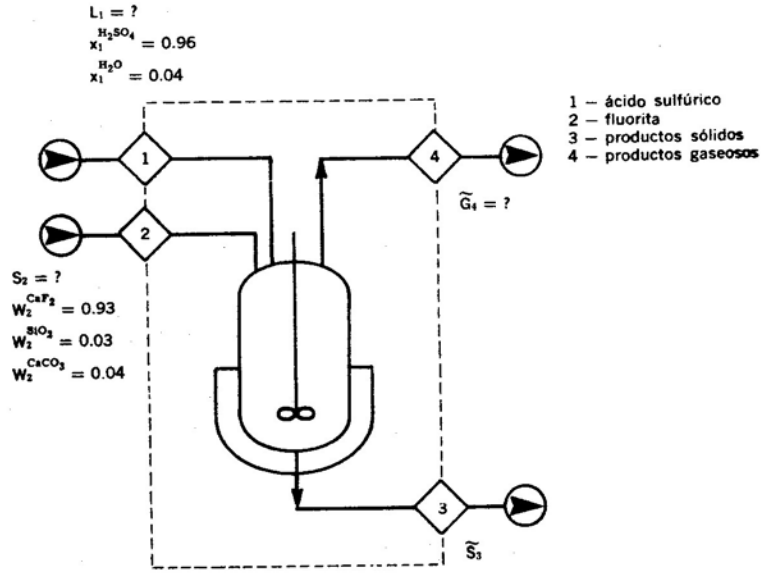
$$CaF_2 + H_2SO_4 \longrightarrow 2\,HF + CaSO_4$$

$$6\,HF + SiO_2 \longrightarrow H_2SiF_6 + 2\,H_2O$$

$$CaCO_3 + H_2SO_4 \longrightarrow CaSO_4 + CO_2 + H_2O$$

Si se quiere obtener una tonelada por h de HF y si se sabe que el rendimiento de la 1a. reacción es del 90%, ¿qué cantidad de fluorita (CaF_2 al 93%, $CaCO_3$ 4%) y de H_2SO_4 (96%) se deberá añadir al reactor?, ¿qué cantidad de productos se obtiene?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Balance de $CaSO_4$

$$\tilde{S}_3\tilde{w}_3^{CaSO_4} = \tilde{S}_2\tilde{w}_2^{CaCO_3} + \tilde{S}_2\tilde{w}_2^{CaF_2}\ (0.9)$$

2.2 Balance de CO_2

$$\tilde{S}_2\tilde{w}_2^{CaCO_3} = \tilde{G}_4\tilde{y}_4^{CO_2}$$

2.3 Balance de H_2SiF_8

$$\tilde{S}_2\tilde{w}_2^{SiO_2} = \tilde{G}_4\tilde{y}_4^{H_2SiF_6}$$

2.4 Balance de HF

$$\tilde{G}_4\tilde{y}_4^{HF} = (2\,\tilde{S}_2\tilde{w}_2^{CaF_2})\ (0.9) - (\tilde{S}_2\tilde{w}_2^{SiO_2})\ 6$$

2.5 H_2SO_4 entrante

$$\tilde{L}_1\tilde{x}_1^{H_2SO_4} = \tilde{S}_2\tilde{w}_2^{CaF_2} + \tilde{S}_2\tilde{w}_2^{CaCO_3}$$

2.6 H_2SO_4 saliente

$$\tilde{G}_4\tilde{y}_4^{H_2SO_4} = \tilde{L}_1\tilde{x}_1^{H_2SO_4} - \tilde{S}_2\tilde{w}_2^{CaF_2}\ (0.9) - \tilde{S}_2\tilde{w}_2^{CaCO_3}$$

2.7 Balance de H_2O

$$\tilde{L}_1\tilde{x}_1^{H_2O} + \tilde{S}_2\tilde{w}_2^{SiO_2}\ (2) + \tilde{S}_2\tilde{w}_2^{CaCO_3} = \tilde{G}_4\tilde{y}_4^{H_2O}$$

3. Cálculos

3.1 Tomando 1 tonelada de fluorita entrante

$S_2w_2^{CaF_2} = 0.93$ ton/h $\quad\therefore\quad \tilde{S}_2\tilde{w}_2^{CaF_2} = 0.93/78.07 = 0.011912$ ton mol/h

$S_2w_2^{SiO_2} = 0.03$ ton/h $\quad\therefore\quad \tilde{S}_2\tilde{w}_2^{SiO_2} = 0.03/60.08 = 0.000499$ ton mol/h

$S_2w_2^{CaCO_3} = 0.04$ ton/h $\quad\therefore\quad \tilde{S}_2\tilde{w}_2^{CaCO_3} = 0.04/100.089 = 0.000399$ ton mol/h

3.2 Balance de HF

$$\tilde{G}_4\tilde{y}_4^{HF} = (0.011912)\ (2)\ (0.9) - (0.000499)\ 6 = \tilde{G}_4\tilde{y}_4^{HF}$$

$$G_4y_4^{HF} = 0.0184476\ (20.00637) = 0.369069\ \text{ton/h HF}$$

3.3 Fluorita necesaria por tonelada de HF

$$S_2 w_2^{CaF_2} = 0.93/0.369069 = 2.519 \text{ ton/h}$$

$$S_2 = 2.519/0.93 = 2.708 \text{ ton/h}$$

3.4 Cantidad de H_2SO_4 necesaria

$$\widetilde{L}_1 \widetilde{x}_1^{H_2SO_4} = \frac{2.519}{78.07} + \frac{2.708\ (0.04)}{100.089} = 0.03342\ \frac{\text{ton mol}}{\text{h}}$$

$$L_1 x_1^{H_2SO_4} = 0.03342\ (98.07) = 3.27 \text{ ton } H_2SO_4/\text{h al } 100\%$$

$$L_1 = 3.27/0.96 = 3.406 \text{ ton/h de } H_2SO_4 \text{ al } 96\%$$

3.5 Balance de CO_2

$$\widetilde{G}_4 \widetilde{y}_4^{CO_2} = \frac{2.708\ (0.04)}{100.089} = 0.001082\ \frac{\text{ton mol}}{\text{h}}\ CO_2$$

$$G_4 y_4^{CO_2} = 0.001082\ (44) = 0.0476 \text{ ton/h de } CO_2$$

3.6 Balance de H_2SiF_6

$$\widetilde{G}_4 \widetilde{y}_4^{H_2SiF_6} = \frac{2.708\ (0.03)}{60.08} = 0.001352\ \frac{\text{ton mol}}{\text{h}}$$

$$G_4 y_4^{H_2SiF_6} = 0.001352\ (144.09) = 0.19481 \text{ ton/h}$$

3.7 Agua

$$\frac{2.708\ (0.03)\ 2}{60.08} + \frac{2.708\ (0.04)}{100.089} + \frac{3.406\ (0.04)}{18} = \widetilde{G}_4 \widetilde{y}_4^{H_2O}$$

$$\widetilde{G}_4 \widetilde{y}_4^{H_2O} = 0.0011355 \text{ ton mol/h}$$

$$G_4 y_4^{H_2O} = 0.2043 \text{ ton/h}$$

3.8 H_2SO_4

$$\frac{2.708\ (0.93)}{78.07} + \frac{2.708\ (0.04)}{100.089} - \frac{2.708\ (0.93)\ (0.9)}{78.07} - \frac{2.708\ (0.04)}{100.089} = \widetilde{G}_4 \widetilde{y}_4^{H_2SO_4}$$

$$\widetilde{G}_4 \widetilde{y}_4^{H_2SO_4} = 0.003226$$

$$G_4 y_4^{H_2SO_4} = 0.003226\ (98.07) = 0.3163 \text{ ton/h}$$

3.9 CaF_2 saliente

$$S_3 w_3^{CaF_2} = 2.519\,(0.1) = 0.2519 \text{ ton/h}$$

3.10 Cantidad de $CaSO_4$ saliente

$$\frac{2.708\,(0.04)}{100.089} + \frac{2.708\,(0.93)\,(0.9)}{78.07} = \widetilde{S}_3 \widetilde{w}_3^{CaSO_4}$$

$$\widetilde{S}_3 \widetilde{w}_3^{CaSO_4} = 0.03011 \text{ ton mol/h}$$

$$S_3 w_3^{CaSO_4} = 0.03011\,(136.14) = 4.0992 \text{ ton/h}$$

4. **Resultados**

Se requieren 2.708 ton/h de fluorita

Se requieren 3.406 ton/h de H_2SO_4 al 96%

Los productos salientes del reactor son:

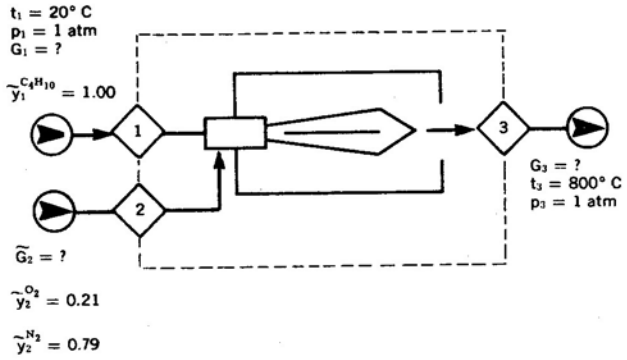
HF	1	ton/h
H_2O	0.2043	ton/h
CO_2	0.0476	ton/h
H_2SiF_6	0.19481	ton/h
H_2SO_4	0.3163	ton/h
CaF_2	0.2519	ton/h
$CaSO_4$	4.0492	ton/h

Total = 6.06411 ton/h

Problema 9.5

En un quemador se introduce butano con un 25% más del aire teórico requerido. Si se queman 85 m^3/h medidos a 20 °C y 760 mm de Hg, ¿qué cantidad de aire se requerirá a las mismas condiciones?, ¿cuál será la composición de los gases salientes?, ¿qué volumen ocuparán los gases salientes si están a 800 °C y 1 atm?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Los balances de masa se harán basándose en la reacción química. Con la ley de los gases ideales se obtendrán los gastos volumétricos necesarios.

2.2 Reacción

$$2\,C_4H_{10} + 13\,O_2 \longrightarrow 8\,CO_2 + 10\,H_2O$$

2.3 Masa de butano

$$PV = \frac{m}{PM}RT$$

$$G_1 = PV/RT$$

2.4 Cantidad de oxígeno necesario

$$\tilde{G}_2\tilde{y}_2^{O_2} = G_1\frac{(13)}{2}(1.25)$$

2.5 Cantidad saliente de O_2

$$\tilde{G}_3\tilde{y}_3^{O_2} = \tilde{G}_1\frac{(13)}{2}(1.25) - \tilde{G}_1\left(\frac{13}{2}\right)$$

2.6 Cantidad de nitrógeno entrante y saliente

$$\tilde{G}_2\tilde{y}_2^{N_2} = \tilde{G}_2\tilde{y}_2^{O_2}\,(\tilde{y}_{aire}^{N_2}/\tilde{y}_{aire}^{O_2})$$

2.7 Cantidad de aire

$$\tilde{G}_2\tilde{y}_2^{N_2}\,(1/\tilde{y}_{aire}^{N_2}) = \tilde{G}_2$$

2.8 Cantidad de CO_2 saliente

$$\tilde{G}_3 \tilde{y}_3^{CO_2} = \tilde{G}_1 (8/2)$$

2.9 Cantidad de H_2O saliente

$$\tilde{G}_3 \tilde{y}_3^{H_2O} = \tilde{G}_1 (10/2)$$

3. Cálculos

3.1 Masa de butano

$$\tilde{G}_1 = \frac{(1)\,(85)}{(0.082)\,(293)} = 3.53 \frac{\text{kg mol}}{\text{h}}$$

3.2 Cantidad requerida de oxígeno

$$\tilde{G}_2 \tilde{y}_2^{O_2} = 3.53 \ \frac{(13)}{2} \ (1.25) = 28.68 \frac{\text{kg mol}}{\text{h}}$$

3.3 Cantidad de oxígeno saliente

$$\tilde{G}_3 \tilde{y}_3^{O_2} = 3.53 \left(\frac{13}{2}\right)(1.25) - 3.53 \left(\frac{13}{2}\right) = 5.735 \frac{\text{kg mol}}{\text{h}}$$

3.4 Cantidad de nitrógeno entrante y saliente

$$\tilde{G}_2 \tilde{y}_2^{N_2} = \tilde{G}_2 \tilde{y}_2^{O_2} \left(\frac{\tilde{y}_{\text{aire}}^{N_2}}{\tilde{y}_{\text{aire}}^{O_2}} \right) = 28.68 \left(\frac{0.79}{0.21}\right) = 107.89 \frac{\text{kg mol}}{\text{h}}$$

3.5 Cantidad de aire

$$\tilde{G}_2 = 107.89\ (1/0.79) = 136.57\ \text{kg mol/h}$$

$$\tilde{G}_2 = \tilde{G}_2\, RT/P = 136.57\ (0.082)\ (293) = 3\,281\ \text{m}^3\text{/h}$$

3.6 Cantidad de CO_2 saliente

$$\tilde{G}_3 \tilde{y}_3^{O_2} = 3.53\ (4) = 14.12\ \text{kg mol/h}$$

3.7 Cantidad de H_2O saliente

$$\tilde{G}_3 \tilde{y}_3^{H_2O} = 3.53\ (5) = 17.65\ \text{kg mol/h}$$

3.8 Composición de los gases salientes

$$\tilde{G}_3 = 5.735 + 107.89 + 14.12 + 17.65 = 145.395\ \text{kg mol/h}$$

$$\tilde{y}_3^{O_2} = 5.735/145.395 = 0.0394 \qquad \tilde{y}_3^{N_2} = 107.89/145.395 = 0.742$$

$$\tilde{y}_3^{CO_2} = 0.0971 \qquad \tilde{y}_3^{H_2O} = 0.121$$

3.9 Volumen de los gases salientes

$$G_3 = 145.395\ (0.082)\ (800 + 273) = 12\,792.72\ \text{m}^3/\text{h}$$

4. **Resultados**

Cantidad de aire requerido a 20 °C y 1 atm 3 281 m^3/h

Composición del gas saliente

$$\tilde{y}_3^{O_2} = 0.0394 \qquad \tilde{y}_3^{N_2} = 0.742 \qquad \tilde{y}_3^{CO_2} = 0.0971 \qquad \tilde{y}_3^{H_2O} = 0.121$$

Volumen de los gases salientes a 800 °C y 1 atm

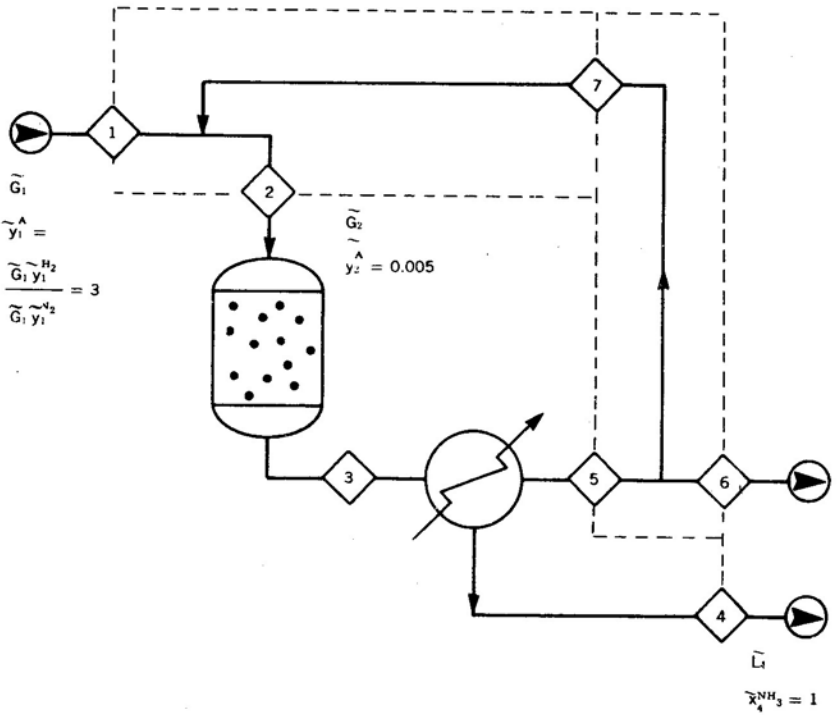
12 792.72 m^3/h

Problema 9.6

A un convertidor de amoniaco se le alimenta una mezcla estequiométrica de nitrógeno y de hidrógeno (1 a 3). En el convertidor, 10% de los reactivos se convierten en amoniaco. El amoniaco formado se quita en el condensador. El gas no reaccionante se recicla al convertidor. Para eliminar la acumulación ilimitada de inertes (argón) se coloca una purga en la corriente de reciclo. Calcule la fracción de gas reciclado que debe purgarse si el argón entrante al proceso debe ser de 0.5%. El argón entrante al proceso viene con el N_2 que se obtuvo del aire.

Composición del aire 20.99 O_2, 78.03 N_2, 0.95 A.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

El problema se puede resolver usando moles; sólo se debe evitar hacer el balance molar en el reactor, pues allí moles entrante $\neq$ moles saliente.

2.2 Balances en las uniones y reacción

$$\tilde{G}_1 + \tilde{G}_7 = \tilde{G}_2$$

$$\tilde{G}_5 = \tilde{G}_7 + \tilde{G}_6$$

$$N_2 + 3\,H_2 \longrightarrow 2\,NH_3$$

2.3 Balances de argón

$$\tilde{G}_1\tilde{y}_1^A + \tilde{G}_7\tilde{y}_7^A = \tilde{G}_2\tilde{y}_2^A$$

$$\tilde{G}_1\tilde{y}_1^A = \tilde{G}_6\tilde{y}_6^A \qquad \tilde{y}_5^A = \tilde{y}_6^A = \tilde{y}_7^A$$

2.4 Entrada al reactor

$$\tilde{G}_2 = \tilde{G}_2\tilde{y}_2^{N_2} + \tilde{G}_2\tilde{y}_2^{H_2} + \tilde{G}_2\tilde{y}_2^{A}$$

2.5 Composición del argón en la alimentación

$$\tilde{y}_1^{N_2} + 3\,\tilde{y}_1^{N_2} + \tilde{y}_1^{A} = 1$$

$$4\,\tilde{y}_1^{N_2} + \tilde{y}_1^{A} = 1$$

A partir de la composición del aire

$$\frac{\tilde{y}_1^{N_2}}{\tilde{y}_1^{A}} = \frac{78.03}{0.95}$$

$$\tilde{G}_2\tilde{y}_2^{N_2} + \tilde{G}_2\tilde{y}_2^{H_2} = 100 \text{ kg mol/h}$$

3. Cálculos

$$100 \text{ kg mol/h} = \tilde{G}_2\tilde{y}_2^{N_2} + \tilde{G}_2\tilde{y}_2^{H_2}$$

3.1 Concentración del argón en $\tilde{G}_1$

$$\frac{\tilde{y}_1^{N_2}}{\tilde{y}_1^{A}} = \frac{78.03}{0.95} = 82.13$$

$$\tilde{y}_1^{N_2} = 82.13\,\tilde{y}_1^{A}$$

$$4\,(82.13\,\tilde{y}_1^{A}) + \tilde{y}_1^{A} = 1 \qquad \therefore \qquad \tilde{y}_1^{A} = 0.0030347$$

3.2 Entrada al reactor $\tilde{G}_2$

$$\tilde{G}_2\tilde{y}_2^{A} + 100 = \tilde{G}_2$$

$$\tilde{G}_2\,(0.005) + 100 = \tilde{G}_2$$

$$\tilde{G}_2 = 100/0.995 = 100.50251$$

	Entradas kg mol	Salidas kg mol
N_2	25	22.5
H_2	75	67.5
A	0.50251	0.50251
NH_3	—	5

3.3 $\widetilde{G}_5$

$$\widetilde{G}_5 = 22.5 + 67.5 + 0.50251 = 90.50251$$

$$\widetilde{L}_4 = 5 \text{ kg mol de } NH_3$$

$$\tilde{y}_5^A = \frac{\widetilde{G}_5 \tilde{y}_5^A}{\widetilde{G}_5} = \frac{0.50251}{90.50251} = 0.0055524$$

(se ve que subió el porcentaje)

3.4 Alimentación fresca $\widetilde{G}_1$

$$\widetilde{G}_2 = \widetilde{G}_1 + \widetilde{G}_7$$

$$100.50251 = \widetilde{G}_1 + \widetilde{G}_7 \qquad \text{(I)}$$

$$\widetilde{G}_2 \tilde{y}_2^A = \widetilde{G}_1 \tilde{y}_1^A + \widetilde{G}_7 \tilde{y}_7^A$$

$$0.50251 = \widetilde{G}_1 (0.0030347) + \widetilde{G}_7 (0.0055524) \qquad \text{(II)}$$

Resolviendo I y II simultáneamente,

$$\widetilde{G}_1 = 22.0518$$

$$\widetilde{G}_7 = 78.4507 \text{ kg mol/h}$$

3.5 Purga

$$\widetilde{G}_1 \tilde{y}_1^A = \widetilde{G}_6 \tilde{y}_6^A$$

$$22.0518\ (0.0030347) = 0.06692059 = \widetilde{G}_6 \tilde{y}_6^A$$

$$\widetilde{G}_6 = \frac{0.06692059}{0.0055524} = 12.05 \frac{\text{kg mol}}{\text{h}}$$

3.6 Fracción de gas purgado

$$\frac{\widetilde{G}_6}{\widetilde{G}_7} = \frac{12.05}{78.45} = 0.1536$$

4. **Resultado**

Se debe purgar el 15.36% de los gases reciclados.

Problema 9.7

En un reactor continuo de deshidrogenación a flujo permanente, se llevan a cabo las reacciones siguientes:

$$C_2H_6 \rightarrow C_2H_4 + H_2$$

$$C_2H_6 + H_2 \rightarrow 2\,CH_4$$

El flujo molar de alimentación es de 100 kg mol/h y la corriente de productos sale del reactor a un flujo de 140 kg mol/h. La composición de los gases en % en mol es:

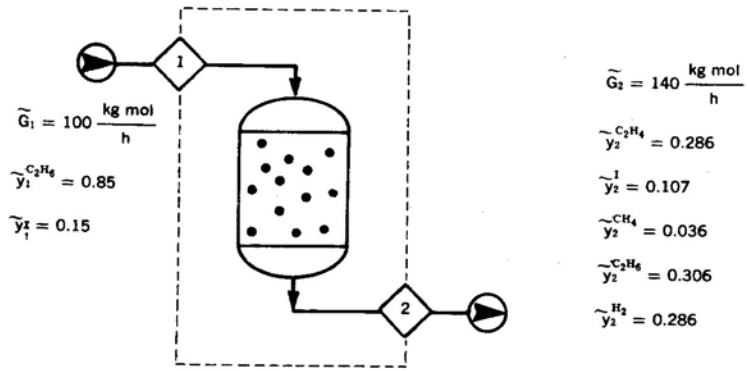
Alimentación		Productos	
C_2H_6	85	C_2H_6	30.6
Inertes	15	C_2H_4	28.6
		H_2	26.8
		CH_4	3.6
		Inertes	10.7

¿Cuál es la conversión del etano?

¿Cuál es el rendimiento del etileno basado en alimentación de etano?

¿Cuál es la selectividad del etileno relativa al metano?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Conversión

$$\% \text{ conversión} = 100 \left[\frac{\tilde{G}_1 \tilde{y}_1^{C_2H_6} - \tilde{G}_2 \tilde{y}_2^{C_2H_6}}{\tilde{G}_1 \tilde{y}_1^{C_2H_6}} \right]$$

2.2 Selectividad

$$\% \text{ de selectividad de etileno} = 100 \left[\frac{\tilde{G}_2 \tilde{y}_2^{C_2H_4}}{\tilde{G}_1 \tilde{y}_1^{C_2H_6} - \tilde{G}_2 \tilde{y}_2^{C_2H_6}} \right]$$

$$\% \text{ de selectividad de metano} = 100 \left[\frac{\tilde{G}_2 \tilde{y}_2^{CH_4}}{\tilde{G}_1 \tilde{y}_1^{C_2H_6} - \tilde{G}_2 \tilde{y}_2^{C_2H_6}} \right]$$

2.3 Rendimiento

$$\frac{\tilde{G}_2 \tilde{y}_2^{C_2H_4} \text{ real}}{\tilde{G}_2 \tilde{y}_2^{C_2H_4} \text{ teórico}} (100)$$

3. Cálculos

3.1 Conversión

$$\% = 100 \left[\frac{85 - 140\,(0.306)}{85} \right] = 49.6\%$$

3.2 Selectividad

$$\text{Etileno} = 100 \left[\frac{140\,(0.286)}{85 - 140\,(0.306)} \right] = 94.97\%$$

$$\text{Metano} = 100 \left[\frac{140\,(0.036)}{42.16} \right] = 11.95\%$$

Selectividad de etileno a metano = 94.97/11.95 = 7.94

3.3 Rendimiento

$$\frac{140\,(0.286)}{85} (100) = 49\%$$

4. **Resultados**

El rendimiento es de 49.0%.

La conversión 49.6%.

La selectividad 7.94%.

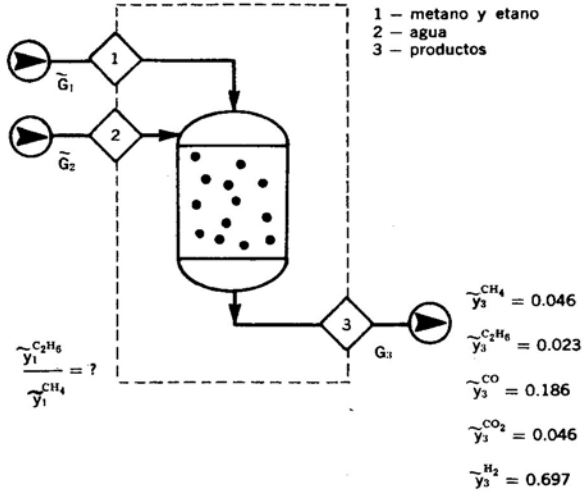
Problema 9.8

Una de las técnicas para producir hidrógeno para varias operaciones petroquímicas consiste en hacer reaccionar hidrocarburos gaseosos con vapor de agua en presencia de un catalizador de níquel. El análisis en base seca y % en mol de los gases salientes del reactor es:

CH_4	C_2H_6	CO	CO_2	H_2
4.6	2.3	18.6	4.6	69.7

si sólo se introdujeron los hidrocarburos metano y etano en la alimentación del reactor, ¿cuál es la relación molar de estos gases en la alimentación?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 En la producción de H_2 las reacciones son:

$$CO + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2$$
$$CH_4 + H_2O \longrightarrow CO + 3\,H_2$$
$$C_2H_6 + 2\,H_2O \longrightarrow 2\,CO + 5\,H_2$$
$$2\,CO + 2\,H_2O \longrightarrow 2\,CO_2 + 2\,H_2$$

2.2 Balance de carbono

$$\tilde{G}_1 \tilde{Y}^{C}_{1CH_4} + \tilde{G}_1 Y^{C}_{1C_2H_6} = \tilde{G}_3 \tilde{Y}^{C}_{3}; \qquad \tilde{Y}^{C}_{3} = \text{átomos mol C/kg mol de } \tilde{G}_3$$

2.3 Balance de oxígeno atómico

$$\tilde{G}_3 \tilde{y}^{O}_{3} = \tilde{G}_2 \tilde{y}^{O}_{2}$$

2.4 Balance de H_2O reaccionante

$$\tilde{G}_2 \tilde{Y}^{O}_{2} = \tilde{G}_2 \tilde{y}^{H_2O}_{2}$$

2.5 Balance de H_2 entrante

$$\tilde{G}_3 \tilde{Y}^{H_2}_{3} = \tilde{G}_1 \tilde{Y}^{H_2}_{1} + \tilde{G}_2 \tilde{Y}^{H_2}_{2}$$

2.6 Balance de CH_4 y C_2H_6

$$\tilde{G}_1 \tilde{y}^{CH_4}_{1} \left(\tilde{Y}^{H_2}_{CH_4}\right) + \tilde{G}_1 \tilde{y}^{C_2H_6}_{1} \left(\tilde{Y}^{H_2}_{C_2H_6}\right) = \tilde{G}_1 \tilde{Y}^{H_2}_{1}$$

$$\tilde{G}_1 \tilde{y}^{CH_4}_{1} \left(\tilde{Y}^{C}_{CH_4}\right) + \tilde{G}_1 \tilde{y}^{C_2H_6}_{1} \left(\tilde{Y}^{C}_{C_2H_6}\right) = \tilde{G}_1 \tilde{Y}^{C}_{1}$$

3. Cálculos

3.1 Base 100 kg mol de mezcla saliente

Balance de salida

sustancia	kg mol	kg átomo de carbono	kg mol de hidrógeno	kg átomo de oxígeno
CH_4	4.6	4.6	9.2	—
C_2H_6	2.3	4.6	6.9	—
CO	18.6	18.6	—	18.6
CO_2	4.6	4.6	—	9.2
H_2	69.7		69.7	—
		32.4	85.8	27.8

3.2 Balance de C

$$\tilde{G}_3\tilde{Y}_3^C = \tilde{G}_1\tilde{Y}_1^C = 32.4 \text{ kg atm C}$$

3.3 Balance de oxígeno

$$\tilde{G}_3\tilde{Y}_3^O = \tilde{G}_2\tilde{Y}_2^O = 27.8 \text{ kg átomo de oxígeno}$$

3.4 Balance de H_2O

$$\tilde{G}_2\tilde{Y}_2^O = \tilde{G}_2\tilde{y}_2^{H_2O} = 18.6 + 9.2 = 27.8 \text{ kg mol de } H_2O$$

3.5 Balance de H_2 entrante

$$\tilde{G}_1\tilde{Y}_1^{H_2} = 85.8 - 27.8 = 58 \text{ kg mol } H_2$$

3.6 Relación de CH_4 a C_2H_6 en la entrada

$$\tilde{G}_1\tilde{y}_1^{CH_4}(2) + \tilde{G}_1\tilde{y}_1^{C_2H_6}(3) = 58$$

$$\tilde{G}_1\tilde{y}_1^{CH_4}(1) + \tilde{G}_1\tilde{y}_1^{C_2H_6}(2) = 32.4$$

Resolviendo simultáneamente

$$\tilde{G}_1\tilde{y}_1^{C_2H_6} = 6.8 \text{ kg mol} \qquad \tilde{G}_1\tilde{y}_1^{CH_4} = 18.8 \text{ kg mol}$$

4. **Resultado**

La relación molar es de 2.764 kg mol de CH_4 por cada mol de C_2H_6

Problema 9.9

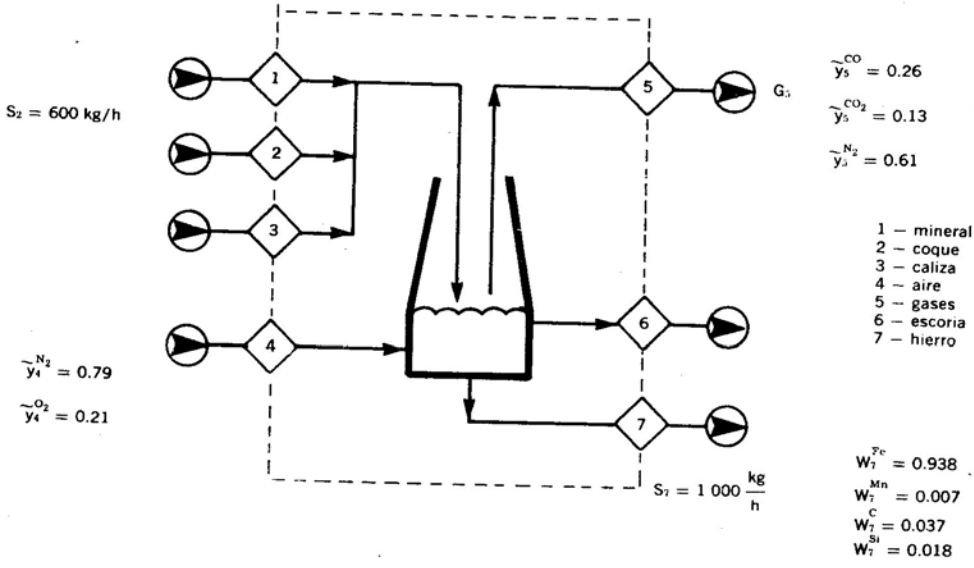
Un mineral que contiene la siguiente composición: Fe_2O_3 70%, SiO_2 15%, MnO 2%, Al_2O_3 13% se funde en un alto horno para dar un metal con el siguiente análisis:

Fe	93.8%
Mn	0.7%
C	3.7%
Si	1.8%

Para obtener una tonelada de ese metal se emplearon 600 kg de coque de 80% de C y 20% de SiO_2. El análisis volumétrico de los gases da 26% de CO, 13% de CO_2 y 61% de N_2. En la escoria no queda nada de hierro y aquélla contiene 30% de CaO.

Determine la cantidad de mineral y de caliza (carbonato de calcio puro que se utiliza como fundente), así como el volumen de gases inyectados y expulsados por tonelada de lingote de hierro.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Balance de hierro

Con base en la reacción $Fe_2O_3 \longrightarrow 2\ Fe + 3/2\ O_2$

{Rapidez de entrada de óxido} = {Rapidez de salida de hierro}

2.2 Gasto de mineral

$$S_1 w_1^{Fe_2O_3} = \tilde{S}_1 \tilde{w}_1^{Fe_2O_3} PM_{Fe_2O_3}$$

$$S_1 = |(S_7 w_7^{Fe}/2\ PM_{Fe})\ PM_{Fe_2O_3}|/w_1^{Fe_2O_3}$$

2.3 Balance de silicio

Con base en la reacción $SiO_2 + C \longrightarrow Si + CO_2$

$$\tilde{S}_1\tilde{w}_1^{SiO_2} + \tilde{S}_2\tilde{w}_2^{SiO_2} = \tilde{S}_6\tilde{w}_6^{SiO_2} + \tilde{S}_7\tilde{w}_7^{Si}$$

2.4 Balance de manganeso

$$MnO + \tfrac{1}{2}\,C \longrightarrow Mn + \tfrac{1}{2}\,CO_2$$

$$\tilde{S}_1\tilde{w}_1^{MnO} = \tilde{S}_6\tilde{w}_6^{MnO} + \tilde{S}_7\tilde{w}_7^{Mn}$$

2.5 Balance de aluminio

$$\tilde{S}_1\tilde{w}_1^{Al_2O_3} = \tilde{S}_6\tilde{w}_6^{Al_2O_3}$$

2.6 Cantidad de escoria producida

$$S_6 = S_6w_6^{CaO} + S_6w_6^{SiO_2} + S_6w_6^{MnO} + S_6w_6^{Al_2O_3}$$

2.7 Cantidad de fundente

$$S_3 = \tilde{S}_3\,PM_{CaCO_3} = (\tilde{S}_6\tilde{w}_6^{CaO})\,PM_{CaCO_3}$$

2.8 Balance de nitrógeno

$$\tilde{G}_4\tilde{y}_4^{N_2} = \tilde{G}_5\tilde{y}_5^{N_2}$$

2.9 Balance de calcio

$$\tilde{S}_3 = \tilde{S}_6\tilde{w}_6^{CaO} \qquad CaCO_3 \longrightarrow CaO + CO_2$$

2.10 Gasto de aire

$$G_4 = \tilde{G}_4\,(22.4) = \frac{\tilde{G}_5\tilde{y}_5^{N_2}}{\tilde{y}_4^{N_2}}\,(22.4)$$

2.11 Balance de carbón

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \qquad C + 1/2\,O_2 \rightarrow CO \qquad CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$$

$$\tilde{S}_2\tilde{w}_2^{C} + \tilde{S}_3\tilde{w}_3^{CaCO_3} = \tilde{G}_5\tilde{y}_5^{CO} + \tilde{G}_5\tilde{y}_5^{CO_2} + \tilde{S}_7\tilde{w}_7^{C}$$

2.12 Gasto de gases expulsados

$$G_5 = \tilde{G}_5\,(22.4) = (\tilde{G}_5\tilde{y}_5^{CO} + \tilde{G}_5\tilde{y}_5^{CO_2} + \tilde{G}_5\tilde{y}_5^{N_2})\,22.4$$

3. Sustitución y cálculos

3.1 Gasto de mineral

$$S_1 = \frac{\frac{1\,000\,(0.938)}{2\,(55.85)}\,(159.7)}{0.7} = 1\,915.83 \text{ kg}$$

3.2 Cantidad de escoria producida

$$S_6 = \frac{[1\,915.83\,(0.15) + 600\,(0.2) - \frac{1\,000\,(0.018)\,(60.09)}{28.09}]}{1 - 0.3} +$$

$$+ \frac{1\,915.83\,(0.02) - \frac{1\,000\,(0.007)\,70.94}{54.94} + 1\,915.83\,(0.13)}{1 - 0.3}$$

3.3 Cantidad de fundente

$$S_3 = 924.58\,(0.3)\,(100.08)/56.08 \text{ kg}$$

3.4 Gasto de gases expulsados

$$G_5 = \frac{\left[\frac{600\,(0.8)}{12} + \frac{495}{100} - \frac{1\,000\,(0.037)}{12}\right] 22.4}{|1 - 0.61|} = 2\,599.23 \text{ m}^3$$

3.5 Gasto de aire

$$G_4 = [2\,599.63\,(0.61)\,(22.4)]/0.79 = 2\,007 \text{ m}^3$$

4. **Resultados**

Cantidad de material. Por cada tonelada de lingotes de hierro se requieren 1 915.83 kg de mineral.

Cantidad de caliza.

Para cada tonelada de lingotes se requieren 495 kg de fundente.

GASES EXPULSADOS

Para cada tonelada de lingotes se expulsan 2 599.23 metros cúbicos (a condiciones normales) de gases de combustión.

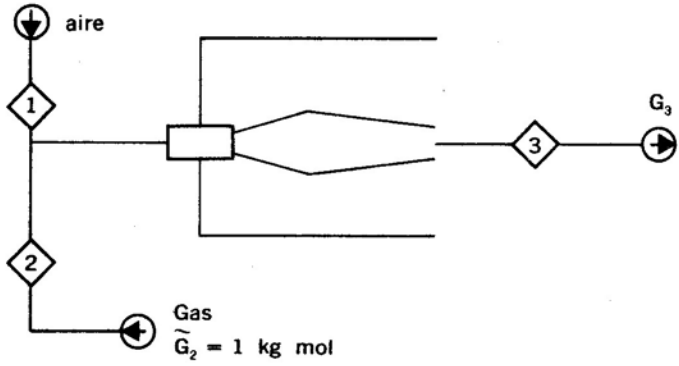
Problema 9.10

Calcule la cantidad de aire teórico que debe utilizarse para quemar 1 kg mol del siguiente gas:

CO_2	2.6 % en volumen
C_2H_4	8.4
O_2	0.7
H_2	39.9
CO	32.9
CH_4	10.1
N_2	5.4

¿Cuál será la composición de los gases de chimenea?

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Reacción

$$a\ CO_2 + b\ C_2H_4 + CO_2 + e\ H_2 + f\ CO + g\ CH_4 + h\ N_2 + i\ O_2 + j\ N_2 \rightarrow k\ CO_2 + l\ H_2O + m\ N_2$$

3. Cálculos

3.1 Reacción

Base 1 kg mol de gas

$$0.026\ CO_2 + 0.084\ C_2H_4 + 0.007\ O_2 + 0.399\ H_2$$
$$+ 0.329\ CO + 0.101\ CH_4 + 0.054\ N_2 + i\ O_2 + j\ N_2$$
$$\rightarrow k\ CO_2 + l\ H_2O + m\ N_2$$

3.2 Balances

Balance de C

$$0.026 + 0.084 \times 2 + 0.329 + 0.101 = k = 0.624$$

Balance de H_2

$$0.084 \times 2 + 0.399 + 0.101 \times 2 = l = 0.769$$

Balance de O_2

$$0.026 + 0.007 + 0.329 \times 0.5 + i = 0.624 + 0.769 \times 0.5$$
$$i = 0.811$$

$$\text{Aire necesario } \tilde{G}_1 = \frac{0.811}{0.21} = 3.861\ \frac{\text{kg mol}}{\text{h}}$$

Nitrógeno entrante con el aire

$$\tilde{G}_1\tilde{y}_1^{N_2} = 3.861 \times 0.79 = 3.050\ \frac{\text{kg mol}}{\text{h}}$$

Balance de nitrógeno

$$0.054 + 3.050 = m = 3.1049\ \text{kg mol}$$

3.3 Composición de los gases de chimenea

Moles salientes $k + l + m = 0.624 + 0.769 + 3.1049$

$$\tilde{G}_3 = 4.4979\ \text{kg mol}$$

$$\tilde{y}_3^{N_2} = \frac{3.1049}{4.4979} = 0.69$$

$$\tilde{y}_3^{CO_2} = \frac{0.624}{4.4979} = 0.1387$$

$$\tilde{y}_3^{H_2O} = \frac{0.769}{4.4979} = 0.17096$$

4. **Resultados**

Se requieren 3.861 kg mol de aire, la composición de los gases salientes es de 69% de N_2, 13.87% de CO_2 y 17.09% de H_2O.

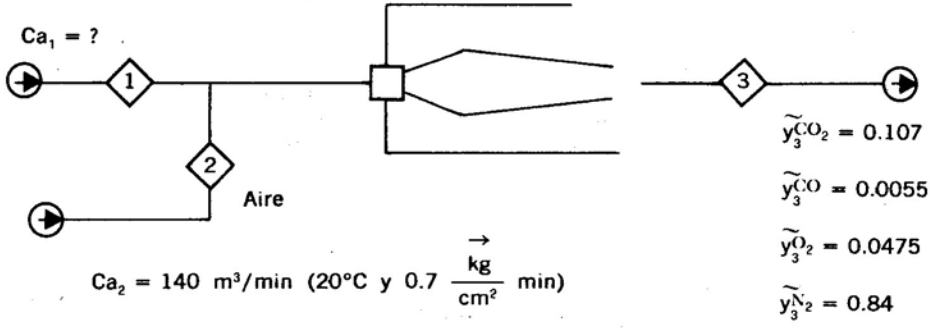
Problema 9.11

En una prueba que se realiza en una caldera en la que se usó como combustible aceite, no fue posible medir la cantidad de aceite quemado, aunque se midió el aire empleado encontrándose que se habían utilizado 140 m³/min de aire medido a 20 °C y 0.7 $\vec{kg}/cm^2$ manométricos. El análisis del gas de chimenea seco (Análisis Orsat) es:

$CO_2 = 10.7\%$	$O_2 = 4.75\%$
$CO = 0.55\%$	$N_2 = 84\%$

Si se supone que el aceite está formado únicamente por hidrocarburos, calcule los litros por hora de aceite que se queman si la densidad es de 940 kg/m³. Presión atmosférica 760 mm de Hg.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

El análisis Orsat de los gases de combustión se efectúa haciendo pasar un volumen conocido que se recoge en agua, por diferentes reactivos, que fijan cada uno de los productos. El análisis es pues en base seca, ya que el agua que los gases contenían se disolvió en el agua con la que recogió el gas.

2.2 Balance de materia de acuerdo con la reacción.

$$a\ C + b\ H + d\ O_2 + e\ N_2 \rightarrow f\ CO_2 + g\ CO + h\ O_2 + j\ N_2 + k\ H_2O$$

2.3 Aire introducido

$$P\ Ca_2 = \tilde{G}_2\ RT_2$$

3. Cálculos

3.1 Reacción

$$a\ C + b\ H + d\ O_2 + e\ N_2 \rightarrow 10.7\ CO_2 + 0.55\ CO +$$
$$+ 4.75\ O_2 + 84\ N_2 + k\ H_2O$$

3.2 Balances

Balance de carbono

$$a = 10.7 + 0.55 = 11.25$$

Balance de nitrógeno

$e = 84$;

Como el aire está formado por 21% de O_2 y 79% de N_2 en volumen

$$\therefore \quad d = 84 \times \frac{0.21}{0.79}$$

Balance de oxígeno

$$2(22.329) = 2(10.7) + 0.55 + 2(4.75) + k$$
$$k = 13.208$$

Balance de hidrógeno

$$b = 2k$$
$$b = 26.416$$

3.3 Aire introducido

$$\text{Presión} = \frac{0.7}{1.033} + 1 = 1.6776\ \text{atm}$$

$$\tilde{G}_2 = \frac{1.6776 \times 140 \times 60}{0.082 \times 293} = 586.537\ \frac{\text{kg mol}}{\text{h}}\ \text{de aire}$$

3.4 Aceite quemado

$$\text{Carbono quemado} = \frac{463.36 \times 11.25}{84} = 62.05 \text{ kg } \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$\text{Hidrógeno quemado} = \frac{463.46 \times 26.416}{84} = 145.71 \text{ kg } \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$\text{Masa quemada} = 62.05 \times 12 + 145.71\ (1) = 890.31 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\text{Volumen quemado} = 890.31 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times \frac{\text{l}}{0.94 \text{ kg}} = 947.14 \text{ l/h}$$

4. **Resultado**

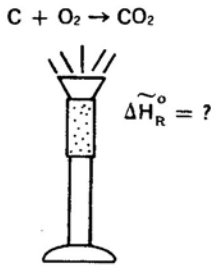
Se queman 947.14 l/h de aceite.

Problema 9.12

Calcule el calor estándar de la reacción

$$C_{(\text{grafito})} + O_2 \rightarrow CO_2$$

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Para hallar el calor de reacción estándar se deberán obtener los calores de formación de los reactivos y los productos. En este caso, para carbón en forma de grafito y para el oxígeno el calor de formación es cero, y el calor de reacción es igual al calor de formación de bióxido de carbono. En caso de que el carbono estuviera en otra forma alotrópica, su calor de formación sería diferente de cero.

2.2 Calor estándar

$$\Delta\widetilde{H}^0_R = \Delta\widetilde{H}^0_{f\,CO_2} - \Delta\widetilde{H}^0_{f\,O_2} - \Delta\widetilde{H}^0_{f\,C} = \Delta\widetilde{H}^0_{f\,CO_2}$$

3. Cálculos

3.1 Calor de reacción estándar

$$\Delta\widetilde{H}^0_{f\,CO_2} = -94.05 \text{ kcal/g mol}$$

$$\therefore \Delta\widetilde{H}^0_R = -94.05 \text{ kcal/g mol de carbono}$$

4. **Resultado**

La reacción es exotérmica y desprende 94.05 kcal por cada gramo mol de carbono quemado, si la reacción se lleva a cabo a 25 °C y 1 atm.

Problema 9.13

Encuentre el calor estándar de la reacción

(I) $Mg\,(s) + 2\,HCl\,(g) \longrightarrow Mg\,Cl_2\,(s) + H_2\,(g)$

a partir de las ecuaciones

(II) $Mg\,(s) + Cl_2\,(g) \longrightarrow Mg\,Cl_2\,(s)$ $\qquad \Delta\widetilde{H}^0_R = -153.2$ kcal/g mol

(III) $\frac{1}{2}\,H_2\,(g) + \frac{1}{2}\,Cl_2\,(g) \longrightarrow HCl\,(g)$ $\qquad \Delta\widetilde{H}^0_R = -22.06$ kcal/g mol

1. Planteamiento

1.1 Discusión

Al lado de los reactivos y productos aparecen las letras (s) y (g); esto quiere decir sólido y gaseoso. Estas letras se suelen usar cuando puede haber confusión sobre el estado físico de las sustancias; cuando se omiten, significa que la sustancia está en su forma más común a 25 °C y 1 atm.

Para resolver el problema tendremos que recordar la regla de Hess, o sea, que podremos operar las reacciones como si fueran ecuaciones algebraicas.

1.2 Calor estándar

Si multiplicamos la tercera ecuación por dos y la restamos de la segunda (la resta se efectúa poniendo los reactivos como productos, y viceversa, y cambiando de signo a $\Delta\tilde{H}^{\circ}_{R}$)

$$\begin{array}{rr} Mg\,(s) + Cl_2\,(g) \longrightarrow Mg\,Cl_2\,(s) & -\,153.2 \\ +\quad 2\,HCl \longrightarrow H_2\,(g) + Cl_2\,(g) & 2\,(22.06) \\ \hline Mg\,(s) + 2\,HCl\,(g) + Cl_2\,(g) \longrightarrow Mg\,Cl_2\,(s) + H_2\,(g) + Cl_2\,(g) & \end{array}$$

ó

$$Mg\,(s) + 2\,HCl\,(g) \longrightarrow Mg\,Cl_2\,(s) + H_2\,(g) \qquad \Delta\tilde{H}^{\circ}_{R} = -\,109.08\ kcal$$

Esta ecuación es idéntica a la primera.

2. **Resultado**

La reacción desprende 109.18 kcal por cada gramo mol de magnesio.

Problema 9.14

Calcule el calor de formación del ácido iodhídrico en el estado gaseoso a partir de los datos siguientes:

1) $HI\,(aq) + KOH\,(aq) \longrightarrow KI\,(aq) + H_2O$ $\quad \Delta\tilde{H}^{\circ}_{R} = -\,13.7$ kcal/g mol
2) $HCl\,(aq) + KOH\,(aq) \longrightarrow KCl\,(aq) + H_2O$ $\quad \Delta\tilde{H}^{\circ}_{R} = -\,13.7$ kcal/g mol
3) $H_2\,(g) + Cl_2\,(g) \longrightarrow 2\,HCl\,(g)$ $\quad \Delta\tilde{H}^{\circ}_{R} = -44.12$ kcal/g mol
4) $HCl\,aq \longrightarrow HCl\,(g) + aq$ $\quad \Delta\tilde{H}^{\circ}_{R} = 17.3$ kcal/g mol
5) $Cl_2\,(g) + 2\,KI\,(aq) \longrightarrow 2\,KCl\,(aq) + I_2\,(s)$ $\quad \Delta\tilde{H}^{\circ}_{R} = -\,52.4$ kcal/g mol
6) $HI\,(aq) \longrightarrow HI\,(g) + aq$ $\quad \Delta\tilde{H}^{\circ}_{R} = 19.4$ kcal/g mol

1. Planteamiento

1.1 Discusión

La ecuación requerida es:

$$1/2\,H_2\,(g) + 1/2\,I_2\,(s) \longrightarrow HI\,(g)$$

El sistema se puede resolver utilizando la ley de Hess. El término (aq) significa que una sustancia está a dilución infinita en agua, o sea, que ya no produce más calor de disolución.

1.2 Calor estándar de reacción

Reacomodando las ecuaciones,

$$KI\ (aq) + H_2O \longrightarrow HI\ (aq) + KOH\ (aq)$$

$$HCl\ (aq) + KOH\ (aq) \longrightarrow KCl\ (aq) + H_2O$$

$$H_2\ (g) + Cl_2\ (g) \longrightarrow 2\ HCl\ (g)$$

$$HCl\ (aq) \longrightarrow HCl\ (g) + aq$$

$$2\ KCl\ (aq) + I_2\ (s) \longrightarrow Cl_2\ (g) + 2\ KI\ (aq)$$

$$HI\ (aq) \longrightarrow HI\ (g) + aq$$

Para obtener el resultado requerido, sólo será necesario balancear las ecuaciones anteriores:

$$2\ KI\ (aq) + 2\ H_2O \longrightarrow 2\ HI\ (aq) + 2\ KOH\ (aq)$$

$$2\ HCl\ (aq) + 2\ KOH\ (aq) \longrightarrow 2\ KCl\ (aq) + 2\ H_2O$$

$$H_2\ (g) + Cl_2\ (g) \longrightarrow 2\ HCl\ (g)$$

$$2\ HCl\ (g) + 2\ aq \longrightarrow 2\ HCl\ (aq)$$

$$2\ KCl\ (aq) + I_2\ (s) \longrightarrow Cl_2\ (g) + 2\ KI\ (aq)$$

$$2\ HI\ (aq) \longrightarrow 2\ HI\ (g)$$

Suma $\qquad H_2 + I_2 \longrightarrow 2\ HI\ (g)$

De lo anterior

$$\Delta\tilde{H}^0_f = 1/2\ [-2\ \Delta\tilde{H}^0_{R1} + 2\ \Delta\tilde{H}^0_{R2} + \Delta\tilde{H}^0_{R3} - 2\ \Delta\tilde{H}^0_{R4} - \Delta\tilde{H}^0_{R5} + 2\ \Delta\tilde{H}^0_{R6}]$$

2. Cálculos

2.1 Calor estándar de formación

$$\Delta\tilde{H}^0_f = 1/2\ [2\ (13.7) + 2\ (-13.7) - 44.2 + (-2)\ (17.3) + 52.4 + 2\ (19.4)] =$$

$$= 6.2\ \text{kcal/g mol}$$

3. **Resultado**

El calor de formación es de 6.2 kcal por gramo mol de ácido iodhídrico.

Problema 9.15

Calcule, a 300 °C, el calor de reacción siguiente

$$C_2H_4\ (g) + H_2O\ (l) \longrightarrow C_2H_5OH\ (l)$$

1. Planteamiento

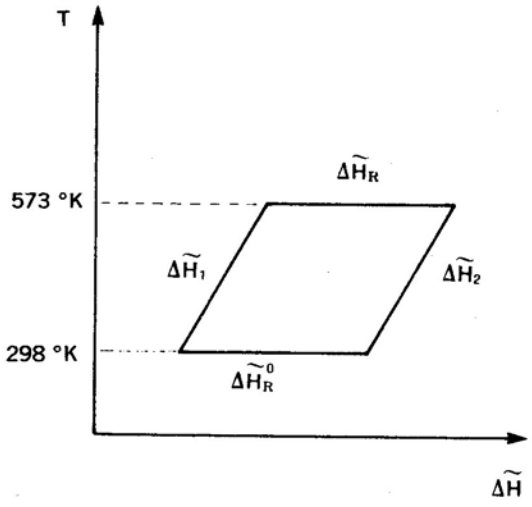
1.1 Discusión

Se pide el calor de reacción a una temperatura superior a 25 °C, por lo que debe corregirse el dato de $\Delta\widetilde{H}^0_R$. Como es una reacción orgánica, el calor de reacción se puede obtener a partir de los calores de combustión.

1.2 Calor estándar de reacción

$$\Delta\widetilde{H}^0_R = \Delta\widetilde{H}^0_{C,C_2H_4} + \Delta H^0_{C,H_2O} - \Delta H^0_{C,C_2H_5OH}$$

1.3 Calor de reacción



$$\Delta\widetilde{H}_{R300} = \Delta\widetilde{H}^0_R - \Delta\widetilde{H}_1 - \Delta\widetilde{H}_2$$

$$\Delta\tilde{H}_1 = \int_{298}^{T} \tilde{C}p\,dT + \tilde{\lambda}_{H_2O}$$

El agua a 300 °C es vapor, el alcohol a 300 °C es también vapor, y para llegar a 25 °C deben condensarse.

$$\Delta\tilde{H}_2 = \int_{T}^{298} \tilde{C}p\,dT - \tilde{\lambda}_{alcohol}$$

$$\Delta\tilde{H}_{R300} = \Delta\tilde{H}^0_R - \int_{298}^{T} \tilde{C}p\,dT - \tilde{\lambda}_{H_2O} + \int_{298}^{T} \tilde{C}p\,dT + \tilde{\lambda}_{alcohol}$$

2. Cálculos

2.1 Calor estándar de reacción

$$\Delta\tilde{H}^0_R = -337.234 - (-326.7) = -10.534 \ \frac{\text{kcal}}{\text{g mol de etileno}}$$

2.2 Capacidades caloríficas

$$\tilde{C}p_{C_2H_4} = 2.83 + 28.6\,(10^{-3})\,T - 8.726\,(10^{-6})\,T^2$$

$$\tilde{C}p_{H_2O} = 7.256 + 2.298\,(10^{-3})\,T - 0.283\,(10^{-6})\,T^2$$

$$\tilde{C}p_{C_2H_5OH} = 6.94 + 39.741\,(10^{-3})\,T - 11.926\,(10^{-6})\,T^2$$

2.3 Incremento en las capacidades caloríficas

$$\Delta\tilde{C}p = [6.94 - (2.83 + 7.256)] + [39.741 - (2.298 + 28.6)]\,T\,(10^{-3}) +$$

$$+ [(-11.926) - (-8.726 - 0.283)]\,T^2\,(10^{-6}) =$$

$$= -3.096 + 8.843\,T\,(10^{-3}) - 2.917\,(10^{-6})\,T^2$$

2.4 Entalpía de los reactivos

$$\int_{298}^{573} = [-3.096 + 8.843\,T\,(10^{-3}) - 2.917\,(10^{-6})\,T^2]\,dT = 50.503 \text{ cal/g mol}$$

2.5 Calores latentes

$$\lambda_{H_2O\ a\ 25\ °C} = 583 \text{ kcal/kg} \qquad \tilde{\lambda}_{H_2O} = 10\,497 \text{ kcal/kg mol}$$

$$\lambda_{C_2H_5OH\ a\ 25\ °C} = 220 \text{ kcal/kg} \qquad \tilde{\lambda}_{C_2H_5OH} = 10\,120 \text{ kcal/kg mol}$$

2.6 Calor de reacción a 300 °C

$$\Delta\tilde{H}_{R300} = -10.534 + 0.050409 + 10.12 - 10.497 = -10.8714 \text{ kcal/g mol}$$

3. **Resultado**

El calor de reacción a 300 °C es de − 10.8714 kcal/g mol

Problema 9.16

Un aceite combustible tiene una densidad de 14.1 grados API y una temperatura de ebullición media de 470 °C. ¿Cuál será su poder calorífico?

1. Planteamiento

1.1 Factor de caracterización

$$C = \frac{\sqrt[3]{T_B}}{\rho_R}$$

1.2 Densidad relativa

$$°API = 141.5/\rho_R - 131.5$$

2. Cálculos

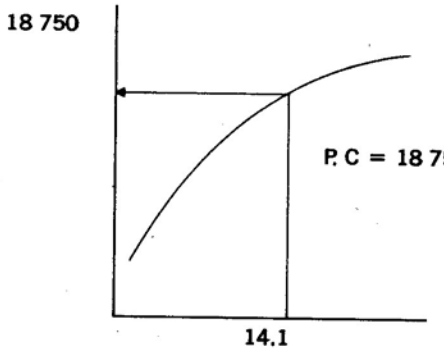
2.1 Densidad relativa

$$14.1 = \frac{141.5}{\rho_R} - 131.5 \quad \therefore \quad \rho_R = 0.97184$$

2.2 Factor de caracterización

$$C = \frac{\sqrt[3]{1\,337.4}}{0.97184} = 11.33$$

2.3 Poder calorífico



Del apéndice

$$P.C = 18\,750 \frac{BTU}{lb} = 10\,415 \frac{kcal}{kg}$$

4. **Resultado**

El poder calorífico es de 10 415 kcal/kg.

Problema 9.17

Calcule el poder calorífico alto de un carbón con la siguiente composición en peso:

C = 86.7	H = 2.2	O = 2.9
S = 0.5	N = 0.8	

1. Planteamiento

1.1 Poder calorífico

$$PC = 8\,079\ C = 34\,456\ (H - \frac{O}{8}) + 2\,250\ S$$

2. Cálculos

2.1 Poder calorífico

$$PC = 8\,079\ (0.867) + 34\,456\ (0.022 - \frac{0.029}{8}) + 2\,250\ (0.005) =$$

$$= 7\,648.869 \frac{kcal}{kg}$$

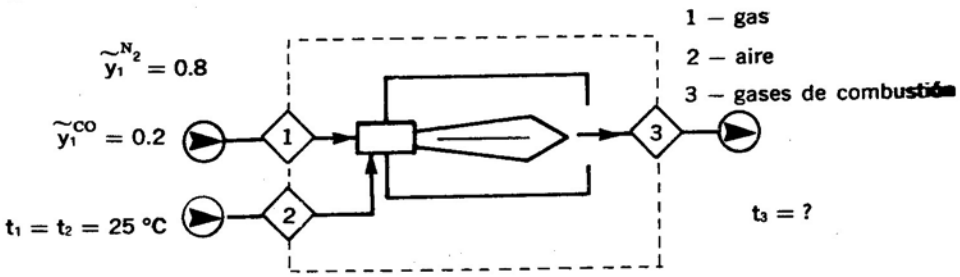
3. **Resultado**

El poder calorífico es de 7 648.869 $\frac{kcal}{kg}$ de acuerdo con la fórmula de Dulong. El poder calorífico reportado en el Perry para ese carbón es de 7 521.47 $\frac{kcal}{kg}$.

Problema 9.18

Calcule la temperatura teórica de flama de un gas que contiene 20% de CO y 80% de N_2 en volumen, cuando aquél se quema con cien por ciento de exceso del aire teórico requerido. El gas y el aire están inicialmente a 25 °C.

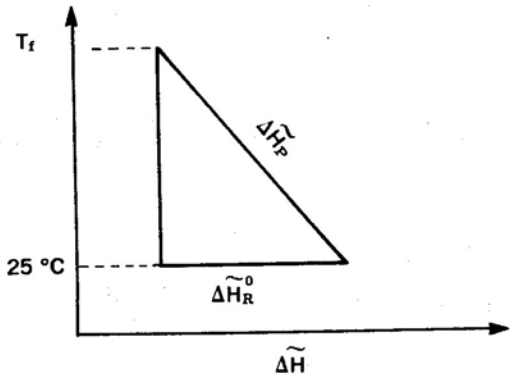
1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

En este caso, todo el calor de reacción sirve para calentar los productos de la reacción y el inerte que acompaña al aire y al gas



$$\Delta\tilde{H}_R^0 = \Delta\tilde{H}_p$$

$$CO + 1/2\ O_2 \longrightarrow CO_2$$

2.2 Balance de materia

$$\text{CO entrante} = \tilde{G}_1 \tilde{y}_1^{CO}$$

Nitrógeno entrante con el gas

$$\tilde{G}_1 \tilde{y}_1^{N_2} = (\tilde{G}_1 \tilde{y}_1^{CO} / \tilde{y}_1^{CO})\ \tilde{y}_1^{N_2}$$

Oxígeno requerido por la reacción

$$\tilde{G}_2\tilde{y}_2^{O_2} = (\tilde{G}_1\tilde{y}_1^{CO}/2)\ 2$$

Nitrógeno entrante con el aire

$$\tilde{G}_2\tilde{y}_2^{N_2} = (\tilde{G}_2\tilde{y}_2^{O_2}/\tilde{y}_2^{O_2})\ \tilde{y}_2^{N_2}$$

Nitrógeno total entrante

$$\tilde{G}_2\tilde{y}_2^{N_2} + \tilde{G}_1\tilde{y}_1^{N_2} = \tilde{G}_3\tilde{y}_3^{N_2}$$

CO_2 saliente

$$\tilde{G}_3\tilde{y}_3^{CO_2} = \tilde{G}_1\tilde{y}_1^{CO}$$

Oxígeno saliente que no reaccionó

$$\tilde{G}_3\tilde{y}_3^{O_2} = \tilde{G}_2\tilde{y}_2^{O_2} - 1/2\ \tilde{G}_3\tilde{y}_3^{CO_2}$$

3. Cálculos

3.1 Balance de materia

Base 1 g mol de CO quemado

$\tilde{G}_1\tilde{y}_1^{N_2} = (1/0.2)\ (0.8) = 4$ g mol

$\tilde{G}_2\tilde{y}_2^{O_2} = 1\ (0.5)\ (2) = 1$ g mol

$\tilde{G}_2\tilde{y}_2^{N_2} = (1/0.21)\ (0.79) = 3.76$ g mol

$\tilde{G}_3\tilde{y}_3^{CO_2} = 1$ g mol

$\tilde{G}_3\tilde{y}_3^{O_2} = 1 - 0.5 = 0.5$

$\tilde{G}_3\tilde{y}_3^{N_2} = 4 + 3.76 = 7.76$ g mol

3.2 Calor estándar de reacción

$$\Delta\tilde{H}_R^0 = \Delta\tilde{H}_{FCO_2}^0 - \Delta\tilde{H}_{FCO}^0 = -94.0518 - (-26.4157) =$$

$$= -67.6361 \text{ kcal/g mol}$$

3.3 Capacidades caloríficas

$$\tilde{C}p_{CO_2} = 6.214 + 10.396\ (10^{-3})\ T - 3.545\ (10^{-6})\ T^2$$

$$\tilde{C}p_{O_2} = 6.148 + 0.003102\ T - 0.923\ (10^{-6})\ T^2$$

$$\tilde{C}p_{N_2} = 6.524 + 0.00128\ T - 0.001\ (10^{-6})\ T^2$$

3.4 Entalpía de los productos

$$\Delta\tilde{H}p = 1 \int_{298}^{T} \tilde{C}p_{CO_2}\, dT + 0.5 \int_{298}^{T} \tilde{C}p_{O_2}\, dT + 7.76 \int_{298}^{T} \tilde{C}p_{N_2}\, dT$$

$$\Delta\tilde{H}p = 59.504\ T + 0.01125\ T^2 - 1.484\ (10^{-6})\ T^3 - 18\,703$$

3.5 Temperatura de flama

$$67\,636.1 = 59.504\ T + 0.01125\ T^2 - 1.484\ (10^{-6})\ T^3 - 18\,703$$

Esto se resuelve por tanteos

Primer tanteo $t = 1\,200\ ^{\circ}K$

$$71\,404.8 + 16\,200 - 2\,564 - 18\,703 = 66\,337 \neq 67\,636.1$$

Segundo tanteo $t = 1\,215\ ^{\circ}K$

$$72\,297.36 + 16\,607 - 2\,661.7 - 18\,703 = 67\,540 \cong 67\,636.1$$

4. **Resultado**

La temperatura de flama es de aproximadamente 1 215 °K.

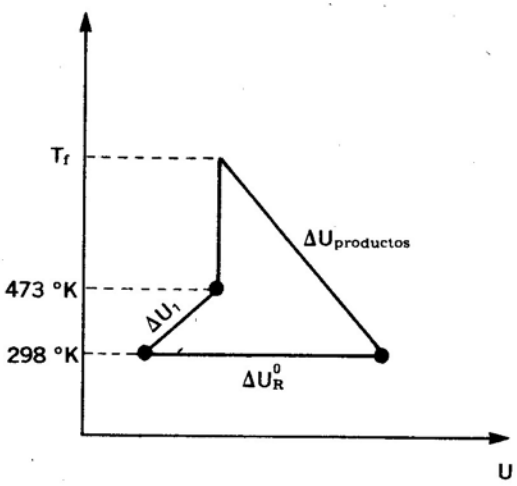
Problema 9.19

¿Cuál es la temperatura de flama del CO al quemarse en un cien por 100 de aire a volumen constante? La temperatura inicial es de 200 °C.

1. Planteamiento

1.1 Discusión

El calor de reacción se deberá obtener a volumen constante; esto se puede obtener a partir de:



$$CO + \tfrac{1}{2}\, O_2 \longrightarrow CO_2$$

$$\Delta\tilde{U}^0_R = \Delta\tilde{U}_1 + \Delta\tilde{U}_{productos}$$

$$\Delta\tilde{U}^0_R = \Delta\tilde{H}^0_R - RT\,\Delta\tilde{n}$$

$$\Delta\tilde{U}_1 = \int_{25}^{200} \tilde{C}v\, dT; \qquad Cp - \tilde{C}v = R$$

$$\Delta\tilde{U}_{prod} = \int_{T}^{25} \tilde{C}v_{prod}\, dT$$

1.2 Balance de masa

Reactivos iniciales	Reactivos finales
$\tilde{G}_1 \tilde{y}_1^{CO}$	$\tilde{G}_2 \tilde{y}_2^{CO_2} = \tilde{G}_1 \tilde{y}_1^{CO}$
$\tilde{G}_1 \tilde{y}_1^{O_2} = \tilde{G}_1 \tilde{y}_1^{CO}\,(2)/2$	$\tilde{G}_2 \tilde{y}_2^{O_2} = \tilde{G}_1 \tilde{y}_1^{O_2}/2$
$\tilde{G}_1 \tilde{y}_1^{N_2} = \tilde{G}_1 \tilde{y}_1^{O_2}\,(\tilde{y}_1^{N_2})/\tilde{y}_1^{O_2}$	$\tilde{G}_2 \tilde{y}_2^{N_2} = \tilde{G}_1 \tilde{y}_1^{N_2}$

2. Cálculos

2.1 Balance de masa

Base 1 g mol de CO

$\tilde{G}_1 \tilde{y}_1^{CO} = 1$	$\tilde{G}_1 \tilde{y}_1^{O_2} = 1$	$\tilde{G}_1 \tilde{y}_1^{N_2} = 3.76$
$G_2 \tilde{y}_2^{CO_2} = 1$	$\tilde{G}_2 \tilde{y}_2^{O_2} = 0.5$	$\tilde{G}_2 \tilde{y}_2^{N_2} = 3.76$

2.2 Calor estándar de reacción a volumen constante

$$\Delta\tilde{H}^{\circ}_{R} = -94.0518 - (-26.4157) = -67.6361$$

$$\Delta U^{\circ}_{R} = -676\,361 - 1.98\,(298)\,(1 - 1.5) = -67\,931 \text{ cal/g mol}$$

2.3 Energía interna de los reactivos

$$\Delta\tilde{U}_1 = 1\int_{25}^{200} \tilde{C}v_{CO}\,dT + 4.76\int_{25}^{200} \tilde{C}v_{aire}\,dT$$

$$\tilde{C}pm_{CO}\Big|_{25}^{200} = 7.05 \qquad \tilde{C}pm_{aire} = 7.05 \qquad \therefore \qquad \tilde{C}vm_{CO} = 5.05$$

$$\tilde{C}vm_{aire} = 5.07$$

$$\Delta\tilde{U}_1 = 5.76\,(5.07)\,(200 - 25) = 5\,110.56 \text{ cal}$$

2.4 Temperatura de flama

$$-67\,931 = 5\,110.56 + 3.76\int_{T}^{25} \tilde{C}v_{N_2}\,dT + \int_{T}^{25} \tilde{C}v_{CO_2}\,dT +$$

$$+ 0.5\int_{T}^{25} \tilde{C}v_{O_2}\,dT$$

Si suponemos un $\tilde{C}pm$ de 8, $\therefore$ $\tilde{C}vm = 6.02$

$$\frac{73\,041.56}{(3.75 + 1 + 0.5)\,6.02} + 25 = T = 2\,336\ ^{\circ}C$$

Esta temperatura se usa para el primer tanteo

$$\tilde{C}pm_{O_2} = 8.4 \qquad \tilde{C}pm_{N_2} = 8 \qquad \tilde{C}pm_{CO_2} = 13$$

$$\tilde{C}vm_{O_2} = 6.42 \qquad \tilde{C}vm_{N_2} = 6.02 \qquad \tilde{C}vm_{CO_2} = 11.2$$

$\therefore$ $73\,041.56 = 3.75\,(6.02)\,(T - 25) + 11.2\,(T - 25) + 0.5\,(6.42)\,(T - 25)$

$$T = 2\,004\ ^{\circ}C$$

Esta temperatura se usa como segundo tanteo

$$\tilde{C}pm_{O_2} = 8.35 \qquad \tilde{C}pm_{N_2} = 7.85 \qquad \tilde{C}pm_{O_2} = 12.9$$

$$\tilde{C}vm_{O_2} = 6.37 \qquad \tilde{C}vm_{N_2} = 5.97 \qquad \tilde{C}vm_{O_2} = 10.92$$

$$\therefore\ 73\,041.56 = 3.75\ (5.97)\ (T - 25) + 10.92\ (T - 25) + 0.5\ (6.37)\ (T - 25)$$

$$T = 2\,027\ ^{\circ}C$$

3. **Resultado**

La temperatura de flama debe estar alrededor de los 2 027 °C.

Problema 9.20

Obtenga el calor de la siguiente reacción:

$$2\ NaOH\ (4\ M) + H_2SO_4\ (2\ M) \longrightarrow Na_2SO_4\ (dil) + 2\ H_2O$$

1. Planteamiento

1.1 Discusión

La reacción anterior se lleva a cabo en dilución, por lo que se deben agregar a los calores de reacción los calores de dilución.

1.2 Calor estándar de reacción

$$\Delta\tilde{H}^0_R = \Delta\tilde{H}^0_{F\ Na_2SO_4\ dil} + 2\ \Delta\tilde{H}^0_{F\ H_2O} - \Delta\tilde{H}^0_{F\ NaOH\ dil\ 4M} - \Delta\tilde{H}^0_{F\ H_2SO_4\ 2M}$$

2. Cálculos

2.1 Calor de formación del ácido sulfúrico 2 M (dos molar)

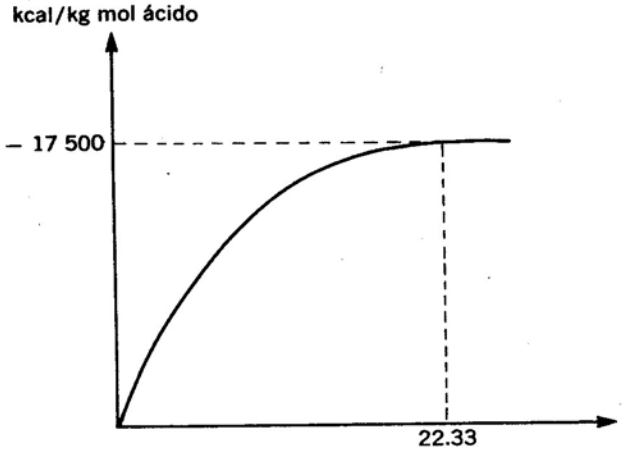
$\Delta\tilde{H}^0_F = -193.91$ kcal/g mol H_2SO_4 Sol 2 M = 2 g mol de H_2SO_4/1 l de sol

Si suponemos la densidad de la solución igual a la del agua, un litro de disolución = 1 000 g

$$H_2O = 1\,000 - 98\ (2) = 804$$

$$\text{Moles de agua/Mol de ácido} = \frac{\frac{804}{18}}{2} = 22.33$$

A partir de la gráfica



$$\Delta\tilde{H}^{0}_{F\ 2M} = -193.91 \text{ kcal/g mol} - 17.5 = -211.41 \text{ kcal/g mol}$$

2.2 Calor de formación de la sosa 4 M (cuatro molar)

$$\Delta\tilde{H}^{0}_{F} = -101.99 \text{ kcal/g mol}$$

Si suponemos la densidad de la solución igual a la del agua:

$$H_2O = 1\,000 \text{ g} - 4\,(40) = 840 \text{ g de } H_2O$$

$$\text{moles de } H_2O/\text{moles de sosa} = (840/18)/4 = 11.66$$

$$\Delta\tilde{H}^{0}_{dil} = -10\,500 \text{ kcal/kg mol}$$

$$\therefore\ \Delta\tilde{H}^{0}_{F\ NaOH\ 4M} = -101.99 - 10.5 = -112.49 \text{ kcal/g mol}$$

2.3 Calor de formación del Na_2SO_4 en dilución

Gramos de agua entrantes por g mol de sulfato formado.

Con la sosa

$$840/2 = 420 \text{ g}$$

Con el ácido

$$804/2 = 402 \text{ g} \quad \therefore \quad \frac{420 + 402}{18} = 45.66 \text{ g mol}$$

Agua saliente

$$45.66 \text{ g mol } H_2O + 2 \text{ g mol de reacción} = 47.66 \text{ g mol}$$

$$\text{g mol de } H_2O/\text{g mol de } Na_2SO_4 = 47.66/1 = 47.66$$

$$\Delta\widetilde{H}^0_{F\,Na_2SO_4} = -330.9 \text{ kcal/g mol} \qquad \Delta H_{dil} = -2\,000 \text{ cal/g mol}$$

$$\Delta\widetilde{H}^0_{F\,dil} = -330.9 - 2 = -332.9 \text{ kcal/g mol}$$

2.4 Calor estándar de reacción

$$\Delta\widetilde{H}^0_R = -332.9 + (-68.3174)\,2 - 2\,(-112.49) - (-211.41) =$$

$$= -33.14 \text{ kcal/g mol}$$

3. **Resultado**

El calor de reacción es de − 33.14 kcal/g mol.

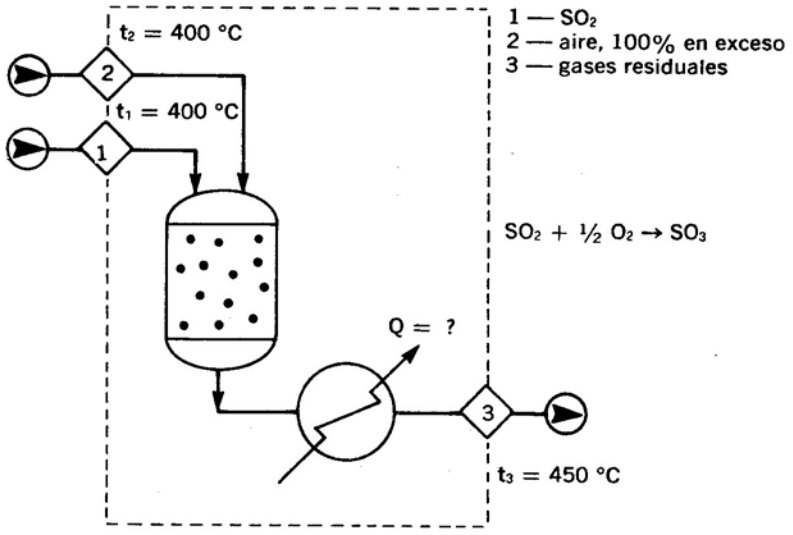
Problema 9.21

El SO_2 se oxida con cien por 100 de aire en exceso y un ochenta por ciento de conversión a SO_3.

Los gases entran al convertidor a 400 °C y salen a 450 °C.

¿Cuántas calorías se absorben en el intercambiador del convertidor por kg mol de SO_2 introducido?

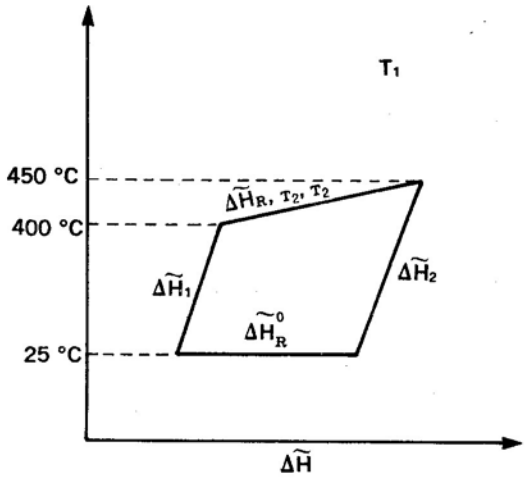
1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

Este problema plantea el caso de una reacción que va de T_1 a T_2, por lo que:



$$\Delta\tilde{H}^0_R = \Delta\tilde{H}_1 + \Delta\tilde{H}_{R,T_1T_2} + \Delta\tilde{H}_2$$

$$\Delta\tilde{H}_{T_1T_2} = \Delta\tilde{H}^0_R - \Delta\tilde{H}_1 - \Delta\tilde{H}_2$$

$$\Delta\tilde{H}^0_R = \Delta\tilde{H}^0_{F\,SO_3} - \Delta\tilde{H}^0_{F\,SO_2} - \Delta\tilde{H}^0_{F\,O_2}$$

2.2 Balance de materia

Base: un kg mol de SO_2

SO_2 entrante	$\tilde{G}_1\tilde{y}_1^{SO_2}$
Aire entrante	$\tilde{G}_2\tilde{y}_2^{O_2} = \tilde{G}_1\tilde{y}_1^{SO_2}\,(2)/2$
Nitrógeno entrante	$(\tilde{G}_2\tilde{y}_2^{O_2})\,\tilde{y}_2^{N_2}/\tilde{y}_2^{O_2} = \tilde{G}_3\tilde{y}_3^{N_2}$
SO_3 saliente	$\tilde{G}_3\tilde{y}_3^{SO_3} = \tilde{G}_1\tilde{y}_1^{SO_2}\,(0.8)$
SO_2 saliente	$\tilde{G}_1\tilde{y}_1^{SO_2} - \tilde{G}_3\tilde{y}_3^{SO_3} = \tilde{G}_3\tilde{y}_3^{SO_2}$

Oxígeno saliente

$$\tilde{G}_3\tilde{y}_3^{O_2} = \tilde{G}_2\tilde{y}_2^{O_2} - \tilde{G}_3\tilde{y}_3^{SO_3}/2$$

3. Cálculos

3.1 Balance de masa

$\tilde{G}_1\tilde{y}_1^{SO_2} = 1$

$\tilde{G}_2\tilde{y}_2^{N_2} = (0.79)/0.21 = 3.76$ kg mol/h $= \tilde{G}_3\tilde{y}_3^{N_2}$

$\tilde{G}_3\tilde{y}_3^{SO_3} = 0.8$ kg mol/h

$\tilde{G}_3\tilde{y}_3^{SO_2} = 1 - 0.8 = 0.2$ kg mol/h

$\tilde{G}_3\tilde{y}_3^{O_2} = 1 - 0.8/2 = 0.6$ kg mol/h

$\tilde{G}_2\tilde{y}_2^{O_2} = 1$ kg mol/h

3.2 Calor estándar de reacción

$$\Delta\tilde{H}_R^0 = -94.39 - (-70.94) = -23.45 \text{ kcal/g mol}$$

3.3 Entalpía de los reactivos

Usando $\tilde{C}pm$

$$\tilde{C}pm_{SO_2}\Big|_{25}^{400\,^\circ C} = 10.94 \text{ cal/g mol } ^\circ K = 10.94 \text{ kcal/kg mol } ^\circ K$$

$$\tilde{C}pm_{aire} = 7.152 \text{ kcal/kg mol } ^\circ K$$

$$\Delta\tilde{H}_1 = 10.94\,(1)\,(400 - 25) + 4.76\,(7.152)\,(400 - 25) = 16\,864 \text{ kcal}$$

3.4 Entalpía de los productos

$$\tilde{C}pm_{SO_2}\Big|_{25}^{450} = 11.08 \qquad \tilde{C}pm_{SO_3} = 15.52$$

$$\tilde{C}pm_{O_2} = 7.45 \qquad \tilde{C}pm_{N_2} = 7.1$$

$$\Delta\tilde{H}_2 = 11.08\,(0.2)\,(25 - 450) + 15.52\,(0.8)\,(25 - 450) + 7.45\,(0.6)$$
$$(25 - 450) + 7.1\,(3.76)\,(25 - 450)$$

$$\Delta\tilde{H}_2 = -19\,464.15 \text{ kcal}$$

3.5 Calor de reacción

$$\Delta\widetilde{H}_{T_1T_2} = -23\,490\,(0.8) - 16\,864 + 19\,464 = -16\,196 \text{ kcal}$$

4. **Resultado**

Se deben eliminar 16 196 kcal por kg de SO_2 introducido.

Problema 9.22

Se hizo un estudio a nivel de planta piloto para la reacción A + B ⟶ C operando adiabáticamente y a presión constante. Los resultados de una corrida experimental fueron los siguientes

Alimentación	Productos
5 g mol de A a 75 °C	5 g mol de C a 178 °C
10 g mol de B a 100 °C	5 g mol de B a 178 °C

a) ¿Cuál es el calor de reacción a 25 °C?

b) El mismo proceso en escala comercial se verifica con un 35 por 100 de eficiencia. Si las condiciones de la alimentación son: 25 kg mol/h de A a 75 °C, 50 kg mol/h de B a 100 °C, ¿cuál será la temperatura de salida de los productos en °C?

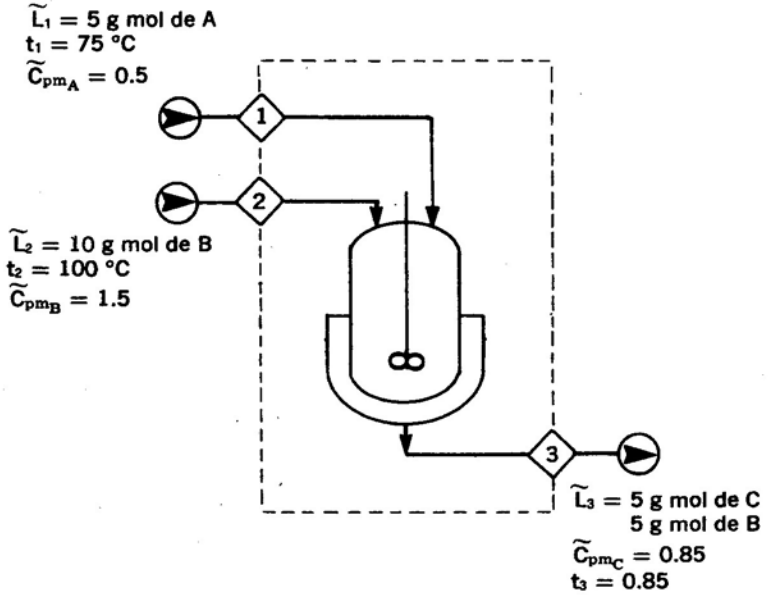
Datos

$\widetilde{C}pm\ A = 0.5$ cal/g mol °C

$\widetilde{C}pm\ B = 1.5$ cal/g mol °C

$\widetilde{C}pm\ C = 0.85$ cal/g mol °C

1. Traducción



2. Planteamiento

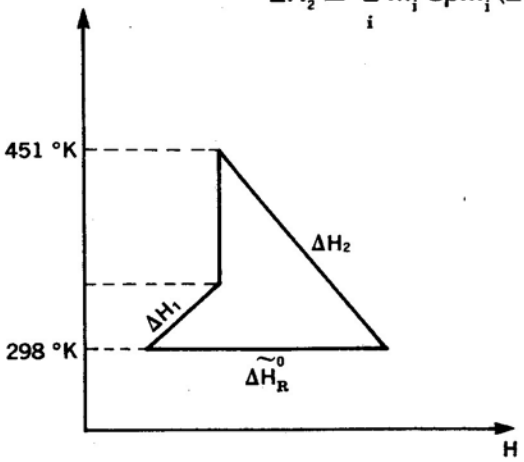
2.1 Discusión

Es una reacción adiabática en donde el calor de reacción sirve para calentar los productos

$$\Delta\widetilde{H}^0_R = \Delta\widetilde{H}_1 + \Delta\widetilde{H}_2$$

$$\Delta\widetilde{H}_1 = \sum_i^n \widetilde{m}_i\, \widetilde{C}pm_i\, (\Delta T) \text{ reactivos}$$

$$\Delta\widetilde{H}_2 = \sum_i^n \widetilde{m}_i\, \widetilde{C}pm_i\, (\Delta T) \text{ productos}$$



Reacción A + B ⟶ C

3. Cálculos

3.1 Entalpía de los reactivos

$$\Delta\widetilde{H}_1 = 10\,(1.5)\,(100 - 25) + 5\,(0.5)\,(75 - 25) = 1\,250 \text{ cal}$$

3.2 Entalpía de los productos

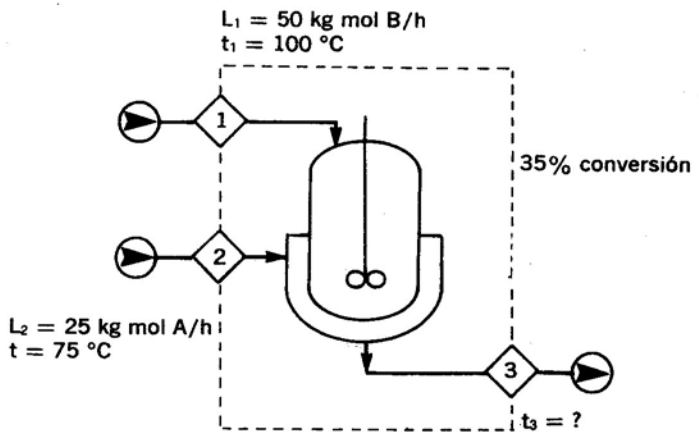
$$\Delta\widetilde{H}_2 = 5\,(0.85)\,(25 - 178) + 5\,(1.5)\,(25 - 178) = -1\,797.75 \text{ cal}$$

3.3 Calor estándar de reacción

$$\Delta\widetilde{H}^{\circ}_R = 1\,250 - 1\,797.75 = -547.75 \text{ cal}$$

$$\Delta\widetilde{H}^{\circ}_R = -547.75/5 \text{ g mol de C} = -109.55 \text{ cal/g mol de C}$$

3.4 Inciso b (en escala comercial). Traducción



3.5 Balance de energía

$$\Delta\widetilde{H}^{\circ}_R = \Delta\widetilde{H}_1 + \Delta\widetilde{H}_2 = \widetilde{m}_2\widetilde{C}p_2\Delta T + \widetilde{m}_1\widetilde{C}p_1\Delta T + \widetilde{m}_3\widetilde{C}p_3\Delta T$$

3.6 Balance de materia

Entradas	Salidas
25 kg mol de A	25 (0.35) = 8.75 kg mol C
50 kg mol de B	25 − (8.75) = 16.25 kg mol A
	50 − 8.75 = 41.25 kg mol B

3.7 Temperatura final

$$(-109.55)\ (8\,750) = 25\,000\ (0.5)\ (75 - 25) + 50\,000\ (1.5)\ (100 - 25) +$$

$$+ 8\,750\ (0.85)\ (25 - Tf) + 16\,250\ (0.5)\ (25 - Tf) + 41\,250\ (1.5)\ (25 - Tf)$$

$$Tf = 119\ °C$$

4. **Resultados**

El calor de reacción es de −109.55 cal/g mol de C.
La temperatura de salida será de 119 °C.

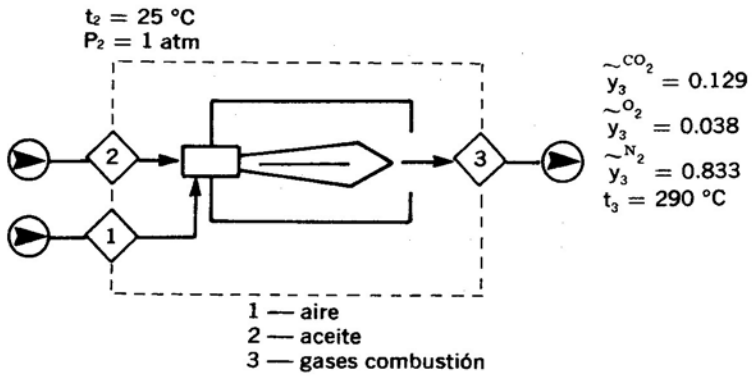
Problema 9.23

Un horno quema aceite con aire seco a 25 °C y 1 atm. El análisis Orsat de los gases es de 12.9 por ciento de CO_2, 3.8 por ciento de O_2 y 83.3 por ciento de N_2.

Suponiendo que el aceite contiene sólo carbón e hidrógeno, calcule:

a) porcentaje de aire en exceso
b) tanto por ciento de carbono en el aceite
c) m^3 de aire/kg de aceite
d) m^3 de gases de combustión/kg de aceite
e) presión parcial del agua en los gases de chimenea
f) el calor eliminado a los gases, si estos salen a 290 °C y si el calor de combustión del aceite es de −8 000 kcal/kg.

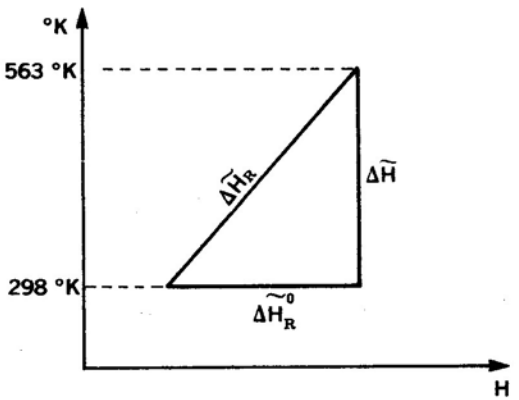
1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Discusión

El análisis de los gases de combustión se suele hacer con un aparato llamado analizador Orsat. Este aparato da las composiciones en volumen de gases secos, es decir, sin tomar en cuenta el agua que contienen los productos de la combustión. El balance se puede efectuar siguiendo la reacción química, pero en este ejemplo se presentará otra forma de resolver el problema distinta de la utilizada en el problema 9.11.



$$\Delta\widetilde{H}_R^0 = \Delta\widetilde{H}_R + \Delta\widetilde{H}_1$$

$$\Delta\widetilde{H}_1 = \int_{290}^{25} \widetilde{C}p_{prod}\, dT - \widetilde{\lambda}_{H_2O}$$

$$\Delta H_R^0 = -\,8\,000 \text{ kcal/kg (dato)}$$

2.2 Balance de materia

$$\widetilde{G}_3\widetilde{y}_3^{CO_2} = \widetilde{G}_2\widetilde{y}_2^{C}$$

El carbono del CO_2 procede sólo del carbono contenido en el aceite

$$\widetilde{G}_3\widetilde{y}_3^{N_2} = \widetilde{G}_1\widetilde{y}_1^{N_2}$$

Todo el nitrógeno que entra, sale

$$\widetilde{G}_1\widetilde{y}_1^{O_2} = (\widetilde{G}_1\widetilde{y}_1^{N_2})\,\widetilde{y}_1^{O_2}/\widetilde{y}_1^{N_2}$$

$$\widetilde{G}_3\widetilde{y}_3^{H_2O} = [\widetilde{G}_1\widetilde{y}_1^{O_2} - \widetilde{G}_3\widetilde{y}_3^{O_2} - \widetilde{G}_3\widetilde{y}_3^{CO_2}]\,2$$

El oxígeno que no salió reaccionó para dar CO_2 y H_2O. Un mol de oxígeno da dos moles de agua.

2.3 Porcentaje de aire en exceso

$$\left\{[\tilde{G}_1\tilde{y}_1^{O_2} - (\tilde{G}_3\tilde{y}_3^{H_2O}/2 + \tilde{G}_3\tilde{y}_3^{CO_2})]/(\tilde{G}_3\tilde{y}_3^{H_2O}/2 + \tilde{G}_3\tilde{y}_3^{CO_2})\right\}(100)$$

2.4 Porcentaje de carbono en el aceite

$$\tilde{G}_2\,\tilde{y}_2^{H_2} = \tilde{G}_3\,\tilde{y}_3^{H_2O}$$

$$\%\ \text{masa} = \tilde{G}_2\tilde{y}_2^{C}\,(PM_C)/[(\tilde{G}_2\tilde{y}_2^{C})\,PM_C + \tilde{G}_2\tilde{y}_2^{H_2}\,(PM)_{H_2}]$$

2.5 Metros cúbicos de aire por kg de aceite

$$\tilde{G}_1 = \tilde{G}_3\tilde{y}_3^{N_2}/\tilde{y}_2^{N_2} \qquad Ca_1 = \frac{\tilde{G}_1\,RT}{P}$$

$$G_2 = \tilde{G}_2\,\tilde{y}_2^{H_2}\,(PM_{H_2}) + \tilde{G}_2\,\tilde{y}_2^{C}\,(PM_C)$$

$$Ca_1/G_2 = m^3 \text{ aire/kg aceite}$$

2.6 Metros cúbicos de gases de combustión por kilogramo de aceite

$$\tilde{G}_3 = \tilde{G}_3\tilde{y}_3^{CO_2} + \tilde{G}_3\tilde{y}_3^{N_2} + \tilde{G}_3\tilde{y}_3^{O_2} + \tilde{G}_3\tilde{y}_3^{H_2O}$$

$$Ca_3 = \tilde{G}_3\,RT/P \qquad Ca_3/G_2 = m^3 \text{ de gases/kg de aceite}$$

2.7 Presión parcial del agua en los gases de chimenea

$$\tilde{P}_{H_2O} = (\tilde{G}_3\,\tilde{y}_3^{H_2O})\,(P_T)/\tilde{G}_3$$

3. Cálculos

3.1 Balance de materia

Base 100 g mol de gases Orsat

$$\tilde{G}_3\tilde{y}_3^{CO_2} = 12.9 \text{ g mol} \qquad \therefore\quad \tilde{G}_2\tilde{y}_2^{C} = 12.9 \text{ g mol}$$

$$\tilde{G}_3\tilde{y}_3^{N_2} = 83.3 \text{ g mol}$$

$$\tilde{G}_1 \tilde{y}_1^{O_2} = (83.3/0.79)\,(0.21) = 22.14 \text{ g mol}$$

$$\tilde{G}_3 \tilde{y}_3^{H_2O} = (22.14 - 12.9 - 3.8)\,2 = 10.88 \text{ g mol} = \tilde{G}_2 \tilde{y}_2^{H_2}$$

3.2 Aire en exceso

$$\frac{22.14 - (10.88/2 + 12.9)}{10.88/2 + 12.9}\,(100) = 20.7\%$$

3.3 Porcentaje de carbono en el aceite

$$\% = \{12.9\,(12)/[12.9\,(12) + 10.88\,(2)]\}\,(100) = 87.6\%$$

3.4 Metros cúbicos de aire por kilogramo de aceite

$$\tilde{G}_3 = 83.3/0.79 = 105.44 \text{ g mol de aire}$$

$$Ca_3 = 105.44\,(0.082)\,(298)/1 = 2\,576.53 \text{ l}$$

$$G_2 = 12.9\,(12) + 10.88\,(2) = 176.56 \text{ g}$$

$$Ca_3/G_2 = 2\,576.53 \text{ l}/176.56 \text{ g} = 14.59 \text{ l/g} = 14.59 \text{ m}^3 \text{ de aire/kg de aceite}$$

3.5 Metros cúbicos de gases de combustión por kilogramo de aceite

$$\tilde{G}_3 = 12.9 + 83.3 + 3.8 + 10.88 = 110.88 \text{ g mol}$$

$$Ca_3 = 110.88\,(0.082)\,(290 + 273)/1 = 5\,118.88 \text{ l}$$

$$Ca_3/G_2 = 5\,118.88 \text{ l}/176.56 \text{ g} = 28.99 \text{ l/g} = 28.78 \text{ m}^3/\text{kg}$$

3.6 Presión parcial del agua en los gases de chimenea

$$\tilde{P}_{H_2O} = 10.88\,(760)/110.88 = 74.57 \text{ mm de Hg}$$

3.7 Calor quitado a los gases

Usando capacidades caloríficas promedio

$$\tilde{C}pm_{H_2O} \Big|_{25}^{290\,^\circ C} = 8.2 \text{ cal/g mol } ^\circ C$$

$$\widetilde{C}pm_{O_2} = 7.35; \qquad \widetilde{C}pm_{N_2} = 7.08; \qquad \widetilde{C}pm_{CO_2} = 10.5$$

$$\widetilde{\lambda}_{H_2O} = 10\,497 \text{ cal/g mol}$$

$$\Delta H_{RT_1T_2} = -8\,000\,000\,(0.176) - \{[12.9\,(10.5) + 3.8\,(7.35) + 10.88\,(8.2) + 83.3\,(7.08)]\,(25 - 290)\} + 10.88\,(10\,497)$$

$$\Delta H_{R\,T_1\,T_2} = -1.0705\,(10^6) \text{ cal}$$

$$Q = -1.0705\,(10^6)/0.176 \text{ kg} = -6.0823\,(10^6) \text{ cal/kg de aceite} = -6\,082 \text{ kcal/kg}$$

4. Resultados

Se introduce 20.7% de aire en exceso.

El aceite contiene 87.6% de carbono.

Se requieren 14.59 m^3 de aire por kg de aceite quemado.

Se producen 28.99 metros cúbicos de gases de combustión.

La presión parcial del agua en los gases de chimenea es de 74.57 mm Hg.

El calor eliminado a los gases es de 6 082 kcal/kg de aceite.

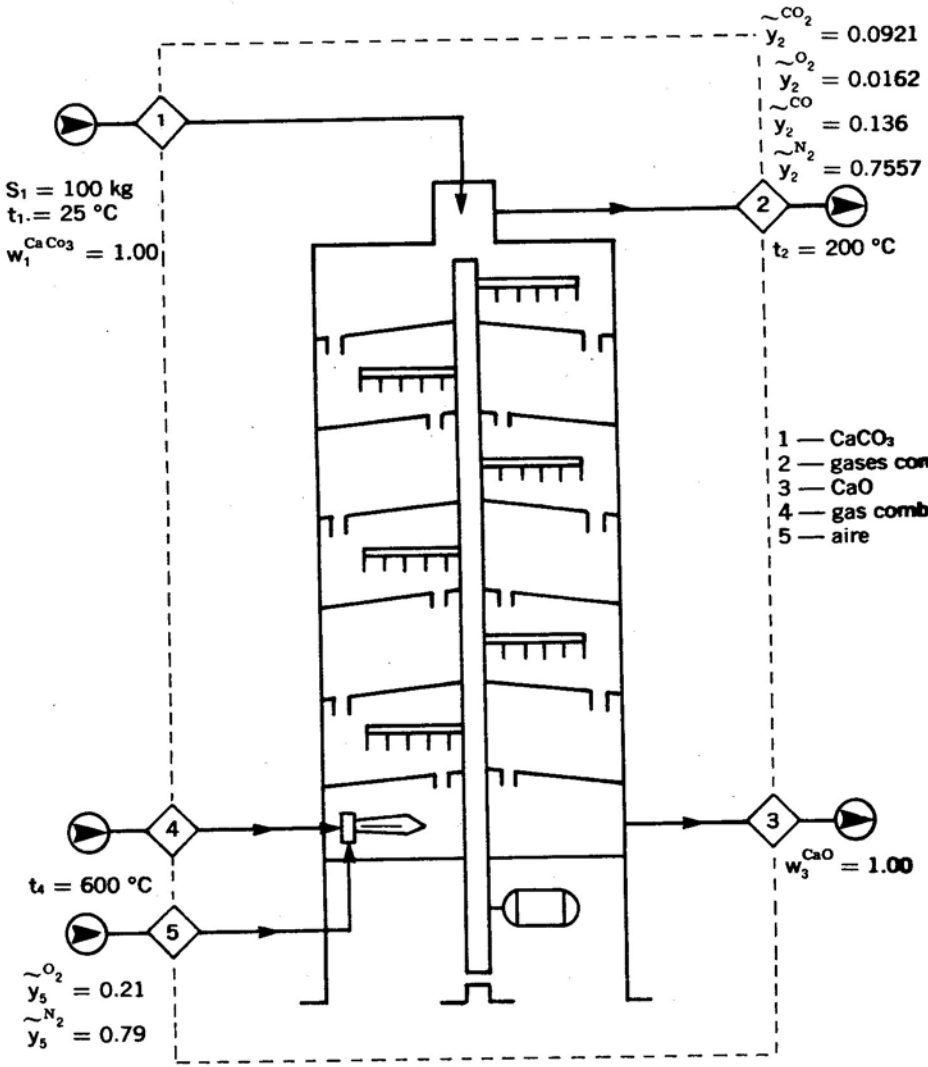
Problema 9.24

Se calcina piedra caliza pura ($CaCO_3$) en un horno vertical mediante contacto directo con los gases de combustión de un gas. Los productos gaseosos de la combustión y de la calcinación suben verticalmente y a contracorriente con la carga de piedra caliza. La piedra se introduce a 25 °C y la cal sale a 900 °C. El gas de combustión entra a 600 °C y se quema con la cantidad teórica requerida de aire a 25 °C. Los gases de combustión y calcinación salen a 200 °C. El análisis del gas de combustión es:

CO_2	9.21%
O_2	1.62%
CO	13.60%
N_2	75.57%

Calcule el número de metros cúbicos medidos a 0 °C y 760 mm de Hg de gas de combustión requerido para calcinar 100 kg de piedra caliza. Desprecie las pérdidas de calor y el contenido de humedad en el aire y en el gas de combustión.

1. Traducción



2. Planteamiento

2.1 Reacciones

$$CaCO_3 \longrightarrow CaO + CO_2 \qquad (I)$$

$$CO + \tfrac{1}{2}\, O_2 \longrightarrow CO_2 \qquad (II)$$

La segunda reacción da el calor necesario para la primera.

2.2 Balances de materia

Balance de Ca

$$\tilde{S}_1 \tilde{w}_1^{Ca} = \tilde{S}_3 \tilde{w}_3^{Ca}$$

En la reacción primera

$$S_3 = S_1 (PM_{CaO})/(PM_{CaCO_3})$$

Balance de CO_2 saliente de la primera reacción

$$\tilde{S}_1 \tilde{w}_1^{CaCO_3} = \tilde{G}_2 \tilde{y}_{2\,I}^{CO_2}$$

CO_2 saliente de la segunda reacción

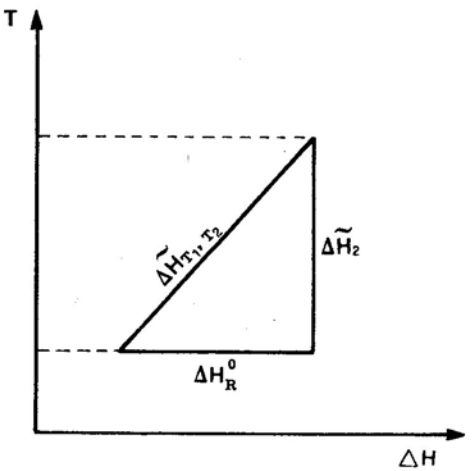
$$\tilde{G}_2 \tilde{y}_{2II}^{CO_2} = \tilde{G}_4 \tilde{y}_4^{CO_2} + \tilde{G}_4 \tilde{y}_4^{CO}$$

Oxígeno entrante

$$\tilde{G}_5 \tilde{y}_5^{O_2} = \frac{\tilde{G}_4 \tilde{y}_4^{CO}}{2} - \tilde{G}_4 \tilde{y}_4^{O_2}$$

2.3 Calor de reacción

Primera reacción



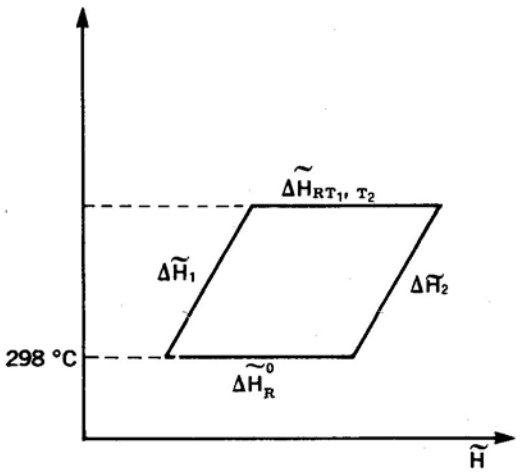
$$\Delta\tilde{H}^0_R = \Delta\tilde{H}_{R\,T_1,T_2} + \Delta\tilde{H}_2$$

$$\Delta\tilde{H}_{R\,T_1,T_2} = \Delta\tilde{H}^0_R - \Delta\tilde{H}_2$$

$$\Delta\tilde{H}^0_R = \Delta\tilde{H}^0_{F\,CaO} + \Delta\tilde{H}^0_{F\,CO_2} - \Delta\tilde{H}^0_{F\,CaCO_3}$$

$$\Delta\tilde{H}_2 = \tilde{S}_3\,\tilde{C}pm_{CaO}(900 - 25) + \tilde{G}_{2\,I}\,\tilde{w}_2^{CO_2}\,\tilde{C}pm_{CO_2}(200 - 25)$$

Segunda reacción



$$\Delta\tilde{H}^0_R = \Delta\tilde{H}_1 + \Delta\tilde{H}_{T_1T_2} + \Delta\tilde{H}_2$$

$$\Delta\tilde{H}_{T_1T_2} = \Delta\tilde{H}^0_R - \Delta\tilde{H}_1 - \Delta\tilde{H}_2$$

$$\Delta\tilde{H}^0_R = \Delta\tilde{H}_{F\,CO_2} - \Delta\tilde{H}^0_{F\,CO}$$

$$\Delta\tilde{H}_1 = \tilde{G}_4\,(\Sigma\tilde{C}pm\tilde{y})\,(600 - 25)$$

$$\Delta\tilde{H}_2 = \tilde{G}\Sigma\,(\tilde{C}pm\tilde{y}_{prod})\,(200 - 25)$$

3. Cálculos

3.1 Balance en la segunda reacción

Base 100 kg mol de gas

Entradas

CO_2	9.21 kg mol
O_2	1.62
CO	13.6
N_2	75.57

Salidas. De acuerdo con la reacción

CO_2 saliente

$$\tilde{G}_2\tilde{y}_2^{CO_2} = 9.21 + 13.6 = 22.81 \text{ kg mol}$$

Oxígeno necesario

$$13.2/2 = 6.6 \text{ kg mol}$$

Oxígeno del aire

$$6.6 - 1.62 = 4.98 \text{ kg mol} = \tilde{G}_5\tilde{y}_5^{O_2}$$

Nitrógeno saliente

$$75.57 + 4.98\,(0.79)/0.21 = 94.3 \text{ kg mol}$$

3.2 Calor estándar de la segunda reacción

$$\Delta\tilde{H}_R^0 = -94.0518 - (-26.4157) = -67.636 \text{ kcal/g mol CO}$$

$$\Delta\tilde{H}_R^0 = -67.636\,(13\,600) = 919\,849.6 \text{ kcal/100 kg mol de gas entrante}$$

3.3 Entalpía de los reactivos

$$\Delta\tilde{H}_1 = 9.21\,(11.053)\,(600 - 25) + 1.62\,(7.616)\,(600 - 25) + 13.6\,(7.259)\,(600 - 25) + 75.57\,(7.229)\,(600 - 25) = 436\,513 \text{ kcal}$$

3.4 Entalpía de los productos. Segunda reacción

$$\Delta\tilde{H}_2' = 22.81\,(9.701)\,(25 - 200) + 94.3\,(6.996)\,(25 - 200)$$

$$\Delta\tilde{H}_2 = -154\,175.3 \text{ kcal}$$

3.5 Calor total generado en la segunda reacción por 100 kg mol de gas

$$\Delta\tilde{H}_{T_1T_2} = -919\,849.6 - 436\,513 + 154\,175.3 = -1\,202\,187.3 \text{ kcal}$$

3.6 Primera reacción. Balance

Base 100 kg de $CaCO_3$

$$S_1 = 100 \text{ kg de } CaCO_3 \quad \therefore \quad 1 \text{ kg mol de } CaCO_3 = \tilde{S}_1$$

$$\therefore \quad \tilde{S}_3 = 1 \text{ kg mol CaO} \quad \therefore \quad S_3 = 56 \text{ kg de CaO}$$

$$CO_2 \text{ producido} \quad \tilde{G}_2\tilde{y}_{21} = 1 \text{ kg mol}$$

$$G_2y_{21} = 44 \text{ kg de } CO_2$$

3.7 Calor estándar de reacción. Primera reacción

$$\Delta\tilde{H}^0_R = -94.0518 - 151.9 + 288.45 = 42.4982 \text{ kcal/g mol } CaCO_3$$

$$\Delta H^0_{RTotal} = 42.4982\ (1\ 000) = 42\ 498.2 \text{ kcal/100 kg de } CaCO_3$$

3.8 Entalpía de los reactivos. Primera reacción

$$\Delta\tilde{H}_1 = 0 \qquad \text{Los reactivos entran a 25 °C}$$

3.9 Entalpía de los productos. Primera reacción

$$\Delta\tilde{H}_2 = 1\ (0.23)\ (56)\ (25 - 900) + 1\ (9.701)\ (25 - 200) = -12\ 967.67 \text{ kcal}$$

3.10 Calor requerido para la calcinación de 100 kg de piedra caliza

$$\Delta H_{T_1T_2} = 42\ 498.2 - (-12\ 967.67) = 55\ 465 \text{ kcal}$$

3.11 Cantidad necesaria de gas para calcinar 100 kg de piedra caliza

$$\tilde{G}_4 = (55\ 465/1\ 202\ 187.3)\ (100) = 4.6136 \text{ kg mol}$$

3.12 Metros cúbicos de gas requeridos por 100 kg de piedra caliza (medidos a 0 °C y 760 mm de Hg)

$$Ca_4 = 4.6136\ (22.4)\ m^3/kg\ mol = 103.34\ m^3$$

●

4. **Resultado**

Se requieren 103.34 m³ de gas de combustión por cada 100 kg de $CaCO_3$.

PROBLEMAS PROPUESTOS

Problema 9.25

Calcule el calor de formación del cloruro de bario en solución infinitamente diluida.

Resultado

El calor de formación del cloruro de bario en dilución infinita es de − 208.72 kcal/g mol.

Problema 9.26

Calcule el calor de reacción a volumen constante, a 25 °C, en la siguiente reacción

$$C\,(s) + 1/2\,O_2\,(g) \longrightarrow CO\,(g)$$

Resultado

Se desprenden 26 119.7 calorías por cada gramo mol de monóxido de carbono formado.

Problema 9.27

Calcule el calor estándar de la siguiente reacción

$$C_2H_4\,(g) + H_2O\,(l) \longrightarrow C_2H_5OH\,(l)$$

Resultado

El calor estándar de reacción es de − 10.534 kcal por gramo mol de etileno.

Problema 9.28

Calcule el calor estándar de reacción para la siguiente reacción

$$CaCO_3 \longrightarrow CaO + CO_2$$

Resultado

Es preciso adicionar 43.748 kcal por gramo mol de carbonato, pues la reacción es endotérmica.

Problema 9.29

¿Cuál es la temperatura máxima alcanzada cuando se lleva a cabo adiabáticamente la siguiente reacción?

$$H_2\,(g) + 1/2\,(O_2) \longrightarrow H_2O\,(g)$$

Resultado

La temperatura de flama debe estar alrededor de 4 300 °K.

Problema 9.30

El metanol se convierte en formol al pasarlo sobre un catalizador a 500 °C. La entrada al reactor consiste en metanol y aire en relación a 2 moles de oxígeno por mol de CH_3OH. En esta operación se obtiene una conversión de 20% por paso y los gases residuales que no reaccionan se recirculan continuamente. Se alimenta gas a fin de mantener fija la relación de 2 a 1. Como al recircular se aumenta la cantidad de nitrógeno en el sistema, éste se purga para mantener la corriente de N_2 fija a la entrada del reactor e igual a 10 moles por mol de CH_3OH.

¿Cuánto debe purgarse?

¿Cuál será la relación de recirculación a la relación de purga?

Resultados

Se deben purgar 15.78 kg por cada kg mol de metanol que se mete al reactor. La relación de recirculación a purga es de 22.05.

Problema 9.31

Calcule la composición en el equilibrio cuando 5 moles de vapor de agua reaccionan con 1 mol de metano a 600 °C y 1 atm.

Las reacciones que se llevan a cabo son:

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3\,H_2 \qquad K = 0.574$$

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \qquad K = 2.21$$

Problema 9.32

Una caldera quema gas natural que contiene sólo metano y nitrógeno. El análisis de los gases secos da: CO_2 8.05%, O_2 6.42% y 85.53% de N_2. Calcule la composición del combustible y la cantidad de aire en exceso usada en la combustión.

Resultados

La composición del combustible es de 9.145% de N_2 y 90.85% de CH_4. Se usó un 40% de aire en exceso.

Problema 9.33

Un mineral de pirita contiene 90% de FeS_2 y 10% de inertes en peso. Este material se calcina con 25% de aire en exceso, de acuerdo con la reacción $4\,FeS_2 + 11\,O_2 \longrightarrow 2\,Fe_2O_3 + 8\,SO_2$.

La mezcla sólida sale del calcinador con 13% de inerte en peso y el resto de FeS_2 y Fe_2O_3.

Calcule:

a) El peso de sólidos que salen del calcinador.

b) El % de conversión basados en FeS_2.

c) El análisis Orsat de los gases producidos.

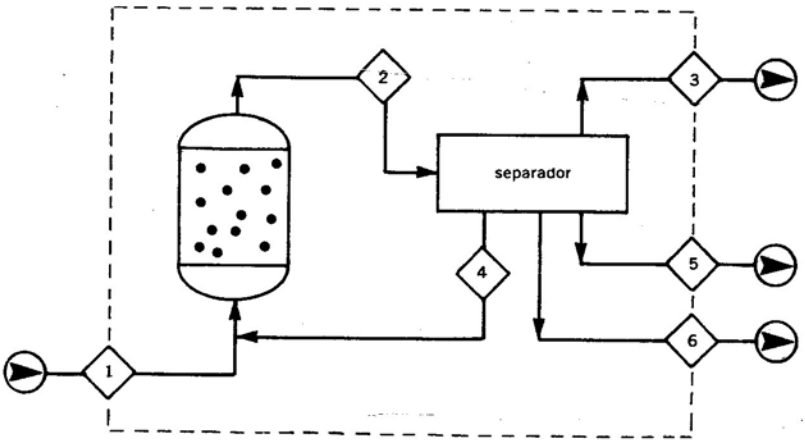
Nota: El análisis de los gases de combustión que incluye todos los gases, excepto el vapor de agua, recibe el nombre de análisis Orsat, o análisis base seca.

Resultados

Del calcinador salen 769 kg/h por 1 000 kg/h de mineral entrante. La conversión es del 77%. El análisis Orsat es de 8.36% oxígeno, 9.75% SO_2 y 81.88% N_2.

Problema 9.34

En un reactor catalítico se deshidrogena butano para obtener buteno. Si la conversión es del 5% y la selectividad es del 50%, calcule los moles de buteno, gas residual y coque que se obtienen por cada kg mol de alimentación fresca de butano.



1 – butano
2 – productos
3 – buteno
4 – recirculación de butano
5 – gases (5% CH_4, 15% C_2H_6, 10% C_2H_4, 70% H_2)
6 – coque

Resultados

Se obtendrán 0.5 kg mol de buteno, 2.0689 kg mol de gas residual y 0.862 kg mol de coque.

Problema 9.35

Un horno produce hierro en lingotes; para ello se utilizan cuatro cargas de mineral de hierro. La relación de coque empleado por mineral es de 1 a 2.2.

Para poder efectuar la reducción se mezcla el mineral con coque y piedra caliza.

El hierro en lingotes obtenido contiene 94% de hierro, y 1% de silicio, Mn, P y C.

La escoria contiene un tercio del manganeso entrante así como los elementos no contenidos en los lingotes de hierro.

La relación de $(CaO + MgO)$ a $(SiO_2 + Al_2O_3)$ en la escoria es de 1.

¿Cuánto hierro en lingotes se producirá?

¿Cuál será la composición de éste y de la escoria?

¿Cuánta caliza y coque se necesita?

Datos de análisis

	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Mn	Fe	P
Mineral 1	3.4	2.27	0.21	0.23	0.5	52.96	0.07
Mineral 2	5.26	2.35	0.19	0.49	0.86	52.37	0.069
Mineral 3	7.27	2.43	0.25	0.24	0.8	47.19	0.06
Mineral 4	11.28	2.61	0.24	0.33	0.69	44.63	0.06

	P	S	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO
Coque	0.014	1.17	6.05	3	0.4	0.18
Caliza	0.03	—	3	1.2	51.93	1.15

Para una carga se utilizan 5 000 kg del mineral 1, 10 000 del 2, 5 000 del 3 y 5 000 del 4.

Resultados

Se producen 13 272 kg de hierro en lingotes. La composición de los lingotes es 94% Fe, 0.13% P, 0.92% Mn, 1% Si, 3.937% C. La composición de la escoria es 29.9% SiO_2, 14% MnO, 18% Al_2O_3, 48% $(CaO + MgO)$, 2.4% S.

Se requieren 4432.4 kg de caliza y 11 363 kg de coque.

Problema 9.36

El ácido sulfhídrico que acompaña a ciertos gases naturales se separa absorbiéndolo en etanol amina. El H_2S procedente del absorbedor se lleva a un horno, en donde un tercio de H_2S se oxida a SO_2; este último reacciona entonces catalíticamente con el H_2S remanente para dar azufre.

En una cierta planta los gases entrantes al horno dan el siguiente análisis:

H_2S	53.92% volumen
CO_2	34.75% "
CH_4	2.74% "
H_2O	8.59% "

La adición de aire se controla para que se lleve a cabo la combustión completa de los hidrocarburos y la oxidación del H_2S a azufre.

Las reacciones que se llevan a cabo son:

$$H_2S + 3/2\ O_2 \longrightarrow SO_2 + H_2O$$

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

La reacción se lleva a cabo con un rendimiento del 91.7%. Si se quiere obtener 100 toneladas por día de S, ¿qué cantidad de m^3 de gases y aire se necesitarán a 50 °C y 5 lb/in^2 manométricas?, ¿cuál será la composición de los gases salientes?

Resultados

Se requieren 124 919 m^3/día de gases y 192 602 m^3/día de aire.

La composición de los gases salientes es 17.7% S, 1.6% H_2S, 22.7% H_2O, 13.4% CO_2, 0.7% O_2, 43.6% N_2.

Problema 9.37

En una planta se quiere obtener 2 000 kg/h de carbonato de bario, mediante un proceso consistente en fundir barita con carbonato de sodio anhidro. La barita contiene tan sólo sulfato de bario y material infusible.

La masa resultante de la fusión contiene 11.3% de $BaSO_4$, 27.7% Na_2SO_4, 20.35% de Na_2CO_3 y el resto es de carbonato de bario y material infusible.

a) Calcule el % de conversión del sulfato de bario en carbonato.

b) Calcule la composición de las baritas.

c) Calcule el reactivo en exceso y su porcentaje.

d) Calcule la cantidad de material entrante y saliente por cada corriente.

Resultados

El reactivo en exceso es el carbonato de sodio, el exceso es 59.2%. La conversión de sulfato de bario a carbonato es del 80.2%.

Problema 9.38

La oxidación del metanol se lleva a cabo a 500 °C sobre un catalizador.

$$CH_3OH + \tfrac{1}{2}\, O_2 \longrightarrow CH_2 = O + H_2O$$

La alimentación al reactor consiste en aire y metanol a razón de dos moles de O_2 por mol de metanol.

La conversión por paso es 20% y los gases residuales que no reaccionen se mandan a un condensador, en donde se separa el metanol, el cual se recircula.

Se alimenta gas contínuamente para que se mantenga la relación de 2 a 1. ¿Cuál será la composición de la alimentación para dar una conversión total de 100%?

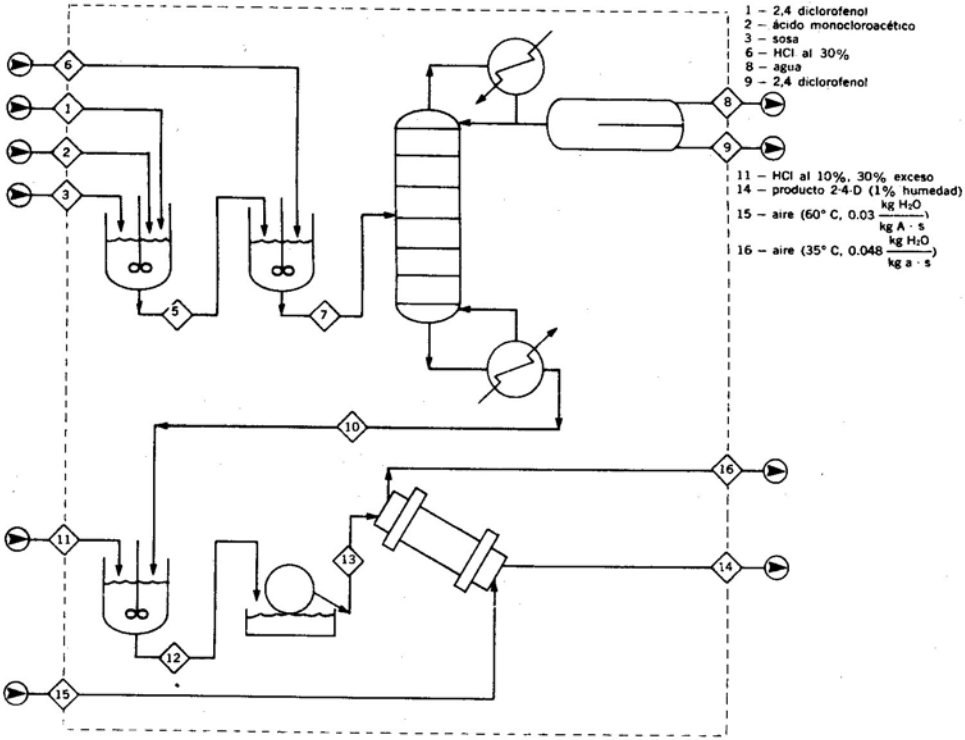
Calcule los moles de CH_3OH recirculados por mol de metanol alimentado para dar una conversión del 100%.

Resultados

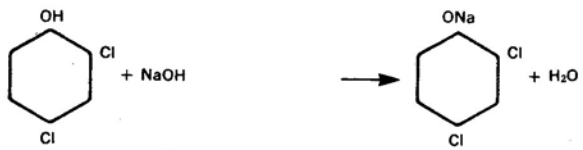
La composición de la alimentación es del 97.94% en mol de aire por 2.05% en mol de metanol. Se recirculan 4 kg mol de metanol por cada mol alimentado.

Problema 9.39

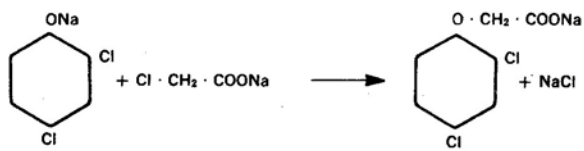
El insecticida 2-4-D se produce en el proceso ilustrado a continuación:

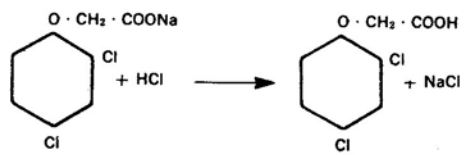


Las reacciones del proceso son:



$$Cl\,CH_2\,COOH + Na\,OH \rightarrow Cl\,CH_2\,COO\,Na + H_2O$$





El decantador sugiere que el fenol y el agua vienen como productos superiores de la columna y que el fenol se separa fácilmente. Este se recircula. El ácido 2-4-D es insoluble y se separa por filtración. Si en el proceso la primera reacción tiene un rendimiento del 80%, ¿cuánto se requerirá de fenol y de NaOH para producir 500 kg/h de 2-4-D?, ¿cuánto fenol se destila?, ¿cuántos fondos si todo el fenol y el 80% del agua se obtienen como productos?, ¿cuánto HCl se adiciona en el tanque de acidificación?, ¿cuántos m^3 de aire se requieren en el secador si los sólidos entran con 40% de humedad?

Resultados

Se requieren 460.9 kg/h de fenol, se destilan 92 kg/h de fenol y 300 kg/h de agua. Los fondos son de 857 kg/h, se adicionan 1 341 kg/h de HCl al 1%, se requieren 17 155 m^3/h de aire.

Problema 9.40

Calcule el calor de reacción a 125 °C de la reacción

$$CO + 1/2\ O_2 \longrightarrow CO_2$$

Resultado

El calor de reacción a 125 °C es de − 67.749 kcal/g mol.

Si se usan $\tilde{C}pm$, el calor de reacción obtenido es de −67.7891 kcal/g mol

Problema 9.41

Calcule el calor producido en la siguiente reacción

$$H_2\ (g, 200\ °C) + 1/2\ O_2\ (g, 200\ °C) \longrightarrow H_2O\ (g, 700\ °C)$$

Resultado

Se desprenden 53 680 calorías por gramo mol de agua formada.

Problema 9.42

Se quema metano en un horno con dos veces la cantidad estequiométrica de aire. Si el metano y el aire están inicialmente a 25 °C., ¿cuál será la temperatura de los productos salientes de la reacción?

Resultado

La temperatura de flama estará alrededor de 1 192 °C.

Problema 9.43

Calcule el calor de reacción en la producción de gas de agua a 1 500 °C

$$C\,(s) + 2\,H_2O\,(g) \longrightarrow CO_2\,(g) + 2\,H_2\,(g)$$

Resultado

El calor de reacción a 1 500 °C es de 25 827 calorías por gramo mol de carbono, o sea, ese calor hay que proporcionarlo a la reacción.

Problema 9.44

El monóxido de carbono puro se mezcla con cien por 100 de aire en exceso y se quema completamente a presión constante. Los reactivos están originalmente a 200 °C. Determine el calor eliminado o agregado si los productos salen a 2 000 °C.

Resultado

Se deberán agregar 17 893 calorías por cada gramo mol de CO introducido.

Problema 9.45

Tratando de optimizar el proceso del problema número 7.9, se partió de las condiciones de alimentación del inciso **b** y se operó isotérmicamente a 150 °C. La eficiencia mejoró hasta un 70 por 100. ¿Cuál será la cantidad de calor suministrada o cedida por el proceso?

Resultado

Se deben adicionar 253 000 cal/h para hacer la reacción isotérmica a 150 °C.

Problema 9.46

Encuentre el calor de reacción de

$$H_2SO_4\,(l) + 2\,NaOH\,(aq) \longrightarrow Na_2SO_4\,(aq) + 2\,H_2O\,(l)$$

a partir de las siguientes reacciones:

$H_2\,(g) + S\,(s) + 2\,(O_2) \longrightarrow H_2SO_4\,(l)$	$\Delta\tilde{H}^\circ = -193\,910$ cal/g mol
$Na\,(s) + 1/2\,O_2\,(g) + 1/2\,H_2\,(g) \longrightarrow NaOH\,(s)$	$\Delta\tilde{H}^\circ = -101\,990$ "
$2\,Na\,(s) + S\,(s) + 2\,(O_2)\,g \longrightarrow Na_2SO_4\,(s)$	$\Delta\tilde{H}^\circ = -330\,900$ "
$Na_2SO_4\,(s) + \infty\,H_2O \longrightarrow Na_2SO_4\,(aq)$	$\Delta\tilde{H}^\circ = -\quad 560$ "
$H_2\,(g) + 1/2\,O_2\,(g) \longrightarrow H_2O\,(l)$	$\Delta\tilde{H}^\circ = -\ 68\,317$ "
$NaOH\,aq \longrightarrow NaOH\,(s) + \infty\,H_2O$	$\Delta\tilde{H}^\circ = \quad 10\,246$ "

Resultado

Se desprenden 49.812 kcal.

Problema 9.47

Calcule el calor generado por la siguiente reacción

$$H_2\,(g) + 1/2\,O_2 \longrightarrow H_2O\,(g)$$

El hidrógeno (5 kg mol) entra a 200 °C y el aire entra a 300 °C, en la cantidad estequiométricamente necesaria para que todo el hidrógeno se queme. Los productos de la reacción salen a 700 °C.

Resultado

Se desprenden 242 165 kcal.

Problema 9.48

Se introduce vapor a 250 °C a través de un lecho de coque que está inicialmente a 1 200 °C. Los gases salen a una temperatura promedio de 800 °C con la siguiente composición en volumen sobre base seca:

H_2	53.5 %
CO	39.7 "
CO_2	6.8 "

Del vapor introducido, el 30 por 100 pasa sin descomponerse. Calcule el calor de reacción en kilocalorías por kg mol de vapor introducido. El calor específico promedio del coque de 0 a 1 200 °C es de 0.35. Las reacciones que se llevan a cabo son:

$$C + H_2O\ (g) \longrightarrow CO + H_2$$

$$CO + H_2O\ (g) \longrightarrow CO_2 + H_2$$

Resultado

Se necesita adicionar 21 613.87 kcal por kg mol de H_2O.

Problema 9.49

Una planta quema azufre, con pureza de 99.4 por ciento a razón de 310 kg/h. La temperatura promedio del aire es de 15 °C y los gases salen del quemador a 404 °C, con una composición de 17.4 por 100 de SO_2, 2.7 por 100 de O_2 y el resto de N_2. Los gases pasan entonces a un enfriador que reduce su temperatura de 404 °C a 21 °C por medio de agua, que pasa de 14 °C a 32 °C.

Calcule:

a) El porcentaje de azufre quemado a SO_2
b) Los kilogramos por hora de SO_2
c) El consumo de aire en m^3/min
d) Los m^3/min de gases que salen del quemador y los m^3/min que salen del enfriador
e) El calor extraído del quemador en kcal/h
f) El agua usada en el enfriador en litros por hora

Nota: En el proceso se forma algo de SO_3, pero no lo detecta el analizador.

Resultados

Se quema el 95.5 por 100 del azufre a SO_2.

Se forman 589.17 kg/h de SO_2.

Se requieren 21 m^3/min de aire.

Salen 49.34 m^3/min de gases del quemador y 21.42 m^3/min del enfriador.

Se extraen 497 407 kcal/h.

Se usan 9 460 l/h de agua.

APENDICE I

Conversiones más comunes

Espacio

1 pulgada, "inch" = in = 2.54 cm

1 milla = 1.609 km

1 pie, "foot" = ft = 30.48 cm

1 pie = 12 pulgadas

1 yarda = 0.944 m

Masa

1 libra, "pound" = lb = 453.59 g

1 tonelada métrica = 1 000 kg

1 tonelada corta = 2 000 libras

1 onza = 28.394 g

Volumen

1 pie cúbico, $ft^3 = 28.32$ l = 7.48 galones

1 galón = 3.7854 l

1 m^3 = 35.33 ft^3

1 barril = 42 galones

1 onza fluida = 29.57 cm^3

1 barril de petróleo (E.U.A.) = 159.24 l

Presión

1 atmósfera, atm = 760 mm de Hg

1 atm = 29.92 pulgadas de Hg

1 psi = libra sobre pulgada cuadrada = $\vec{lb}/in^2 = 703 \frac{\vec{kg}}{m^2}$

1 atm = $14.7 \vec{lb}/in^2 = 1.033 \vec{kg}/cm^2$

1 baria = bar = 1 dina/cm = 1 dyn/cm^2

1 atm = 101 337.3 Pascal

$$1 \quad \frac{\vec{kg}}{m^2} = 1 \text{ mm de } H_2O$$

Fuerza

1 Newton = 0.1019 $\vec{kg}$

1 kilogramo fuerza = $\vec{kg}$ = 9.81 newton = 9.81 N

1 libra fuerza = $\vec{lb}$ = 0.454 $\vec{kg}$

1 kilocaloría = kcal = 426.7 kilogramo fuerza-metro

Energía

1 BTU = 252 calorías = 252 cal

1 atmósfera-litro, "atm-l" = 10.333 $\vec{kg}$ m = 0.0242 cal

1 BTU = 778.2 pie-libra-fuerza = 778.2 $\vec{ft\text{-}lb}$

1 BTU = 1 054 julios = 1 054 J

1 julio = 1 newton metro = 1 Nm

1 pie libra, "foot-pound", $\vec{ft\text{-}lb}$ = 0.1383 $\vec{kgm}$

Potencia

1 caballo de vapor = C.V. = 75 $\vec{kg}$ m/s = 0.736 kW

1 horse power = H.P. = 0.7457 kilovatios = 0.7457 kW

1 vatio = W = 1 julio/s

1 caballo de caldera BHP = 33 475 BTU/h

1 kilovatio, kw = 1 000 vatios = 1 000 julios/s = 1.359 C.V.

1 tonelada de refrigeración = 12 000 BTU/h = 3 024 kcal/h

Energía por unidad de masa

$$1 \quad \frac{\text{julio}}{\text{kg}} = 1 \quad \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$1 \quad \frac{\overrightarrow{\text{kgm}}}{\text{kg}} = 3.278 \quad \frac{\text{ft-}\overrightarrow{\text{lb}}}{\text{lb}}$$

$$1 \quad \frac{\text{BTU}}{\text{lb}} = 0.555 \quad \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} = 236.81 \quad \frac{\overrightarrow{\text{kgm}}}{\text{kg}}$$

Constante de los gases

$$R = 0.082 \text{ 1-atm/(g mol °K)} = 1.987 \text{ cal/g mol °K}$$

$$R = 0.082 \text{ m}^3\text{-atm/(kg mol °K)} = 0.7302 \text{ atm ft}^3\text{/lb mol °K}$$

$$R = 10.73 \text{ psi ft}^3\text{/(lb mol °R)} = 1.987 \quad \frac{\text{BTU}}{\text{lb mol °R}}$$

APENDICE II

Pesos atómicos internacionales (1961)

Actinio	Ac	(227)	Lactano	La	138,91
Aluminio	Al	26,9815	Litio	Li	6,939
Americio	A	(243)	Lutecio	Lu	174,97
Antimonio	Sb	121,75	Magnesio	Mg	24,312
Argón	A	39,948	Manganeso	Mn	54,9380
Arsénico	As	74,9216	Mercurio	Hg	200,59
Astato	At	(210)	Molibdeno	Mo	95,94
Azufre	S	32,064	Neodimio	Nd	144,24
Bario	Ba	137,34	Neón	Ne	20,183
Berilio	Be	9,0122	Neptunio	Np	(237)
Berkelio	Bk	(245)	Niobio	Nb	92,906
Bismuto	Bi	208.980	Níquel	Ni	58,71
Boro	B	10,811	Nitrógeno	N	14,0067
Bromo	Br	79,909	Oro	Au	196,967
Cadmio	Cd	112,40	Osmio	Os	190,2
Calcio	Ca	40,08	Oxígeno	O	15,9994
Californio	Cf	(248)	Paladio	Pd	106,4
Carbono	C	12,01115	Plata	Ag	107,870
Cerio	Ce	140,12	Platino	Pt	195,09
Cesio	Cs	132,905	Plomo	Pb	207,19
Cinc	Zn	65,37	Plutonio	Pu	(242)
Circonio	Zr	91,22	Polonio	Po	(210)
Cloro	Cl	35,453	Potasio	K	39,102
Cobalto	Co	58,9332	Praseodimio	Pr	140,907
Cobre	Cu	63.54	Prometio	Pm	(145)
Cromo	Cr	51,996	Protactinio	Pa	(231)
Curio	Cm	(245)	Radio	Ra	(226)
Disprosio	Dy	162,50	Radón	Rn	(222)
Erbio	Er	167,26	Renio	Re	186,22
Escandio	S	44,956	Rodio	Rh	102,905
Estaño	Sn	118,69	Rubidio	Rb	85,47
Estroncio	Sr	87,62	Rutenio	Ru	101.07
Europio	Eu	151,96	Samario	Sm	150,35
Flúor	F	18,9984	Selenio	Se	78,96
Fósforo	P	30,9738	Silicio	Si	28,086
Francio	Fr	(233)	Sodio	Na	22,9898
Gadolinio	Gd	157,25	Talio	Tl	204,37
Galio	Ga	69.72	Tantalio	Ta	180,948
Germanio	Ge	72.59	Tecnecio	Tc	(99)
Hafnio	Hf	178,49	Teluro	Te	127.60
Helio	He	4,0026	Terbio	Tb	158,924
Hidrógeno	H	1,00797	Titanio	Ti	47,90
Hierro	Fe	55,847	Torio	Th	232,038
Holmio	Ho	164,930	Tulio	Tm	168,934
Indio	In	114,82	Uranio	U	238,03
Iridio	Ir	192,2	Vanadio	V	50,942
Itrio	Y	88,905	Volframio	W	183.85
Iterbio	Yb	173,04	Xenón	Xe	131,30
Kriptón	Kr	83,80	Yodo	I	126,9044

APENDICE III

Propiedades críticas

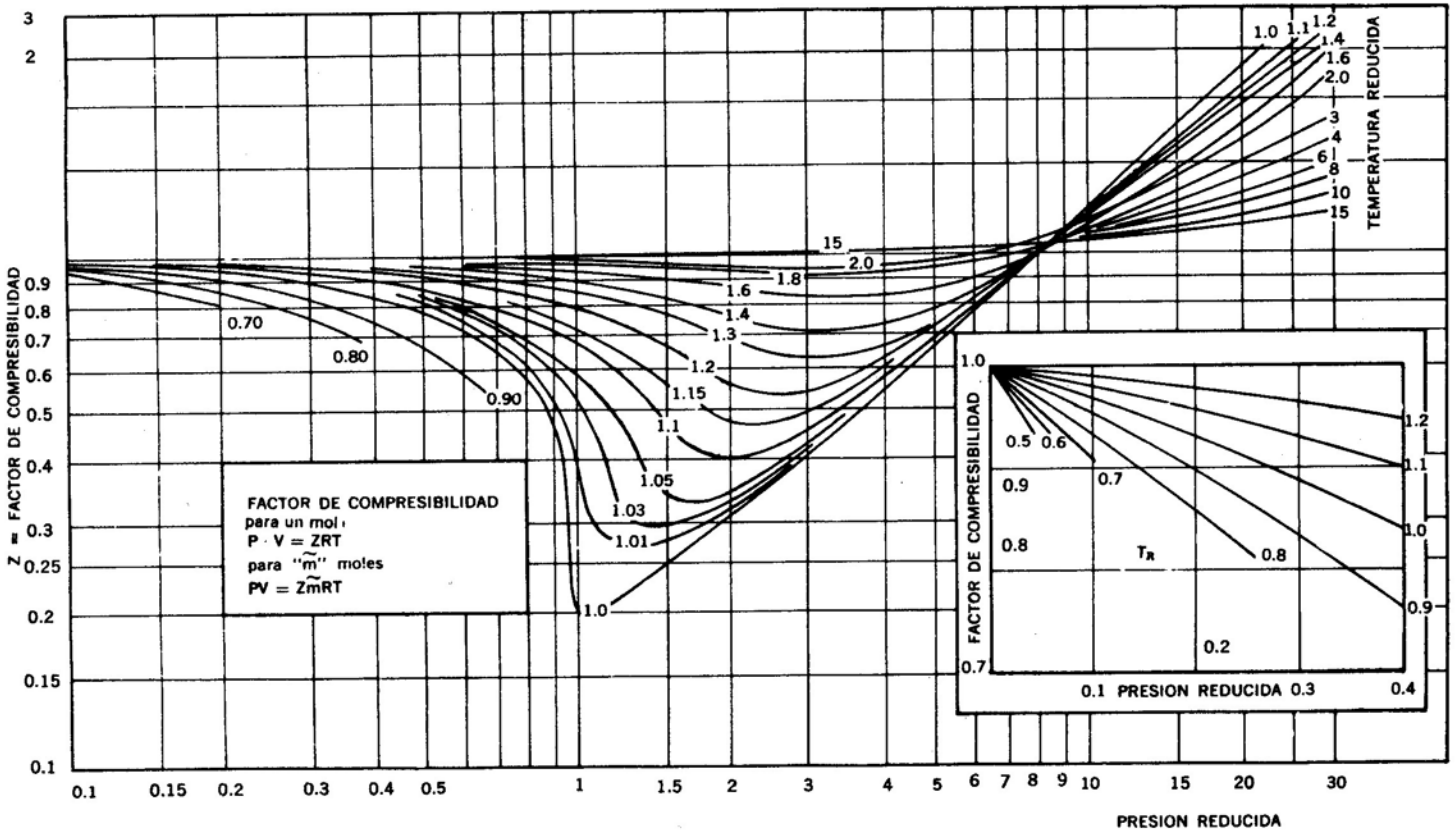
Sustancia	P_c (atm)	Tc °K	Vc $\frac{m^3}{kg\ mol}$
Acetileno	62	308.88	0.112
Aire	36.4	132.77	0.086
Amoniaco	111.3	405.55	0.092
Benceno	48.7	562.77	0.256
n-Butano	37.5	425	0.255
Dióxido de carbono	72.9	304.44	0.094
Monóxido de carbono	34.5	132.7	0.093
Freón 12	39.6	384.44	0.221
Etano	48.2	305.55	0.148
Etileno	50.5	283.33	0.124
Helio	2.26	5.18	0.057
n-Heptano	27	540	0.426
Hidrógeno	12.8	33.22	0.065
Metano	45.8	191.11	0.099
Cloruro de metilo	65.8	416.11	0.143
Nitrógeno	33.5	126.11	0.090
n-Octano	24.6	569.44	0.485
Oxígeno	50.1	154.44	0.074
Propano	42.1	370	0.200
Dióxido de azufre	77.7	430.55	0.122
Agua	218.2	647.22	0.056
Neón	26.9	44.5	0.041
Argón	48.0	151	0.075
Kriptón	54.3	209.4	0.092
Xenón	58	289.8	0.118
Cloro	76.1	417	0.124
Metiletilcetona	41.0	535.6	0.267
Freón II	43.5	471.2	0.248
Acido cianhídrico	53.2	456.8	0.139
Bromo	102	584	0.144
Propileno	45.5	365	0.181
i-Butano	3.6	408.1	0.263
Pentano	33.3	469.8	0.311
n-Hexano	29.9	507.9	0.368
n-Heptano	27	540.2	0.426
n-Octano	24.6	569.4	0.485
n-Nonano	22.5	595	0.543
Octohexano	40	553	0.308
Tetracloruro de carbono	45	556.4	0.276
Disulfuro de carbono	78	552	0.170
Cloroformo	54	536.6	0.240
Acetona	47.0	508	0.213
Acetato de etilo	37.8	253.1	0.286
Acido acético	57.1	594.8	0.171
Bióxido de nitrógeno	100	431	0.082
Cloropentano	44.5	511.8	0.26
Acido clorhídrico	81.5	324.6	0.087
Etanol	63	516.3	0.167
i-Pentano	32.9	461	0.308
Oxido de nitrógeno	65	179.2	0.058
Oxido nitroso	71.7	309.5	0.096
Acido sulfhídrico	88.9	373.6	0.098
Trióxido de azufre	83.8	491.4	0.126
Tolueno	40.3	593.9	0.318
m-Xileno	34.6	619	0.390
o-Xileno	35.7	631.5	0.380
p-Xileno	33.9	618	0.37
Cloro benceno	44.6	632.4	0.308
Cloruro de metilo	65.9	416.2	0.139

APENDICE IV

Constantes de Van der Waals

Sustancia	a $\frac{\text{atm-l}^2}{\text{g mol}^2}$	b l/g mol
Dióxido de azufre	6.69	0.0565
Amoniaco	4.05	0.0364
Dióxido de carbono	3.61	0.0428
Agua	5.464	0.0309
Hidrógeno	0.244	0.0266
Acido clorhídrico	3.667	0.04081
Acido sulfhídrico	4.431	0.04287
Monóxido de carbono	1.485	0.03985
Cloro	6.493	0.05622
Metano	2.253	0.04278
Aire	1.33	0.0366
Etileno	4.48	0.0572
Nitrógeno	1.347	0.0386
Oxígeno	1.36	0.0319
Acetileno	4.408	0.0514
Benceno	18.798	0.1209
n-Butano	14.332	0.1215
Ciclohexano	21.50	0.1401
Dietilamina	19.199	0.1393
Etano	5.425	0.0642
Helio	0.033	0.0232
n-Heptano	30.93	0.2069
n-Hexano	24.858	0.1768
Hidrógeno	0.244	0.0266
Isobutano	12.733	0.113
Isopentano	18.345	0.1437
Metano	2.266	0.0428
Cloruro de metilo	7.488	0.06506
n-Pentano	19.055	0.1463
Propano	9.258	0.0903
Propileno	8.404	0.0832
Trióxido de azufre	8.209	0.0602

APENDICE V



Fuente: O.A. Hougen y K.M. Watson. **Chemical Process Principles Charts.** John Wiley. Nueva York, 1946.

APENDICE VI

Propiedades de algunos compuestos orgánicos

Sustancia	Fórmula	Punto normal de fusión °C	Punto normal de ebullición
Metano	CH_4	−182.48	−161.4
Etano	C_2H_6	−183.23	− 88.6
Propano	C_3H_8	−187.65	− 42.2
n-Butano	C_4H_{10}	−135.33	− 0.6
Isobutano	C_4H_{10}	−159.6	− 10
n-Pentano	C_5H_{12}	−129.72	36.3
n-Hexano	C_6H_{14}	− 95.32	69
n-Heptano	C_7H_{16}	− 90.6	98.4
Etileno	C_2H_4	−169.15	−103.9
Propileno	C_3H_6	−185.35	− 5
Acetileno	C_2H_2		− 84
Benceno	C_6H_6	5.53	80.1
Tolueno	C_7H_8	− 95	110.8
o-Xileno	C_8H_{10}	− 25.19	144
m-Xileno	C_8H_{10}	− 47.87	139.3
p-Xileno	C_8H_{10}	13.26	138.5
Ciclohexano	C_6H_{12}	6.67	80.74
Metanol	CH_4O	− 97.8	64.7
Etanol	C_2H_6O	−114.4	78.4
n-Propanol	C_3H_8O	−127	97.8
Isopropanol	C_3H_8O		82.5
n-Butanol	$C_4H_{10}O$	− 89.2	117
Isobutanol	$C_4H_{10}O$	−108	106.9
Etilen glicol	$C_2H_6O_2$		197.4
Glicerina	$C_3H_8O_2$	18	290
Fenol	C_6H_6O	40.9	181.4
Oxido de etileno	C_2H_4O	−111.3	
Formaldehido	CH_2O	− 92	− 21
Acetona	C_3H_6O	− 95.5	56.5
Acido fórmico	CH_2O_2	8.4	100.8
Acido acético	$C_2H_4O_2$	16.7	118.1
Eter dietílico	$C_4H_{10}O$	−116.3	34.6
Acido propiónico	$C_3H_6O_2$	− 22	141.1

APENDICE VII

Punto de fusión, calor latente de fusión, punto de ebullición y calor latente de vaporización de algunas sustancias

Sustancias	Punto de fusión °C	Calor latente de fusión cal/g	Punto de ebullición °C	Calor latente de vaporización cal/g
Mercurio	−38.87	2.8	357	69.7
Potasio	63.7	147	760	496
Plata	960.5	24.9	2 212	556
Sodio	97.8	27.05	883	1 005
Estaño	231.9	14.5	2 270	573
Zinc	419.5	24.4	906	419.5
Aluminio	660.2	96	2 450	3 050
Antimonio	530.5	38.3	1 440	383
Cadmio	321	13.2	765	286.4
Oro	1 063	14.96	2 966	415
Plomo	327.4	5.89	1 737	204.6
Agua	0	79.55	100	539.58
Amoniaco	−77.7	79.52	−33.4	328.29
Cromo	1 615	75.59	2 200	
Cobre	1 083	48.94	2 300	1 145.89
Hierro	1 535	63.75	3 000	1 515
Manganeso	1 260	62.8	1 900	1 004
Níquel	1 452	71.53	2 900	1 487
Molibdeno	2 620	69.41	3 700	1 334

APENDICE VIII

Presión de vapor del agua en mm de Hg

TEMPERATURA °C	PRESION EN mm de Hg
0	4.579
5	6.543
10	9.209
15	12.788
20	17.535
25	23.756
30	31.824
35	42.175
40	55.324
45	71.88
50	92.51
55	118.04
60	149.38
65	187.54
70	233.7
75	289.1
80	355.1
85	433.6
90	525.7
95	633.9
100	760.0

APENDICE IX

Capacidad calorífica a presión constante de algunos gases

$\tilde{C}p = a + bT + cT^2$ $\quad \frac{cal}{g\ mol\ °K}$

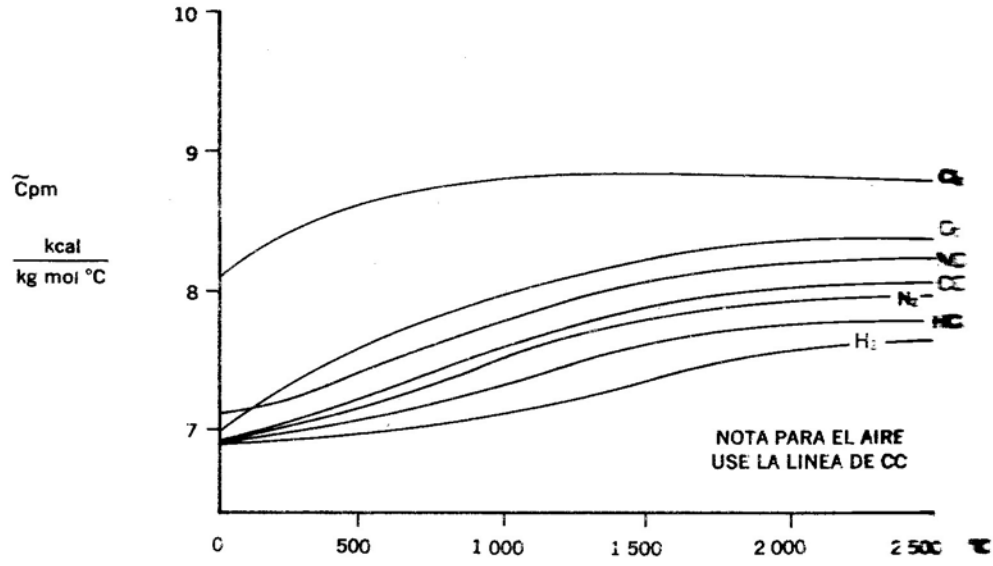
T en °K

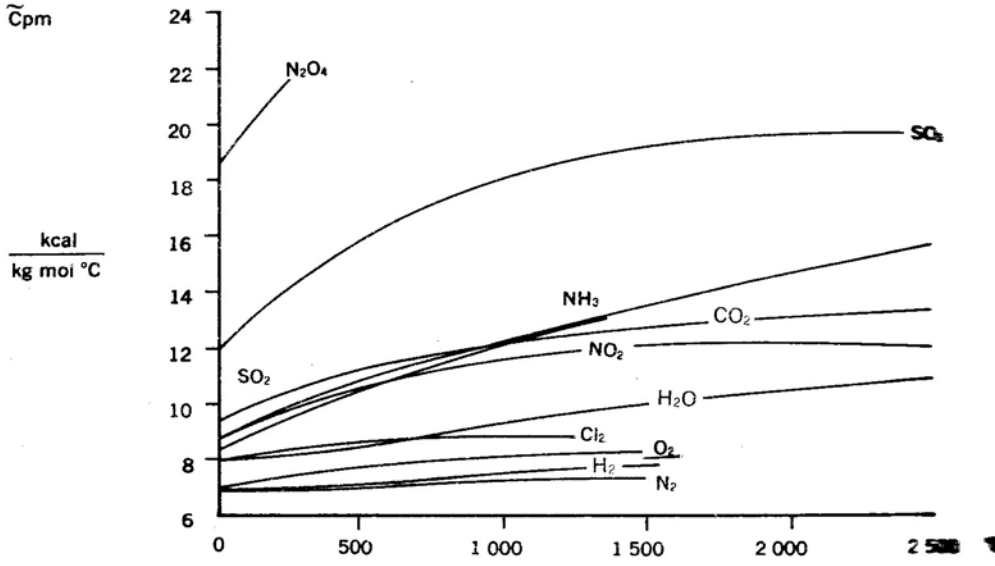
Gas	a	b (10^3)	c (10^6)
H_2	6.946	− 0.196	0.4757
NH_3	6.086	8.812	− 1.506
N_2	6.457	1.389	− 0.069
O_2	6.117	3.167	− 1.005
CO	6.35	1.811	− 0.2675
NO Oxido nítrico	6.44	2.069	− 0.4206
CO_2	6.339	10.14	− 3.415
SO_2	6.945	10.01	− 3.794
SO_3	7.454	19.13	− 6.628
HC_1	6.734	0.431	0.3613
C_2H_6	2.322	38.04	−10.97
CH_4	3.204	18.41	− 4.48
C_2H_4	3.019	28.21	− 8.537
Cl_2	7.653	1.762	− 0.2656
NH_3	5.92	8.963	− 1.764
C_2H_2	7.331	12.622	− 3.889
NH_3	6.086	8.812	− 1.506
C_6H_6	−0.409	77.612	−26.429
C_4H_{10}	3.844	73.350	−22.655
Cl_2	7.576	2.424	− 0.965
C_6H_{12} Ciclohexano	−7.701	125.675	−41.589
C_2H_5OH Alcohol etílico	6.99	39.741	−11.926
C_7H_{16} n-Heptano	7.094	123.447	−38.719
C_6H_{14} n-Hexano	6.011	106.746	−33.363
H_2S	6.662	5.134	− 0.854
CH_3OH Alcohol metílico	4.394	24.279	− 6.855
C_5H_{12} n-Pentano	4.895	90.113	−28.039
C_3H_8	2.410	57.195	−17.533
Tolueno C_7H_8	0.576	93.493	−31.227
H_2O	7.256	2.298	0.283
$C_5H_9CH_3$ Metil Ciclopentano	−3.261	112.590	−36.243
Br_2	8.92	0.12	− 3.00
CS_2	12.45	1.6	−18
HCN	9.41	1.7	−14.4
NO_2 Dióxido de Nitrógeno	10.07	2.28	−16.7
N_2O_4 Tetróxido de nitrógeno	20.05	9.5	−35.6

Fuente: L.B. Andersen y L.A. Wenzel, **Introduction to chemical Engineering,** McGraw-Hill, Kogakusha, Tokio, 1961.

APENDICE X

Calores específicos promedio de algunos gases en función de la temperatura

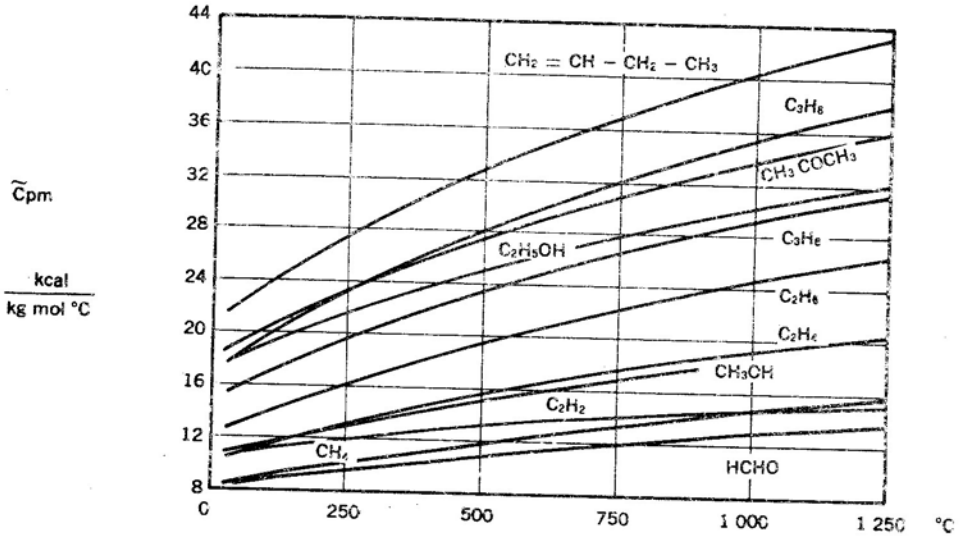


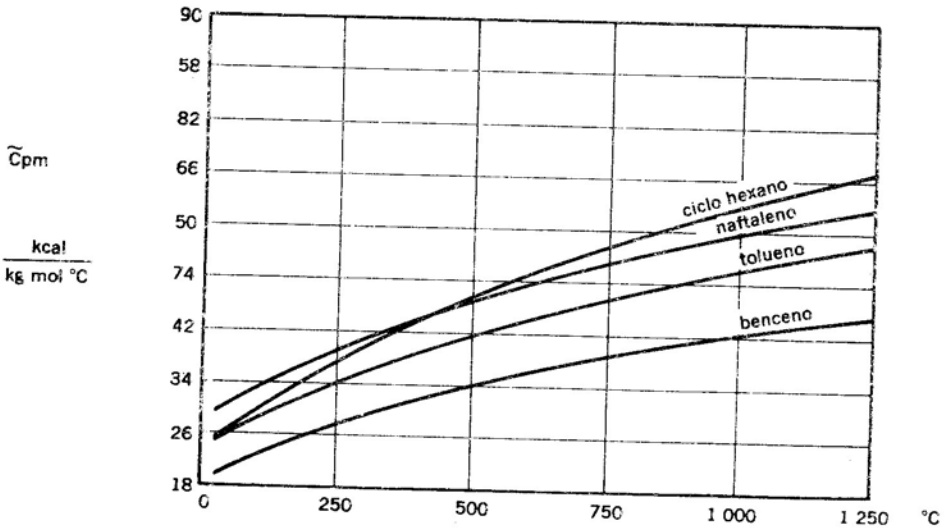


Fuente: O.A. Hougen, K.M. Watson and R.A. Ragatz, **Chemical Process Principles**. Part I. John Wiley and Sons, Inc. Nueva York, 1954.

APENDICE XI

Capacidad calorífica molar promedio a presión constante de algunos gases orgánicos

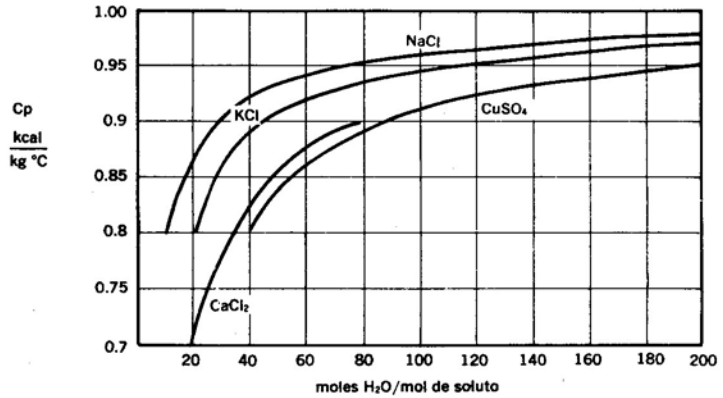


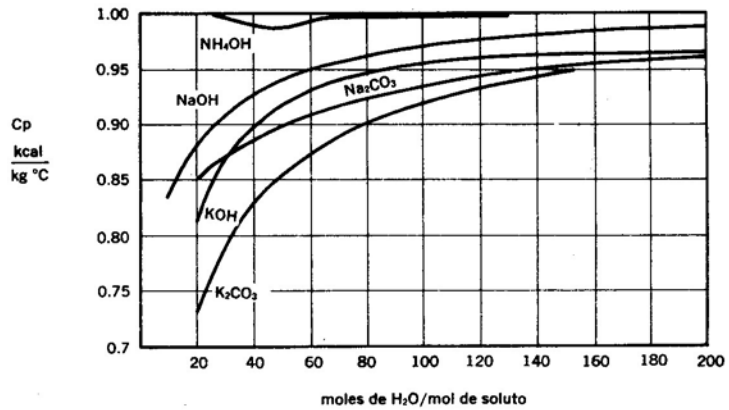


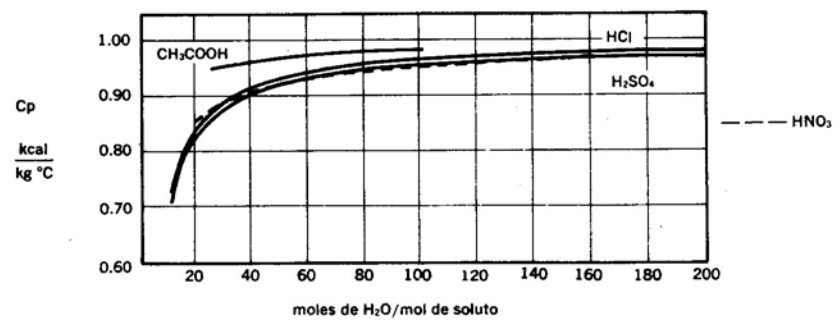
Fuente: O.A. Hougen, K.M. Watson and R.A. Ragatz, **Chemical Process Principles. Part I,** John Wiley and Sons, Inc. Nueva York, 1954.

APENDICE XII

Capacidades caloríficas de disoluciones acuosas a 20 °C







Fuente: O.A. Hougen, K.M. Watson and R.A. Ragatz, **Chemical Process Principles. Part I,** John Wiley and Sons, Inc. Nueva York, 1954.

APENDICE XIII

Capacidad calorífica de algunos compuestos y elementos sólidos

Compuestos y elementos sólidos	$\tilde{C}p$ cal/(mol °C)	Intervalo de temperatura °K
Aluminio	$4.8 + 0.00322\ T$	273 — 931
Cloruro de aluminio	$13.25 + 0.028\ T$	273 — 465
Oxido de aluminio	$22.08 + 0.8971\ T - 522\,500/T^2$	273 — 1 973
Cloruro de amonio	$9.8 + 0.0368\ T$	273 — 457
Nitrato de amonio	31.8	273 — 293
Calcio	$5.31 + 0.00333\ T$	273 — 673
Cloruro de calcio	$16.9 + 0.00386\ T$	273 — 1 055
Carbonato de calcio	$19.68 + 0.001189\ T - 307\,600/T^2$	273 — 1 173
Oxido de calcio	$10 + 0.00484\ T - 108\,000/T^2$	273 — 1 173
Sulfato de calcio	$18.52 + 0.02197\ T - 156\,800/T^2$	273 — 1 373
Carbón (grafito)	$2.673 + 0.002617\ T - 116\,900/T^2$	273 — 1 373
Hierro	$41.3 + 0.00638\ T$	273 — 1 041
Oxido ferroso	$12.62 + 0.001492\ T - 7\,200/T^2$	273 — 1 173
Oxido férrico	$24.72 + 0.01604\ T - 423\,400/T^2$	273 — 1 097
Oxido ferroso férrico	$41.17 + 0.01882\ T - 979\,500/T^2$	273 — 1 065
Sulfuro de hierro, piritas	$10.7 + 0.0133\ T$	273 — 773
Carbonato de magnesio	16.9	290
Cloruro de magnesio	$17.3 + 0.00377\ T$	273 — 991
Sulfato de magnesio	26.7	296 — 372
Cloruro de potasio	$10.93 + 0.00376\ T$	273 — 1043
Nitrato de potasio	28.8	401 — 611
Sulfato de potasio	33.1	287 — 371
Carbonato de sodio	28.9	288 — 371
Cloruro de sodio	$10.79 + 0.0042\ T$	273 — 1 073
Nitrato de sodio	$4.56 + 0.058\ T$	273 — 583
Sulfato de sodio	32.8	289 — 371
Azufre (rómbico)	$3.63 + 0.0064\ T$	273 — 368
Azufre (monoclínico)	$4.38 + 0.0044\ T$	368 — 392
Zinc	$5.25 + 0.0027\ T$	273 — 692
Cloruro de zinc	$15.9 + 0.008\ T$	273 — 638

Fuente: J.H. Perry, **Chemical Engineers' Handbook,** McGraw-Hill, Nueva York, 4a. ed., 1963.

APENDICE XIV

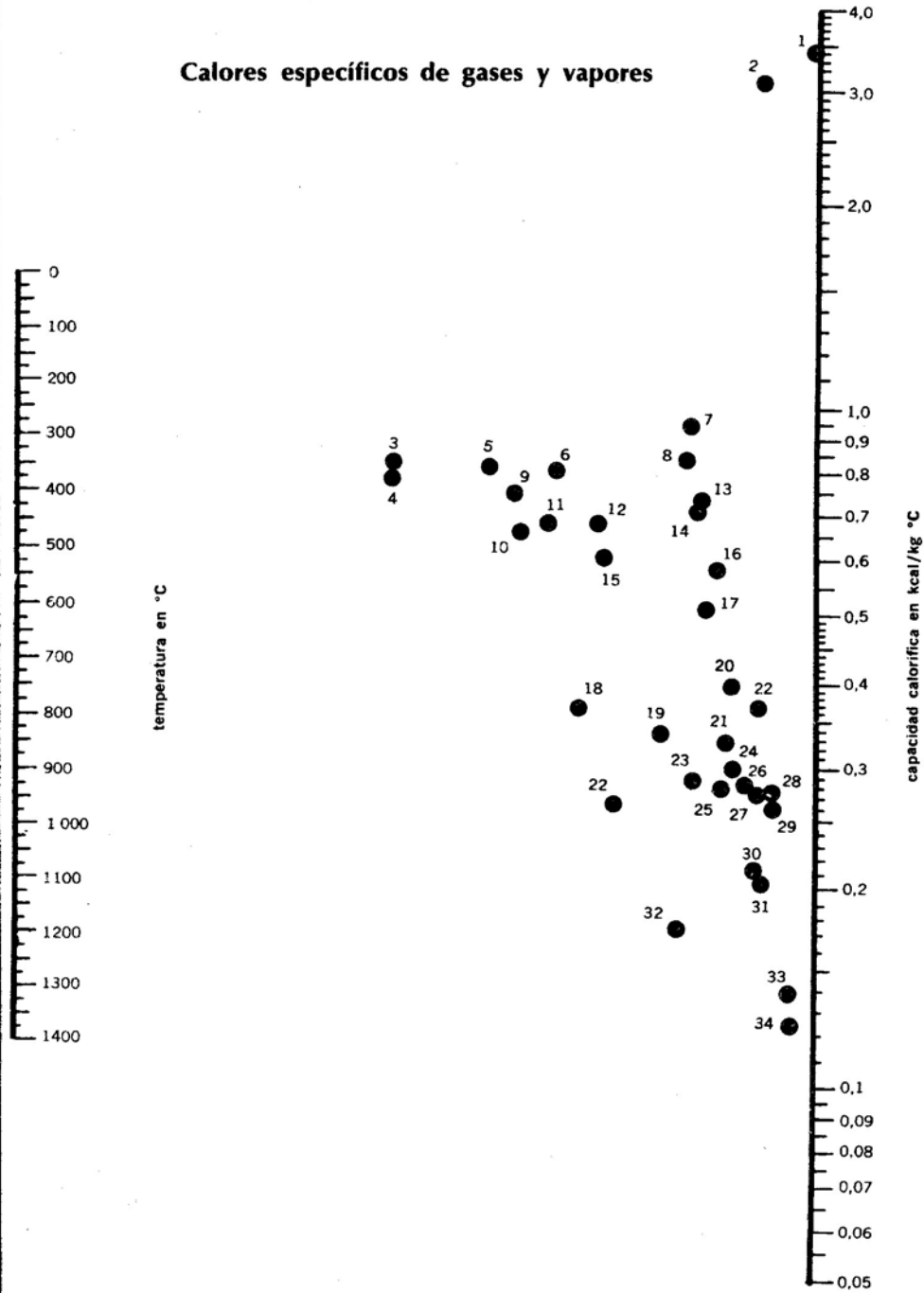
Calores específicos de gases y vapores

(El número corresponde al del punto en la gráfica de la página siguiente.)

Núm.	Gas o Vapor	Intervalo de temperatura, °C Mínima	Máxima
10	Acetileno	0	200
15	Acetileno	200	400
16	Acetileno	400	1 400
17	Agua	0	1 400
27	Aire	0	1 400
12	Amoníaco	0	600
14	Amoníaco	600	1 400
33	Azufre	300	1 400
32	Cloro	0	200
34	Cloro	200	1 400
30	Acido clorhídrico	0	1 400
22	Dióxido de azufre	0	400
31	Dióxido de azufre	400	1 400
18	Dióxido de carbono	0	400
24	Dióxido de carbono	400	1 400
3	Etano	0	200
9	Etano	200	600
8	Etano	600	1 400
4	Etileno	0	200
11	Etileno	200	600
13	Etileno	600	1 400
20	Acido fluorhídrico	0	1 400
1	Hidrógeno	0	600
2	Hidrógeno	600	1 400
5	Metano	0	300
6	Metano	300	700
7	Metano	700	1 400
26	Nitrógeno	0	1 400
26	Oxido de carbono	0	1 400
25	Oxido nítrico	0	700
28	Oxido nítrico	700	1 400
23	Oxígeno	0	500
29	Oxígeno	500	1 400
19	Acido sulfhídrico	0	700
21	Acido sulfhídrico	700	1 400

Fuente: J.H. Perry, **Chemical Engineers' Handbook**, McGraw-Hill, Nueva York, 3a. ed., 1950

Calores específicos de gases y vapores



APENDICE XV

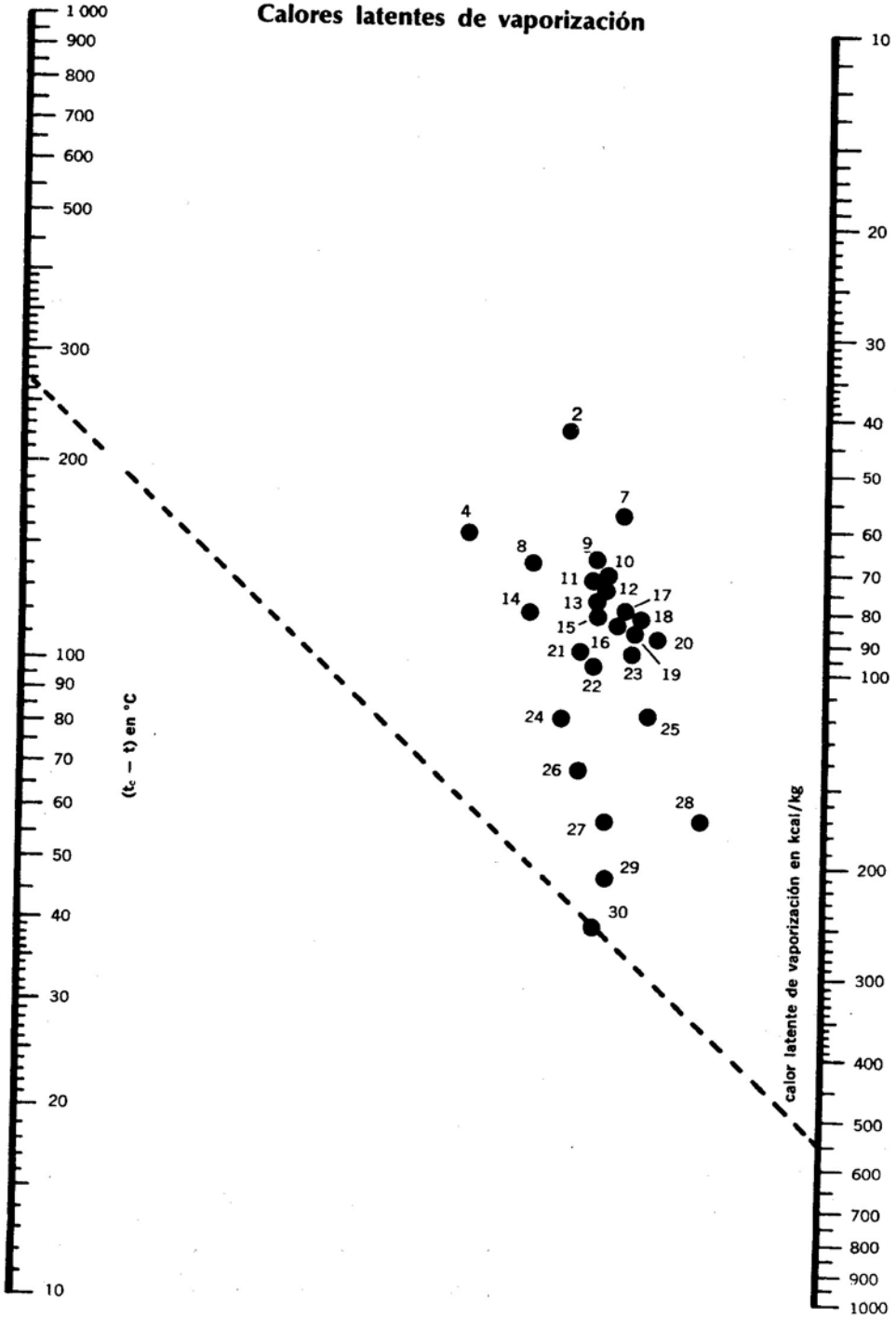
Calores latentes de vaporización

(Variación con la temperatura t, en función de la diferencia $t_c - t$ entre la temperatura crítica y aquélla. El número dado en la primera columna corresponde al punto de la sustancia en la gráfica de la página siguiente).

Núm.	Compuesto	Intervalo de validez ($t_c - t$) °C	t_c °C
22	Acetona	120-210	235
18	Acido acético	100-225	321
30	Agua	100-500	374
29	Amoníaco	50-200	133
13	Benceno	10-400	289
16	Butano	90-200	153
7	Cloroformo	140-275	263
17	Cloruro de etilo	100-250	187
20	Cloruro de metilo	70-250	143
8	Diclorometano	150-250	216
14	Dióxido de azufre	90-160	157
21	Dióxido de carbono	10-100	31
25	Etano	25-150	32
26	Etanol	20-140	243
28	Etanol	140-300	243
13	Eter etílico	10-400	194
10	Heptano	20-300	267
11	Hexano	50-225	235
15	Isobutano	80-200	134
25	Metanol	40-250	240
9	Octano	30-300	296
19	Oxido nitroso	25-150	36
12	Pentano	20-200	197
23	Propano	40-200	96
24	Propanol	20-200	264
4	Sulfuro de carbono	140-275	273
2	Tetracloruro de carbono	30-250	283

Fuente: J.H. Perry, **Chemical Engineers' Handbook,** McGraw-Hill, Nueva York, 3a. ed., 1950.

Calores latentes de vaporización



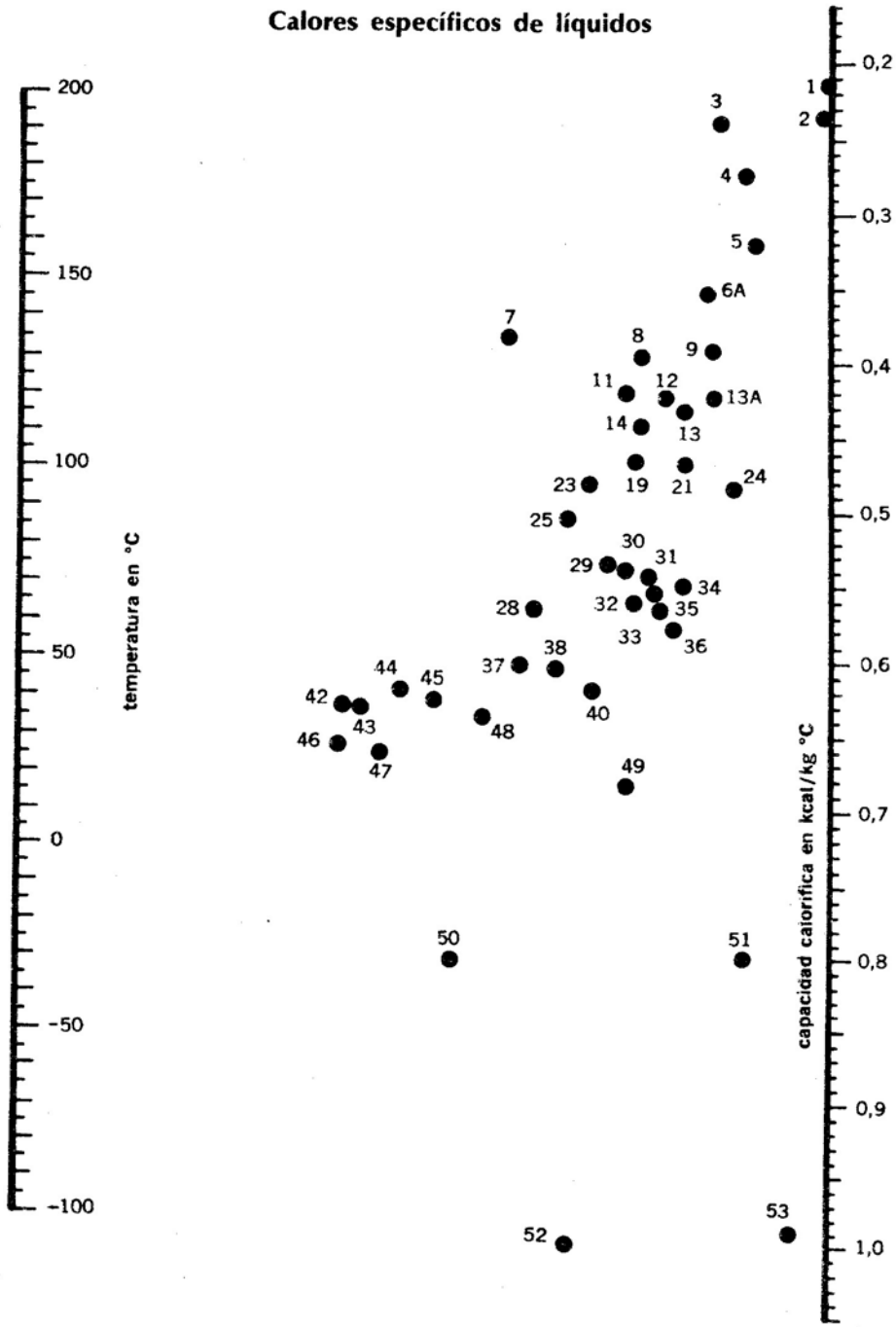
APENDICE XVI

Calores específicos de líquidos

(El número corresponde al del punto en la gráfica de la página siguiente).

Núm.	Líquido	Intervalo de temperatura, °C Mínima	Máxima
24	Acetato de etilo	— 50	25
32	Acetona	20	50
29	Acido acético	0	80
48	Acido clorhídrico, 30%	20	100
9	Acido sulfúrico, 98%	10	45
53	Agua	10	200
37	Alcohol amílico	— 50	25
52	Amoníaco	— 70	50
30	Anilina	0	130
23	Benceno	10	80
1	Bromuro de etilo	5	25
44	Butanol	0	100
8	Clorobenceno	0	100
4	Cloroformo	0	50
49	Cloruro de calcio, solución al 25%	— 40	20
13	Cloruro de etilo	— 30	40
13A	Cloruro de metilo	— 80	20
51	Cloruro de sodio, solución al 25%	— 40	20
21	Decano	— 80	25
6A	Dicloroetano	— 30	60
5	Diclorometano	— 40	50
11	Dióxido de azufre	— 20	100
42	Etanol, 100%	30	80
46	Etanol, 95%	20	80
50	Etanol, 50%	20	80
36	Eter etílico	—100	25
31	Eter isopropílico	— 80	20
25	Etilbenceno	0	100
38	Glicerina	— 40	20
28	Heptano	0	60
35	Hexano	— 80	20
7	Yoduro de etilo	0	100
43	Isobutanol	0	100
47	Isopropanol	— 20	50
40	Metanol	— 40	20
14	Naftaleno	90	200
12	Nitrobenceno	0	100
34	Nonano	— 50	25
33	Octano	— 50	25
45	Propanol	— 20	100
2	Sulfuro de carbono	—100	25
3	Tetracloruro de carbono	10	60
23	Tolueno	0	60
19	Xileno	0	100

Fuente: J.H. Perry, **Chemical Engineers' Handbook,** McGraw-Hill, Nueva York, 3a. ed., 1950.


Calores específicos de líquidos
temperatura en °C
200
150
100
50
0
-50
-100
capacidad calorífica en kcal/kg °C
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
1
2
3
4
5
6A
7
8
9
11
12
13A
14
13
23
19
21
24
25
30
29
31
34
28
32
35
33
36
37
38
44
45
42
43
40
46
48
47
49
50
51
52
53

APENDICE XVII

Entalpías del vapor de agua saturado

Temperatura de saturación °C t	Presión de saturación kg/cm² p	Entalpía kcal/kg	
		Del líquido H_L	Del vapor H_V
0	0.006228	0	597.2
10	0.012513	10.04	601.6
20	0.02383	20.03	606.0
30	0.04325	30.00	610.4
40	0.07520	39.98	614.7
50	0.12578	49.95	619.0
60	0.2031	59.94	623.2
70	0.3177	69.93	627.3
80	0.4829	79.95	631.3
90	0.7149	89.98	635.1
100	1.03323	100.04	638.9
110	1.4609	110.12	642.5
120	2.0245	120.3	646.0
130	2.7544	130.4	649.3
140	3.685	140.6	652.5
150	4.854	150.9	655.5
160	6.302	161.3	658.3
170	8.076	171.7	660.9
180	10.225	182.2	663.2
190	12.800	192.8	665.3
200	15.857	203.5	667.0
210	19.456	214.3	668.3
220	23.659	225.3	669.3
230	28.531	236.4	669.7
240	34.140	247.7	669.6
250	40.56	259.2	669.0
260	47.87	271.0	667.8
270	56.14	283.0	665.9
280	65.46	295.3	663.5
290	75.92	308.0	660.2
300	87.61	321.0	656.1
310	100.64	334.6	650.8
320	115.13	349.0	644.2
330	131.18	364.2	636.0
340	148.96	380.7	625.6
350	168.63	398.9	611.9
360	190.42	420.9	592.8
370	214.68	452.3	559.3
374.1	225.4	502	502

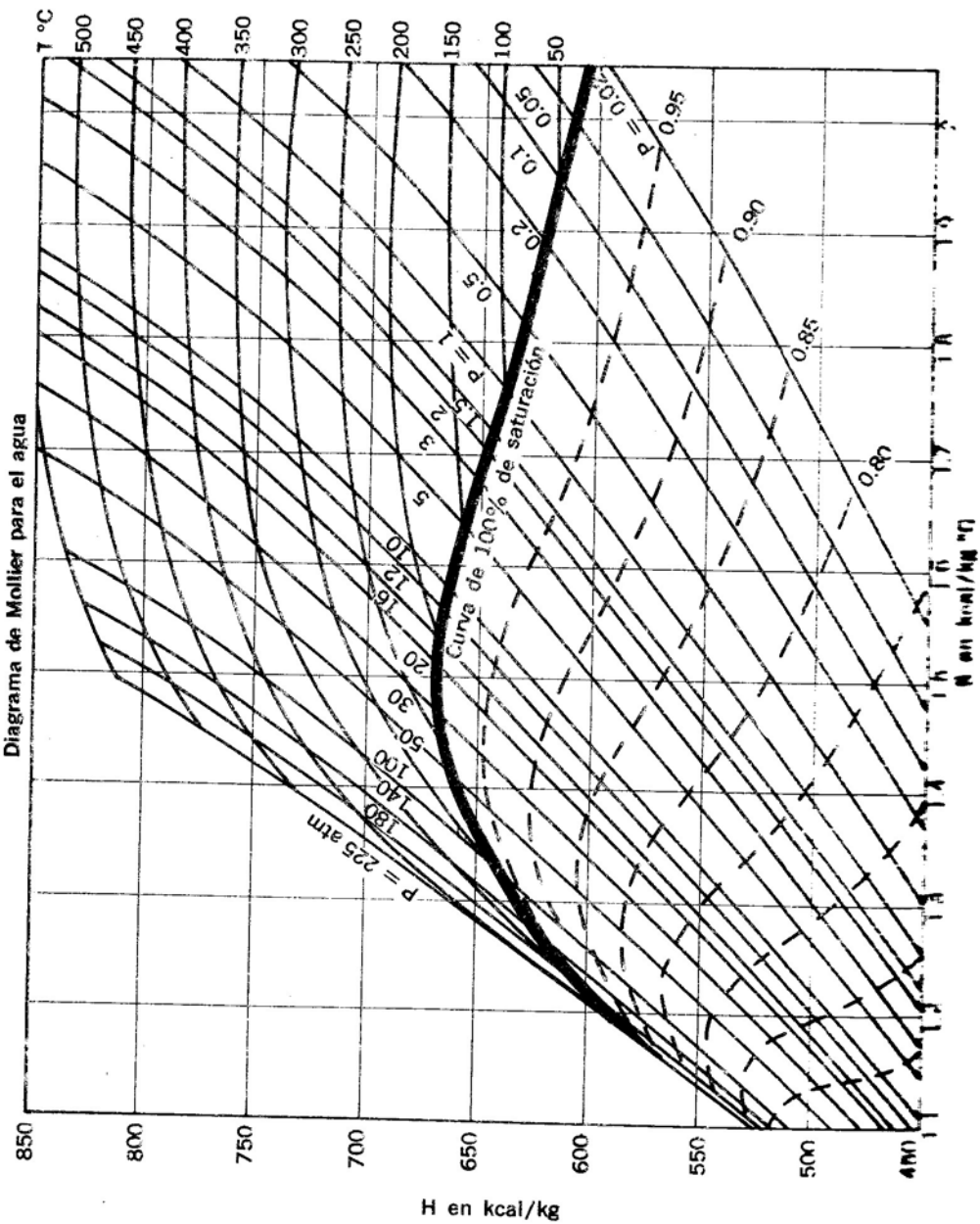
APENDICE XVIII

Entalpías del vapor sobrecalentado kcal/kg

P-atm	1	5	10	25	50	75	100	125	150	200	250	300
T °C												
0												
10												
20												
30												
40												
50												
60												
70												
80												
90												
100	639.1											
110	644.2											
120	649.1											
130	653.8											
140	658.5											
150	663.2											
160	667.9	661.3										
170	672.5	666.9										
180	677.2	672.2	663.6									
190	681.8	677.2	670.3									
200	686.5	682.2	676.1									
210	691.1	687.2	681.6									
220	695.8	692.1	687.2									
230	700.5	697.0	692.4	675.0								
240	705.2	791.9	697.6	682.2								
250	709.9	706.8	702.8	688.9								
260	714.6	711.6	707.9	695.2								
270	719.3	716.5	712.9	701.2	674.6							
280	724.0	721.4	717.9	707.1	683.6							
290	728.8	726.2	723.0	712.9	691.8	661.5						
300	733.5	731.1	728.1	718.6	699.5	673.1						
310	738.3	736.0	733.1	724.1	706.7	683.7	651.7					
320	743.1	740.9	738.2	729.6	713.6	693.1	666.0					
330	747.9	745.8	743.2	735.1	720.2	701.8	678.3	646.6				
340	752.7	750.7	748.2	740.6	726.6	710.0	689.2	662.9				
350	757.5	755.6	753.3	746.0	732.9	717.7	699.2	676.4	647.5			
360	762.3	760.5	758.3	751.4	739.1	725.1	708.4	688.4	663.9			
370	767.2	765.5	763.3	756.7	745.1	732.1	717.0	699.2	677.9	610.2		
380	772.1	770.4	768.4	762.1	751.1	738.9	725.2	709.2	690.4	640.2	468.5	440.2
390	777.0	775.4	773.4	767.4	757.0	745.6	733.0	718.5	701.7	660.7	584.6	470.2
400	781.9	780.4	778.4	772.7	762.8	752.1	740.4	727.2	712.2	676.6	622.4	524.5
410	786.8	785.4	783.5	778.0	768.6	758.6	747.6	735.5	721.9	690.2	647.5	582.2
420	791.8	790.4	788.6	783.3	774.3	764.9	754.6	743.4	731.0	702.4	666.7	616.8
430	796.7	795.4	793.7	788.7	780.0	771.0	761.4	751.0	739.6	713.6	682.2	641.5
440	801.7	800.5	798.8	794.0	785.7	777.1	768.1	758.4	747.9	724.0	695.6	660.8
450	806.7	805.5	804.0	799.3	791.4	783.2	774.7	765.5	755.8	733.7	707.8	677.4
460	811.8	810.6	809.1	806.4	797.0	789.2	781.1	772.5	763.4	743.0	719.2	692.2
470	816.8	815.7	814.3	809.9	802.7	795.2	787.5	779.3	770.8	751.9	730.1	705.7
480	821.9	820.8	819.4	815.3	808.3	801.1	793.8	786.1	778.0	760.5	740.5	718.1
490	827.0	826.0	824.6	820.6	813.9	807.0	800.0	792.7	785.1	768.7	750.2	729.5
500	832.1	831.1	829.8	826.0	819.5	812.9	806.2	799.2	792.0	776.6	759.9	740.2
510	873.3	836.3	835.1	831.4	825.1	818.8	812.4	805.7	298.8	784.2	768.3	750.3
520	842.5	841.6	840.3	836.8	830.7	824.7	818.5	812.1	805.5	791.6	776.5	759.8
530	847.7	846.8	845.6	842.2	836.3	830.5	824.5	818.5	812.1	798.8	784.4	768.9
540	852.9	852.1	850.9	847.6	841.9	836.3	830.6	824.8	818.6	805.8	792.1	777.6
550	858.1	857.3	856.1	852.9	847.6	842.1	836.6	830.9	825.0	812.8	799.7	786.0

Fuente: A. Vián y J. Ocón, **Elementos de ingeniería química,** Aguilar, Madrid, 1976.

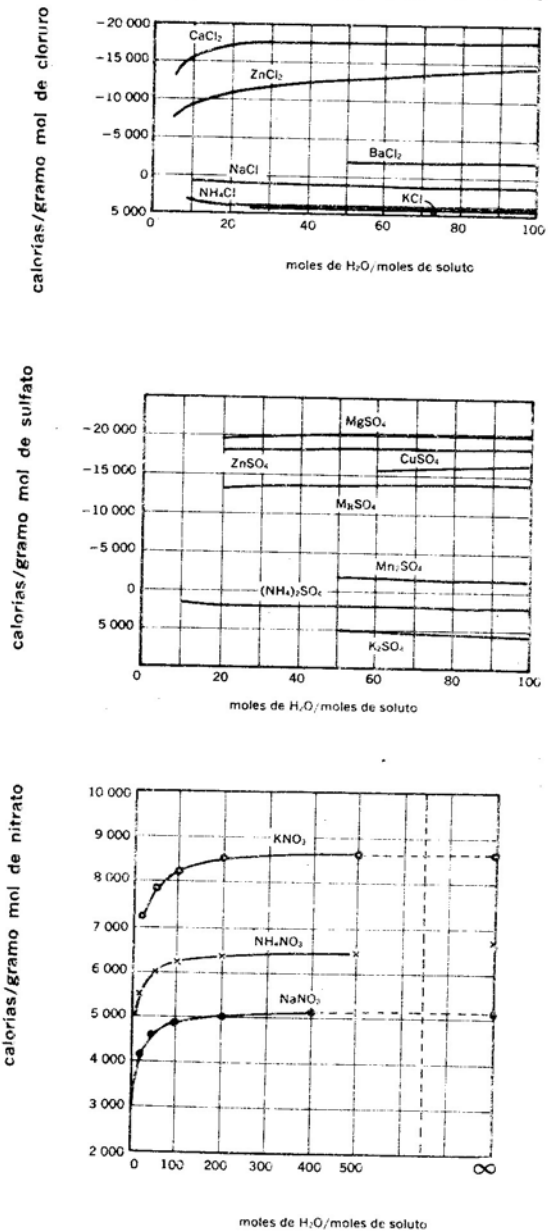
APENDICE XIX



Fuente: A. Vián y J. Ocón, **Elementos de ingeniería química**, Aguilar, Madrid 1974

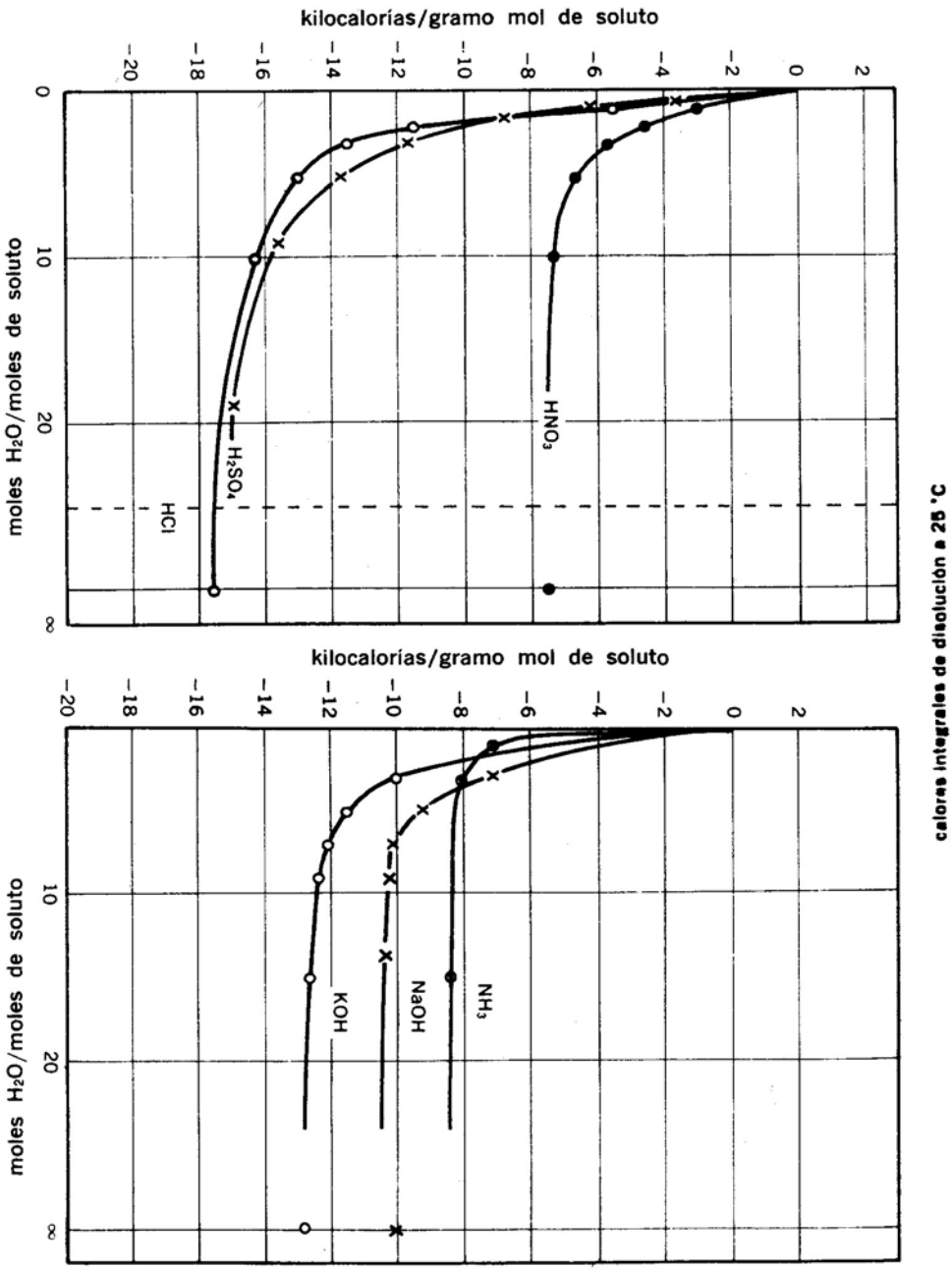
APENDICE XX

Calores integrales de disolución a 25 °C



Fuente: E.T. Williams y R.C. Johnson, **Stoichiometry for Chemical Engineers**, McGraw-Hill, Nueva York, 1958.

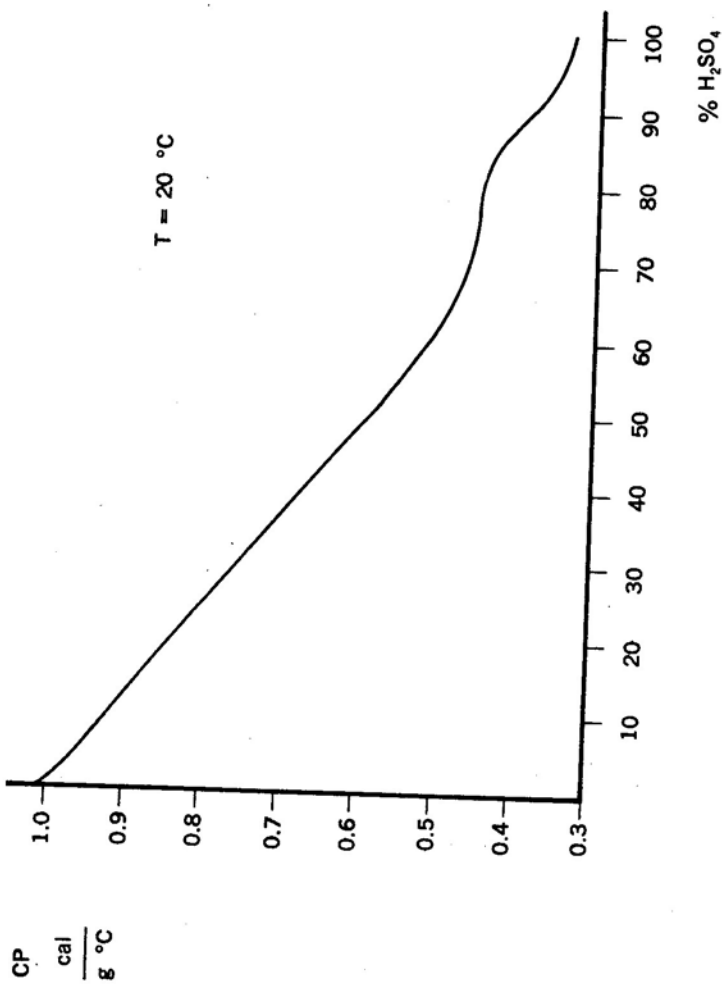
APENDICE XXI
Calores integrales de disolución a 25 °C



Fuente: E.T. Williams y R.C. Johnson, **Stoichiometry for Chemical Engineers,** McGraw-Hill, Nueva York, 1958.

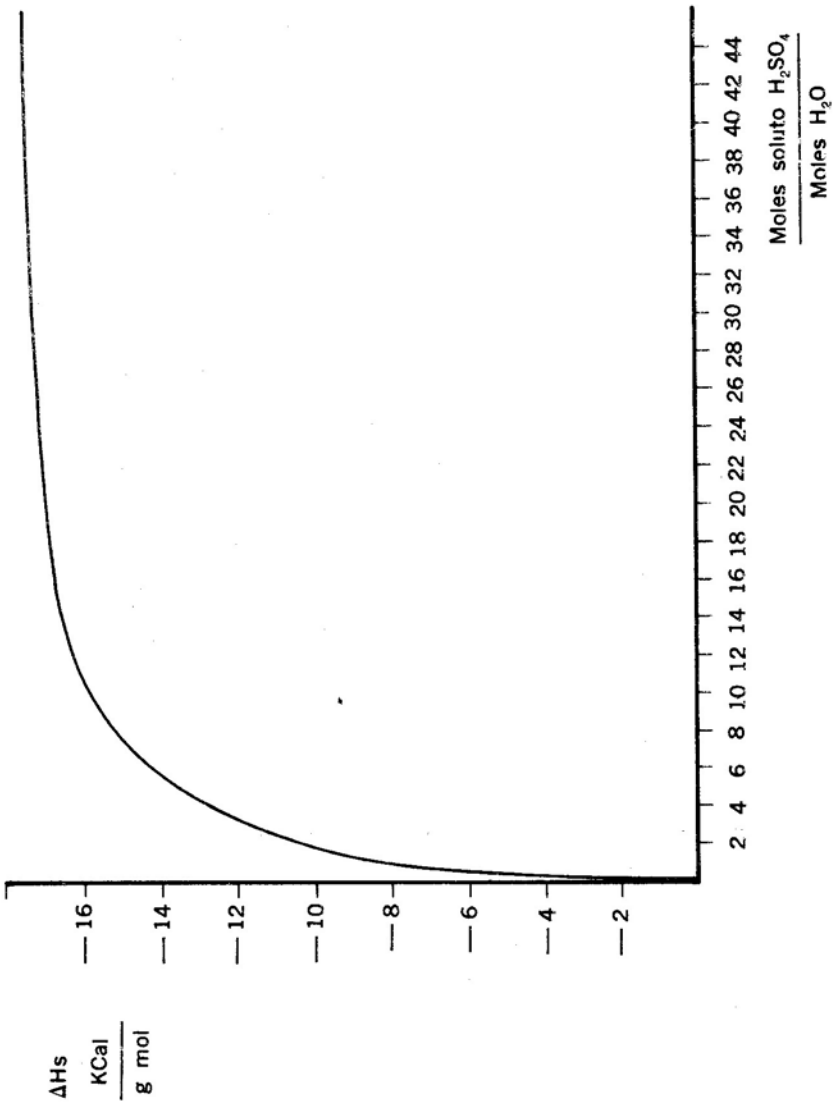
APENDICE XXII

Capacidad calorífica de las disoluciones de ácido sulfúrico



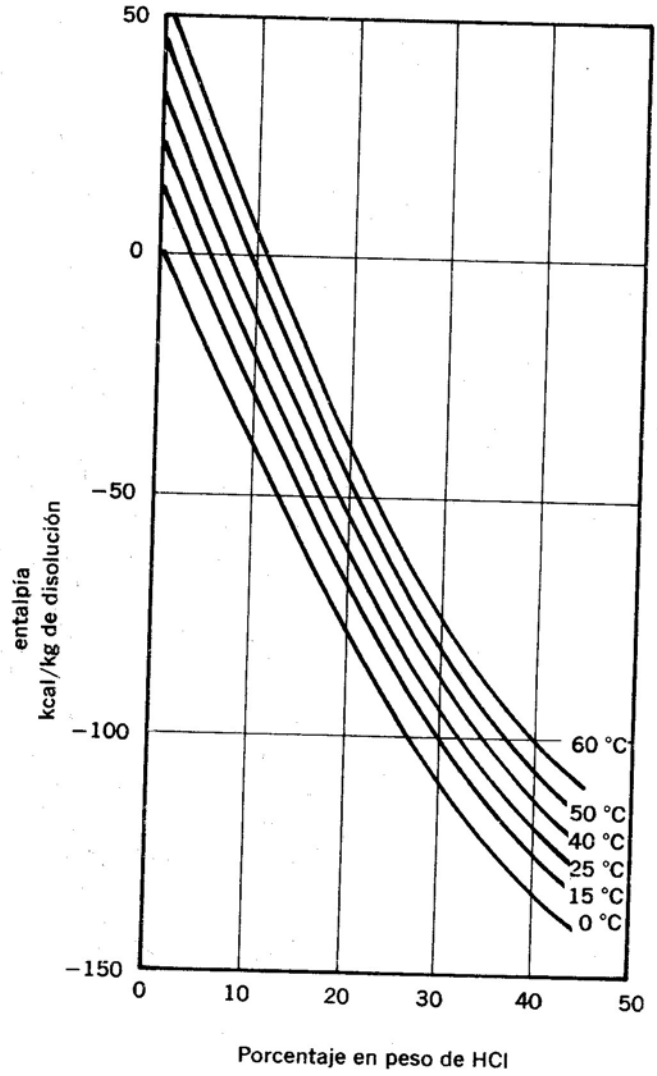
APENDICE XXIII

Calores de disolución del ácido sulfúrico



APENDICE XXIV

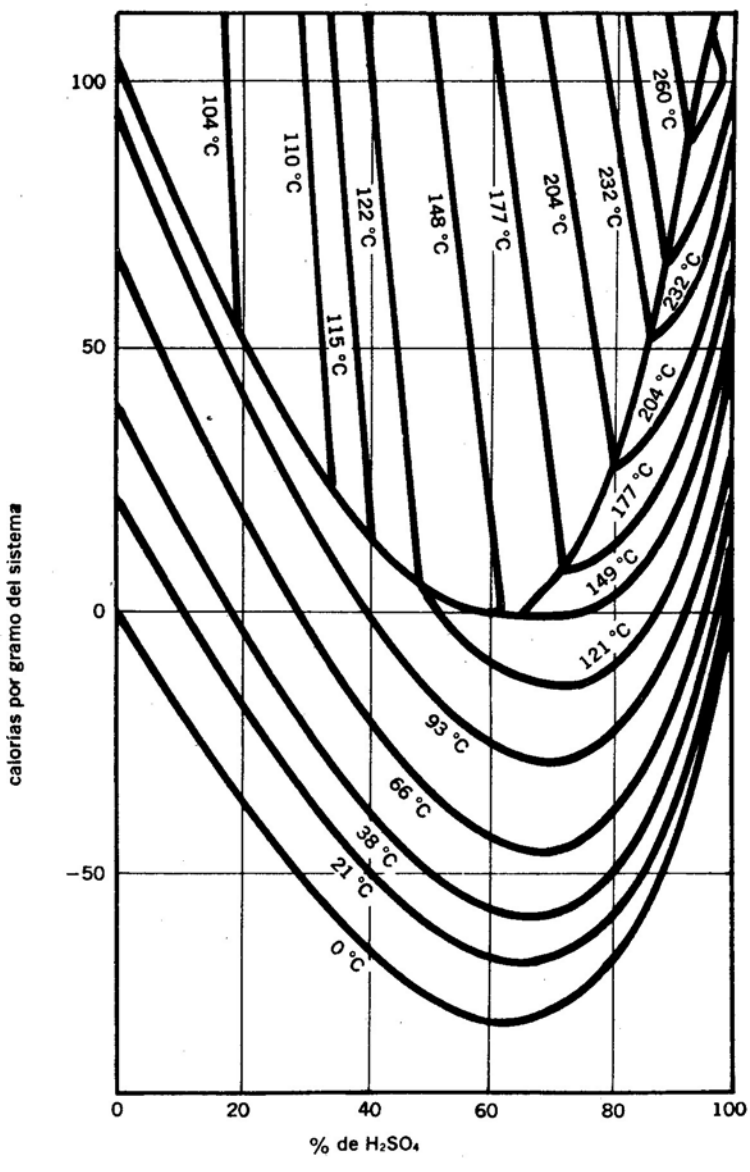
Diagrama entalpía-concentración para las disoluciones acuosas de ácido clorhídrico



Fuente: O.A. Hougen, K.M. Watson y R.A. Ragatz, **Chemical Process Principles. Part I,** John Wiley and Sons, Inc., Nueva York, 1954.

APENDICE XXV

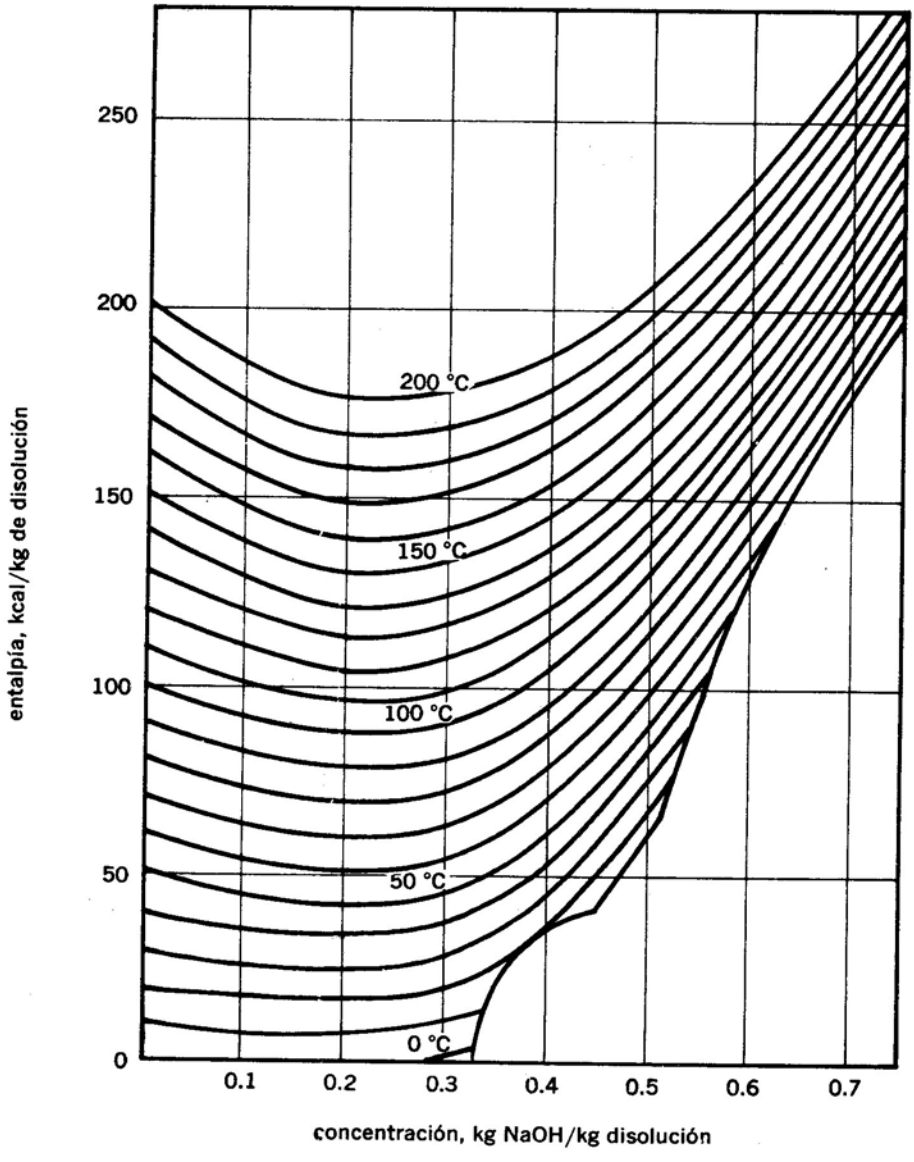
Diagrama entalpía-concentración para las disoluciones acuosas de ácido sulfúrico a una atmósfera



Fuente: O.A. Hougen, K.M. Watson y R.A. Ragatz, **Chemical Process Principles. Part I,** John Wiley and Sons, Inc., Nueva York, 1954.

APENDICE XXVI

Diagrama entalpía-concentración para las disoluciones de hidróxido sódico



Fuente: McCabe, **Trans. Am. Inst. Chem. Engrs.**, 31, 129 (1935).

APENDICE XXVII

Constantes de Antoine

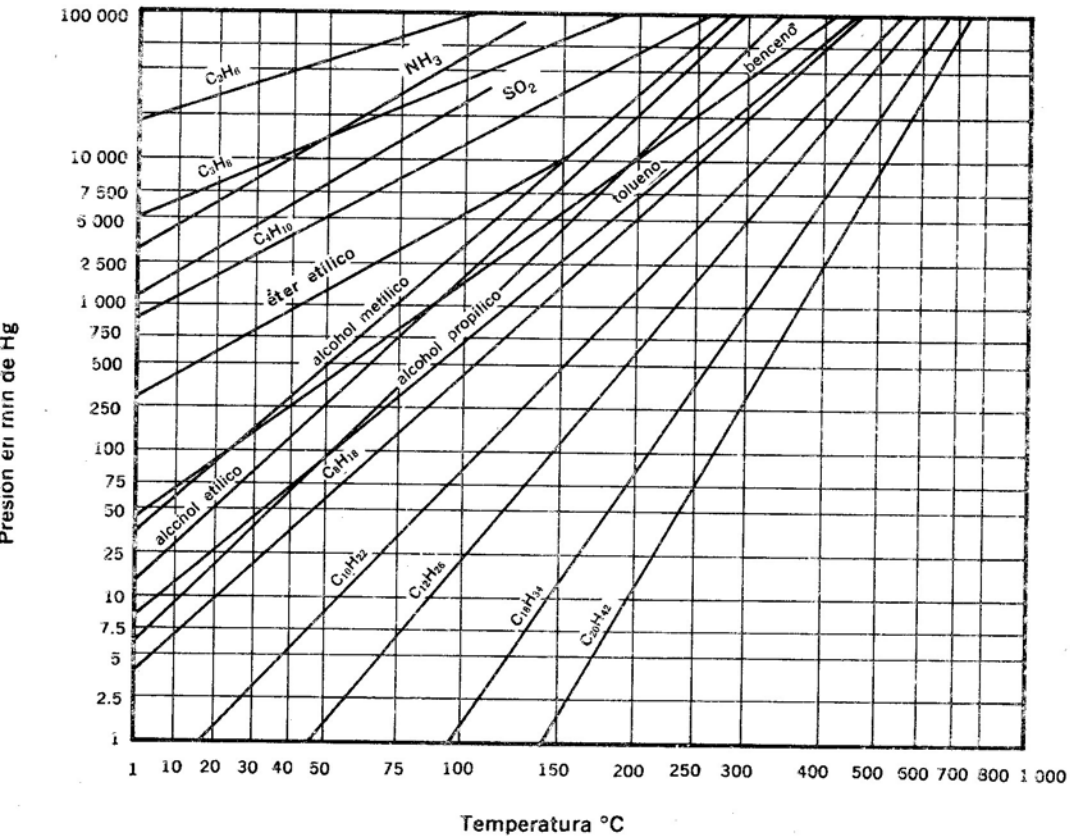
$$\text{Log } P^{o} = A - \frac{B}{t + C}$$

P = mm de Hg t = °C

	A	B	C
Acido acético	7.80307	1651.2	225
Metano	6.61184	399	266
Acetaldehido	6.81089	992.0	230
Etano	6.80266	656.4	250
Amoniaco	7.55466	1002.711	247.885
Propano	6.82973	813.2	248
Tetracloruro de carbono	6.9339	1242.43	230
Butano	6.83029	945.9	240
Clorobenceno	7.1069	1500	224
Pentano	6.85221	1064.63	232
Cloroformo	6.90328	1163.03	227.4
Hexano	6.87776	1171.53	224.366
Ciclohexano	6.84498	1203.526	222.864
Heptano	6.90246	1268.115	216.9
Acetato de etilo	7.09808	1238.71	217.0
Benceno	7.429	1628.32	279.56
Metil etilcetona	6.97421	1209.6	216
Tolueno	6.953	1343.94	219.38
Estireno	6.92409	1420	206
Etil ciclohexano	6.80266	656.4	256
Disulfuro de carbono	6.85145	1122.5	236.46
Acetona	7.02447	1161	224
Dióxido de azufre	7.32776	1022.8	240
Alcohol etílico	8.04494	1554.3	222.65
Alcohol metílico	7.87863	1473.11	230
Agua	8.10765	1750.286	235 de 0° a 60 °C
Agua	7.96681	1668.21	228 de 60 a 150 °C

APENDICE XXVIII

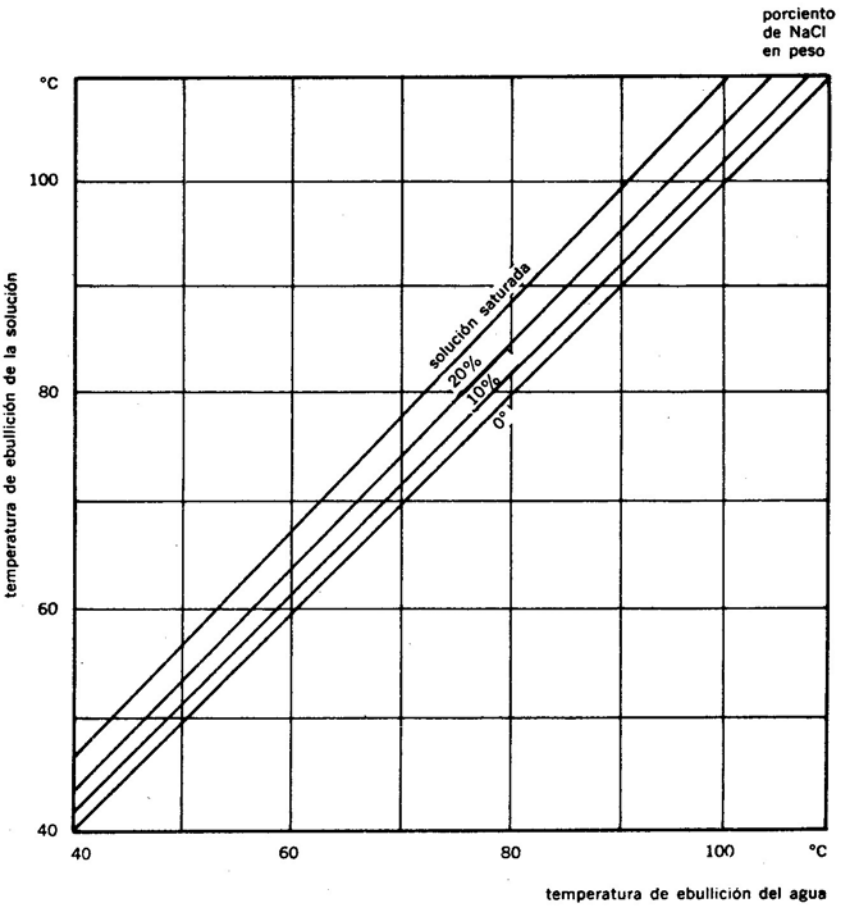
Diagrama de presión de vapor de Cox



Fuente: Hougen, Watson y Ragatz. **Chemical Process Principles.** John Wiley & Sons, Nueva York, 1954.

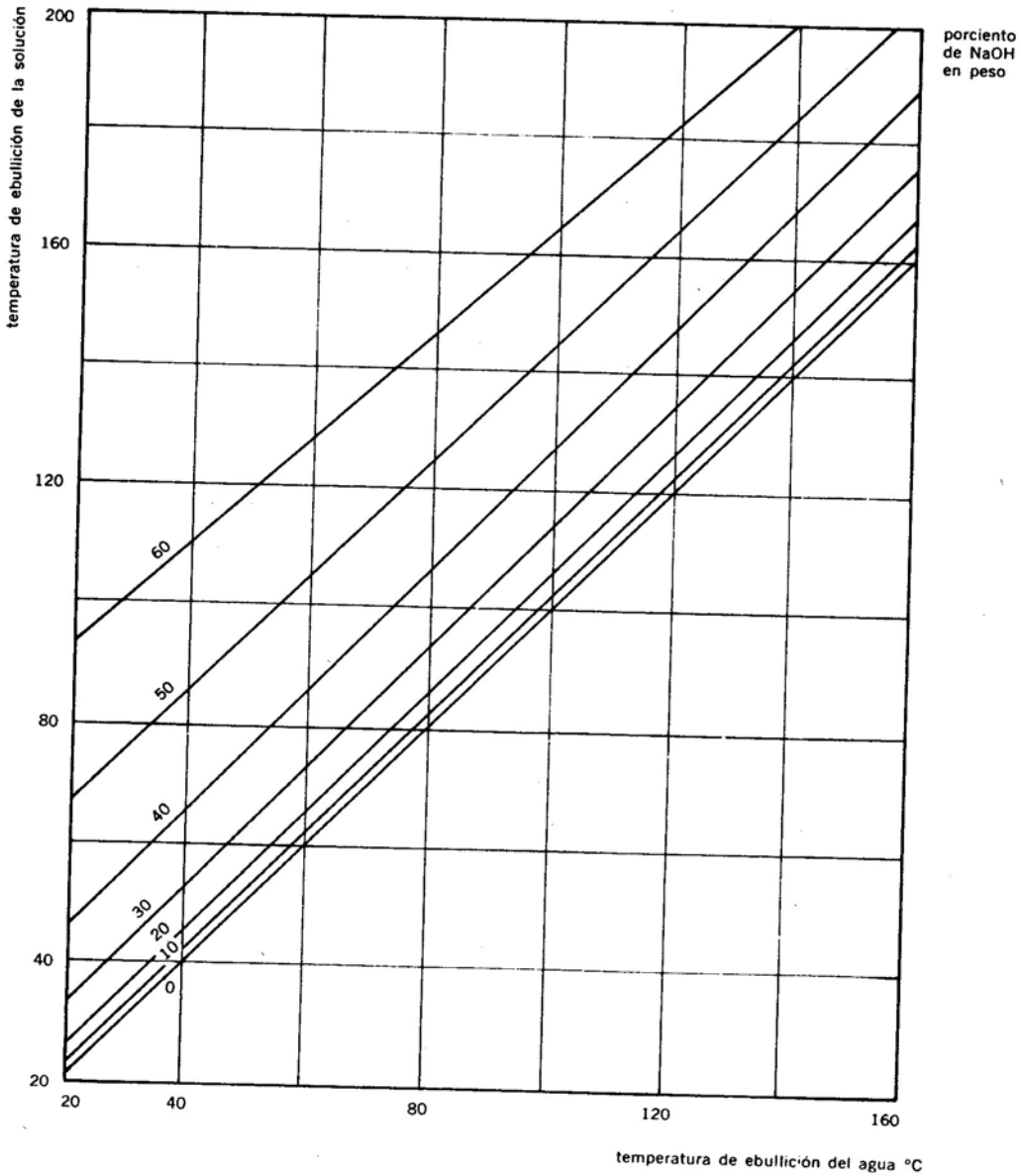
APENDICE XXIX

Diagrama de Dühring para las disoluciones de NaCl



APENDICE XXX

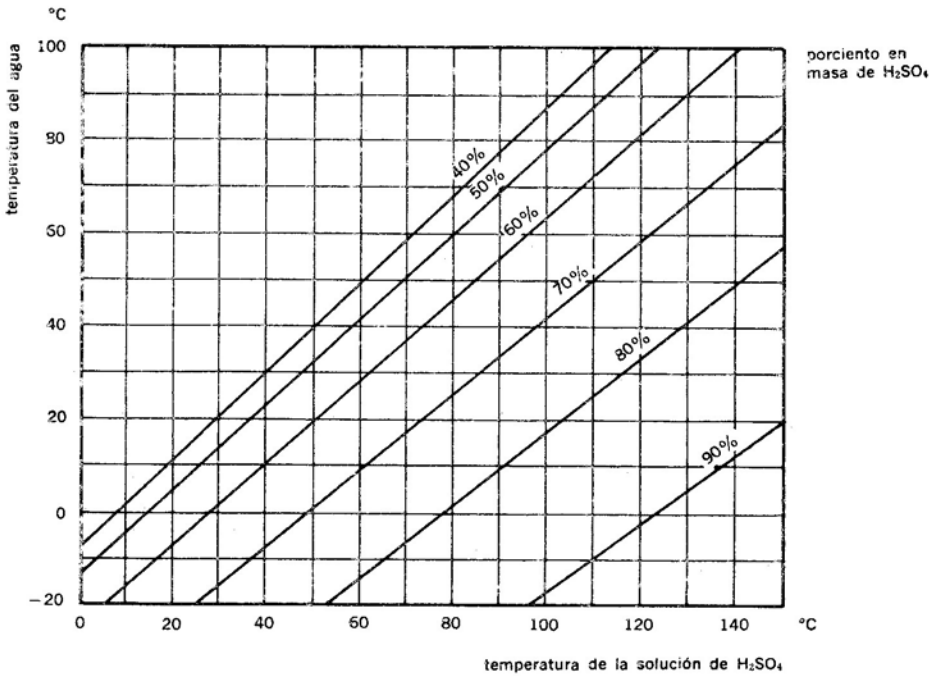
Diagrama de Dühring para las disoluciones de NaOH



Fuente: Hougen, Watson y Ragatz. **Chemical Process Principles.** Part. I. John Wiley. Nueva York, 1954.

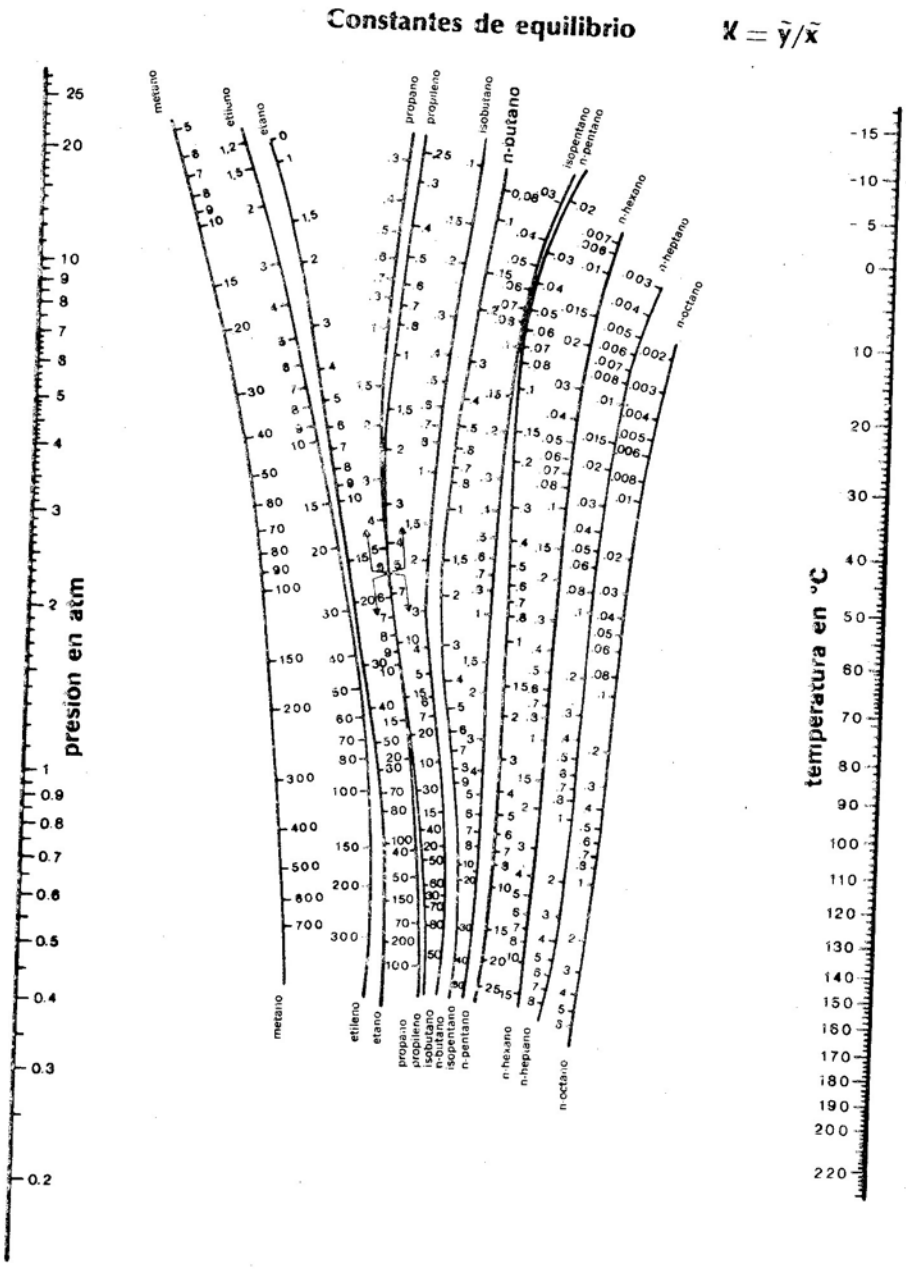
APENDICE XXXI

Diagrama de Dühring para las disoluciones de H_2SO_4



Fuente: Henley & Bieber. **Chemical Engineering Calculations.** McGraw-Hill. Nueva York 1959.

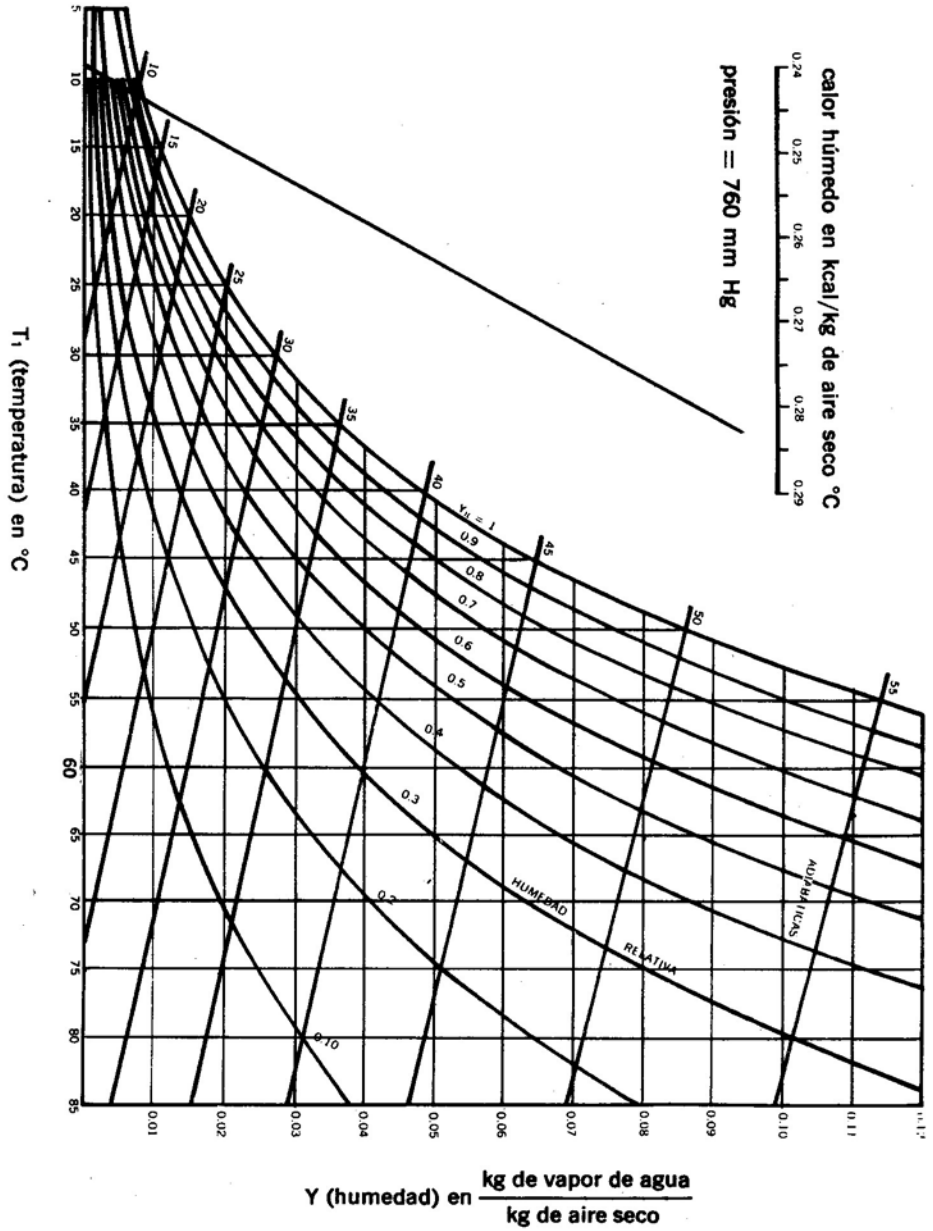
APENDICE XXXII



Fuente: Scheibel y Jenny, **Ind. Eng. Chem.**, 37, 81 (1945).

APENDICE XXXIII

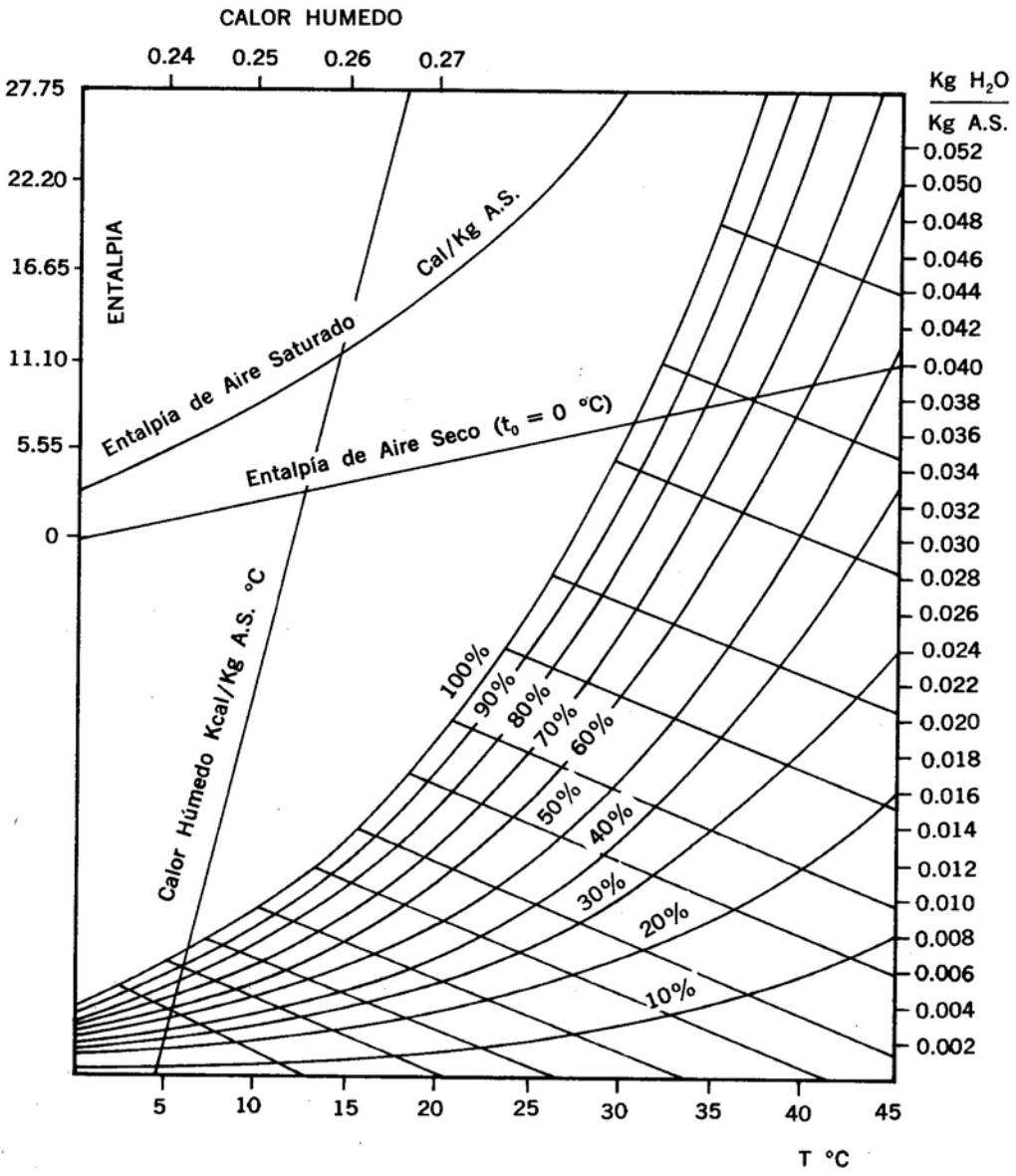
Diagrama psicrométrico



Fuente: J. Ocón y G. Tojo, **Problemas de ingeniería química. Tomo I**, Aguilar, Madrid, 1967.

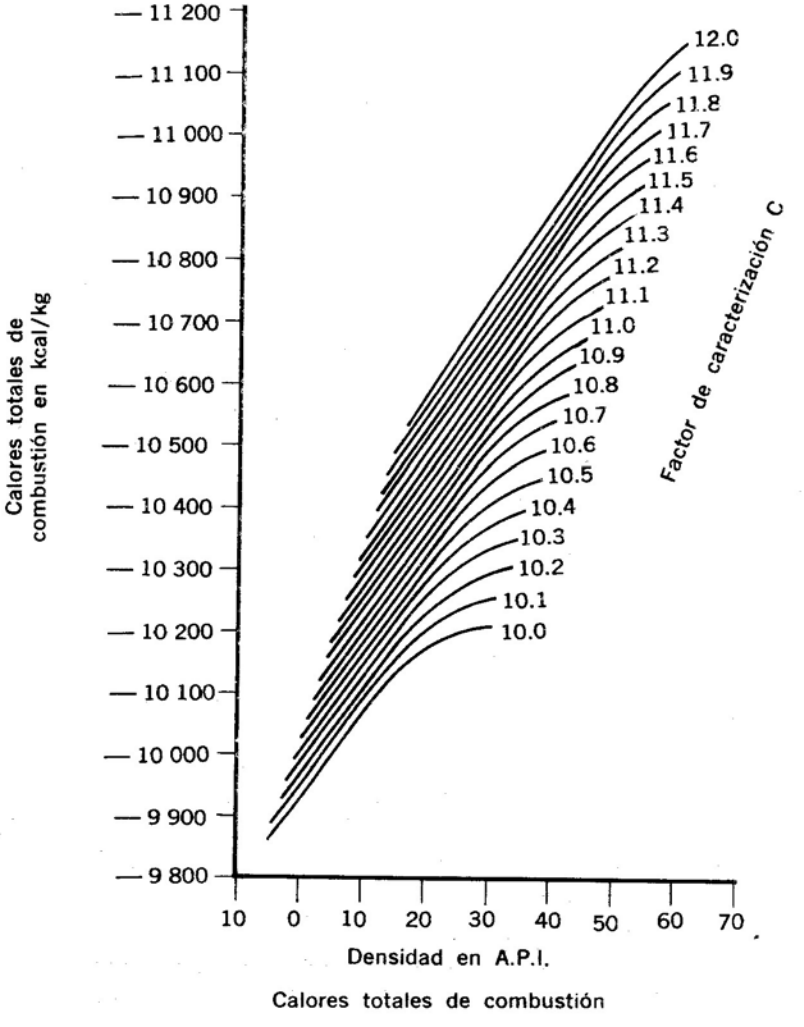
APENDICE XXXIV

Carta psicrométrica a 586 mm Hg



Fuente: A. González, **Prácticas de Balance de Materia y Energía,** Fac. de Química, UNAM, México, 1989.

APENDICE XXXV



Fuente: Hougen et al., **Chemical Process Principles,** Wiley, New York, 1959.

APENDICE XXXVI

Entalpías de formación de algunos compuestos a 25 °C

Compuesto	$\Delta\tilde{H}^{\circ}_{F}$ kcal/gmol
$AlCl_3$ (s)	−163.8
$Al(OH)_3$ (s)	−304.8
$Al_2(SO_4)_3$ (s)	−820.99
S (s) rómbico	0
S (s) monoclínico	−0.071
SO_2 (g)	−70.94
SO_3 (g)	−94.39
$BaCl_2$ (s)	−205.25
$Ba(OH)_2$ (s)	−225.9
Ba S (s)	−111.2
Ba SO_4 (s)	−340.2
$CaCl_2$ (s)	−190.6
$CaCO_3$ (s)	−289.5
CaO (s)	−151.7
$Ca(OH)_2$	−235.58
C (s) grafito	0
C (s) diamante	0.453
C (s) amorfo, coque	2.6
CO (g)	−26.416
CO_2 (g)	−94.052
$ZnCl_2$ (s)	−99.9
$ZnSO_4$ (s)	−233.4
CuS (s)	−11.6
Cu_2S (s)	−18.97
$CuSO_4$ (s)	−184.7
H_2SO_4 (l)	−193.91
HBr (g)	−8.66
HCl (g)	−22.063
HF (g)	−64.2
H_2O (g)	−57.7979
H_2O (l)	−68.3174
$BaCO_3$ (s)	−291.3
H_3BO_3	−260.2
Al_2O_3	−399.09
CaF_2	−290.3
$CaSO_4$	−342.42

Compuesto	$\Delta\tilde{H}^{0}_{F}$ kcal/gmol
$Fe(OH)_2$	−135.8
H_2S (g)	−4.815
HNO_3 (l)	−41.404
Fe_2O_3 (s)	−196.5
FeS_2 (s)	−42.52
$Fe_2(SO_4)_3$ (s)	−653.1
$MgCl_2$ (s)	−189.76
$MnCl_2$ (s)	−112
MnO (s)	−92.04
MnO_2 (s)	−124.55
NH_3 (g)	−10.96
NH_4Cl (s)	−75.23
NH_4OH (aq)	−87.59
NO (g)	21.6
NO_2 (g)	7.96
N_2O_5 (s)	−10
AuCl (s)	−8.3
AgCl (s)	−30.11
$AgNO_3$ (s)	−29.4
KCl (s)	−104.348
$KClO_4$ (s)	−103.8
KI (s)	−78.88
$KMnO_4$ (s)	−192.9
KOH (s)	−102.02
SiO_2 (s)	−203.35
NaBr (s)	−86.72
NaCl (s)	−98.321
NaF (s)	−135.94
$NaNO_3$ (s)	−111.71
NaOH (s)	−101.96
Na_3PO_4 (s)	−457.0
Fe_3O_4	−267
$Mg(OH)_2$	−221.00
MgO	−143.84
$CrCl_3$	−134.6
$CuCO_3$	−142.2
CuS	−11.6
$PbCO_3$	−167.3
PbO	−52.07
$PbSO_4$	−219.5

Compuesto	ΔH_F^0 kcal/gmol
$MnSO_4$	−254.24
$CaSO_4$ (s)	−342.42
CaC_2 (s)	−15.0
$MgCl_2$ (s)	−153.2
HI (g)	6.2
NH_4NO_3 (s)	−87.27
$(NH_4)_2SO_4$ (s)	−281.86
Na_2SO_3 (s)	−260.6
O_3 (g)	34.1
CCl_4 (g)	−24.00
CHN (g)	31.2
CH_4 (g)	−17.89
CH_3OH (l)	−48.08
C_2H_6 (g)	−20.24
CH_3CH_2OH (l)	−56.12
CF_4 (g)	−223.0
CCl_2O (g)	−52.8
H_4N_2 (g)	22.75
D_2O (g)	−59.57
C_3H_6 (g)	4.88
C_3H_8	−24.82
C_4H_{10} (g)	−30.15
HgO (s)	−21.68
$HgSO_4$ (s)	−168.3
MoO_2 (s)	−130
MOS_2 (s)	−55.5
$Ni(OH)_2$ (s)	−128.6
$NiSO_4$ (s)	−213.0
HPO_3 (s)	−228.2
H_3PO_4 (s)	−306.2
P_2O_5 (s)	−360.0
K_2CO_3 (s)	−273.93
KCN (s)	−26.9
$K_2Cr_2O_7$ (s)	−485.9
KNO_3 (s)	−117.76
K_2SO_4 (s)	−342.66
Na_2CO_3 (s)	−270.3
$NaHCO_3$ (s)	−85.73
NaCN (s)	−21.46
Na_2SiO_3	−360

Compuesto	ΔH_F^0 kcal/gmol
$ZnCO_3$ (s)	−194.2
Zn SO_4 (s)	−233.88
Zn $(OM)_2$ (s)	−153.5
Na_2S (s)	−89.2
$Ca_3(PO_4)_2$	−986.2
CaF_2	−290.3

Fuente: O.A. Hougen, K.M. Watson and R.A. Ragatz. **Chemical Process Principles. Part I.** John Wiley and Sons, Inc. Nueva York, 1954.

APENDICE XXXVII

Calores de combustión

Compuesto	Fórmula	Calor de combustión ΔM °C kcal/gmol
Ciclohexano	C_6H_{12} (g)	944.79
Fenol	C_6H_5OH (l)	731.46
Nitrobenceno	$C_6H_5NO_2$ (l)	739.00
Naftaleno	$C_{10}H_8$ (s)	1 231.6
Alcohol isopropílico	$CH_3CHOHCH_3$ (l)	481.11
Etilen glicol	CH_2OHCH_2OH (l)	284.48
Eter etílico	$C_2H_5OC_2H_5$ (l)	326.7
Amoniaco	NH_3 (g)	91.44
Buteno	C_4H_8 (g)	649.757
Ciclopentano	C_5H_{10} (l)	867.54
Cloroetano	C_2H_5Cl (g)	339.66
Cloruro de etileno	C_2H_3Cl (g)	303.90
Etileno	C_2H_4 (g)	337.230
Metano	CH_4 (g)	212.798
Etano	C_2H_5 (g)	372.82
Propano	C_3H_8 (g)	530.605
n-Butano	C_4H_{10} (g)	687.982
iso-Butano	C_4H_{10} (g)	686.342
n-Pentano	C_5H_{12} (g)	845.16
n-Hexano	C_6H_{14} (g)	1 002.57
n-Heptano	C_2H_{16} (g)	1 160.01
n-Octano	C_8H_{18}	1 317.45
Benceno	C_6H_8 (g)	789.08
Tolueno	C_2H_8 (l)	934.5
Acetileno	C_2H_2 (g)	310.615
Alcohol etílico	C_2H_5OH (l)	326.7
Alcohol metílico	CH_4O (l)	173.65
Acido acético	$C_2H_4O_2$ (l)	208.34
Formaldehido	CH_2O (g)	134.67
Acetona	C_3H_6O (l)	427.79
Acetaldehido	C_2H_4O (g)	284.98
Sacarosa	$C_{12}H_{22}O_{11}$ (s)	1 348.9
Acetato de etilo	$C_4H_8O_2$ (l)	538.9
Urea	NH_2CONH_2 (s)	151.05
o-Xileno	$C_6H_4CCH_3)_2$ (l)	1 088.16
Tetra cloruro de carbono	CCl_4	92.01
Anilina	$C_6H_3NH_2$	812.00
Estireno	$C_6H_5CHCH_2$ (g)	1 060.40
Carbón	C (s)	94.0518
Monóxido de carbono	CO (g)	67.6361
Hidrógeno	H_2 (g)	68.3174
Alcohol alílico	C_3H_6O (l)	442.3
Glicerina	$C_3H_8O_3$ (l)	396.27
Alcohol butílico	$C_4H_{10}O$ (l)	638.18
Alcohol amílico	$C_5H_{12}O$ (l)	786.7
Acido oxálico	$C_2H_2O_4$ (s)	58.82
Anhidrido acético	$C_4H_6O_3$ (l)	426.00
Acido propiónico	$C_3H_6O_2$ (l)	365.41
Acido láctico	$C_3H_6O_3$ (s)	325.8
Acido benzoico	$C_7H_6O_3$ (s)	771.5
Acido cítrico	$C_6H_8O_7$ (s)	474.3
Acido butírico	$C_4H_8O_2$ (l)	520
Acido palmítico	$C_{16}H_{32}O_2$ (s)	2 379

Compuesto	Fórmula	Calor de combustión ΔM °C kcal/gmol
Acido esteárico	$C_{18}H_{36}O_2$ (s)	2 697
Acido aléico	$C_{18}H_{34}O_2$ (l)	2 668
Dextrosa	$C_6H_{12}O_6$ (s)	673
Fructosa	$C_6H_{12}O_6$ (s)	675
Lactosa	$C_{12}H_{22}O_{11}$ (s)	1 350.1
Sucrosa	$C_{12}H_{22}O_{11}$ (s)	1 348.9
Acetato de etilo	$C_4H_8O_2$ (l)	538.76
Acetato de metilo	$C_3H_6O_2$ (g)	397.5
Cloroformo	$CHCl_3$ (l)	114.3
Disulfuro de carbono	CS_2 (l)	256.97
Cloruro de metilo	CH_3Cl(g)	182.81
Trinitro tolueno	$C_7H_5N_3O_6$ (s)	821

APENDICE XXXVIII

Densidad del agua

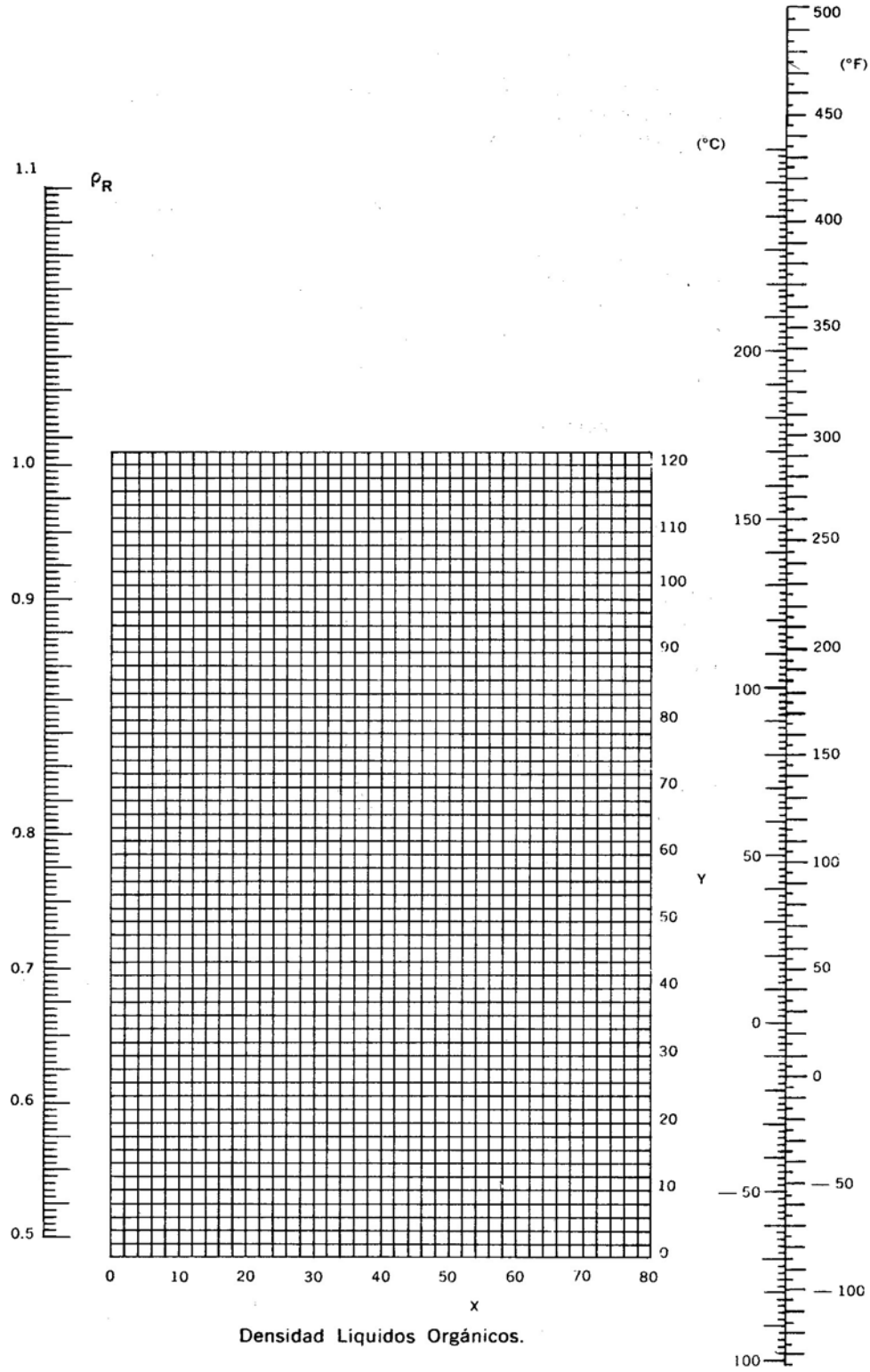
T °C	ρ kg/l	T °C	ρ kg/l
0	0.99987	33	0.99473
1	0.99993	34	0.99440
2	0.99997	35	0.99406
3	0.99999	36	0.99371
4	1.00000	37	0.99336
5	0.99999	38	0.99300
6	0.99997	39	0.99263
7	0.99993	40	0.99225
8	0.99988	41	0.99187
9	0.99981	42	0.99147
10	0.99973	43	0.99107
11	0.99963	44	0.99066
12	0.99952	45	0.99025
13	0.99940	46	0.98982
14	0.99927	47	0.98940
15	0.99913	48	0.98896
16	0.99897	49	0.98852
17	0.99880	50	0.98807
18	0.99862	51	0.98762
19	0.99843	52	0.98715
20	0.99823	53	0.98669
21	0.99802	54	0.98621
22	0.99780	55	0.98573
23	0.99757	60	0.98324
24	0.99733	65	0.98059
25	0.99708	70	0.97781
26	0.99682	75	0.97489
27	0.99655	80	0.97183
28	0.99627	85	0.96865
29	0.99598	90	0.96534
30	0.99568	95	0.96192
31	0.99537	100	0.95838
32	0.99506		

APENDICE XXXIX

Densidades de líquidos en función de la temperatura. Valores de (X, Y)

Compuesto	X	Y
Acetato de etilo	35.0	65.0
Acetato de metilo	40.1	70.3
Acetato de propilo	33.0	65.5
Acetona	26.1	47.8
Acetonitrilo	21.8	44.9
Acetileno	20.8	10.1
Ácido acético	40.6	93.5
Ácido butílico	31.3	78.7
Ácido isobutílico	31.5	75.9
Ácido propiónico	35.0	83.5
Alcohol etílico	24.5	48.6
Alcohol isoamílico	20.5	52.0
Alcohol metílico	25.8	49.1
Alcohol n. propílico	23.8	50.8
Amoniaco	22.4	24.6
Anilina	33.5	92.5
Benceno	32.7	63.0
Isobutano	13.7	16.5
Butirato de isometilo	33.0	64.1
Butirato de n-metilo	31.5	65.5
Ciclohexano	19.6	44.0
Clorobenceno	41.7	105.0
Cloruro de etilo	42.7	62.4
Cloruro de metilo	52.3	62.9
Decano	16.0	38.2
Dietilamina	17.8	33.5
Dióxido de carbono	78.6	45.4
Duodecano	14.3	41.4
Propionato de metilo	36.5	68.3
Propionato de etilo	32.1	63.9
Propionitrilo	20.1	44.6
Sulfuro de etilo	25.7	55.3
Sulfuro de metilo	31.9	57.4
n-Eicosano	14.8	47.5
Etano	10.8	4.4
Éter etílico	22.6	35.8
Éter metílico	27.2	30.1

Compuesto	X	Y
Éter metil-etílico	25.0	34.4
Éter propil-etílico	20.0	37.0
Etil mercaptano	32.0	55.5
Fenol	35.7	103.8
Fosfina	28.0	22.1
Fluorobenceno	41.9	36.7
Formiato de etilo	22.6	35.8
Formiato de metilo	46.4	74.6
Formiato de propilo	33.8	66.7
n-Heptadecano	15.6	45.7
n-Heptano	12.6	29.8
n-Hexadecano	15.8	45.0
n-Hexano	13.5	27.0
Metil mercaptano	37.3	59.5
n-Nonadecano	14.9	47.0
n-Nonano	16.2	36.5
n-Octadecano	16.2	46.5
n-Octano	12.7	32.5
n-Pentadecano	15.8	44.2
n-Pentano	12.6	22.6
Isopentano	13.5	22.5
Piperidina	27.5	60.0
Propano	14.2	12.2
n-Tetradecano	15.8	43.3
n-Tridecano	15.3	42.4
Trietilamina	17.9	37.0
n-Undecano	14.4	39.2



Densidad Liquidos Orgánicos.

NOMENCLATURA USADA EN ESTA OBRA

Es común que en los libros de ingeniería química se use una nomenclatura especial para cada capítulo, dependiendo del tipo de operación o proceso utilizado. A veces, se suele utilizar la misma o mismas letras con distintos significados. Lo anterior crea graves problemas y confusiones al lector que por primera vez se asoma a los textos de ingeniería química, por esta razón, los autores consideraron necesario estudiar a fondo la nomenclatura usada, tratando de obtener una que evitara las dificultades anteriormente señaladas.

En general se trató de respetar en lo posible aquella nomenclatura sancionada por el uso, en otros casos se usaron símbolos y letras más acordes con el idioma español. Creemos que la nomenclatura expuesta y utilizada en esta obra es fácil de manejar, racional, no se presta a confusiones y evita incluir una lista al final de cada capítulo.

En general las propiedades son designadas por medio de letras latinas o griegas. En ocasiones se usará la misma letra para designar diferentes propiedades. Para diferenciar entre ellas, se agregará una tilde cuando se trate de propiedades molares, un vector sobre la letra cuando se quiera indicar la idea de fuerza

NOMENCLATURA USADA PARA INDICAR PROPIEDADES DE LA MATERIA

Símbolo	**Propiedad**	**Unidades comunes**
μ	viscosidad	centipoise, cP
ρ	densidad absoluta	kg/m^3
d_R ó ρ_R	densidad relativa	$\rightarrow$
Pe	peso específico	kg/m^3
V	volumen	m^3
P	presión	atmósferas, atm
$\widetilde{P}$	presión parcial	mm de Hg
P^0	presión de vapor	mm de Hg
Pc	presión crítica	atmósferas

Símbolo	Propiedad	Unidades comunes
m, M	masa	kg
T ó t	temperatura	°C
u	velocidad	m/s
t_H	temperatura de bulbo húmedo	°C
t_R	temperatura de rocío	°C
C_p	capacidad calorífica	kcal/kg °C
Y_R	humedad relativa	
°Be	densidad en grados Baumé	°Be
°API	densidad en grados API	°API
A	área transversal al flujo	m^2
tc	temperatura crítica	°K
te	temperatura de ebullición	°C

NOMENCLATURA USADA PARA INDICAR FLUJOS

L	flujo másico de líquido	kg/h
G	flujo másico de gas	kg/h
S	flujo másico de sólidos	kg/h
M	flujo másico de mezclas	kg/h
Ca	flujo volumétrico de gas	m^3/h
Ca	flujo volumétrico de líquidos	m^3/h
$\tilde{G}$	flujo molar de gas	kg mol/h
$\tilde{L}$	flujo molar de líquido	kg mol/h
$\tilde{S}$	flujo molar de sólidos	kg mol/h
$\tilde{M}$	flujo molar de mezclas	kg mol/h
S_s	flujo másico de sólido seco	kg/h
G_s	flujo másico de gas seco	kg/h

NOMENCLATURA USADA PARA INDICAR CONCENTRACIONES

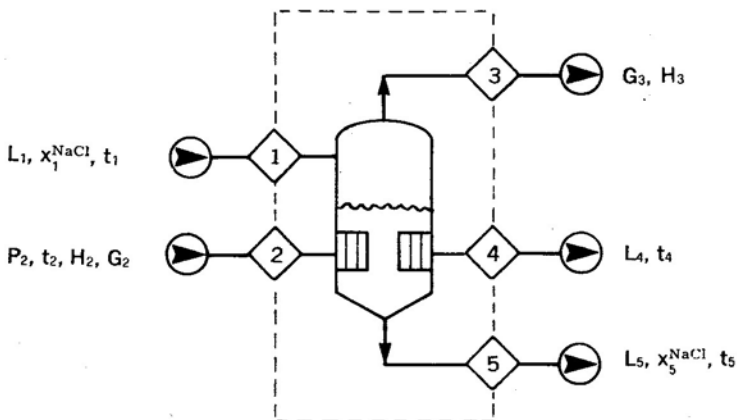
x	fracción masa en líquidos	kg/kg totales
y	fracción masa en gases	kg/kg totales
z	fracción masa en mezclas	kg/kg totales
w	fracción masa en sólidos	kg/kg totales
$\underset{\sim}{C}$	concentración másica	kg/l
$\tilde{C}$	concentración molar	kg mol/l
X_i	relación masa en líquidos	kg/kg totales sin i

Símbolo	Propiedad	Unidades comunes
Y_i	relación masa en gases	kg/kg totales sin i
Z_i	relación masa en mezclas	kg/kg totales sin i
$\tilde{x}$	fracción molar en fase líquida	kg mol/kg mol totales
$\tilde{y}$	fracción molar en fase gaseosa	kg mol/kg mol totales
$\tilde{w}$	fracción molar en fase sólida	kg mol/kg mol totales
$\tilde{z}$	fracción molar en mezclas	kg mol/kg mol totales

NOMENCLATURA USADA EN BALANCES DE ENERGIA

Símbolo	Propiedad	Unidades comunes
Cpm	capacidad calorífica media a presión constante	kcal/kg °C
$\tilde{C}p$	capacidad calorífica molar a presión constante	kcal/kg mol °C
C_H	calor húmedo	kcal/kg de aire seco °C
λ	calor latente	kcal/kg
$\tilde{\lambda}$	calor latente molar	kcal/kg mol
H	entalpía	kcal/kg
$\Delta\tilde{H}°$	calor de reacción estándar	kcal/g mol
$\Delta\tilde{H}_T$	calor de reacción a una temperatura dada	kcal/g mol
$\Delta\tilde{H}_d$	calor de disolución	kcal/g mol
Q	calor	kcal/s
τ	trabajo	J
$\mathscr{P}$	potencia	W
EPo	energía potencial	J
EC	energía cinética	J
EP	energía de presión o flujo	J
ΣF	pérdidas por fricción	J
U	energía interna	kcal/kg
u	velocidad	m/s
D	diámetro	m
Cp	capacidad calorífica a P constante	kcal/kg °C
Cv	capacidad calorífica a V constante	kcal/kg °C
θ	tiempo	s
z ó h	altura	m

USO DE LA NOMENCLATURA EN RELACION CON LA SIMBOLOGIA



Ejemplo

1. Líquido diluido
2. Vapor
3. Gases evaporados
4. Vapor condensado
5. Líquido concentrado

Símbolo	Descripción	Unidades comunes
L_1	flujo de líquido en la corriente 1	kg/h
x_1^{NaCl}	fracción masa de NaCl en la corriente líquida 1	kg de NaCl/kg totales
P_2	presión en la corriente 2	kg/cm^2
G_2	flujo de gases en la corriente 2	kg/h
H_2	entalpía de la corriente 2	kcal/kg
t_5	temperatura de la corriente 5	°C

OPERACIONES CON LA NOMENCLATURA USADA

Nomenclatura	Descripción	Unidades comunes
$L_1 x_1^{NaCl}$	masa de NaCl en la corriente 1	kg de NaCl/h
$L_1 H_1$	energía entrante con la corriente 1	kcal/kg
$EC = mu^2/2$	energía cinética	J
$Q_A = L_A \lambda_A$	calor de vaporización en la corriente A	kcal/h
$L = u_A A_A \rho_A$	flujo de la corriente A	kg/h
$Q_A = \tilde{x}_A^{eta} \tilde{H}_A^{eta} + \tilde{x}_A^{H_2O} \tilde{H}_A^{H_2O}$	calor entrante con la corriente líquida A (formada por agua y etanol)	kcal/kg mol
$\tilde{L}_1 \tilde{x}_1^{K_2SO_4}$	moles de K_2SO_4 en la corriente 1	kg mol de K_2SO_4/h
$G_s Y_1^{H_2O}$	masa de agua entrante en la corriente 1	kg de H_2O/h

BIBLIOGRAFIA

Andersen L.B. y Wenzel L.A., *Introduction to Chemical Engineering*, McGraw-Hill, Nueva York, 1961.

Balzhiser R.E. y Samuels M.R., *Chemical Engineering Thermodynamics*, Prentice Hall, Englewood Clíffs, 1972.

Costa Novela E., *Ingeniería Química*, Tomo I, Alhambra, Madrid, 1983.

Faires V.M., *Thermodynamics*, McMillan, Nueva York, 1960.

Felder R.M. y Rousseau R.W., *Elementary Principles of Chemical Processes*, John Wiley, New York, 1986.

Helsdon R.M., *Termodinámica aplicada*, Urmo, Bilbao, 1965.

Henley E.J. y Bieber H., *Chemical Engineering Calculations*, McGraw-Hill, Nueva York, 1959.

Henley E.J. y Rosen E.H., *Material and Energy Balance Computations*, John Wiley, Nueva York, 1969.

Himmelblau D.M., *Principios y cálculos básicos de la ingeniería química*, CECSA, México, 1970.

Hougen O.A., Watson K.M. y Ragatz R.A., *Chemical Process Principles*, Tomo I, John Wiley, Nueva York, 1959.

Kirkbride Ch. G., *Chemical Engineering Fundamentals*, McGraw-Hill, Nueva York, 1947.

Littlejohn Ch. E. y Meenaghan G.F., *Introducción a la ingeniería química*, CECSA, México, 1960.

Mahan B.H., *Elementary Chemical Thermodynamics*, Benjamin. Nueva York, 1960.

Ocón J. y Tojo G., *Problemas de ingeniería química*, Aguilar, Madrid, 1970.

Perry J.H., *Chemical Engineers' Handbook*, McGraw-Hill, Nueva York, 1963.

Purón A., *Principios de los procesos de ingeniería*, Vol. I, Limusa, México, 1974.

Russell T.W. y Denn M.M., *Introducción al análisis en ingeniería química*, Limusa, México, 1976.

Schmidt A.X. y List H.L., *Material and Energy Balances*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1962.

Thompson E.V. y Ceckler W.H., *Introducción a la ingeniería química*, McGraw-Hill, 1979.

Tyner M., *Process Engineering Calculations*, The Ronald Press Company, Nueva York, 1960.

Valiente A. y Stivalet R.P., *El ingeniero químico. ¿Qué hace?*, Alhambra, México, 1980.

Valiente A. y Stivalet R.P., *Problemas de balances de materia*, Alhambra, México, 1981.

Valiente A. y Stivalet R.P., *Problemas de balances de energía*, Alhambra, México, 1982.

Valiente A. B.T., *Problemas de balance de materia y energía en la industria alimentaria*, Limusa, México, 1986.

Weber H.C. y Meissner H.P., *Thermodynamics for Chemical Engineers*, John Wiley. Nueva York, 1957.

Whitwell J.C. y Torner R.K., *Conservation of Mass and Energy*, McGraw-Hill, Nueva York, 1969.

Williams E.T. y Johnson R.C., *Stoichiometry for Chemical Engineers*, McGraw-Hill, Nueva York, 1958.

Problemas de balances de materia y energía
se imprimió en marzo de 1991 en Impresora Cantori, S.A.
Centeno 590 A bis, Granjas México • 08400, México, D.F.
Se encuadernó en Ediciones Culturales, S.A.
Centenario 340, Merced Gómez • 01600, México, D.F.

La edición consta de 2 000 ejemplares.

Acerca de los autores

Antonio Valiente Barderas, ingeniero químico, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México; Maestría en Fenómenos de Transporte, Instituto Tecnológico de Loghborough, Inglaterra. Maestría en Administración Industrial UNAM.
Profesor titular de tiempo completo también de la Facultad de Química de la UNAM; ha sido profesor de ingeniería química en varias universidades privadas y públicas del país

Ha dirigido más de 50 tesis profesionales y es autor de más de 6 libros de texto sobre ingeniería química y coautor del libro *El ingeniero químico, ¿Qué hace?*
Su experiencia profesional incluye trabajos en Ferro Enamel de México, el Instituto Mexicano del Petróleo y Mexaro.
Rudi Primo Tlacatzin Stivalet Corral, ingeniero químico, Facultad de Química, UNAM. Cursos superiores en l'Ecole Supérieure de Chimie de Mulhouse, Francia. Cursos especializados sobre evaluación de proyectos, administración y transferencia de tecnología. Catedrático de ingeniería química en la UNAM. Ha dirigido más de 90 tesis profesionales; es autor de varias publicaciones sobre la educación del ingeniero químico y coautor del libro *El ingeniero químico, ¿Qué hace?*

Su experiencia profesional incluye trabajos en Bufete Industrial, Colgate Palmolive, Química Hoechst, Celanese mexicana, Instituto Mexicano del Petróleo y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Sobre la obra

El objetivo de esta obra es la enseñanza de una metodología lógica para la resolución de problemas de balances de materia y energía.

Este libro acumula la experiencia de diez años que los autores tienen en la enseñanza de la ingeniería química.

Esta obra sustituye a *Problemas de Balance de Materia* y *Problemas de Balance de Energía*, tratando en un sólo volumen ambas. Este sistema es el que se aplica actualmente en la UNAM y en numerosas escuelas del país y, a juicio de los autores, es el más conveniente para una correcta asimilación de los conocimientos y para que el estudiante comprenda, desde los primeros años, la íntima conexión que existe entre materia y energía.
El método empleado para la resolución de los problemas fue ideado por los autores. En el libro se presentan numerosos problemas resueltos y propuestos con sus correspondientes resultados.

En todos los problemas se utilizan conversiones de unidades de un sistema a otro, pero de preferencia se usa el sistema MKS de ingeniería y el SI para la resolución de la mayor parte de los mismos, lo que simplifica notablemente las conversiones y los cálculos.

La obra contiene apéndices con tablas, gráficas y nomogramas que permiten que el libro sea autosuficiente para la resolución de los problemas incluidos.

ISBN 968 444 109 6
PRIMERA EDICIÓN

Alhambra Mexicana