

Facultad de Ciencias

notas

de clase

Fundamentos de
balances de masas
para Farmacia.

Héctor Galván López



Biología
Estadística
Farmacia
Física
Geología
Instituto de Ciencias Naturales
Matemáticas
Observatorio Astronómico
Química



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO
México, D.F.

**El conocimiento que no se comparte o
se divulgue, esta condenado a morir.
El autor.**

Dedicatoria

A la memoria de mis padres **Luis José y Lilia** por su amor durante su existencia.
A mi esposa Carmen Amelia y a mis amados hijos: Diego Felipe y Juan Camilo.

Agradecimientos.

A la **Universidad Nacional de Colombia** que a través del Departamento de Farmacia de la Facultad de Ciencias me concedió el tiempo y el espacio necesario para la realización de esta obra.

A mis "**Profesores Mudos**" (libros) por su asesoría permanente, que sin importarles el tiempo y el espacio de consulta, me guiaron con maestría y sabiduría por el camino del saber.

A mis queridos hijos **Diego Felipe y Juan Camilo**, por su valiosa colaboración durante la ejecución de este trabajo.

PROLOGO

Durante mi trayectoria de muchos años en la Universidad Nacional de Colombia, primero como estudiante de la carrera de Farmacia y después como docente de la misma, he compartido con los estudiantes la falta de un texto guía que nos sirviera de consulta y apoyo para la realización de nuestro que hacer diario. Por ello y por muchas razones más, me propuse la tarea de subsanar en parte este sentimiento.

La información que presento en este libro, titulado " Fundamentos de Balances de Masas para Farmacia" en ningún momento pretende ser original. Más bien, ésta corresponde a la reunión metódica y ordenada del conocimiento. En especial, de términos, de conceptos y procedimientos relacionados con las Operaciones Unitarias, conocimientos que se encuentran dispersos entre otros, en libros de Ingeniería, libros de Física, libros de Química, libros de Matemáticas, libros de Fisicoquímica y en algunos libros de Farmacia.

Además, este libro contiene en gran parte, el conocimiento generado a lo largo de muchos años de experiencia como docente de la carrera de Farmacia especialmente en la cátedra de Operaciones Unitarias (Teoría y Laboratorio), en la cátedra de Farmacotecnia (Teoría y Laboratorio) y últimamente en la cátedra de Aplicación de Estrategias Experimentales al Diseño y Control de Medicamentos.

El libro, en general consta de tres Capítulos.

En el capítulo primero "Dimensiones, Análisis Dimensional y Unidades", se presentan una serie de definiciones y marcos conceptuales sobre sistemas de dimensiones, usos de los factores dimensionales de conversión y una serie de ejemplos que ilustran la utilidad de los mismos. También se tratan casos especiales de análisis dimensional y algunos métodos para obtener números adimensionales.

En el Capítulo Segundo "Procesos y Variables de Procesos", se presentan los principales marcos conceptuales y definiciones del conjunto de variables que afectan al proceso o a una operación en particular. Se tratan problemas de mezclas de sistemas binarios de gran utilidad farmacéutica. También se consigna un método para obtener densidades de todo tipo de sólidos, método comprobado y utilizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias del Departamento de Farmacia.

El Capítulo tercero "Balance de Materia", es un capítulo de integración en donde se utilizan los conocimientos aportados en los capítulos anteriores para resolución de problemas de balances de masas. En este capítulo, se presentan marcos conceptuales sobre los diferentes tipos de balances y una guía para resolver los diferentes tipos de problemas que puedan presentarse.

También, se resuelven problemas tipos sobre diferentes procesos. Cada capítulo de este libro termina con una serie de ejercicios, para que el lector les resuelva una vez estudiado cada uno de ellos.

Héctor Galván López
Profesor Asociado

INDICE GENERAL

CAPITULO I

Dimensiones, análisis dimensional y unidades	1
Introducción	1
Definiciones	2
Sistemas de dimensiones	2
Factores dimensionales de conversión	5
Ecuaciones dimensionales	8
Ejercicios para resolver	9
Análisis dimensional	11
Método de Rayleigh	12
Aplicación del análisis dimensional.	13
Resolución de problemas de flujo de fluidos, ejemplo 1.6	13
Resolución de problema de flujo de calor, ejemplo 1.7	28
Número de Reynolds	21
Método de Buckinghamm, resolución de problema 1.6	22
Ejercicios para resolver	25
Sistemas de unidades y su manipulación	27
Unidades básicas	27
Sistemas de unidades	30
Factores de conversión	33
Factores de conversión para la unidad de longitud	34
Factores de conversión para la unidad de masa	35
Factores de conversión para la magnitud volumen	36
Escala de temperaturas y equivalencias	38
Ejercicios para resolver	42

CAPITULO II

Procesos y variables de procesos	43
Introducción	43
Definiciones y marco conceptual	45
Procesos, corriente, unidad de Proceso, proceso unitario	46
Procesos intermitentes, procesos continuos, procesos semi-intermitentes	47
Variables de procesos	49
Densidad	49
Densidad de mezclas	50
Densidad sorbitol - agua	56
Densidad jarabe USP - agua	56
Densidad propileno glicol - agua	57
Densidad polietileno glicol 400 - agua	57
Densidad alcohol etílico - agua	57
Densidad de soluciones binarias de algunos electrólitos	58
Densidad granular	60
Densidad global	60
Densidad verdadera	61
Porosidad	61
Densidad de algunos sólidos	62
Determinación de la densidad de sólidos	64
Viscosidad	67
Flujo	68
Composición	71
Presión	74
Humedad	77
Diagrama de flujo	78
Ejercicios para resolver	84

CAPITULO III

Balance de materia	88
Introducción	88
Balance de materia	90
Tipos de balances	91
Ecuación general de balance	93
Guía para la realización de los cálculos de balance de materiales	95
Componente de enlace	96
Procedimiento para el cálculo de balance de materiales	97
Balance de masas en sistemas no reaccionantes	101
Balance de masas en procesos intermitentes en régimen transitorio	107
Balance de masas en sistemas reaccionantes	115
Estequiometría	116
Reactivo limitador	117
Ecuación del proceso	118
Degradación oxidativa del captopril	119
Balance de masas en procesos unitarios intermitentes	119
Balance de masas en procesos unitarios continuos	123
Balance de materia en procesos con recirculación	127
Recirculación	128
Relación de recirculación	128
Alimentación fresca	128
Volumen de control	128
Temperatura del bulbo seco	130
Temperatura del bulbo húmedo	131
Temperatura de rocío	131
Humedad relativa	131
Balance de materia con derivación de flujo	137
Ejercicios de aplicación	143
Bibliografía	149

CAPITULO I

DIMENSIONES

ANALISIS DIMENSIONAL

UNIDADES

DIMENSIONES

Introducción:

Dentro del procesamiento de materiales de interés químico, biológico y en especial, de interés farmacéutico, hay un conjunto de operaciones que no podrían realizarse si no hay una operación previa de transferencia. Dentro de estas operaciones, entre otras podemos citar: la operación de llenado de formas farmacéuticas líquidas homogéneas estériles y no estériles; el calentamiento de materiales para elaborar con ellos sistemas heterodispersos tipo emulsión; la operación de esterilización por calor húmedo, etc. Todas estas operaciones tienen en común, el transporte de un fluido a través de tuberías. Estos fluidos entre otros pueden ser: un jarabe, un elixir, una solución estéril o vapor sobrecalentado, etc. Los problemas que puedan presentarse en dichas transferencias, pueden ser analizados y resueltos en primera instancia, mediante la técnica del análisis dimensional del conjunto de variables que afectan a estos sistemas.

Definiciones y Marco Conceptual:

Dimensión. Es la descripción de una magnitud física. En un sentido general, puede considerarse la dimensión como aquella que representa, el conjunto de todas las unidades que se han utilizado, se utilizan o puedan utilizarse para medir una magnitud. También, puede considerarse la dimensión, de las magnitudes que sirven para describir un fenómeno.

Magnitud. Es una propiedad física de un sistema que puede ser medida. Toda magnitud física consta de dos partes. Una unidad que expresa la magnitud de que se trata y da la forma para su medida y un número que indica cuantas unidades se necesitan para completar la magnitud.

Dimensión de la Magnitud. Es un símbolo, código o abreviatura que representa a la magnitud en una forma general sin hacer referencia a un sistema en particular de unidades. Por ejemplo: el símbolo L, representa la idea o concepto de la distancia entre dos puntos; el símbolo M, representa la idea o concepto del contenido de materia de un sistema. Las dimensiones, al igual que las magnitudes se pueden clasificar en dos grandes grupos, las Dimensiones Primarias o Fundamentales y las Dimensiones Secundarias o Derivadas.

Dimensiones Primarias. Son aquellas que por si solas, son capaces de definir un sistema o condición de una operación dentro de un proceso. La escogencia o elección de cada una de estas dimensiones tanto en su número como en su tipo, se hacen por convención y conveniencia.

Dimensiones Secundarias. Son aquellas que se definen mediante una función de relación sencilla y se expresan en función de las dimensiones primarias. Por ejemplo: la velocidad, se define como la relación entre el espacio recorrido y el tiempo.

Sistemas de dimensiones. Existen varios sistemas de dimensiones entre los cuales podemos citar:

Sistema Absoluto. Tiene como dimensiones primarias la masa, la longitud, el tiempo y la temperatura. Las demás dimensiones como la velocidad, la fuerza, la energía la presión, la superficie, etc. son secundarias y se expresan en función de las dimensiones primarias.

Sistema Gravitacional. Tiene como dimensiones primarias la fuerza, la longitud, el tiempo y la temperatura. Las demás dimensiones como la velocidad, la masa, la energía, la presión, etc. son secundarias y se expresan en función de las dimensiones primarias.

Sistemas Redundantes. Son aquellos sistemas, en los cuales, las dimensiones escogidas como primarias, se pueden representar por una sola dimensión o mediante una función de relación sencilla; es decir estas dimensiones presentan un doble comportamiento; a veces se comportan como primarias y a veces se comportan como secundarias. Existen dos sistemas redundantes a saber: El primero, tiene como dimensiones primarias o fundamentales la masa, la energía, la longitud, el tiempo y la temperatura (M E L T t). Las demás dimensiones, son secundarias o derivadas.

Este sistema es redundante porque la dimensión masa (M) y la dimensión energía (E) se comportan como primaria y la vez como secundaria. Nótese, que este sistema es el resultado de una mezcla de dimensiones primarias y secundarias del sistema absoluto.

El segundo, tiene como dimensiones primarias la masa, la fuerza, la longitud, el tiempo y la temperatura (M F L T t). Las demás dimensiones, son secundarias.

Este sistema es redundante porque la dimensión masa (M) y la dimensión fuerza (F) se comportan como primaria y a la vez como secundaria. Nótese, que este sistema es el resultado de una mezcla de dimensiones primaria del sistema absoluto y dimensiones del sistema gravitacional.

Las dimensiones correspondientes a cada una de las variables o magnitudes de los sistemas descritos anteriormente se encuentran reportados en el cuadro I.

En este cuadro, se encuentran las dimensiones primarias o fundamentales correspondientes a cada uno de los sistemas, así como también algunas dimensiones secundarias para cada uno de los mismos.

CUADRO N°I: Sistemas de dimensiones.

SISTEMAS DE DIMENSIONES				
MAGNITUDES	ABSOLUTO	GRAVITACIONAL	MELTt	MFLTt
MASA (m)	M	$\frac{Ft^2}{L}$	M	M
LONGITUD (l)	L	L	L	L
TIEMPO (t)	t	t	t	t
TEMPERATURA (T)	T	T	T	T
FUERZA (f)	$\frac{ML}{t^2}$	F	$\frac{ML}{t^2}$	$\frac{ML}{t^2}, F$
ENERGÍA (E)	$\frac{ML^2}{t^2}$	FL	E	$\frac{ML^2}{t^2}, FL$
PRESIÓN (p)	$\frac{M}{t^2l}$	$\frac{F}{L^2}$	$\frac{M}{t^2l}$	$\frac{F}{L^2}$
DENSIDAD (ρ)	$\frac{M}{L^3}$	$\frac{Ft^2}{L^4}$	$\frac{M}{L^3}$	$\frac{Ft^2}{L^4}$
VOLUMEN (V)	L^3	L^3	L^3	L^3
VISCOSIDAD (η)	$\frac{M}{Lt}$	$\frac{Ft}{L^2}$	$\frac{M}{Lt}$	$\frac{Ft}{L^2}$
CAPACIDAD CALORÍFICA (C_p)	$\frac{L^2}{Tt^2}$	$\frac{L^2}{Tt^2}$	$\frac{E}{MT}$	$\frac{L^2}{Tt^2}$
COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR (h)	$\frac{M}{t^3T}$	$\frac{F}{LtT}$	$\frac{M}{t^3T}$	$\frac{F}{LtT}$
TENSIÓN SUPERFICIAL (γ)	$\frac{M}{t^2}$	$\frac{F}{L}$	$\frac{M}{t^2}$	$\frac{F}{L}, \frac{M}{t^2}$

Factores Dimensionales de Conversión.

Debido a la existencia de diferentes sistemas de dimensiones y con el propósito de poder realizar operaciones sencillas de suma y resta en los diferentes balances de masas y energía es necesario entender y manipular los diferentes factores de conversión. Estos factores, pueden definirse de una manera general, como la relación de dimensiones para una misma magnitud en dos sistemas diferentes.

Ejemplo 1.1: La relación entre las dimensiones de fuerza del sistema absoluto y las dimensiones de fuerza en el sistema gravitacional (ver cuadro I), corresponde a un factor de conversión comúnmente conocido como g_c .

$g_c = \text{Dimensiones de fuerza del sistema absoluto} / \text{Dimensiones de fuerza del sistema gravitacional}$.

$$g_c = \frac{ML}{Ft^2} \quad (1.1)$$

Este factor de conversión, se utiliza para convertir dimensiones de fuerza del sistema absoluto a dimensiones de fuerza del sistema gravitacional y viceversa.

Ejemplo 1.2: La relación de dimensiones de energía del sistema gravitacional y las dimensiones de energía del sistema redundante **MELTt** (ver cuadro I), da origen a un factor de conversión conocido generalmente como el equivalente mecánico del calor (J). Este factor convierte las dimensiones de energía del sistema gravitacional a dimensiones de energía del sistema redundante **MELTt** y viceversa.

$J = \text{Dimensiones de energía del sistema gravitacional} / \text{Dimensiones de energía del sistema redundante}$. MELTt.

$$J = \frac{FL}{E} \quad (1.2)$$

EJERCICIOS DE APLICACION.

Ejemplo 1.3: Convertir las dimensiones de energía cinética del sistema absoluto a dimensiones de energía del sistema redundante MELTt.

$$Ec = \frac{mv^2}{2} \quad (1.3)$$

Busque, en el cuadro número I, las dimensiones correspondientes a cada una de las magnitudes de la ecuación 1.3 y forme con ellas una ecuación dimensional así:

$$Ec = \frac{ML^2}{t^2} \quad (1.4)$$

Divida la ecuación 1.4 por el factor g_c y simplifique.

$$\frac{Ec}{g_c} = \frac{ML^2}{t^2 g_c} = \frac{ML^2 F t^2}{ML t^2} = FL \quad (1.5)$$

Ahora, divida la ecuación resultante por el factor J y simplifique

$$\frac{Ec}{g_c J} = \frac{FL}{J} = \frac{FLE}{FL} = E \quad (1.6)$$

En general, para convertir las dimensiones de energía (cinética) del sistema absoluto a dimensiones de energía del sistema redundante MELTt se divide por los factores g_c y J .

Ejemplo 1.4: Expresar el balance de energía dado por la ecuación número 1.7 en dimensiones de energía por unidad de masa del sistema absoluto.

$$\Delta U + m \Delta \frac{v^2}{2} + \Delta PV + mg \Delta Z = Q + W \quad (1.7)$$

En donde:

U = Energía interna en el sistema redundante MELTt.

m = Masa.

P = Presión

V = Volumen

v = Velocidad

Q = Calor

W = Trabajo.

Reemplazando cada una de las magnitudes de la ecuación 1.7, por sus respectivas dimensiones, dadas en el cuadro I y dividiendo por la dimensión masa, tenemos:

$$\frac{E}{M} + \frac{FL^3}{ML^2} + \frac{L^2}{t^2} + \frac{L^2}{t^2} = \frac{E}{M} + \frac{E}{M} \quad (1.8)$$

Ahora, convertimos las dimensiones de energía del sistema MELTt al sistema gravitacional multiplicando por el factor J. Así:

$$\frac{E}{M}J = \frac{EFL}{ME} = \frac{FL}{M} \quad (1.9)$$

Ahora, la dimensión fuerza del sistema gravitacional la convertimos a dimensiones fuerza del sistema absoluto, multiplicando por g_c así:

$$\frac{E}{M}Jg_c = \frac{FL}{M}g_c = \frac{FLML}{Mft^2} = \frac{L^2}{t^2} \quad (1.10)$$

De igual manera, convertimos la dimensión fuerza del sistema gravitacional dada por el segundo término de la izquierda de la ecuación 1.8 a dimensiones de fuerza del sistema absoluto multiplicando por g_c , así:

$$\frac{FL}{M}g_c = \frac{FLML}{Mft^2} = \frac{L^2}{t^2} \quad (1.11)$$

De acuerdo, con todos estos procedimientos la ecuación 1.7, toma la siguiente forma:

$$\Delta \frac{E}{M}Jg_c + \Delta PV_e g_e + \Delta \frac{v^2}{2} + g\Delta Z = (Q + W)Jg_c \quad (1.12)$$

La ecuación resultante, tiene las siguientes dimensiones:

$$\frac{L^2}{t^2} + \frac{L^2}{t^2} + \frac{L^2}{t^2} + \frac{L^2}{t^2} = \frac{L^2}{t^2} + \frac{L^2}{t^2} \quad (1.13)$$

La ecuación 1.13, es una ecuación **dimensionalmente homogénea**. Como puede observarse, una ecuación dimensionalmente homogénea, es aquella en la cual todos sus términos poseen las mismas dimensiones. También, puede considerarse una ecuación dimensionalmente homogénea cuando la forma de la ecuación no depende de las unidades fundamentales de la medida, es decir, que la ecuación es válida para cualquier sistema de unidades.

Esta ecuación presenta las siguientes características: cuando se divide por uno cualquiera de sus términos, la ecuación resultante carece de dimensiones. (Compruébelo). Se puede utilizar con cualquier sistema de unidades siempre y cuando se utilicen las mismas unidades para las magnitudes fundamentales.

Ecuaciones Dimensionales. Las ecuaciones dimensionales son aquellas deducidas por métodos empíricos, en las que se correlacionan datos experimentales sin tener en cuenta la consistencia dimensional. Por ejemplo:

$$\frac{q}{A} = 3.57 \frac{T^{1.25}}{D_o^{0.25}} \quad (1.14)$$

La ecuación 1.14, corresponde a la velocidad de transmisión de calor por conducción y convección desde una tubería horizontal hacia la atmósfera. En esta ecuación:

q = Flujo calorífico con dimensiones de energía sobre tiempo.

A = Area de superficie

T = Diferencia en temperatura

Do = Diámetro de la tubería

Estas ecuaciones se caracterizan por que sus términos, al ser reemplazados por sus respectivas dimensiones, a la ecuación resultante no se le anulan sus dimensiones, es decir la ecuación no es dimensionalmente homogénea.

EJERCICIOS PARA RESOLVER

1. Demuestre que la ecuación de los gases ideales tiene dimensiones de energía. ¿Es esta ecuación dimensionalmente homogénea?

2. Demuestre que la ecuación de Stokes, es dimensionalmente homogénea.

3. Es la ecuación de Clausius Clapeyron dimensionalmente homogénea?

4. La caída de presión de un fluido que fluye a través de una tubería viene dada por la ecuación $\Delta P = \frac{2fL\rho\nu^2}{D}$ en donde:

P = Presión

f = Factor de fricción

L = Longitud de la tubería

ρ = Densidad del fluido

ν = Velocidad media del fluido

D = Diámetro de la tubería

Cuales son las dimensiones de f. Es esta ecuación dimensionalmente homogénea?. Si no lo es, conviértala.

5. La potencia de emisión de un cuerpo negro viene dada por: $W = AT^4$ en donde:

W = Potencia de emisión con dimensiones de energía sobre tiempo.

A = Constante de Stefan Boltzan.

T = Temperatura

Es esa ecuación dimensionalmente homogénea?.

6. Demuestre si la ecuación que describe la caída libre de un cuerpo es dimensionalmente homogénea.

7. Convertir las dimensiones de energía potencial del sistema absoluto a dimensiones de energía del sistema redundante.
8. Exprese la ecuación de balance de energía 1.7 en dimensiones del sistema gravitacional.
9. Usando factores de conversión primarios, exprese la tensión superficial en dimensiones del sistema absoluto y dimensiones de los sistemas redundantes.
10. ¿Es la ecuación de Arrhenius, la cual relaciona la constante de velocidad de una reacción química con la temperatura, dimensionalmente homogénea?.
11. Usando factores de conversión primarios, exprese la conductividad térmica en dimensiones del sistema absoluto y en dimensiones del sistema gravitacional.
12. Usando factores de conversión primario, exprese el coeficiente de transmisión de calor en dimensiones del sistema absoluto y en dimensiones del sistema gravitacional.

ANALISIS DIMENSIONAL

El análisis dimensional es un método mediante el cual se deduce información de un fenómeno o sistema, con una premisa única, que el fenómeno o sistema puede ser descrito por una ecuación dimensionalmente correcta con un número determinado de variables que afectan a dicho fenómeno o sistema. La aplicación del análisis dimensional, a problemas prácticos, ésta basado en la hipótesis, en que la solución a los problemas puede ser expresada por medio de una ecuación dimensionalmente homogénea en términos del conjunto de variables especificadas en su solución.

El análisis dimensional también puede ser considerado como un tratamiento algebraico de los símbolos de las unidades consideradas como independientes de su valor numérico. El análisis dimensional es una ayuda muy valiosa para resolver problemas que no pueden tratarse totalmente por métodos teóricos o matemáticos. Problemas de esta clase pueden presentarse generalmente en los fluidos tales como: gases, vapores, líquidos, calor, etc. cuando son transportados a través de tuberías.

El análisis dimensional, puede considerarse, como un procedimiento mediante el cual, el conjunto de variables que afectan a un sistema son reunidas en grupos y cada uno de estos grupos resultante de este análisis debe ser adimensional (carentes de dimensión).

El análisis dimensional, es una técnica muy valiosa para orientar la investigación y resulta de gran utilidad práctica para señalar el camino a seguir en una investigación, cuyo fin último es poder correlacionar los datos experimentales en una forma adecuada para su utilización.

El análisis dimensional, resulta muy útil para comprobar la consistencia de las unidades de una ecuación y especialmente importante, en el escalonamiento de un proceso, con el fin de comprobar el comportamiento de las unidades de proceso en cualquier escala del proceso.

El análisis dimensional, no se puede aplicar, sino se tiene un conocimiento suficientemente claro de los aspectos físicos del problema que se está considerando. Este conocimiento nos ayuda a elegir el conjunto de variables más relevantes en la solución del problema así como también las leyes físicas básicas que tendrían que intervenir en la solución matemática, si esta fuese posible.

De todo lo anterior, se deduce, que el análisis dimensional es una técnica intermedia que utiliza el desarrollo matemático formal, las leyes físicas y la experimentación científica a la solución de problemas. Para poder obtener soluciones a problemas mediante el análisis dimensional, es necesario que cada una de las dimensiones consideradas, deba aparecer por lo menos en la ecuación dimensional dos veces. Si esto no se cumple, es posible que el problema este mal planteado o no tenga solución, por omisión de una o varias variables que afectan al sistema.

Estos grupos sin dimensiones, pueden obtenerse, mediante la aplicación del método de Rayleigh o mediante el teorema de Buckingham.

Método de Rayleigh.

Este método, está basado en el hecho de que si existe una ecuación teórica entre las variables que afectan a un sistema, dicha ecuación tiene que ser dimensionalmente homogénea; es decir, las dimensiones de cada uno de sus términos tienen que ser iguales así como también, los exponentes que acompañan a cada una de estas dimensiones.

Este método del análisis dimensional, no conduce a soluciones numéricas por lo tanto, hay que recurrir a la experimentación para completar la solución a dichos problemas.

Método de Buckingham.

En muchos casos, en los cuales no es posible formular ecuaciones diferenciales para obtener números adimensionales, es conveniente utilizar un procedimiento más general; procedimiento comúnmente conocido como el método de Buckingham. Este procedimiento se inicia con un listado de las variables más relevantes del problema físico que se estudia, después se determina el número de parámetros o grupos adimensionales que pueden resultar de la combinación de las variables, aplicando el teorema pi de Buckingham.

El teorema de Buckingham, enuncia que las relaciones funcionales entre \mathbf{q} cantidades o variables cuyas unidades puedan expresarse en términos de \mathbf{u} unidades o dimensiones fundamentales, puede escribirse como $(\mathbf{q} - \mathbf{u})$ grupos adimensionales independientes, a los cuales se les puede llamar pi (π). En general, el número máximo de grupos adimensionales que se pueden obtener con este teorema, es igual al número de variables independientes necesarias para especificar el sistema menos el número de dimensiones fundamentales necesarias para expresar todas las variables.

Ejemplo 1.5: Para ilustrar el uso de estos métodos considérese el siguiente ejemplo: Un fluido incompresible fluye por el interior de un tubo circular de diámetro interno D . Las variables más relevantes que describen este comportamiento son: La caída de presión, la velocidad del fluido, el diámetro y la longitud del tubo, la viscosidad y la densidad del fluido. El número total de variables \mathbf{q} es igual a 6 y el número total de dimensiones \mathbf{u} que describen todas estas variables es tres, las cuales corresponden a la masa, la longitud y el tiempo. Por lo tanto, el número de grupos adimensionales que se pueden obtener es 3, $\pi = 3$

Ejemplo 1.6: Aplicación del Análisis Dimensional a la resolución de problemas de flujo de fluidos.

Supongamos, que a medida que avanza un fluido por una tubería larga, lisa, circular y recta hay pérdida de presión por fricción. Pérdida, que depende de las siguientes variables: longitud y diámetro de la tubería (factores geométricos); velocidad media, densidad y viscosidad del fluido (propiedades del fluido). Cual quier cambio, que se haga en una de estas variables, produce cambios en la caída de presión del fluido.

Esta pérdida de presión del fluido a través de la tubería puede ser estudiada de diferentes maneras, entre estas se pueden citar:

Experimentación. Para obtener una ecuación empírica por este método, se requiere determinar el efecto de cada una de estas variables a diferentes niveles, sobre la pérdida de presión del fluido. Para ello, es necesario efectuar una experimentación sistemática con cada una de las variables manteniendo las restantes a un nivel constante. Este procedimiento es muy dispendioso y demasiado costoso y más aun, muy engorroso; llevando al final a la difícil tarea de correlacionar, el efecto de cada una de las variables investigadas sobre la caída de presión del fluido.

Método Científico. También, es factible determinar el efecto de cada una de estas variables sobre la caída de presión del fluido utilizando los diseños experimentales con el conjunto de variables que afectan al sistema. Entre estos diseños experimentales, se pueden utilizar los diseños de Plackett Burman y los diseños factoriales fraccionados en las primeras etapas de la investigación, diseños muy útiles en la selección de las variables más relevantes que afectan el sistema.

También, se pueden utilizar los diseños factoriales completo, cuando se quiere buscar superficies de respuestas con el conjunto de variables seleccionadas por los diseños anteriores. Con estos tipos de diseños se pueden obtener modelos, que expliquen el comportamiento de los datos experimentales, todo esto, con el fin de obtener una ecuación muy útil y de gran utilidad para predecir un resultado bajo unas condiciones determinadas para un propósito práctico.

Método de Rayleigh. Basados en este método y en el hecho de que toda ecuación esta compuesta de variables y constantes de proporcionalidad. El problema (Ejemplo 1.6) descrito anteriormente, se puede representar matemáticamente mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta P = f(D, \nu, \rho, \eta, l) \quad (1.15)$$

La ecuación 1.15, indica que la pérdida de presión por fricción es una función del conjunto de variables que están dentro del paréntesis, cuya función **f** es completamente desconocida

La ecuación 1.15, se puede representar como una serie de potencia en donde se conserva la base, así:

$$\Delta P = CD^a \nu^b \rho^c \eta^d l^e C_1 D^a \nu^b \rho^c \eta^d l^e \quad (1.16)$$

En esta ecuación:

C = Constante de proporcionalidad sin dimensiones.

a,b,c,d,e son los exponentes de cada una de las magnitudes o variables los cuales pueden ser: negativos, positivos o cero.

Reemplazando, cada una de las magnitudes de la ecuación 1.16 por sus respectivas dimensiones dadas en el cuadro I tenemos:

$$\frac{F}{L^2} = CL^a \left(\frac{L}{t}\right)^b \left(\frac{M}{L^3}\right)^c \left(\frac{M}{Lt}\right)^d L^e \quad (1.17)$$

Ahora, la ecuación 1.17 se agrupa por dimensiones obteniéndose:

$$\frac{F}{L^2} = CL^{a+b-3c-d+e} t^{-b-d} M^{c+d} \quad (1.18)$$

En la ecuación 1.18, se observa que la dimensión fuerza del sistema gravitacional aparece una sola vez por lo tanto, el sistema aparentemente no tiene solución. Este problema, se puede obviar convirtiendo la dimensión fuerza a dimensiones de fuerza del sistema absoluto, esto, se consigue multiplicando por g_c . así:

$$\frac{F}{L^2} g_c = \frac{FML}{L^2 F t^2} = L^{a+b-3c-d+e} t^{-b-d} M^{c+d} \quad (1.19)$$

$$\frac{M}{L t^2} = CL^{a+b-3c-d+e} t^{-b-d} M^{c+d} \quad (1.20)$$

de acuerdo con el método de Rayleigh, para que una ecuación, sea dimensionalmente consistente, la suma de los exponentes de cada una de las dimensiones deberá ser la misma a ambos lados de la ecuación. Aplicando, este principio a la ecuación 1.20, tenemos:

$$\text{Exponentes de M:} \quad 1 = c + d \quad (1.21)$$

$$\text{Exponentes de L:} \quad 1 = a + b - 3c - d + e \quad (1.22)$$

$$\text{Exponentes de t:} \quad -2 = -b - d \quad (1.23)$$

Estas igualdades, dan como resultado un sistema de ecuaciones simultáneas, en donde hay cinco incógnitas (a,b,c,d,e) y tres ecuaciones. El cual necesita para su resolución, cinco ecuaciones independientes y solamente hay tres. Por lo tanto, para poder solucionar dicho sistema se tendrá que expresar tres variables (exponentes) en función de las otras dos. De esta manera, el número de soluciones teóricas posibles correspondiente a este sistema vendrá dada por:

$$N.S.P = \frac{n!}{\gamma!(n + \gamma)!} \quad (1.24)$$

en donde:

NSP = Número de soluciones posibles

n = Número de variables (exponentes)

r = Número de exponentes escogidos

Para este caso, n = 5 y r = 3; reemplazando estos valores en la ecuación 1.24 tenemos:

$$\text{N.S.P.} = {}_5C_3 = \frac{5!}{3!(5-3)!} = 10$$

Para este caso, el número de soluciones posibles es 10. Una de estas soluciones, consiste en tomar los exponentes (a,b,c) y expresarlos en función de los exponentes (d,e) . Bajo estas condiciones, se resuelve el sistema de ecuaciones simultáneas, el cual da como resultado:

$$a = -d - e$$

$$b = 2 - d$$

$$c = 1 - d$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación 1.16 e introduciendo el factor g_c tenemos:

$$\Delta P g_c = C D^{-d-e} \nu^{2-d} \rho^{l-d} \eta^d l^e \quad (1.25)$$

Ahora, se agrupan las magnitudes que tengan igual exponentes, lo cual da como resultado:

$$\frac{\Delta P g_c}{\rho \nu^2} = C \left(\frac{D \nu \rho}{\eta} \right)^{-d} \left(\frac{l}{D} \right)^e \quad (1.26)$$

La ecuación 1.26, resultante del análisis dimensional que se le aplicó a la ecuación 1.16 presenta grandes ventajas con respecto a esta última. En la ecuación 1.16, se requiere calcular después de una investigación sistemática cinco exponentes y una constante. Estas, se pueden calcular midiendo la caída de presión en función de una de las cinco variables y manteniendo constante las cuatro restantes.

Repetir la misma experiencia fijando otras cuatro variables y determinando la caída de presión en función de la magnitud escogida como variable y así sucesivamente hasta agotar todas las posibles combinaciones. Esta investigación sistemática, conduce a la difícil tarea de realizar un valioso análisis de correlación con toda la información obtenida, dificultándose, de esta manera, la obtención de un modelo matemático que explique el comportamiento de los datos experimentales.

En contraste con la ecuación 1.26, en donde se requieren calcular dos exponentes y una constante, lo cual reduce considerablemente el número de experiencias para darle solución a este problema y por consiguiente, la mayor facilidad para obtener modelos matemáticos que expliquen el comportamiento de los datos experimentales.

Experimentalmente, se ha comprobado que el exponente de la relación longitud a diámetro de la tubería es igual 1, para números de Reynolds mayores que 400; en donde el fluido, puede considerarse que avanza totalmente en régimen turbulento. Bajo estas condiciones experimentales, la ecuación 1.26 se transforma en:

$$\frac{\Delta P g_c D}{\rho \nu^2 l} = C \left(\frac{D \nu \rho}{\eta} \right)^{-d} \quad (1.27)$$

La ecuación 1.27, relaciona el factor de fricción con el número de Reynolds.

En el análisis dimensional, el número de grupo sin dimensiones resultante del análisis, es igual al número de variables menos el número de dimensiones. Para el caso analizado anteriormente, el número de variables analizadas 6, número de dimensiones utilizadas para el desarrollo del análisis 3. De esta manera, el número de grupos sin dimensiones obtenidos es tres (ecuación 1.26).

Esta relación entre el número de variables y el número de dimensiones es comúnmente conocida como el teorema de Pi o Vaschy - Buckingham enunciado anteriormente.

Otra aplicación del análisis dimensional, es la ayuda tan valiosa, en la resolución de problemas que tienen que ver con la transmisión de energía en forma de calor que tiene lugar en casi todos los procesos industriales y en especial en los procesos de fabricación de medicamentos así como también en las operaciones de esterilización por calor húmedo o por calor seco y en las operaciones de fabricación de emulsiones cosméticas en las que se necesita fundir sólidos de bajo punto de fusión. Esta aplicación se verá resumida en el ejemplo 1.7

Ejemplo 1.7: Aplicación del Análisis Dimensional a la Transferencia de Energía en forma de Calor.

La transmisión de calor entre un fluido que circula por el interior de un tubo limpio y pulido y otro fluido exterior al tubo. Las variables que afectan esta transmisión de energía en forma de calor pueden ser: la longitud y el diámetro del tubo; la densidad, la viscosidad y la velocidad del fluido así como también, la conductividad y el calor específico del fluido.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente y con la aplicación del método de Rayleigh. Con las variables antes mencionadas, se puede formar una ecuación de transmisión de calor por convección así:

$$h = \Phi(D, \nu, \rho, \eta, l, k, C_p, g_c) \quad (1.28)$$

En esta ecuación:

h = Coeficiente de transferencia de calor

D = Diámetro del tubo

ν = Velocidad media del fluido

ρ = Densidad del fluido

η = Viscosidad del fluido

l = Longitud del tubo

k = Conductividad del fluido

C_p = Calor específico del fluido

g_c = Factor de conversión

La ecuación 1.28, se puede representar como una serie de potencia en donde se conserva la base. de esta manera, dicha ecuación toma la siguiente forma:

$$h = CD^a \nu^b \rho^c \eta^d l^e k^i C_p^j g_c^n \quad (1.29)$$

Reemplazando en la ecuación 1.29, cada una de sus magnitudes o variables por sus respectivas dimensiones dadas en el cuadro I. Tenemos:

$$\frac{F}{LtT} = CL^a \left(\frac{L}{t}\right)^b \left(\frac{M}{L^3}\right)^c \left(\frac{Ft}{L^2}\right)^d L^e \left(\frac{F}{tT}\right)^i \left(\frac{L}{t^2T}\right)^j \left(\frac{ML}{t^2F}\right)^n \quad (1.30)$$

Agrupando, la ecuación 1.30, por dimensiones.

$$\frac{F}{LtT} = CL^{a+b-3c-2d+e+2j+n} t^{-b+d-i-2j-2n} M^{c+n} F^{d+i-n} T^{-i-j} \quad (1.31)$$

En la ecuación 1.29 se observa, que cada una de las dimensiones que la componen, aparece por lo menos dos veces, lo que, nos indica que no hay incoherencia en el conjunto de variables escogidas para definir el sistema. Por lo tanto, se puede desarrollar el análisis. Igualando los exponentes correspondientes a cada una de las dimensiones, tenemos:

$$\text{Exponentes de F : } 1 = d + i + n$$

$$\text{Exponentes de L : } -1 = a + b - 3c - 2d + e + 2j + n$$

$$\text{Exponentes de t : } -1 = -b + d - i - 2j - 2n$$

$$\text{Exponentes de T : } -1 = -i - j$$

$$\text{Exponentes de M: } 0 = c + n$$

Estas igualdades dan como resultado, un sistema de ecuaciones simultáneas en donde hay 8 incógnitas y cinco ecuaciones independientes. La única forma, de resolver este sistema es, expresando cinco variables en función de las otras tres. De esta manera, el número de soluciones teóricas posibles se obtendrá aplicando nuevamente la ecuación 1.25.

$$n = 8 ; r = 5$$

$${}_2C_5 = 56$$

Para este caso el número de soluciones teóricas posibles es 56. Una de estas soluciones consiste en tomar los exponentes (a, b, c, d, i, n) y expresarlos en función de los exponentes (b, e, j) los cuales, se consideran como variables independientes.

Resolviendo, el sistema de ecuaciones simultáneas bajo estas consideraciones tenemos:

$$a = b - e - 1$$

$$c = b$$

$$d = j - b$$

$$i = 1 - j$$

$$n = -b$$

Reemplazando estos valores en la ecuación 1.29, se tiene:

$$h = CD^{b-e-1}\nu^b\rho^b\eta^{j-b}l^ek^{1-j}C_p^jg_c^{-b} \quad (1.32)$$

Ahora, agrupamos las magnitudes que tengan los mismos exponentes, dando origen a la siguiente ecuación:

$$h = \Phi C \left(\frac{D\nu\rho}{\eta g_c} \right)^b \left(\frac{L}{D} \right)^e \left(\frac{k}{D} \right)^1 \left(\frac{\eta C_p}{k} \right)^j \quad (1.33)$$

La función de la ecuación 1.33, puede ser determinada por métodos experimentales. En el caso de la transmisión de calor por convección, dado por la ecuación 1.33, establece que si se realiza una serie de experimentos (bajo un diseño experimental determinado), tomando como variable independiente la velocidad y determinando los valores de h para cada valor de esta; manteniendo constante los demás grupos adimensionales, los cuales, quedan fijos una vez escogido el tipo de tubería y el fluido que va a circular por ella. Bajo estas condiciones, se puede determinar la función entre estos grupos.

La ecuación 1.33, puede ser representada de la siguiente manera:

$$\frac{hD}{k} = \Phi C \left(\frac{D\nu\rho}{\eta g_c} \right)^b \left(\frac{L}{D} \right)^e \left(\frac{\eta C_p}{k} \right)^j \quad (1.34)$$

Cada uno de estos grupos adimensionales, se les a dado el nombre de algún investigador en el campo de la mecánica de fluidos o en el campo de la transmisión de calor. De esta manera, los grupos adimensionales obtenidos mediante la técnica del análisis dimensional toman los siguiente nombres:

$$\frac{D\nu\rho}{\eta} = \frac{DG}{\eta} = \text{Número de Reynolds} = \text{Re}$$

$$\frac{hD}{k} = \text{Número de Nusselt} = \text{Nu}$$

$$\frac{\eta C_p}{k} = \text{Número de Prandtl} = \text{Pr}$$

El **Número de Reynolds**, depende de cuatro variables a saber: diámetro de la tubería, viscosidad, densidad y velocidad media del fluido. Este número al igual que los demás grupos adimensionales, su valor es independiente del sistema de unidades.

El número de Reynolds, es de gran utilidad práctica en el diseño y construcción de cabinas de flujo laminar, (ampliamente utilizadas en muchas operaciones farmacéuticas), en la determinación del tamaño de partículas por sedimentación gravitacional, especialmente importante en la operación de mezcla de líquidos y en la escogencia del tipo de agitador para realizarla, etc.

Generalmente, para números de Reynolds menores o iguales a 2 100, se considera que el fluido fluye en régimen laminar, condición muy importante en el diseño de las cabinas de flujo laminar.

Para números de Reynolds comprendidos entre 2 100 y 4 000 se considera, que el fluido presenta un estado de transición en donde el fluido puede ir en régimen laminar y/o en régimen turbulento.

Para números de Reynolds superiores a 4 000, se considera que el fluido avanza en régimen turbulento, condición indispensable en la operación de mezclado de fluidos en donde se necesita una distribución aleatoria de las velocidades de los fluidos de procesos que se pretenden mezclar.

En la determinación el tamaño de partículas por sedimentación gravitacional, es necesario, que las partículas sedimenten a una velocidad tal que no introduzca turbulencia en el sistema.

Cuando las partículas sedimentan a una velocidad en la cual número de Reynolds calculado a partir de la velocidad de sedimentación y el diámetro promedio de las partículas; densidad y viscosidad del fluido en el cual se hace la determinación es

mayor que **0.2**, se considera que la velocidad de sedimentación es muy rápida, la cual introduce turbulencia en el sistema de sedimentación y por consiguiente, el resultado de la determinación del tamaño de partícula bajo estas condiciones no es confiable.

Método de Buckingham.

Para ilustrar el uso de este método, considérese el ejemplo 1.6 resuelto por el método de Rayleigh.

En donde:

$q = 6$ = número total de variables necesarias para especificar el sistema

$u = 3$ = número de dimensiones fundamentales necesarias para especificar las variables del sistema y en este caso corresponden a la masa M, la longitud L y el tiempo t. El número de grupos adimensionales π es:

$$\begin{aligned} \pi &= q - u = 3 \text{ por lo tanto} \\ \pi_1 &= f(\pi_2, \pi_3) \end{aligned} \tag{1.35}$$

Cada uno de estos grupos adimensionales π (π), esta compuesto por un núcleo central y una variable. El núcleo central, debe aparecer en todos los grupos. Dicho núcleo central, esta compuesto de u variables que deben contener todas las dimensiones fundamentales (M,L,t) en este caso. Al seleccionar este núcleo se excluye generalmente la variable cuyo efecto se desea determinar. En este caso se excluye la variable P, la cual, no debe aparecer formando parte de este núcleo central. Seleccionando las variables D, ν, ρ como el núcleo de variables comunes a todos los grupos π y adicionándole a c/u de ellos una de la variables restantes ($\Delta P, L, \eta$) formamos los siguientes grupos adimensionales:

$$\pi_1 = D\nu\rho\Delta P \tag{1.36}$$

$$\pi_2 = D\nu\rho L \tag{1.37}$$

$$\pi_3 = D\nu\rho\eta \tag{1.38}$$

Obsérvese, que las variables adicionadas al núcleo central, no hacen parte de este.

Para que estos tres grupos sean adimensionales, las variables, deben elevarse a cierta potencia así:

$$\pi_1 = D^a \nu^b \rho^c \Delta P^1 \quad (1.39)$$

$$\pi_2 = D^d \nu^f \rho^g L^1 \quad (1.40)$$

$$\pi_3 = D^h \nu^i \rho^j \eta^1 \quad (1.41)$$

Para la evaluación de c/u de los exponentes, se reemplaza las magnitudes por sus respectivas dimensiones y teniendo que las dimensiones de los grupos π son: M.L.t. Tenemos: Para el grupo 1.

$$\pi_1 = M^0 L^0 t^0 = L^a \left(\frac{L}{t}\right)^b \left(\frac{M}{L^3}\right)^c \left(\frac{M}{Lt^2}\right)^1 \quad (1.42)$$

Agrupando por dimensiones se tiene:

$$M^0 L^0 t^0 = L^{a+b-3c-1} t^{-b-2} M^{c+1} \quad (1.43)$$

Igualando exponentes.

$$\text{Exponentes de M: } 0 = c + 1$$

$$\text{Exponentes de L: } 0 = a + b - 3c - 1$$

$$\text{Exponentes de t: } 0 = -b - 2$$

Resolviendo este sistema de ecuaciones simultaneas tenemos:

$$a = 0 \quad b = -2 \quad c = -1$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación 1.39

$$\pi_1 = D^0 \nu^{-2} \rho^{-1} \Delta p^1$$

$$\pi_1 = \frac{\Delta p^1}{\nu^2 \rho^1} = \text{Número de Euler.} \quad (1.44)$$

Para el grupo 2.

$$\pi_2 = M^0 L^0 t^0 = L^d \left(\frac{L}{t}\right)^e \left(\frac{M}{L^3}\right)^f L^1 \quad (1.45)$$

Agrupando por dimensiones se tiene:

$$M^0 L^0 t^0 = L^{d+e-3f+1} t^{-e} M^f \quad (1.46)$$

Igualando exponentes:

Exponentes de M: $0 = f$

Exponentes de L: $0 = d + e - 3f + 1$

Exponentes de t: $0 = -e$

Resolviendo este sistema de ecuaciones simultáneas tenemos:

$d = -1$; $e = 0$; $f = 0$.

Sustituyendo estos valores en la ecuación 1.40 se tiene:

$$\pi_2 = D^{-1} \nu^0 \rho^0 L^1 = \frac{L}{D}$$

$$\pi_2 = \frac{L}{D} \quad (1.47)$$

Repitiendo este mismo procedimiento para el grupo 3. Obtenemos el Número de Reynolds.

$$\pi_3 = \frac{D\nu\rho}{\eta} = N_{Re} = \text{Número de Reynolds} \quad (1.48)$$

Sustituyendo los valores obtenidos para π dados por las ecuaciones 1.44, 1.45 y 1.46 en la ecuación 1.35 tenemos:

$$\frac{\Delta p}{\nu^2 \rho} = f \left(\frac{L}{D}, \frac{D\nu\rho}{\eta} \right) \quad (1.49)$$

Nota:

En las soluciones parciales dadas por los métodos de Rayleigh y Buckingham ecuaciones 1.26 y 1.47 respectivamente se observa que ambos llevan a la obtención de los mismos grupos adimensionales.

EJERCICIOS PARA RESOLVER

1. Demuestre, que las ecuaciones 1.26 y 1.34 obtenidas mediante la técnica del análisis dimensional, son dimensionalmente homogéneas y que cada grupo obtenido mediante esta técnica, carece de dimensiones.
2. Con un ejemplo numérico, demuestre que el número de Reynolds, es independiente del sistema de unidades.
3. Determinar una ecuación, para determinar el flujo volumétrico de un líquido viscoso que fluye por un tubo de sección circular. Suponga, que el conjunto de variables que afectan al sistema son las siguientes: longitud y diámetro del tubo; gradiente de presión entre los extremos del tubo y la viscosidad del líquido.
4. Calcular el número de Reynolds, para el agua que fluye de un tubo de dos pulgadas de diámetro a 7 pies/seg, usando unidades consistentes del sistema métrico, del sistema ingenieril y del sistema internacional.
5. Un fármaco sólido de densidad 2.70 g / mL , está suspendido en agua a $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Si el tamaño más grande de la distribución de tamaño de partículas es de 865 micras y estas, sedimentan a una velocidad de 230 micras/ seg. ¿Será esta determinación confiable?.
6. Utilizando el método de Rayleigh, obtenga por lo menos cuatro soluciones posibles del ejemplo 1.6 desarrollado anteriormente. Compare, estas cuatro soluciones posibles y compruebe, que la ecuación obtenida es dimensionalmente homogénea.
7. Utilizando el método de Rayleigh, obtenga por lo menos cinco soluciones posibles del ejemplo 1.7 desarrollo anteriormente. Compare, estas cinco soluciones posibles y compruebe que cada uno de los grupos de variables obtenidos carece de dimensiones.
8. Utilizando el método de Buckingham, obtenga por lo menos dos soluciones posibles del ejemplo 1.7 desarrollo anteriormente. Compare, estas dos soluciones posibles y compruebe que cada uno de los grupos de variables obtenidos carece de dimensiones.

9. Utilizando el método de Rayleigh, obtenga por lo menos tres soluciones posibles del ejemplo 1.7 desarrollado anteriormente. Compare, estas tres soluciones posibles y compruebe que cada uno de los grupos de variables obtenidos carece de dimensiones.
10. Por una tubería con un diámetro interno de 2.067 pulgadas fluye agua a 300 K con una velocidad de 10 galones/min. Calcule el número de Reynolds usando unidades del sistema inglés y del SI.
11. La leche entera a 293 K, densidad de 1030 kg/m^3 y viscosidad de 2.12 cp. pasa con un flujo másico de 0.605 kg/s por una tubería de vidrio de 63.5 mm de diámetro interno. Calcule: El número de Reynolds, la velocidad de flujo necesaria para un número de Reynolds de 2100 y la velocidad.
12. Se está bombeando aceite dentro de una tubería de 10 mm de diámetro interno con un número de Reynolds de 2100. La densidad del aceite es de 855 kg/m^3 y su viscosidad es de 0.021 Pa.s. ¿Cual es la velocidad en la tubería?. Se desea conservar el mismo número de Reynolds y la misma velocidad calculada anteriormente. Usando un segundo fluido con una densidad de 925 kg/m^3 y una viscosidad de 0.015 Pa.s. ¿Cual debe ser el diámetro de la tubería que se use?.
13. Resuelva el problema 11, si el fluido es un jarabe medicamentoso de densidad 1.20 g/cm^3 y viscosidad de 60 cp.
14. Resuelva el problema 12, para los siguiente fluidos: jarabe simple y solución de sorbitol USP.

SISTEMAS DE UNIDADES Y SU MANIPULACION

Con frecuencia, los profesionales de las diferentes áreas del conocimiento tales como: el Farmacéutico, el Químico, el Físico, el Ingeniero, el Médico, etc. acuden conciente o inconscientemente a un sistema de unidades para realizar algunos cálculos correspondientes a su quehacer profesional y/o comercial.

El profesional Farmacéutico, por ejemplo, generalmente está consultando, está haciendo mediciones científicas y cálculos sobre propiedades físicas, químicas, fisicoquímicas de los materiales de proceso, sobre el conjunto de variables que afectan al proceso, así como también, consulta y obtiene modelos empíricos que describan el comportamiento de un fenómeno o sistema. La información obtenida por este profesional por lo general, viene expresada en cualquier sistema de unidades.

Las mediciones científicas y los cálculos, se efectúan utilizando cantidades cuyas magnitudes se expresan en términos de unidades de medidas para las diferentes dimensiones convencionales. La masa de un lote de tabletas podría reportarse en kilogramos, en libras; el volumen de un lote de una forma farmacéutica líquida podría reportarse en litros, en galones, en metros cúbicos; el flujo de un fluido de arrastre en un cromatógrafo o el flujo de aire a un secador puede expresarse en mL/s, ft^3 /minutos, etc. Debido a estos hechos, la asociación de dimensiones con cantidades físicas es indispensable, para eliminar las ambigüedades que podrían presentarse en la comunicación y en el uso de estas cantidades. Por todo anterior, se hace necesario el conocimiento de las definiciones de las unidades convencionales (patrones), los diferentes sistemas de unidades, los factores de conversión y su manipulación.

Unidad de medición. Una unidad de medición es simplemente aquella que está definida por una magnitud y el nombre de la unidad que es usada para su medición. Para que la unidad de medición cumpla su función, quienes la utilicen deberán contar con una definición común de la misma. Más aún, la definición deberá ser verificable mediante experimentos físicos estandarizados.

Unidades Básicas. Las unidades básicas para las dimensiones primarias (longitud, masa, tiempo temperatura), a continuación se definirán por la importancia que tienen ellas de intervenir generalmente en todo tipo de cálculo las unidades básicas que intervienen en todo tipo de cálculos.

La unidad de longitud, el metro (**m**). En 1960 fue redefinido como un múltiplo de la longitud de onda en el vacío de la línea espectral rojo-anaranjado del átomo de criptón 86. El metro es la longitud igual a 1 650 763.73 veces la longitud de onda en el vacío de la radiación correspondiente a la transición entre los niveles 2p₁₀ y 5d₅ del átomo de criptón-86.

La unidad de masa, el kilogramo (**kg**), es la masa del kilogramo prototipo internacional, que es un cilindro de platino e iridio, conservado en la Oficina Internacional de Pesos y Medidas de Sèvres.

El segundo (**s**) es la duración de 9 192 631 770 periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los niveles hiperfinos del estado basal del átomo de cesio-133.

La unidad de temperatura, el kelvin (**K**), es la fracción 1/273.16 de la temperatura termodinámica del punto triple del agua.

Unidades Múltiplos. Son aquellas, que son múltiplos o fracciones de las unidades básicas. Tales como el minuto, la hora y el milisegundo, son unidades múltiplos del segundo; el kilómetro, el centímetro, el milímetro son unidades múltiplos del metro.

Para estas unidades múltiplos, se usan internacionalmente los siguientes prefijos. Ver Cuadro II.

CUADRO II: Prefijos para Unidades Múltiplos y Submúltiplos.

PREFIJO	ABREVIATURA	FACTOR	PREFIJO	ABREVIATURA	FACTOR
Tera	T	10 ¹²	Deci	d	10 ⁻¹
Giga	G	10 ⁹	Centi	c	10 ⁻²
Mega	M	10 ⁶	Mili	m	10 ⁻³
Kilo	k	10 ³	Micro	μ	10 ⁻⁶
Hecto	h	10 ²	Nano	n	10 ⁻⁹

Estas unidades múltiplos, son definidas más bien por conveniencia que por necesidad, así: es más conveniente referirse a 50 toneladas que 50 000 000 gramos; 3 años que 94 608 000 segundos; 10 nanogramos que 0. 000 000 0001 gramos, etc.

Unidades Derivadas. Estas unidades se obtienen mediante una función de relación sencilla a partir de las unidades básicas. Estas, se pueden obtener de dos maneras. Multiplicando o dividiendo unidades básicas : Ej. m/s; kg/s; lbf.ft, etc. Haciendo equivalencia definida de unidades compuestas. Ej.

$$Pa = \frac{kg}{m.s^2}, atm = 14.7 \frac{lbf}{in^2}, Dy = g \frac{cm}{s^2}, etc$$

Manipulación. Es sumamente importante, tanto para el estudiante como para los profesionales de cualquier área del conocimiento que conozcan y manipulen el conjunto de unidades usadas para una dimensión. Las magnitudes correspondientes a dicha dimensión siempre deberán usarse para reportar valores. Las unidades deberán siempre mostrarse explícitamente para cada cantidad dimensional que intervenga en un cálculo o en alguna transacción de tipo comercial; también, como ayuda en la determinación de las unidades del resultado y en la verificación de la consistencia de las unidades que se usaron en los pasos intermedios del cálculo. Específicamente, la manipulación de unidades ocurre siguiendo las reglas dadas a continuación.

1. La suma o resta de cantidades que estén todas expresadas en las mismas unidades, produce un resultado expresado en dichas unidades. La suma resta de cantidades expresadas en unidades diferentes obviamente no tiene sentido.
2. La multiplicación o división de cantidades expresadas en unidades arbitrarias, produce un resultado cuyas unidades estarán determinadas por el producto o cociente de las unidades de dichas cantidades.
3. La división de cantidades expresadas en las mismas unidades produce como resultado una cantidad adimensional. Es decir, las unidades se cancelan entre sí.
4. El producto de cantidades expresadas en las mismas unidades da un resultado cuyas unidades corresponden a las unidades originales elevadas a la potencia apropiada.

SISTEMAS DE UNIDADES

Existen muchos sistemas de unidades para una misma dimensión, muchos de estos sistemas tienden a caer en decadencia y que fueron usados por la industria farmacéuticas en épocas pasadas.

Los sistemas de unidades mas comunes y ampliamente utilizados en la industria y en especial la farmacéutica, entre otros son los siguientes:

El Sistema Metro, Kilogramo, Segundo Abreviado **M.K.S.** Para este sistema, la unidad de longitud es el metro (**m**), la unidad de masa es kilogramo (**kg**), la unidad de tiempo es el segundo (**s**), la unidad de fuerza es el kilogramo fuerza (**kgf**).

El Sistema Centímetro, Gramo, Segundo. Abreviado **C.G.S.** Para este sistema la unidad de longitud es el centímetro (**cm**), la unidad de masa es el gramo (**g**), la unidad de tiempo es el segundo (**s**), la unidad de fuerza es la dina (**Dy**) y la unidad de energía como trabajo es el ergio (**Erg**).

El Sistema Inglés . Para este sistema, la unidad de longitud es el pie (**ft**), la unidad de masa el la libra (**lb**), la unidad de tiempo es el segundo (**s**), la unidad de fuerza es la libra fuerza (**lbf**) y la unidad de energía como trabajo es la libra fuerza pies (**lbf.ft**).

El sistema Internacional. Abreviado **S.I.** Este sistema, que viene siendo adoptado por toda la comunidad científica a partir de la décima primera conferencia general sobre pesas y medidas realizado en 1 960.

Para este sistema la unidad de longitud es el metro (**m**), la unidad de masa es kilogramo (**kg**), la unidad de tiempo es el segundo (**s**). En este sistema, hay unidades derivadas que poseen nombres específicos. Por ejemplo;

Newton, unidad de fuerza = **N**

Pascal, unidad de presión = **Pa**

Watt, unidad de potencia = **W**

Julio, unidad de energía = **J**

En el cuadro número III, se reportan los principales sistemas de unidades utilizadas hoy en día por la comunidad científica y por la comunidad comercial.

En dicha tabla, se observan los símbolos utilizados para las unidades de cada uno de los diferentes sistemas.

Los símbolos para las unidades no toman la forma plural, pero sí sus nombres completos. El cuadro III, es el resultado de reemplazar en los sistemas dimensionales dados en el cuadro I, las dimensiones primarias por las unidades definidas para cada sistema en particular. Así por ejemplo:

La dimensión fuerza viene definida para cualquier sistema absoluto por la siguiente ecuación dimensional: $\frac{ML}{t^2}$

Si se sustituye, cada una de estas dimensiones, por las unidades definidas para el sistema C. G. S. obtenemos la siguiente relación:

$$\frac{gcm}{s^2}$$

De igual manera, si esta misma relación dimensional la expresamos en unidades del sistema internacional obtendremos la relación:

$$\frac{kgm}{s^2}$$

Si la expresamos en unidades del sistema inglés obtendremos la siguiente relación:

$$\frac{lbpie}{s^2}$$

CUADRO III: Sistemas de Unidades.

SISTEMAS DE UNIDADES							
		ABSOLUTO			GRAVITACIONAL		
MAGNITUD	SIMBOLO	MÉTRICO	INGLES	INTERNAC	MÉTRICO	INGLES	INTERNAC
MASA	m	g	lb	kg	$\frac{Dy.s^2}{cm}$	$\frac{lb.fs^2}{ft}$	$\frac{N.s^2}{m}$
LONGITUD	l	cm	ft	m	cm	ft	m
TIEMPO	t	s	s	s	s	s	s
TEMPERAT	T	°C	°F	K	°C	°F	K
FUERZA	f	$\frac{g.cm}{s^2}$	$\frac{lb.ft}{s^2}$	$\frac{kg.m}{s^2}$	Dy	lbf	N
ENERGÍA	E	$\frac{g.cm^2}{s^2}$	$\frac{lb.ft^2}{s^2}$	$\frac{kg.m^2}{s^2}$	Dy.cm =Erg.	lbf.ft	N.m = J
PRESIÓN	p	$\frac{g}{cm.s^2}$	$\frac{lb}{ft.s^2}$	$\frac{kg}{m.s^2}$	$\frac{Dy}{cm^2}$	$\frac{lbf}{ft^2}$	$\frac{N}{m^2} = Pa$
DENSIDAD	ρ	$\frac{g}{cm^3}$	$\frac{lb}{ft^3}$	$\frac{kg}{m^3}$	$\frac{Dy.s}{cm^4}$	$\frac{lbf.s}{ft^4}$	$\frac{N.s}{m^4}$
VISCOSIDAD	η	$\frac{g}{cm.s}$	$\frac{lb}{ft.s}$	$\frac{kg}{m.s}$	$\frac{Dy.s}{cm^2}$	$\frac{lbf.s}{ft^2}$	$\frac{N.s}{m^2}$
C.CALORÍF	C_p	$\frac{cm^2}{s.^{\circ}C}$	$\frac{ft^2}{s.^{\circ}F}$	$\frac{m^2}{s.K}$	$\frac{cm^2}{s.^{\circ}C}$	$\frac{ft^2}{s.^{\circ}F}$	$\frac{m^2}{s.K}$
POTENCIA	W	$\frac{g.cm^2}{s^3}$	$\frac{lft.ft^2}{s^3}$	$\frac{J}{s} = W$	$\frac{Dy.cm}{s}$	$\frac{lbf.ft}{s}$	$\frac{J}{s} = W$
TENSIÓN SUPERFICIAL	γ	$\frac{g}{s^2}$	$\frac{lb}{s^2}$	$\frac{kg}{s^2}$	$\frac{Dy}{cm}$	$\frac{lbf}{ft}$	$\frac{N}{m}$

Factores de Conversión.

En general, un factor de conversión puede ser definido como una relación igual a la unidad, obtenida a partir de una igualdad o equivalencia.

Los factores de conversión son debidos a la existencia de diferentes unidades para una misma dimensión, como puede observarse en los diferentes sistemas de unidades descritos anteriormente.

Estos factores de conversión son ampliamente utilizados por la comunidad científica, en especial por el Farmacéutico, el Ingeniero, el Ingeniero Químico, el Químico, profesionales, que en algún momento de su actividad tendrán que importar y/o exportar materias primas, productos terminados, materiales, equipos, bienes y servicios, etc. En general, estos factores, serán usados por todos aquellos profesionales de cualquier área del conocimiento que en cualquier espacio o tiempo de su vida tendrán que comprar o vender algún elemento o material relacionado con su actividad profesional, actividad científica o actividad comercial.

Por el conjunto de razones anotadas anteriormente, es importante que todos estos profesionales conozcan y manipulen algunos factores de conversión que le servirán de ayuda.

En el cuadro IV, se reportan algunos factores de Conversión para la Unidad de Longitud.

CUADRO IV: Factores de Conversión para la Unidad de Longitud

Una Unidad A = b Unidades B								
A	B							
Nombre	Símbolo	nm	μm	mm	cm	dm	m	km
Angstrom	\AA	10^{-1}	10^{-4}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-13}
nanómetro (milimicra)	$nm(m\mu)$	1	10^{-3}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-12}
micrómetro (micra)	$\mu m(\mu)$	10^3	1	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-9}
milímetro	mm	10^6	10^3	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}
centímetro	cm	10^7	10^4	10	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-5}
decímetro	dm	10^8	10^5	10^2	10	1	10^{-1}	10^{-4}
metro	m	10^9	10^6	10^3	10^2	10	1	10^{-3}
decámetro	dam	10^{10}	10^7	10^4	10^3	10^2	10	10^{-2}
hectómetro	hm	10^{11}	10^8	10^5	10^4	10^3	10^2	10^{-1}
kilómetro	km	10^{12}	10^9	10^6	10^5	10^4	10^3	1

En el cuadro V, se encuentran reportados algunos factores de conversión para la unidad de masa.

CUADRO V: Factores de Conversión para la Unidad de Masa

Una Unidad A = b Unidades B									
A	B								
Nombre	Símbolo	ag	fg	pg	ng	μ g	mg	g	kg
attogramo	<i>ag</i>	1	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}	10^{-18}	10^{-21}
femtogramo	<i>fg</i>	10^3	1	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}	10^{-18}
picogramo	<i>pg</i>	10^6	10^3	1	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}
nanogramo	<i>ng</i>	10^9	10^6	10^3	1	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}
microgramo	<i>μg</i>	10^{12}	10^9	10^6	10^3	1	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}
miligramo	<i>mg</i>	10^{15}	10^{12}	10^9	10^6	10^3	1	10^{-3}	10^{-6}
gramo	<i>g</i>	10^{18}	10^{15}	10^{12}	10^9	10^6	10^3	1	10^{-3}
kilogramo	<i>kg</i>	10^{21}	10^{18}	10^{15}	10^{12}	10^9	10^6	10^3	1
tonelada	<i>t</i>	10^{24}	10^{21}	10^{18}	10^{15}	10^{12}	10^9	10^6	10^3

En el cuadro VI, se encuentran reportados algunos factores de conversión para la magnitud volumen en diferentes sistemas de unidades.

CUADRO VI: Factores de Conversión para la Magnitud de Volumen

Una Unidad A = b Unidades B							
A	B						
Nombre	Símbolo	m^3	pie^3	pul^3	gal	L	cm^3
M. Cúbico	m^3	1	35.314	6.1×10^4	264.2	10^3	10^6
P. Cúbico	pie^3	2.8317×10^{-2}	1	1727.36	7.481	28.317	28317
Pul. Cúbica	pul^3	1.64×10^{-5}	5.71×10^{-4}	1	4.33×10^{-3}	1.64×10^{-2}	16.4
Galón	gal	3.785×10^{-3}	0.1336	230.88	1	3.785	3785
Litro	L	0.001	35.314×10^{-3}	61.02	0.2642	1	10^3
C. Cúbico	cm^3	10^{-6}	35.314×10^{-6}	61.02×10^{-3}	2.642×10^{-4}	10^{-3}	1

En el cuadro VII, se encuentran reportados algunos de los factores de conversión para diferentes unidades derivadas más comúnmente utilizadas en la resolución de problemas de balances de masas y balances de energía.

CUADRO VII: Factores de Conversión de Unidades

VALORES EQUIVALENTES	
MASA	$1kg = 1000g = 0.001ton.métrica = 2.20462lb = 35.27392oz.$ $1Lb = 16oz. = 5x10^{-4}ton = 453.593g = 0.453593kg.$
LONGITUD	$1m = 100cm = 1000mm = 10^6\mu = 10^{10}(\text{Å}) = 39.37pul = 3.2808pies$ $1pie = 12pulg. = 0.3038m = 30.48cm$
VOLUMEN	$1m^3 = 1000L = 10^6cm^3 = 10^6mL = 35.3145Pie^3$ $= 220.83galones imperiales = 264.17galones = 1056.68quarts$ $1pie^3 = 1728pulg.^3 = 7.4805galones = 0.028317m^3 = 28.317L$
FUERZA	$1N = \frac{1kg.m}{s^2} = 10^5Dy = 10^5\frac{g.cm}{s^2} = 0.2248lbf$ $1lbf = \frac{32.174lb.pie}{s^2} = 4.4482N = 4.4482x10^5Dy$
PRESIÓN	$1atm. = 1.01325x10^5\frac{N}{m^2}(Pa) = 1.01325bares = 1.01325x10^6\frac{Dy}{cm^2}$ $= 760mmHg = 14.696\frac{lbf}{pulg.^2}(psi) = 33.9pie.agua = 10.333m.agua$
TRABAJO	$1J = 1N.m = 10^7erg = 10^7Dy.cm = 2.778x10^{-7}kW.hr. = 0.2333901cal$ $= 0.7376lbf.pie = 9.486x10^{-4}Btu$
ENERGÍA	$1Btu = 251.98cal = 777.97lbf.ft = 10.409L.atm = 1054.8joules$ $= 0.293watt.Hr$
POTENCIA	$1W = 1\frac{J}{s} = 0.23901\frac{cal}{s} = 0.7376\frac{lbf.pie}{s} = 14.340\frac{cal}{min}$ $= 9.486x10^{-4}\frac{Btu}{s} = 1.34x10^{-3}hp$

En el cuadro VIII, se presentan las diferentes escalas termométricas más usadas y usos respectivas equivalencias.

CUADRO VIII: Escalas de Temperaturas y Equivalencias

	Celsius	Fahrenheit	Kelvin	Rankine
Punto de Ebullición N. del agua	100°C	212°F	373.5 K	671.17°R
Punto de Fusión N. del hielo	0°C	32°F	273.15 K	491.7°R
Cero Absoluto	-273.15°C	-459.7°F	0 K	0°R

Las siguientes ecuaciones son generalmente utilizadas para obtener valores equivalentes de temperatura de una escala a otra.

$$T \text{ (K)} = T \text{ (°C)} + 273.16$$

$$T \text{ (°R)} = T \text{ (°F)} + 459.69$$

$$T \text{ (°F)} = 1.8 T \text{ (°C)} + 32$$

En los casos, en que por definición intervienen incrementos de temperaturas (ΔT) deben utilizarse las siguiente equivalencias, obtenidas a partir de la diferencia entre el punto de ebullición del agua y el punto de fusión del hielo a 1 atm para las diferentes escalas de temperaturas (ver cuadro VIII).

$$1.8\Delta T \text{ (°F)} = \Delta T \text{ (°C)}$$

$$1.8\Delta T \text{ (°R)} = \Delta T \text{ (K)}$$

$$\Delta T \text{ (°F)} = \Delta T \text{ (°R)}$$

$$\Delta T \text{ (°C)} = \Delta T \text{ (K)}$$

Estas igualdades o equivalencias, dan origen a factores de conversión que deben ser utilizados entre otras: en capacidad calorífica a presión y a volumen constante, conductividad térmica, coeficiente de transferencia de calor, etc.

Algunos factores de conversión tienen abreviaturas especiales entre unos, podemos citar los factores **J** y g_c . Las unidades correspondientes a estos factores de conversión dependen del sistema que se este considerando.

De esta manera, el factor g_c en el sistema internacional y en el sistema M.K.S toma la siguiente forma:

$$g_c = \frac{kg.m}{N.s^2}$$

En estos sistemas la fuerza esta definida, como la fuerza en **Newton**, que hay que aplicarle a una masa de un **kilogramo** para que adquiriera una aceleración de $1 \frac{m}{s^2}$

g_c , en el sistema inglés toma la siguiente forma:

$g_c = \frac{32.174lb.ft}{Lbf.s^2}$. En este sistema la fuerza esta definida como la fuerza en **Libra fuerza**, que hay que aplicarle a una masa de una **libra** para que adquiriera la aceleración de la gravedad ($32.174 \frac{ft}{s^2}$).

g_c , en el sistema C. G. S. toma la siguiente forma:

$g_c = \frac{g.cm}{Dy.s^2}$, la fuerza en este sistema está definida como la fuerza en **Dinas**, que hay que aplicarle a una masa de un **gramo** para que adquiriera la aceleración de $1 \frac{cm}{s^2}$.

En general, este factor tambien puede obtenerse a partir de la segunda ley de Newton, la cual dice, que la fuerza es proporcional al producto de la masa por la aceleración. La constante de proporcionalidad de esta segunda ley, es el factor de conversión conocido como g_c cuyas unidades, dependen del sistema que se este considerando como se expreso anteriormente.

Este factor, convierte la masa a fuerza y la fuerza a masa.

El factor de conversión **J**, convierte energía mecánica en calor y viceversa. Este factor, toma las siguientes formas:

$$J = \frac{Dy.cm}{joule}; \quad J = \frac{N.m}{0.239Cal}; \quad J = \frac{778lb.ft}{Btu}$$

Además, de los factores de conversión condensados en el cuadro IV, hay muchos otros que son de interés, entre los cuales tenemos:

Viscosidad.

$$1 \text{ Centipoise} = 0.01 \text{ poise} = 0.01 \frac{g}{cm.s} = 0.000672 \frac{lb}{ft.s} = 2.42 \frac{lb}{pie.hr}$$

Constante de los gases ideales.

$$1.987 \frac{Btu}{lbmol.R} = 1.987 \frac{pie^3}{lbmol.K} = 1.987 \frac{cal}{gmol.K} = 0.7302 \frac{pie^3.atm}{lbmol.R} = 82.057 \frac{atm.cm^3}{gmol.K}$$

Relaciones como la dosis, expresada como mg. de un fármaco por kg. de peso corporal, los porcentajes; peso a volumen, volumen a volumen, peso a peso y las fracciones son usadas como factores de conversión.

Otro factor de conversión muy importante usado generalmente en el balance de procesos unitarios, es el que se obtiene a partir de la definición de mol es una cantidad de una entidad química definida, cuya masa en gramos es numéricamente igual a su peso molecular. Por ejemplo, un mol de agua pesa 18 gramos.

De igual manera, se pueden definir una libra mol, un kilogramo mol, una tonelada mol, etc.

Ejemplos de los usos de los factores de conversión.

Ejemplo 1.8: Expresar la constante de los gases ideales $R = 0.08205 \frac{L.atm}{mol.K}$ en unidades del sistema internacional.

Utilizando los factores de conversión dados en el cuadro IV tenemos:

$$0.08205 \frac{L.atm}{mol.K} = 0.08205 \frac{L.atm}{mol.K} \times \frac{1m^3}{1000L} \times \frac{1.0135 \times 10^5 Pa}{atm} \times \frac{m^3.Pa}{mol.K} = R$$

Ejemplo 1.9: Convertir 25 L.atm. a Btu, usando los siguiente factores de conversión: 1 atm. = 14.7 psi; 1pie = 12 pulgadas = 30.48 cm; 1 L = 1000 cm^3 ; 1 Btu = 778 lbf. pie

$$25L.atm = 25L.atm \times \frac{1000cm^3}{L} \times \frac{1pie^3}{30.48^3 cm^3} \times \frac{14.7lbf}{atm.pulg^2} \times \frac{144pulg^2}{pie^2} \times \frac{1Btu}{778lbf.pie}$$

$$25 L.atm = 2.52 Btu.$$

En general, para realizar conversión entre unidades de los diferentes sistemas, se recomienda la siguiente secuencia:

- Identificar el sistema de unidades a donde se quiere llegar y escribir las unidades correspondientes.
- Elegir los factores de conversión que relacionen las unidades del sistema de partida con las unidades del sistema de llegada. Esta elección se debe hacer también para cada uno de los pasos intermedios si los hay.
- Hacer una igualdad con la cantidad de partida con sus respectivas unidades.
- Multiplicar el miembro derecho de la igualdad por el factor o factores de conversión correspondiente, teniendo en cuenta que en el denominador de dicho factor debe aparecer las unidades que se quieren eliminar. Simplificar el sistema.
- Reunir todos los términos numéricos y a su lado colocar las unidades. Realizar las operaciones correspondientes

EJERCICIOS PARA RESOLVER

Sumar:

- 173 N.m + 100 lbf. pie + 100 Erg. + 850 cal + 1250 Btu
- 10 atm + 80 bares + 185 psi.
- 40 N + 150 Dy + 22.4 lbf
- $240 \frac{\text{cal}}{\text{min}} + 240 \frac{\text{Btu}}{\text{hr}} + 240 \frac{\text{lbf}\cdot\text{ft}}{\text{hr}} + 10\text{hp}$
- La dureza promedio de un lote de tableta de fenobarbital es de 5.0 kgf/cm². ¿Cual será su dureza promedio en psi, en Pa, en atm y en Dy/cm²?
- ¿A que ritmo, debe entregar energía una bomba a un jarabe de densidad relativa 1.225, para que circule por una tubería de 0.5 pulgadas de diámetro interno y sea utilizado por una maquina llenadora que opera a razón de 120 frascos de 120 mL por minuto?.
- Cuanta energía, hay que suministrarle a 40 galones de agua, para elevar su temperatura de 12 °C a 82 °C. Averiguar, cuanto vale un Kwh. y calcule, el costo aproximado de esta operación unitaria.
$$C_p = 75.4 \frac{J}{\text{mol}\cdot\text{C}}$$
- Usando factores de conversión primarios, convierta un L atm a julios, a libra fuerza.pie, a kilovatios.horas y a ergios.
- Expresa la viscosidad del jarabe USP en unidades del sistema inglés, en unidades del sistema internacional absoluto y gravitacional.
- Si el jarabe del problema 6 tiene una viscosidad de 9.10 cps. Diga Ud., en que régimen sé esta envasando.

CAPITULO II

PROCESOS

VARIABLES DE PROCESOS

PROCESOS

Introducción:

El **Químico Farmacéutico**, durante el ejercicio profesional en la industria Farmacéutica Nacional o Transnacional, tiene que diseñar, desarrollar, realizar y controlar los procesos farmacéuticos que llevan, a la obtención de un producto medicamentoso, un producto cosmético o un producto alimenticio que cumpla con las normas o especificaciones para estos productos.

Durante las primeras etapas del desarrollo de los productos antes mencionados, el Farmacéutico de Proceso tiene que elegir algunos auxiliares de formulación, que cumpla una función de adecuación determinada y en especial, que dichos auxiliares de formulación tengan poca o nada de interacción con el eje central de la formulación; que en el caso de productos medicamentosos, es el Fármaco.

Escogidos estos auxiliares de formulación, según el tipo de producto a desarrollar, el Químico Farmacéutico, tendrá, que especificar cada una de las operaciones así como también el conjunto de variables que lo afectan. Todo lo anterior, con el fin de que el eje central de la formulación, al igual que cada uno de los auxiliares de formulación no sufra cambios de tipo químico o de tipo microbiológico.

Todo lo descrito anteriormente, no se podrá realizar sino se cuenta con el equipo necesario para la ejecución de cada una de las operaciones que componen el proceso de fabricación de estos productos.

El equipo necesario para el desarrollo de estos procesos, lo puede conseguir en plaza, importado y si no, le tocaría colaborar en el diseño del equipo; según el conjunto de especificaciones del producto, ritmo de producción, tamaño de los lotes y las variables que puedan influir durante el desarrollo del proceso.

Los procesos más comunes que generalmente el **Químico Farmacéutico** desarrolla y controla en la industria farmacéutica entre otros, se pueden citar:

Los procesos de fabricación de formas farmacéuticas sólidas, entre los cuales podemos citar: el proceso de fabricación de comprimidos, el proceso de fabricación de grageas, el proceso de fabricación de granulados efervescentes y no efervescentes, el proceso de fabricación de formas farmacéuticas estériles, etc.

Los procesos de fabricación de formas farmacéuticas líquidas homogéneas entre otros, se pueden citar: el proceso de fabricación de soluciones estériles y no estériles y entre estas últimas se pueden citar: el proceso de fabricación de jarabes, el proceso de fabricación de elixires, el proceso de fabricación de soluciones para uso externo, etc.

Los procesos de fabricación de sistemas heterodispersos; entre los cuales, se pueden citar: el proceso de elaboración de emulsiones medicamentosas, el proceso de elaboración de emulsiones cosméticas, el proceso de fabricación de suspensiones estériles, el proceso de elaboración de suspensiones no estériles, etc.

Los procesos de fabricación de semisólidos, que entre ellos podemos mencionar: el proceso de fabricación de supositorios, el proceso de fabricación de labiales, etc. A todos estos procesos, hay que agregarle, el proceso de fabricación de aerosoles.

Debido a esta gran variedad de procesos farmacéuticos, cuyo único fin, es obtener un producto que cumpla con su función terapéutica, con su función cosmética, etc. y debido al hecho de que todos los procesos, están asociados a un producto en particular y a la complejidad de su realización, es mucho más fácil estudiar e investigar los principios básicos o fundamentales que gobiernan las diferentes

operaciones que son comunes a estos procesos, cuyo conocimiento, llevará al Químico Farmacéutico a su aplicación lógica en cada uno de los procesos en donde se requiera la operación y que debe estar de acuerdo con las especificaciones dadas para el producto.

Definiciones y Marco Conceptual:

Procesos

Un proceso puede ser cualquier serie o conjunto de pasos (operaciones), que incluyan cambios en la composición química o bien cambios físicos, cambios químicos o cambios biológicos en el material que se prepara, se procesa o se purifica.

También puede considerarse como proceso, a una operación o una serie de operaciones dispuestas en un orden lógico, el cual conduce a un cambio físico o un cambio químico en un material o mezcla de materiales.

Operación Unitaria

En general, la operación unitaria, se ha restringido a aquellas operaciones en las cuales esencialmente se producen cambios físicas en los materiales de proceso. Por ejemplo: La operación de molienda, la operación de granulación, la operación de mezcla, la operación de compresión, la operación de secado, etc.

La comprensión de los principios físicos básicos de la operación así, como la formulación de ellos mediante modelos matemáticos son los primeros requisitos para la aplicación de estos principios a las operaciones unitarias comunes a muchos procesos. Estas operaciones unitarias, tienen ciertos principios básicos o fundamentales que le son comunes, por ejemplo:

Los principios básicos o fundamentales de los mecanismos de difusión o transferencia de masa, se presentan en la operación de secado, en la absorción, destilación, cristalización, solubilización, separación, etc.

Los principios básicos o fundamentales de los mecanismos de la transferencia de calor, se presentan en las operaciones de secado, destilación, evaporación calentamiento, etc.

Los principios básicos de la transferencia de la cantidad de movimiento es común a las siguientes operaciones: agitación, mezcla, transporte de fluidos, etc.

Las operaciones unitarias estudian principalmente la transferencia y los cambios de energía, la transferencia de masa y los cambios en los materiales que se llevan a cabo por medios físicos, etc.

Corrientes

Se les denomina **corriente**, a los materiales que entran o salen de una unidad de proceso o de un proceso. Las corrientes que entran a una unidad de proceso o que entran a un proceso se les conoce como corriente de **alimentación**. Las corrientes que salen o abandonan una unidad de proceso o un proceso, se les conoce como corriente **producto**.

Unidad de Proceso

Se llama unidad de proceso (**U.P**) al equipo, en el cual se produce o se realiza una transformación de tipo físico o químico del material o mezcla de materiales. Una unidad de proceso, puede ser tan simple, como el vaso de precipitados o una copa, en donde se puede llevar a cabo entre otros, un proceso de elaboración de soluciones de interés farmacéutico y no farmacéutico a pequeña escala. Una unidad de proceso, puede ser tan compleja, como una maquina tableteadora en la cual se lleva a cabo la operación unitaria de compresión de un granulado y más compleja aun, como un reactor en donde se llevan a cabo transformaciones de tipo químico.

Proceso Unitario

Un proceso unitario, puede considerarse como aquel, que produce esencialmente un cambio en la **identidad química** de un material o mezcla de materiales. Este cambio en la identidad química de los materiales, produce también, un cambio en las propiedades químicas, física y fisicoquímicas de dichos materiales.

Las reacciones químicas de oxidación, reducción, hidrólisis, etc. que el Químico Farmacéutico, controla en el diseño de medicamentos y en especial en el diseño, de formas farmacéutica líquidas y que pueden presentarse durante su elaboración o durante el almacenamiento del producto terminado, son ejemplos de procesos unitarios.

Los procesos, en general puede clasificarse:

Procesos Intermitentes

Los procesos intermitentes, son aquellos en los cuales se carga la unidad de proceso de una sola vez y se retira el producto después de cierto intervalo de tiempo. Estos procesos, se caracterizan porque durante el tiempo que dure su realización no hay intercambio de masas entre las unidades de proceso y sus alrededores; pero si, puede haber intercambio de energía. La caracterización de estos procesos, corresponde en fisicoquímica a los llamados sistemas cerrados.

A estos procesos, también se les conoce generalmente con el nombre de procesos en lotes. Como ejemplo de estos procesos intermitentes, entre otros, se pueden citar: el proceso de elaboración de formas farmacéuticas líquidas estériles y no estériles y el proceso de elaboración de formas farmacéuticas sólidas, etc.

Procesos continuos

Son aquellos procesos, en los cuales, las corrientes de entradas o corrientes de alimentación y las corrientes de salida o corrientes de producto fluyen continuamente durante todo el tiempo que dure su realización. Estos procesos, se caracterizan por que, durante el tiempo que dure dicho proceso, hay intercambio de masas y de energía entre las unidades de procesos y sus alrededores. La caracterización de estos procesos, corresponde en fisicoquímica a los llamados sistemas abiertos.

Como ejemplo de estos procesos continuos, se pueden considerar: la alimentación, compresión y salida del comprimido de una maquina tableteadora. Bombeado de un fluido, tal como una forma farmacéutica líquida por una tubería desde su sitio de elaboración hasta la zona de envase. También, puede considerarse dentro de estos procesos; la absorción, distribución y eliminación de los fármacos desde que entran al organismo en una forma farmacéutica determinada hasta cuando salen eliminados intactos o biotransformados.

Dentro de estos procesos continuos, merece especial mención, la determinación de los fármacos en una forma farmacéutica determinada.

Procesos Semi-intermitentes

Son aquellos procesos en los cuales las entradas o corrientes de alimentación a las unidades de procesos son casi instantáneas; mientras que, la corriente salida o corriente producto es continua o viceversa. Estos procesos se caracterizan, porque durante el tiempo que dure su realización, puede haber intercambio de masas y energía entre las unidades de procesos y sus alrededores.

Se pueden considerar como ejemplos de estos procesos, entre otros los siguientes: elaboración del jarabe USP, en el cual, se coloca el agua en la unidad de proceso y la sacarosa se adiciona lentamente y con agitación y al final, se saca todo el producto o corriente jarabe; la emulsificación, la salida de un gas del recipiente que lo contiene; la alimentación de todo ser vivo, la esterilización de formas farmacéuticas líquidas; la liofilización, etc.

Los procesos, también se pueden clasificar de la siguiente manera:

Procesos en Régimen Permanente

Los procesos en régimen permanente son aquellos en los cuales, las variables que regulan el proceso permanecen constantes o tienen pequeñas fluctuaciones alrededor de un valor central o promedio durante el tiempo de su realización.

Procesos en régimen Transitorio o Transciente

Son aquellos procesos en los cuales hay un cambio por los menos en una de las variables que controlan el proceso durante el tiempo de su realización. Un ejemplo de estos, es la elaboración del jarabe USP, en el cual la variable que cambia durante su elaboración es la composición; también puede considerarse, como ejemplo de estos procesos la elaboración de mezclas hidro-alcohólicas, en el cual las variables que cambian durante su realización son: la composición y la temperatura.

VARIABLES DE PROCESOS

Durante el proceso de desarrollo del diseño de un proceso productivo; durante las primeras etapas del diseño de un producto en especial, del diseño de productos medicamentosos; durante el desarrollo de una técnica analítica para determinar cualitativa o cuantitativamente un fármaco puro, un fármaco en un producto medicamentoso o un fármaco en un fluido biológico; durante el diseño de un ensayo de estabilidad de un fármaco en solución o de un fármaco en cualquier forma farmacéutica, etc. El profesional o el conjunto de profesionales responsables de las acciones descritas anteriormente y en especial el profesional Químico Farmacéutico tienen que tener en cuenta, todos y cada uno de los factores (variables) que pueden ser controlados y no controlados y que en un momento dado pueden afectar al proceso productivo, al producto terminados y a la técnica analítica.

Dentro de estas variables, entre otras, se pueden citar:

Masa y Volumen

Este par de variables, afectan la capacidad de producción de una planta y el tamaño de cada una de las unidades de proceso. Estas variables pueden ser intercambiadas entre sí por medio la densidad, que puede ser considerada como un factor de conversión de masa a volumen y viceversa.

El volumen, se ve afectado por la variable temperatura, esta variable al igual que la presión es muy relevante en el manejo de gases y vapores; para sólidos y líquidos estas tienen poca o nada de influencia sobre el volumen que ellos ocupan.

Densidad

La densidad de los materiales, es una de las variables, que al igual que la masa y el volumen, debe tenerse en cuenta en el diseño y construcción de cada una de las unidades de proceso, a sí como también en la realización de una o varias operaciones de un proceso productivo. Por ejemplo, esta variable es sumamente importante en la operación de mezclas sólido - sólido o mezclas líquido - líquido.

La densidad para sólidos y fluidos no compresibles se ve poco o nada afectada por presiones y temperaturas bajas. Lo que equivale a decir, que la densidad para estos materiales y bajo estas condiciones puede considerarse independiente de este par de variables. Entre los fluidos no compresibles, merecen especial mención: el agua, el propileno glicol, la glicerina, la solución de sorbitol USP, el jarabe USP, etc.

Para fluidos compresibles, esta propiedad cambia con cambios en la presión. Entre estos fluidos, se pueden considerar: los gases y los vapores.

Densidad de Líquidos puros y de Sólidos. La densidad de estos materiales de proceso, en su forma general viene dada por la relación entre la masa y el volumen que ellos ocupan.

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

Densidad de Mezclas. La ecuación 2.1, cuando se trata de mezclas de líquidos miscibles o de soluciones sólido - líquido toma la siguiente forma:

$$\rho_M = \frac{m_M}{V_M} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{\sum_{i=1}^n V_i} = \frac{m_1 + m_2 + \cdots + m_i + \cdots + m_n}{V_1 + V_2 + \cdots + V_i + \cdots + V_n} \quad (2.2)$$

En esta ecuación:

m_M = masa de la mezcla.

V_M = volumen de la mezcla.

ρ_M = densidad de la mezcla.

m_i = masa del componente i ésimo de la mezcla

V_i = volumen del componente i ésimo de la mezcla

La ecuación 2.2, o ecuación expandida de la ecuación 2.1, se aplica cuando se conocen las masas y los volúmenes ocupado por cada uno de los componentes puros de la mezcla.

En la ecuación 2.2, se puede reemplazar, la masa de cada uno de los componentes por el volumen y la densidad de cada uno de ellos, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$\rho_M = \frac{\sum_{i=1}^n V_i x \rho_i}{\sum_{i=1}^n V_i} = \frac{V_1 x \rho_1 + V_2 x \rho_2 + \cdots + V_i x \rho_i + \cdots + V_n x \rho_n}{V_1 + V_2 + \cdots + V_i + \cdots + V_n} \quad (2.3)$$

La ecuación 2.3, se puede considerar como otra ecuación expandida de la ecuación 2.1, y puede ser aplicada cuando se conocen los volúmenes y las densidades de cada uno de los componentes puros de la mezcla.

En la ecuación 2.2, se puede reemplazar, el volumen de cada uno de los componentes por su equivalente masa sobre densidad, de esta manera, dicha ecuación toma la siguiente forma:

$$\rho_M = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\rho_i}} = \frac{m_1 + m_2 + \cdots + m_i + \cdots + m_n}{\frac{m_1}{\rho_1} + \frac{m_2}{\rho_2} + \cdots + \frac{m_i}{\rho_i} + \cdots + \frac{m_n}{\rho_n}} \quad (2.4)$$

La ecuación 2.4, al igual que todas las anteriores, es una ecuación expandida de la ecuación 2.1, y se puede aplicar cuando se conocen las masas y las densidades de cada uno de los componentes puros de la mezcla.

Las ecuaciones 2.2, 2.3 y 2.4, se pueden utilizar para calcular con una buena aproximación la densidad de soluciones de sólidos en líquidos y la densidad de mezclas de líquidos miscibles entre sí en todas las proporciones. Esta densidad, se puede calcular conociendo la masa, el volumen y la densidad de cada uno de los componentes puros.

Las densidades calculadas con las ecuaciones anteriores, son bastantes exactas cuando la suma de los volúmenes de los componentes puros resulta igual al volumen esperado. Como sucede con las soluciones de sólidos en líquidos

Con las mezclas de líquidos miscibles en todas las proporciones, el volumen obtenido a partir de la suma de los volúmenes de cada uno de los componentes puros, resulta menor que el volumen esperado, como sucede en las mezclas de alcohol y agua. La densidad calculada con las ecuaciones anteriores, es menor que la densidad obtenida experimentalmente. Esta situación es debida, a que la interacción producida por los puentes de hidrógeno entre el alcohol y el agua ocupan un volumen menor que el volumen esperado.

Razón por la cual, la densidad experimental es un poquito mayor que la densidad obtenida por una de las ecuaciones expandidas. Se espera, que las mezclas de polioles (propileno glicol, la glicerina, y algunos polietilenoglicoles) con el agua, presente este mismo comportamiento.

El siguiente grupo de ejemplos, ilustran la utilidad de estas ecuaciones.

Ejemplo 2.1: Se tiene una mezcla compuesta de 85 gramos de sacarosa de densidad $1.587 \frac{g}{cm^3}$ y peso molecular de 342.30; 45 cm^3 de agua de densidad $0.9971 \frac{g}{cm^3}$.

Calcular: La fracción másica, la fracción molar, la concentración másica de cada uno de los componentes y la composición en volumen.

	m(g)	P.M	$\rho \left(\frac{g}{cm^3} \right)$
Sacarosa =	85	342.30	1.587
Agua =	45	18.0	0.9971

Cálculo de la fracción Másica.

fracción másica de la sacarosa = masa de sacarosa / masa de sacarosa + masa de agua

$$\text{fracción másica de la sacarosa} = \frac{m_s}{m_s + m_a} = \frac{85}{85 + 45} = 0.654 = X_s$$

$$\text{fracción másica del agua} = (1 - 0.6545) = 0.346 = X_a$$

Cálculo del número de moles.

$$\text{moles de sacarosa} = \frac{m_s}{P.M} = \text{masa de sacarosa} / \text{peso molecular de la sacarosa}$$

$$\text{moles de sacarosa} = 85/342.30 = 0.248 = n_s$$

$$\text{moles de agua} = \frac{m_a}{P.M} = 45/18 = 2.5 = n_a$$

Cálculos de las fracciones molares.

$$\text{fracción molar de la sacarosa} = \frac{n_s}{n_s + n_a} = \frac{0.248}{0.248 + 2.5} = 0.09 = y_s$$

$$\text{fracción molar del agua} = 1 - 0.09 = 0.91 = y_a$$

Cálculo de la Concentración.

Concentración de la sacarosa = $\frac{m_s}{v}$ = masa de la sacarosa / volumen de la solución
= c_s

volumen de la solución = masa de la solución / densidad de la solución = $\frac{m_{sol.}}{\rho_{sol.}}$

La densidad de la solución se calcula mediante la ecuación expandida 2.4

$$\rho_M = \frac{\frac{m_s}{\rho_s} + \frac{m_a}{\rho_a}}{\frac{85}{1.587} + \frac{45}{0.9971}} = \frac{85 + 45}{53.56 + 45.13} = \frac{130}{98.69} = 1.3172 \frac{g}{cm^3}$$

Esta mezcla de sacarosa y agua, corresponde al jarabe USP, el cual tiene una densidad de, 1.300g/mL dato, tomado de la referencia (12).

La desviación, correspondiente a este cálculo teórico con el reportado es del 1,30 %

volumen de la solución = masa de la solución / densidad de la solución = $\frac{m_{sol.}}{\rho_{sol.}}$ =
130/1.293 = 100.54cm³.

Concentración másica de la sacarosa = 85/100 = 0.85 $\frac{g}{cm^3}$

concentración másica del agua = 45/100 = 0.45 $\frac{g}{cm^3}$

Ejemplo 2.2: Determinar la fracción molar y la composición de una solución de sorbitol al 70% en peso (sorbitol USP) sabiendo que la densidad del sorbitol sólido a 20°C es de 1.499 g/mL y la densidad del agua a la misma temperatura es de 0.9971 g/mL:

En este ejemplo, al igual que en el ejemplo número 2.1 se ilustra el uso de las ecuaciones expandidas en el cálculo de la densidad de mezclas binarias de sistemas sólido - líquido; en el cual, el sólido es completamente soluble en el líquido. En estos sistemas, se conoce la composición y la densidad de cada uno de los componentes, por lo tanto se calcula la densidad de esta solución utilizando la ecuación expandida 2.4.

	PM	Peso (g)	$\rho \left(\frac{g}{cm^3}\right)$
Sorbitol =	182.17	70	1.490
Agua =	18.0	30	0.9971

Cálculo de la fracción molar.

$$n_s = \frac{m_s}{P.M} = \frac{70}{182.17} = 0.384$$

$$n_a = \frac{m_a}{P.M} = \frac{30}{18} = 1.667$$

$$y_s = \frac{n_s}{n_s + n_a} = \frac{0.384}{0.384 + 1.667} = 0.187$$

$$y_a = \frac{n_a}{n_a + n_s} = \frac{1.667}{1.667 + 0.384} = 0.813$$

Cálculo de la densidad de la solución. Aplicando la ecuación expandida 2.4

$$\rho_M = \frac{\frac{m_s}{\rho_s} + \frac{m_a}{\rho_a}}{\frac{m_s}{\rho_s} + \frac{m_a}{\rho_a}} = \frac{\frac{70}{1.49} + \frac{30}{0.9971}}{\frac{70}{1.49} + \frac{30}{0.9971}} = \frac{100}{46.98 + 30.08} = 1.297 \frac{g}{cm^3}$$

La densidad de esta solución reportada en la referencia (15) es de $1.285 \frac{g}{cm^3}$, la desviación con respecto a este valor es de 0.93 %.

Cálculo de la composición.

$$c_s = \frac{m_s}{v_M}$$

$$V_M = \frac{m_M}{\rho_M} = \frac{100}{1.297} = 77.10 cm^3$$

$$c_s = \frac{70}{77.1} = 0.99 \frac{g}{cm^3}$$

Ejemplo 2.3: Determinar la composición, fracción másica, fracción molar de una solución hidroalcohólica al 95%. La densidad del alcohol anhidro a 20°C es de $0.7904 \frac{g}{cm^3}$ y la densidad del agua a la misma temperatura es de $0.9971 \frac{g}{cm^3}$.

En éste ejemplo se conocen, el volumen y la densidad de cada uno de los componentes del sistema. Por lo tanto, se calcula la densidad utilizando la ecuación expandida número 2.3.

	v(mL)	P.M	$\rho \left(\frac{g}{cm^3}\right)$
Etanol =	95	46.07	0.7904
Agua =	5	18.00	0.9971

$$\rho_M = \frac{V_{et.}x\rho_{et.} + V_a x \rho_a}{V_{et.} + V_a} = \frac{95x0.7904 + 5x0.9971}{95 + 5} = 0.8007 \frac{g}{cm^3}$$

Densidad reportada para el alcohol del 95% en la referencia (12) es de $0.8085 \frac{g}{cm^3}$

La desviación de la densidad calculada mediante la ecuación 2.3 con respecto a la densidad reportada es del 0.96%.

Cálculo de la composición.

$$m_{et.} = V_{et.}x\rho_{et.} = 95x0.7904 = 75.088 \text{ g}$$

$$m_a = V_a x \rho_a = 5x0.9971 = 4.985 \text{ g}$$

$$x_{et.} = \frac{m_{et.}}{m_{et.} + m_a} = \frac{75.088}{75.088 + 4.985} = 0.938$$

$$x_a = \frac{m_a}{m_a + m_{et.}} = \frac{4.985}{4.985 + 75.088} = 0.0622$$

Cálculo de la fracción molar.

$$n_{et.} = \frac{m_{et.}}{P.M} = \frac{75.088}{46.07} = 1.629$$

$$n_a = \frac{m_a}{P.M} = \frac{4.985}{18} = 0.277$$

$$y_{et.} = \frac{n_{et.}}{n_{et.} + n_a} = \frac{1.629}{1.629 + 0.277} = 0.855$$

$$y_a = \frac{n_a}{n_a + n_{et.}} = \frac{0.277}{0.277 + 1.629} = 0.145$$

El autor, utilizando las ecuaciones expandidas, ha calculado las densidades de una serie de sistemas binarios de interés farmacéutico. Estos cálculos corresponden a soluciones en porcentaje en peso, para sólidos que no ionizan en solución, para sólidos que ionizan en solución y para líquidos.

Los resultados de dichos cálculos, se compararon con los resultados reportados en la literatura. En la tabla número uno, se reportan los datos de densidades a 20 ° C para los sistemas binarios solución de sorbitol USP - agua y jarabe simple USP - agua, calculada mediante la ecuación expandida 2.4 desarrollada anteriormente. Estos datos de densidades se compararon con los datos reportados en la referencia 13 y 15.

Tabla N° 1

DENSIDADES A 20°C EN $\frac{g}{cm^3}$ DE SISTEMAS BINARIOS						
	SORBITOL - AGUA			JARABE USP - AGUA		
% en Peso	REPORTADA	CALCULADA	DESVIACIÓN	REPORTADA	CALCULADA	DESVIACIÓN
10	1.0268	1.0218	0.58	1.0256	1.0218	0.37
20	1.0527	1.0458	0.65	1.0521	1.0479	0.40
30	1.0825	1.0720	0.97	1.0804	1.0752	0.48
40	1.1079	1.0995	0.76	1.1093	1.1041	0.47
50	1.1373	1.1285	0.77	1.1389	1.1345	0.38
60	1.1688	1.1622	0.56	1.1729	1.1667	0.53
70	1.2000	1.1913	0.77	1.2056	1.2007	0.41
80	1.2330	1.2254	0.62	1.2411	1.2368	0.35
90	1.2663	1.2615	0.38	1.2773	1.2751	0.17
100	1.2998	1.2975*	0.17	1.3159	1.3172*	0.098

* Densidad calculada a partir de los componentes puros.

La desviación esta dada en porcentaje.

El porcentaje en peso corresponde a la solución de sorbitol USP y al jarabe USP.

De dicha tabla se deduce, que para estos sistemas sólido - líquido y líquido puro - solución sólido en líquido. Las densidades calculadas con la ecuación expandida 2.4 tienen una desviación con respecto a la densidad obtenida experimentalmente menor o igual al 0.97 %. Esto indica, que se puede utilizar esta ecuación para calcular con una buena aproximación la densidad de soluciones de sólido en líquidos cuando se conocen las variables masa, y densidad de cada uno de los componentes del sistema.

En la tabla número 2, se reportan los datos de densidades a 20 °C para las soluciones binarias propileno glicol USP - agua, polietileno glicol 400 - agua y alcohol del 95 % - agua; calculada mediante la ecuación expandida 2.4 desarrolladas anteriormente. Estos datos de densidades, se compararon con los datos de densidades reportados en la referencia 5, para estos mismos sistemas bajo las mismas condiciones.

Tabla N° 2.

DENSIDADES A 20°C EN $\frac{g}{cm^3}$ DE SISTEMAS BINARIOS									
	P.G - AGUA			P.E.G 400 - AGUA			ALCOHOL - AGUA		
$\% \frac{P}{P}$	R	C	D	R	C	D	R	C	D
10	1.0070	1.0009	0.60	1.0162	1.008	0.72	0.9838	0.9744	0.95
20	1.0156	1.005	1.04	1.0326	1.0210	1.12	0.9713	0.09526	1.93
30	1.0252	1.008	1.68	1.0510	1.033	1.71	0.9583	0.9313	2.75
40	1.0328	1.018	1.93	1.0688	1.046	2.13	0.9404	0.9120	3.02
50	1.0387	1.0168	2.1	1.0862	1.058	2.05	0.9214	0.8930	3.08
60	1.0439	1.0210	2.2	1.1023	1.0717	2.77	0.9010	0.8747	2.9
70	1.0460	1.0250	1.43	1.1143	1.0853	2.6	0.8792	0.8571	2.51
80	1.0455	1.0290	1.58	1.1224	1.0991	2.07	0.8568	0.8403	1.93
90	1.0426	1.033	1	1.1263	1.1134	1.14	0.8334	0.8241	1.012

R: Reportada, C: Calculada, D: Desviación

De esta tabla, se puede apreciar, que para estos sistemas líquido - líquido, miscibles entre sí, las densidades calculadas la ecuación expandida 2.4 tiene una desviación con respecto al valor experimental, menor o igual al 3.02 %. Todo esto, indica la gran utilidad de esta ecuación como alternativa para calcular la densidad de cualquier mezcla binaria líquido - líquido

El porcentaje en peso corresponde a los componentes: propileno glicol (P.G), polietileno glicol 400 (P.E.G. 400) y alcohol del 95 %.

La desviación, esta dada en porcentaje.

En la tabla 3, se reportan los datos de densidades para las soluciones en agua de algunos compuestos inorgánicos densidad calculada con la ecuación expandida 2.4 desarrollada anteriormente; estos datos de densidades se compararon con los datos reportados en la literatura. (referencia 22).

Tabla N° 3.

DENSIDADES DE SOLUCIONES BINARIAS DE ELECTROLITOS					
Compuesto	$\rho(a)$	$\rho(b)$	% en peso	$\rho(c)$	Desviación
KCl	1.9800	1.1740	25.5	1.1416	2.76
NH ₄ Cl	1.5274	1.0750	27.3	1.1020	2.50
KI	3.1400	1.1710	59.1	1.6680	2.45
LiCl	2.0700	1.2900	45.3	1.3030	1.00
NaF	2.7800	1.0400	3.94	1.0300	0.96

a = Densidad del sólido en $\frac{g}{cm^3}$ tomada de la referencia 13.

b = Densidad de la solución en $\frac{g}{cm^3}$ tomada de la referencia 14.

% en peso tomado de la referencia 13.

c = Densidad calculada en $\frac{g}{cm^3}$ con una de las ecuaciones expandidas.

La desviación, viene dada en porcentaje.

De la tabla número 3, se deduce, que para estos sistemas, la densidad calculada por la ecuación expandida 2.4, tienen una desviación respecto a los datos de la literatura menor o igual al 2.76 %; valor que indica, que esta ecuación, es de gran utilidad para calcular las densidades de soluciones de algunos sólidos inorgánicos solubles en agua.

De acuerdo, con los resultados presentados anteriormente y los resultados desarrollados a través de los ejemplos 2.1; 2.2 y 2.3, el autor recomienda, la utilización de estas ecuaciones expandidas, para calcular las densidades de soluciones, sólido - líquido, líquido - líquido ya, que la desviación de estas densidades con respecto a los valores experimentales, en líneas generales es menor o igual al 3.08 %, valor correspondiente a la mezcla binaria alcohol del 95 % y agua al 50 % en peso.

En general, comparando los resultados experimentales reportados en la literatura con los calculados con una de las ecuaciones expandidas, vemos que estos últimos, son un poco menores.

Esta diferencia entre las densidades entre otras causas, puede ser debida a que los disolventes polares, como el agua, que está presente en todos los sistemas binarios calculados, son capaces de solvatar moléculas y iones (caso del sorbitol, sacarosa, alcohol, propileno glicol y los electrólitos), mediante fuerzas de interacción y en especial por la formación de puentes de hidrógenos; la cual resulta, en la solubilidad de estas entidades químicas. Dependiente, del grado de interacción entre las moléculas del soluto y las moléculas del disolvente, el soluto sería poco soluble, muy soluble o insoluble.

Bajo estos supuestos, se podría esperar que el resultado de la interacción entre las moléculas del soluto y las moléculas del disolvente, ocupe un volumen a temperaturas y presiones bajas, menor que el volumen correspondiente a la suma de los volúmenes de cada uno de los componentes del sistema. Que en el caso de las ecuaciones expandidas, supone que los volúmenes son aditivos, es decir no hay contracción

de los mismos; razón por la cual, existe diferencias entre las densidades calculadas experimentalmente y las densidades calculadas por una de las ecuaciones expandidas.

Los sólidos cristalinos o sólidos no porosos, los sólidos porosos y los sólidos porosos obtenidos mediante una operación de granulación. Son sólidos de mucha importancia para el Tecnólogo Farmacéutico en la elaboración de formas farmacéuticas. Dichos sólidos, pueden presentar además de la densidad verdadera, dos tipos de densidades.

Densidad Granular

Esta densidad viene definida como la relación entre la masa de las partículas y el volumen granular. Esta relación, se expresa de la siguiente manera:

$$\rho_{gr} = \frac{m}{V_{gr}} = \frac{m}{V + V_d} \quad (2.5)$$

En la ecuación 2.5,

m = masa de las partículas

V = volumen verdadero de las partículas

V_d = volumen de los espacios dentro de las partículas

Densidad Global

La densidad global, viene definida, como la relación entre la masa de las partículas y el volumen global de dichas partículas. La relación matemática que expresa este concepto es la siguiente:

$$\rho_{g1} = \frac{m}{V_{g1}} = \frac{m}{V + V_d + V_e} = \frac{m}{V_{gr} + V_e} \quad (2.6)$$

V_e = Volumen de los espacios entre partículas.

Los demás términos de la ecuación, tienen el mismo significado físico de los términos de la ecuación 2.5

Densidad Verdadera

La densidad verdadera, viene definida, como la relación entre la masa de las partículas y el volumen verdadero de las mismas. La relación matemática, que expresa este concepto es:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.7)$$

En esta ecuación, sus términos tienen el mismo significado físico, dado en las ecuaciones anteriores.

La densidad verdadera, es una característica propia de los materiales que se están considerando. Para sólidos puros, esta densidad, es independiente del tamaño y de la distribución del tamaño de sus partículas. Contrario, a lo que sucede con la densidad global y la densidad granular que son dependientes del tamaño y de la distribución del tamaño de sus partículas.

Tanto la densidad global como la densidad granular, son de importancia primordial en el manejo de sólidos. Por ejemplo: en el envase de sólidos como producto terminado en donde el volumen de llenado es constante, un cambio en estas densidades puede ocasionar problema serios en la línea de empaque. Estas densidades, deben tenerse en cuenta en la operación de llenado de la matriz de una maquina tableteadora, en el proceso de compresión de un granulado. Un cambio en estas densidades puede ocasionar un cambio en el peso de los comprimidos, ya que el volumen de llenado de la matriz de la maquina tableteadora debe permanecer constante durante el proceso de compresión.

Porosidad Total

La porosidad está definida como la diferencia entre el volumen global y el volumen verdadero de un sólido, dividida por el volumen global.

Esta porosidad es conocida como porosidad total del material y puede expresarse en porcentaje del volumen global.

$$\varepsilon = \frac{V_{gl} + V}{V_{gl}} = 1 - \frac{V}{V_{gl}} = 1 - \frac{\rho_{gl}}{\rho}$$

Existe también, la porosidad granular, la cual viene definida por la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_{gr} = \frac{V_{gr} + V}{V_{gr}} = 1 - \frac{V}{V_{gr}} = 1 - \frac{\rho_{gl}}{\rho_{gr}}$$

En la tabla número cuatro, se reportan las densidades verdaderas, las densidades globales y las densidades granulares de algunos sólidos y sólidos granulares de interés farmacéutico obtenido por diferentes métodos de granulación.

Tabla N° 4

DENSIDADES DE ALGUNOS SOLIDOS $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$				
Entidad Química	Verdadera	Global	Global Compactada	Granular
Ácido Ascórbico	1.6500	0.70-0.90 *	1.00-1.20 *	
		0.50-0.70 °	0.90-1.10 °	
Fosfato Tricálcico	3.1400	0.32		
Estearato de Calcio				
Sulfato de Calcio	2.3200	0.6450	1.250	
Celulosa Microcristalina	0.2800		0.43	
Ácido Cítrico	1.6650	1.30-1.40		
Dextrosa Anhidra	1.5400		1.10-1.20	
Lactosa	1.5200	1.77	1.36	
		1.42 **	1.12 **	
Estearato de Magnesio	1.030-1.080	0.119-0.333	0.160-0.400	
Manitol	1.4800	0.410	0.580	
Povidona	1.170-1.180	2.30	1.90	
Sacarina Sódica	1.6700	0.820	0.920	
Cloruro de Sodio	2.1650	0.930	1.090	
Cloruro de Potasio	1.9880			
Cloruro de Amonio	1.5300			

Continuación Tabla N°4

Entidad Química	DENSIDADES DE ALGUNOS SOLIDOS $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$			
	Verdadera	Global	Global Compactada	Granular
Cloruro de Calcio	2.1520			
Cloruro de Magnesio	2.3250			
Cloruro de Bario	3.0970			
Sulfato de Amonio	1.7690			
Sulfato de Magnesio	2.6600			
Bromuro de Potasio	2.7500			
Sorbitol	1.490	0.700 °°	0.850 °°	
		0.680 °*	0.810 °*	
		0.530 *°	0.690	
Sacarosa	1.5870	0.930 *	0.820 *	
		0.600 *	1.030 °	
Talco				
Sulfatiazol +	1.530			1.090
Bicarbonato de Sodio +	2.033			1.450
Fenobarbital +	1.297			0.920
Aspirina ++	1.370			1.330
Fenobarbital	1.300	0.340		
Sulfatiazol	1.500	0.330		

* Cristal

° Polvo

** Secada por Aspersión

°° Gránulos

°* Malla 60

*° Polvo Fino

+ Granulado preparado por vía húmeda ++ Granulado preparado por vía seca

La densidad granular, fue determinada por desplazamiento de mercurio.

Estos datos, fueron tomados de la referencia 15.

La porosidad de cualquier material sólido, depende del tamaño y distribución del tamaño de sus partículas a sí como también del tipo de empaquetamiento.

La porosidad de un sólido, la porosidad de un granulado obtenido por cualquier método de granulación, la porosidad de una tableta, etc., es una de las variables, que condiciona la velocidad de disolución del principio activo o fármaco contenido en estos sistemas de entrega. La porosidad de los lechos empacados, la porosidad de los materiales con los que se preparan las columnas para cromatografía de gases o para cromatografía de alta eficiencia, es la responsable del paso del fluido a través de ellos. La porosidad de los elementos filtrantes, controla el flujo de los fluidos en una operación de filtración, reteniendo de acuerdo a su tamaño, las partículas pequeñas o las partículas grandes.

Determinación de la densidad de Sólidos

Entre los métodos para determinar la densidad de los sólidos, el de mayor importancia es el método del picnómetro. Este método está basado en el principio de Arquímedes (todo cuerpo sumergido en un líquido experimenta una fuerza vertical de abajo hacia arriba igual al peso del líquido desalojado).

Para determinar la densidad de los sólidos por el método del picnómetro, el autor recomienda la siguiente secuencia de operaciones, secuencia comprobada durante el desarrollo del proceso de reducción y determinación del tamaño de partícula en el laboratorio de operaciones unitarias.

Pese un picnómetro limpio y seco.

Llene un tercio del volumen del picnómetro con el sólido y péselo.

Complete el volumen del picnómetro con el líquido y péselo.

Vacíe completamente el picnómetro, púrguelo con el líquido y llénelo con el mismo.
Péselo

Cálculos

P_o = Peso del picnómetro vacío limpio y seco.

P_1 = Peso del picnómetro vacío más el peso del sólido.

P_2 = Peso del picnómetro vacío, más el peso del sólido, más el peso del líquido que llena el picnómetro.

P_3 = Peso del picnómetro vacío, más peso del líquido que llena completamente el picnómetro.

$m_s = P_1 - P_o$ = masa del sólido.

$m_0 = P_2 - P_1$ = masa del líquido que llena parcialmente el picnómetro.

$m_1 = P_3 - P_o$ = masa del líquido que llena totalmente el picnómetro.

$m_2 = m_1 - m_0$ = masa del líquido desalojada por el sólido.

$V_0 = \frac{m_2}{\rho} = V_s$ = volumen del líquido desalojado por el sólido que es igual al volumen del sólido.

$\rho_s = \frac{m_2}{V_s} = \frac{m_s}{m_2} \times \rho$ = densidad del sólido

ρ = densidad del líquido.

La densidad del sólido que se va determinar por este método, depende de las características del líquido que se use en su determinación así:

Cuando se utiliza un líquido de baja viscosidad y menos denso que el sólido, en el cual éste es insoluble, la densidad que se determina, es la verdadera. Se obtiene, la densidad verdadera, por que el líquido es capaz de penetrar a condiciones normales de temperatura y presión los espacios microscópicos y espacios capilares dentro de las partículas y los espacios entre las partículas desalojando el aire ocluido en dichos espacios obteniendose de esta manera, el volumen que se obtiene es el volumen verdadero del sólido.

Entre los líquidos que se pueden utilizar para determinar la densidad verdadera, se pueden considerar: el agua, el alcohol etílico, el alcohol isopropílico, el éter de petróleo, el heptano, etc. En general, se pueden utilizar todos los líquidos de baja viscosidad en el cual, el sólido tiene que ser insoluble.

Para sólidos hidrófobos, el autor recomienda utilizar soluciones de agentes tensioactivos a las cuales, hay que determinarle su densidad por el método del picnómetro.

Cuando se utilizan líquidos de alta viscosidad en el cual, el sólido es insoluble, la densidad que se obtiene es la densidad granular. Se obtiene esta densidad, porque los líquidos de alta viscosidad tienen poca probabilidad de penetrar a condiciones normales de temperatura y presión en los espacios capilares y en los poros microscópicos de las partículas y por consiguiente, desalojar el aire ocluido en ellos. Pero estos líquidos, son capaces de penetrar los espacios entre partículas y por consiguiente, desalojar el aire ocluido en dichos espacios. El volumen determinado con estos líquidos, es el volumen granular. Los líquidos de alta viscosidad, que se puede utilizar para este fin, entre otros, se pueden citar: el mercurio, la glicerina, el propileno glicol, el jarabe USP, la solución de sorbitol USP, el aceite de ricino, etc. Este último, tiene la ventaja, de que es soluble en alcohol etílico, lo cual, facilita la limpieza del picnómetro.

Cuando al sólido que se le determina la densidad, es un sólido cristalino (cloruro de sodio, ácido cítrico, sacarosa, sorbitol, etc.), es decir, no tienen espacios dentro de sus partículas, la densidad determinada con líquidos de baja viscosidad y con líquidos de alta viscosidad, debe ser la misma.

De todo lo anterior se desprende, que el principal problema en la determinación de la densidad de los sólidos, es determinar el volumen que ocupa ya que determinar su masa es relativamente fácil.

Cuando el volumen de los sólidos se determina por vía seca, en una probeta limpia, seca y de diámetro relativamente pequeño; el volumen que se determina es el volumen global. La relación entre la masa del sólido y este volumen es la densidad global del sólido la cual, viene dada por la ecuación 2,6.

Viscosidad

Esta variable puede ser definida, como la resistencia que opone un fluido a fluir bajo la acción de una fuerza. Esta definición implica, que a medida que aumenta la viscosidad de un fluido, se necesita una fuerza mayor para que el fluido adquiera la velocidad deseada.

El estudio de ésta variable, para líquidos puros, para soluciones verdaderas, para soluciones coloidales a concentraciones diluidas o en soluciones concentradas tiene mucha relevancia desde el punto vista práctico como teórico.

Desde el punto de vista práctico, los estudios sobre la viscosidad de una solución homogénea, de un sistema herodisperso tipo suspensión, tipo emulsión, tipo semisólidos, etc. lleva a decidir sobre el tipo de agitador y la potencia necesaria del mismo para inducir corrientes. Corrientes, que son necesarias, para producir mezcla durante el proceso de elaboración de formas farmacéuticas heterodispersas.

La viscosidad, es una de las variables que hay que considerar en la operación de bombeo desde la zona de elaboración hasta la zona de empaque de las formas farmacéuticas mencionadas anteriormente.

La viscosidad, se ve afectada considerablemente por la temperatura. A medida que aumenta la temperatura de los líquidos puros, de las soluciones verdaderas, de las soluciones coloidales, etc. la viscosidad disminuye. Esta característica se aplica en el proceso de elaboración de cremas cosméticas a partir de sólidos fundidos a bajas temperaturas y especialmente durante la operación de emulsificación así como también, en la operación de filtración de líquidos muy viscosos.

Para los gases, la viscosidad aumenta al aumentar la temperatura, fenómeno contrario al observado con los líquidos.

El efecto de la temperatura sobre la viscosidad de los líquidos viene dado por una expresión semejante a la ecuación de Arrhenius.

$$\eta = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \text{ en donde:}$$

A, es una constante que depende del peso molecular y del volumen molar del líquido.

E_a , es la energía de activación necesaria para que se inicie el deslizamiento entre las moléculas del líquido.

R, es la constante de los gases.

T, es la temperatura absoluta.

Se ha comprobado, que la energía de activación necesaria para que el fluido comience a fluir es aproximadamente un tercio de la energía de vaporización del líquido.

La unidad de viscosidad, es el poise. El cual viene definido como la fuerza de corte necesaria para producir una velocidad de $1 \frac{cm}{s}$, entre dos capas paralelas de líquido de $1cm^2$ de superficie y separadas por una distancia de 1 cm.

La viscosidad, puede tener las siguientes dimensiones:

$$\frac{M}{L.t}; \frac{F.t}{L^2}; P.t$$

Esta última dimensión es (P.t) que toma la viscosidad, da origen a una unidad de viscosidad compleja ampliamente utilizada, la cual corresponde a Pascal.segundo abreviado Pa.s

Flujo

El flujo, es una variable, que determina el ritmo de producción en una industria manufacturera. Esta variable también indica, el movimiento de los materiales de un punto a otro dentro de una planta de producción así como también, el movimiento de los materiales entre las diferentes unidades de procesos.

La propiedad de flujo, de sólidos, de polvos y de granulados; obtenida bajo la influencia de la gravedad, tiene mucha aplicación práctica en muchos procesos industriales y en particular en procesos industriales farmacéuticos. Esta propiedad pueden ser determinada, bajo condiciones dinámicas constantes en un vaso vertical y de sección transversal constante. También, esta propiedad puede obtenerse, midiendo el flujo másico de descarga de estos materiales a través de orificios de diferentes diámetros y tubos de diferentes formas y dimensiones.

Flujo de Materiales

Es el ritmo al cual, un material se transporta a través de una línea de proceso.

Flujo Volumétrico

El flujo volumétrico, es el volumen de un fluido (gas, vapor o líquido) transportado en la unidad de tiempo. La relación matemática que define este concepto, viene dada por la ecuación.

$$\dot{V} = \frac{V}{t} \quad (2.8)$$

Las unidades del flujo volumétrico dependen del sistema que se está utilizando, este flujo puede ser expresado en $\frac{m^3}{s}$, $\frac{ft^3}{s}$, $\frac{cm^3}{s}$, $\frac{L}{min}$, etc.

Medidas del Flujo de Fluidos

Para el control de los procesos industriales, es necesario conocer la cantidad de materia que entra y sale de un proceso o de una unidad de proceso. Los materiales generalmente, siempre que sea posible se transportan en forma fluida (solución, suspensión, emulsión, vapor, etc.) y es necesario e importante medir la velocidad con la cual estos fluidos circulan a través de una tubería u otro sistema de conducción. También, la medición del flujo (gas de arrastre) de un fluido, se hace sumamente importante en unidades de procesos tales como: un cromatógrafo líquido de alta eficiencia o un cromatógrafo de gases.

Los medidores de flujos, son unos dispositivos que se colocan en una línea de flujo de un proceso y que proporciona una lectura continua del flujo.

Los medidores de flujo, están basados en la medida directa del peso o volumen del fluido. Los medidores de flujo pueden ser: de carga variable; medidores de área; medidores de corriente; medidores de desplazamiento positivo; medidores magnéticos y medidores ultrasónicos.

Los medidores de flujo más ampliamente utilizados en todos los procesos industriales y en especial en la industria farmacéutica son: los medidores de flujo de carga variable y los medidores de flujo de área variable. Los medidores de carga variable comprenden: los medidores de Venturi, los medidores de orificio y los tubos de

Pitot. Los medidores de flujo de área variable comprenden los diferentes tipos de rotámetros. Los medidores de flujo de carga variable, están basados en la medida de la diferencia de presión que resulta casi exclusivamente por un cambio de energía cinética del fluido. Los medidores de flujo de área variable, están basados en que la pérdida de presión del fluido se mantiene constante y la lectura depende de la variación del área causada por el flujo del fluido.

Velocidad de Flujo

Se define como velocidad de flujo, a la relación entre el flujo volumétrico y la sección transversal (S), perpendicular a dicho flujo. Esta relación, también se le conoce con el nombre de velocidad media y puede ser expresada por el siguiente modelo matemático.

$$\bar{V} = \frac{\dot{V}}{S} = \frac{V}{S.t} = \frac{m \times \rho}{S.t} = \frac{\dot{m}}{S} \times \rho \quad (2.9)$$

cuando la sección perpendicular al flujo es circular ($S = \pi.r^2$), la ecuación 2.9 toma la siguiente forma:

$$\bar{V} = \frac{\dot{V}}{\pi.r^2} = \frac{V}{\pi.r^2.t} = \frac{m \times \rho}{\pi.r^2.t} \quad (2.10)$$

Flujo Másico

El flujo másico, puede definirse, como la cantidad de materia transportada en la unidad de tiempo. Este flujo, en tecnología farmacéutica es conocido generalmente como fluidez. La relación matemática que expresa este concepto viene dada por la siguiente ecuación:

$$\dot{m} = \frac{m}{t} \quad (2.11)$$

Este flujo másico puede ser expresado como: $\frac{g}{s}$, $\frac{Kg}{min}$, $\frac{Lb.}{s}$, etc. o en cualquier otro sistema de unidades.

Velocidad Másica

La velocidad másica, se define como la relación entre el flujo másico y la sección perpendicular al flujo, a esta variable se le conoce también con el nombre de densidad

másica o densidad de flujo másico. esta relación viene dada por la siguiente ecuación:

$$G = \frac{\dot{m}}{S} = \frac{m}{S.t} \quad (2.12)$$

Al igual que las variables masa y volumen, la densidad de los fluidos puros o sus mezclas, pueden ser utilizadas como factor de conversión. En este caso, la densidad puede ser utilizada para convertir flujo másico a flujo volumétrico y viceversa. Cuando se trata de fluidos o sus mezclas, conociendo cada una de las corrientes que entran y salen del proceso o de una unidad de proceso, conociendo la densidad, el flujo y la sección perpendicular al flujo; se puede calcular la energía que lleva cada una de estas corriente.

Composición

La composición de cada una de las corrientes que entran y salen del proceso o de una unidad de proceso, se pueden expresar de diferentes maneras:

Masas

Masa (m) que lleva cada una de las corrientes que entran y salen del proceso o de una unidad de proceso. Esta masa puede ser expresada en gramos, kilogramos, libras, toneladas, etc.

Fracción Másica

La fracción másica puede definirse como la masa de un componente en una mezcla dividida por la masa total de la mezcla.

Moles

Moles puede definirse como el peso de un componente en una corriente de entrada o de salida de un proceso o de una unidad de proceso, dividida por el peso molecular de dicho componente. El peso molecular de un componente en una corriente, puede ser utilizado como un factor de conversión, el cual convierte masa a moles y viceversa.

Fracción Molar

La fracción molar puede definirse como los moles de un componente en una mezcla dividida por los moles totales de la mezcla.

Concentración Másica.

La concentración másica puede definirse como la masa de un componente en una mezcla o solución dividida por el volumen de la solución. Aquí, la densidad de la mezcla o de la solución puede ser utilizada como un factor de conversión.

La aplicación correspondiente a los marcos conceptuales descritos anteriormente, se encuentran reportados a través de los ejemplos 2.1, 2.2 y 2.3.

Temperatura

La temperatura de una sustancia la cual puede presentarse básicamente en los tres estados de agregación, también llamados estados físicos a saber: sólido, líquido y gaseoso, es una medida de la energía térmica del movimiento aleatorio de las moléculas de dicha sustancia en equilibrio térmico.

Termometría

La experiencia nos enseña que, cuando un cuerpo caliente se pone en contacto con otro frío, el primero se enfría y el último se calienta, hasta que una propiedad llamada **temperatura**, se iguala en ambos.

Si ahora acercamos a uno de ellos un tercer cuerpo y no se observa cambio, se dice que éste está a igual temperatura que los otros dos.

Dos sistemas que se encuentran a la misma temperatura que un tercero están a la misma temperatura entre sí, este principio, se le conoce con el nombre de **Ley Cero de la Termodinámica** y es el principio fundamental de la termometría.

El cuerpo que se acerca a otro y cuya temperatura se iguala a la de éste, puede estar calibrado para indicar su propia temperatura en función de otra propiedad física que varíe con dicha temperatura. A este aparato se le conoce con el nombre de **termómetro**.

Debido al hecho, que la energía térmica no puede medirse de una manera directa, la temperatura de una sustancia, debe determinarse en una forma indirecta, midiendo una propiedad física de la sustancia cuyo valor sea una función conocida

de la temperatura. Así por ejemplo: el voltaje, en la unión de dos conductores diferentes es una función de la temperatura, esta función es el fundamento de los termopares.

La variación de la resistencia eléctrica con la temperatura es el fundamento de los termistores; la dilatación de algunos líquidos con la temperatura es el principio fundamental de algunos termómetros, en éste última se pueden mencionar el termómetro de mercurio y el termómetro de alcohol.

Las dos escalas de temperatura más comunes y de gran utilidad en la industria farmacéutica son: la escala Celsius o escala centígrada ($^{\circ}\text{C}$) y la escala Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$). Ambas escalas, tienen los mismos puntos de referencia, el punto de congelación del agua líquida y el punto de ebullición del agua líquida a condiciones normales.

La escala centígrada al punto de congelación del agua líquida, le asigna el valor de cero y al punto de ebullición del agua líquida a condiciones normales le asigna el valor de 100, cada una de las cien divisiones de ésta escala, recibe el nombre de grado centígrado.

La escala Fahrenheit al punto de congelación del agua líquida, le asigna el valor de 32 y al punto de ebullición del agua líquida le asigna el valor de 212, cada una de las 180 divisiones de ésta escala, recibe el nombre de grado Fahrenheit.

Los factores de conversión entre las diferentes escalas, ya fueron tratados en el capítulo uno.

La temperatura, al igual que un gran número de factores (concentración, solvente, catalizadores, ph, luz, etc.) puede afectar la velocidad de los procesos químicos así como también, pueden afectar muchas operaciones unitarias tales como: la disolución, la mezcla de líquidos, la esterilización por calor húmedo, la filtración, etc.

La velocidad de una reacción química incrementa generalmente dos o tres veces por cada incremento en la temperatura de diez grados centígrados.

Esta variación de la velocidad de la reacción con la temperatura es de suma importancia en la determinación de las condiciones de estabilidad de un fármaco

en una forma farmacéutica y en especial, en las formas farmacéuticas líquidas; así como también, ésta variable es de gran interés en la determinación de las condiciones de almacenamiento de los medicamentos y de las materias primas.

En general, el efecto de la temperatura sobre la velocidad de las reacciones químicas viene dada por la ecuación sugerida por Arrhenius, la cual tiene la siguiente expresión matemática.

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (2.13)$$

Esta ecuación en su forma logarítmica toma la siguiente forma:

$$\ln(k) = \ln(A) - \frac{E_a}{RT} \quad (2.14)$$

En donde:

k = Constante específica de la velocidad de la reacción.

A = Factor de frecuencia.

E_a = Energía de activación

$$R = 1.987 \frac{\text{cal}}{\text{K mol.}}$$

T = Temperatura en grados Kelvin.

Presión

Las moléculas de los fluidos (gases, vapores, líquidos), debido al movimiento rápido y vigoroso, siguen una trayectoria al azar, chocando con gran frecuencia unas con otras y con las paredes del recipiente que los contiene y como consecuencia, ejercen una presión sobre estas, es decir, una fuerza por unidad de superficie. Presión, que puede expresarse en diferentes sistemas de unidades, como se vió previamente en el capítulo anterior en factores de conversión.

La presión, de una manera general puede ser definida como la fuerza por unidad de área.

Presión Hidrostática

Cuando un volumen de un líquido, está sometido a la fuerza de gravedad, el peso del líquido que está en la parte superior ejerce una fuerza sobre el líquido que está por debajo. Supongamos una columna vertical de un líquido de densidad ρ , de altura h , que tiene una sección transversal uniforme (S), y que en la superficie superior de la columna se ejerce una presión P_o . La presión del líquido, en la base de la columna es por consiguiente,

$$P = P_o + P_f \quad (2.15)$$

En donde: P = Presión del líquido en la base de la columna.

P_o = Presión en la parte superior de la columna.

P_f = Presión del fluido sobre la base de la columna.

La presión del fluido, en la base de la columna se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$P_f = \frac{F_f}{S} = \frac{m \times g}{S} = \frac{V \times \rho \times g}{S} = \frac{S \times h \times \rho \times g}{S} = h \times \rho \times g \quad (2.16)$$

Reemplazando la presión del fluido (ecuación 2.16) en la ecuación 2.15, e introduciendo el factor de conversión g_c con el fin hacer la ecuación dimensionalmente homogénea tenemos:

$$P = P_o + \frac{g}{g_c} \times h \times \rho \quad (2.17)$$

La ecuación 2.17, está indicando, que la presión ejercida por una columna de un líquido es independiente de su área. Esta ecuación, permite calcular la presión ejercida por el peso de una columna líquida tan delgada como un capilar o tan ancha como la de un océano. Como puede observarse en la ecuación 2.17 la presión hidrostática depende solamente de la altura de la columna del líquido y de la densidad del mismo.

Presión Atmosférica

La presión atmosférica, puede considerarse como la presión en la base de una columna de aire localizada en el punto de medición, por ejemplo, a nivel del mar.

Un valor típico o valor normal de la presión atmosférica a nivel del mar es 760 mm Hg ha sido asignado como presión estándar de una atmósfera.

Muchos dispositivos, medidores de presión en su escala, se lee la presión manométrica del fluido o presión relativa a la presión atmosférica. Una presión manométrica de cero, indica que la presión del fluido es igual a la presión atmosférica.

Presión absoluta

La presión absoluta, se define como la suma de la presión manométrica más la presión atmosférica

$$P_{Absoluta} = P_{Manométrica} + P_{Atmosférica} \quad (2.18)$$

En alguno medidores de presión, generalmente en la escala se encuentra el subíndice a, para denotar que la lectura se hace como presión absoluta o el subíndice g, para denotar que la lectura se hace como presión manométrica.

Medidores de Presión

Hay muchos instrumentos para medir la presión de los fluidos, los instrumentos, más comunes son los manómetros. El manómetro de Bourdon, se usa para medir presiones de fluidos desde un vacío casi total hasta aproximadamente 7 000 atmósferas. Los manómetros en U, se utilizan para medir presiones de fluidos menores o iguales a tres atmósferas.

Una aplicación práctica de los marcos conceptuales expuestos anteriormente sobre la variable **presión**, está precisamente en la industria farmacéutica en el proceso de fabricación de aerosoles y en especial en la operación de llenado con un gas o con un gas licuado que actúa como propelente.

La fuerza impulsora de un aerosol o producto presurizado, puede ser suministrada por un gas o vapor en tres estados físicos diferentes a saber: gas comprimido, gas disuelto y comprimido y gas licuado y comprimido.

En cada uno de estos tres casos, la presión en el interior del recipiente debe ser mayor que la presión atmosférica con el fin, de poder expulsar su contenido.

La presión ejercida por un gas comprimido puede ser usada para expulsar un líquido o un sólido a través de un orificio.

Bajo el supuesto, de que el gas comprimido, es insoluble en los materiales contenidos en el recipiente, solamente, el gas comprimido suministrará la fuerza necesaria para expulsar su contenido a través de un orificio de descarga. El tamaño de este orificio y la presión de descarga determina el tamaño del material disperso.

La presión desarrollada por un gas comprimido depende de la temperatura y de la cantidad de gas presente. La relación entre estos factores viene dada por la ley de los gases ideales. La relación directa entre la presión y la temperatura es una ventaja, en el manejo de los gases, especialmente durante la operación de llenado de los envases.

En resumen, para entender mejor los conceptos de presión se debe estar familiarizado con la siguiente terminología.

Presión atmosférica. Es la presión del aire y del medio atmosférico que nos rodea.

Presión barométrica. Igual a la presión atmosférica llamada presión barométrica debido a que se emplea un barómetro para medir la presión atmosférica.

Presión absoluta. Es una medida de la presión con respecto a un vacío total o presión cero.

Presión manométrica. Es la presión expresada como una cantidad medida a partir de la presión atmosférica o con respecto a alguna otra presión de referencia.

Vacío. Es un método de expresar la presión como una cantidad menor a la presión atmosférica o alguna otra presión de referencia.

Humedad

Este término se utiliza generalmente para significar una función de la concentración de vapor de agua en el aire. Se aplica también, para expresar la concentración de otros vapores en el aire o en otro gas. También es usado para expresar el contenido de agua u otro líquido en un sólido. Sin embargo, su significado está restringido al contenido de vapor de agua en el aire.

Humedad Latente

La humedad latente en un sólido, es el líquido que ejerce una presión de vapor inferior a la del líquido puro a una temperatura determinada.

Contenido de humedad

Es la cantidad de agua de un material por unidad de masa. Esta humedad, puede expresarse tomando como base el material húmedo o tomando como base el material seco.

$$C.H = \frac{\text{Masa de Agua}}{\text{Masa de Sólido Seco}} = \frac{m_a}{m_b} \quad (2.19)$$

$$C.H = \frac{\text{Masa de Agua}}{\text{Masa de Sólido Húmedo}} = \frac{m_a}{m_a + m_b} \quad (2.20)$$

En este texto, se usará el subíndice **a** para el vapor de agua u otro líquido y el subíndice **b** para el aire seco u otro material seco. Material, que puede estar en uno cualquiera de los tres estados de agregación de la materia. Debido a la gran importancia de la humedad para el profesional Químico Farmacéutico en el desarrollo de muchas operaciones unitarias farmacéuticas, tales como: la granulación por vía húmeda, la compresión, el secado de granulados, compresión de granulados efervescentes, acondicionamiento ambiental para almacenar materias primas, etc. Este tema se verá su aplicación en la resolución de algunos problemas sobre secado.

DIAGRAMA DE FLUJO

El diagrama de flujo de un proceso productivo, es una representación gráfica que contiene una serie de símbolos, cada uno de los cuales describe en forma simple una parte del equipo industrial. Cada uno de estos símbolos, están conectados por segmentos de líneas rectas o flechas, las cuales indican la dirección del flujo.

El diagrama de flujo se emplea generalmente para ilustrar la organización general de un proceso productivo.

El diagrama de flujo es un documento clave para definir, replantear y documentar un proceso industrial; también, el diagrama de flujo es el almacén para estimar costos,

fuelle de especificaciones utilizada en el diseño y designación de equipos. En general, se puede considerar el diagrama de flujo como el único documento autorizado que se emplea con el propósito de definir, construir y operar un proceso productivo o una técnica analítica.

Elementos del Diagrama de Flujo

Elementos Esenciales

- Símbolos del equipo
- Líneas de flujo de las corrientes de proceso
- Números de los equipos
- Nombre de los equipos
- Designación de los servicios
- Designación de las variables
- Flujos másicos, flujos volumétricos y flujos molares
- Tabla de balance de masa

Opcionales

- Intercambiadores de energía
- Propiedades físicas de las corrientes de proceso

El diagrama de flujo debe ser de un tamaño tal, que permita acomodar los detalles necesarios del proceso. En la práctica convencional, estos diagramas tienen un tamaño mínimo de 60 por 90 centímetros. Los diagramas de flujos se doblan y se guardan en bolsa especiales, junto con el reporter del diseño del proceso.

Cuando se usan estos diagramas, para procesos en los cuales la ilustración es más importante que la precisión y el detalle, se pueden emplear fotoreducciones o diagramas más pequeños.

Símbolos de Corrientes y de algunos Equipos Farmacéuticos

Todos los diagramas de flujos tienen un conjunto de características que le son comunes a saber:

- El flujo de los materiales es de izquierda a derecha. Las materias primas que van a ser transformadas entran a la unidad de proceso o al proceso por la izquierda y los productos salen por la derecha.
- El diagrama de flujo está orientado horizontalmente, con elevaciones que asemejan al proceso original.
- Las corrientes de flujo, se designan con líneas gruesas. Si las corrientes se cruzan sin mezclarse, una de las corrientes se corta, generalmente la corriente que se corta es la vertical.

Sistema de Numeración de Equipos

Numérese, cada área del proceso, comenzando con 100, 200, 300, 400, etc.

Numérese, las partes principales del equipo de proceso en cada área comenzando con 110, 120, 130, 310, 320, 330, etc.

Numérese, las partes de soporte del equipo asociado con una unidad principal del proceso, comenzando con el número siguiente más alto que el de la unidad principal del proceso, por ejemplo, 111, 112, 113, etc. para las partes soportes relacionadas con 110.

Agréguese una letra de prefijo a cada número de equipo de la lista para su designación.

Los primeros nueve números de cada área están reservados para el equipo que da servicio al área completa.

A. Servicios auxiliares.

B. Equipo de contacto sólido - gas (calcinadores, secadores, hornos, secadores, etc.)

C. Molinos trituradoras.

D. Recipientes de proceso (torres de destilación, columnas de absorción, separadores, agotadores, torres de aspersion).

E. Intercambiadores de calor (enfriadores, condensadores, calentadores).

F. Recipientes de almacenamiento (tanques, receptores embudos).

G. Transportadores de gas (ventiladores, compresores, bombas de vacío).

H. Separadores (filtros de bolsa, filtros rotatorios, filtros de cartucho, centrifugas).

J. Transportadores (elevadores de cangilones de banda, tornillo, transportadores neumáticos).

K. Instrumentos (válvulas de control, transmisores, indicadores, registradores, analizadores).

L. Bombas.

M. Agitadores, mezcladores.

N. Motores, impulsores, turbinas.

P. Unidades de paquete (de refrigeración, unidades de aire, generadores de vapor, torres de enfriamiento, etc.)

Q. Hornos calentadores de proceso.

R. Reactores.

S. Equipos para aumento de tamaño (tableteadora, compactadoras de rodillos, granuladores, etc.)

V. Vaporizadores y evaporadores.

X. Varios.

EJERCICIOS PARA RESOLVER

1. Estimar la densidad y la concentración en peso, de 5 000 litros de jarabe del 50 % obtenido a partir de:

Jarabe del 70 % gravedad específica a 20 ° C 1.259

Jarabe del 60 % gravedad específica a 20 ° C 1.222

Jarabe del 40 % gravedad específica a 20 ° C 1.165

Jarabe del 20 % gravedad específica a 20 ° C 1.076

2. Calcule es la concentración en % en volumen, de 5 000 litros de alcohol al 50 % en peso obtenido a partir de:

Alcohol del 40 % en peso gravedad específica a 20 ° C 0.9904

Alcohol del 30 % en peso gravedad específica a 20 ° C 0.9583

Alcohol del 60 % en peso gravedad específica a 20 ° C 0.9010

Alcohol del 70 % en peso gravedad específica a 20 ° C 0.8792

3. Calcular: la densidad, la gravedad específica y el volumen específico de la siguiente mezcla.

1.0 litro de solución de sorbitol al 50 % en peso y gravedad específica a 20 °C de 1.1373

2.0 litros de solución P.G. al 60 % en peso y gravedad específica a 20 °C de 1.0439

3.0 litros de solución de P.E.G. al 30 % en peso y gravedad específica a 20 °C de 1.0510

4.0 litros de solución de alcohol al 50 % en peso y gravedad específica a 20 °C de 0.9214

4. Un laboratorio farmacéutico, tiene en su bodega.

30 litros de alcohol del 20 % en peso y densidad a 20 °C de 0.9713 g / mL

50 litros de alcohol del 10 % en peso y densidad a 20 °C de 0.9838 g / mL

40 litros de alcohol del 30 % en peso y densidad a 20 °C de 0.9583 g / mL

El Director Técnico del laboratorio, desea aprovechar todo éste alcohol para prepara un elixir del 15 % en alcohol. Cuanta cantidad de agua hay que adicionarle, cual es la densidad del alcohol resultante y cual es su composición en peso. Desprecie cualquier efecto debido a la contracción de volumen.

5. ¿Cuál es la composición en peso y en peso a volumen del alcohol del 65 % y densidad relativa a 25 ° C de 0.850?.

6. El peso obtenido cuando 20.0 g de ácido cítrico están sumergidos en aceite de densidad relativa de 0.920 que llena un picnómetro de 100.0 mL es de 100.50 g. ¿Cuál es la densidad del ácido?.

7. Los investigadores de un laboratorio farmacéutico, en la búsqueda de un vehículo cosolvente, para la elaboración de un elixir con un fármaco depresor del S.C.N., encontraron los siguientes resultados;

Solución de sorbitol U.S.P.	25.0 g	densidad a 20 °C 1.200 g / mL
-----------------------------	--------	-------------------------------

Propileno Glicol	50.0 g	densidad a 20 °C 1.0374 g / mL
------------------	--------	--------------------------------

Alcohol etílico U.S.P	75.0 g	densidad a 20 °C 0.8085 g / mL
-----------------------	--------	--------------------------------

Agua Purificada c.s.p.	500.0 g	densidad a 20 °C 0.9971 g / mL
------------------------	---------	--------------------------------

Calcule la densidad de éste vehículo, su composición en peso, la fracción másica y la fracción molar de cada uno de sus componentes.

8. Usando los datos de densidades reportados en la tabla número cuatro calcule las porosidades de los diferentes sólido.

9. Una mezcla gaseosa contiene 20 g. de nitrógeno y 83 g de oxígeno y 45 g de dióxido de carbono. Calcúlense la composición en fracciones molar y el peso molecular medio de la mezcla.

10. Una solución acuosa contiene un 24 % en peso de cloruro de sodio y su densidad es de $1.1178\text{g}/\text{c.m}^3$. Calcular:

La fracción molar de cloruro de sodio y la fracción molar del agua.

La concentración en mol/L ; lb/pie^3 ; lb/gal ; kg/m^3 del cloruro del sodio.

11. Una solución acuosa contiene 1.807 lb sacarosa/gal de solución. Si la densidad de la sacarosa sólida es de 1.587 g/mL y la densidad del agua es de 0.9981 g/mL. Calcular:

% en peso de sacarosa.

lb de sacarosa/ pie^3 solución.

Molaridad de la solución.

12. La composición de un aceite combustible es de 83 % en peso de carbono y 16.4 % en peso de hidrógeno. Cual es su composición molar.

13. En la medición experimental del secado por congelación de carne de res, la cámara se mantiene a presión absoluta de 2.4 mmHg. Convierta esta presión a atm, pulgadas de agua a 4°C y Pa.

14. Una mezcla de 0.13 moles de amoníaco, 1.27 moles de nitrógeno y 0.025 moles de vapor de agua, está sometida a una presión total de 830 mmHg y 323 K. Calcular:

Fracción molar de cada componente.

Presión parcial de cada componente.

Volumen total de la mezcla en m^3 , en pie^3 y en litros.

15. Un granulado para tabletería con $\rho_{gl} = 0.75g/cm^3$ y una $\rho_v = 1.50g/cm^3$ se somete a la operación compresión obteniéndose, un lote de tabletas de $\rho_{gl} = 1.20g/cm^3$. Calcular: Porosidad del granulado, porosidad de las tabletas y el efecto de la compresión (reducción de la porosidad). Repita los cálculos, para un lote de tabletas con $\rho_{gl} = 1.32g/cm^3$.
16. En el Laboratorio de operaciones unitarias del Departamento de Farmacia de la Universidad Nacional, el azúcar morena con $\rho_v = 1.560g/cm^3$ y $\rho_{gl} = 0.86g/cm^3$ se somete a la operación de pulverización mediante el uso del molino de martillos obteniéndose un polvo blanco de $\rho_{gl} = 1.12g/cm^3$. Calcule: las porosidades y el efecto de la operación sobre el material.
17. Un lecho empacado está compuesto por cilindros de diámetro 0.020 m. La densidad del lecho es de $962 kg/m^3$ y la densidad de los cilindros es de $1600 kg/m^3$. Calcule la porosidad y el diámetro de las partículas.
18. Un lecho empacado compuesto por cubos de 0.020 m. de lado y de densidad de $980 kg/m^3$ la densidad de los cubos sólidos es de $1500 kg/m^3$. Calcule la porosidad y el diámetro de las partículas.
19. Una muestra de un granulado para tabletería con densidad verdadera de $3.203 g/cm^3$ y peso de 131.3 g ocupa un volumen de $820 cm^3$. Calcule la porosidad y el volumen global.
20. El peso de una tableta de I Na es de 0.3439 g. y su volumen es de $0.0963 cm^3$. La densidad verdadera del I Na es de $3.667 g/cm^3$. Calcule la densidad global y la porosidad de la tableta.
21. La densidad verdadera de una mezcla de polvos es $3.203 g/cm^3$, cuando esta mezcla se comprime la densidad es de $3.138 g/cm^3$. Calcule la porosidad del comprimido. Que volumen ocupa 250 kg de la mezcla.

CAPITULO III

BALANCE DE MATERIA

BALANCE DE MATERIA

Introducción:

En el proceso del diseño de un producto manufacturero y en especial, en el proceso del diseño de un **Producto Farmacéutico** realizado bajo ciertas condiciones de temperatura y presión, etc., o en el proceso del diseño de una técnica analítica, en cada uno de estos casos, resulta casi imposible obtener más materia de la que entra al proceso.

El proceso del diseño de un nuevo proceso productivo, el proceso del diseño de una técnica analítica o la modificación de un proceso ya existente no quedan completos hasta que c/u de los componentes de las corrientes de entrada y de las corrientes de salida del proceso o unidad de proceso satisfagan las ecuaciones de balances aplicadas a cada uno de los materiales que entran y salen de el.

El balance de materia, aplicado a un ambiente industrial, tal como, un ambiente **Farmacéutico**. A pesar de los grandes esfuerzos que se realizan para obtener un balance de masa con una certeza absoluta, certeza, que es imposible obtenerla, debido a que el grupo de **Químicos Farmacéuticos**, tiene que medir, pesar y estimar la cantidad de materia en tanques, recipientes, tambos, bolsas, frascos, etc. Además estos profesionales, tienen que tomar muestras representativas durante

el funcionamiento de un proceso productivo, tomar muestras de materias primas, tomar muestras de producto terminado, etc., con el fin, de determinar su contenido por un método químico, físico o fisicoquímico. Los errores que acompañan a cada una de las operaciones señaladas anteriormente; impiden obtener un resultado de los balances de materias igual los valores esperados para cada una de las corrientes de proceso.

Los balances de masas, pueden ser tan fáciles, como los que se aplican a una unidad de proceso o tan complejos, como los aplicados a todo un proceso productivo en una planta de fabricación de medicamentos o más aún, los balances de masas, aplicados a procesos en donde hay pérdida total o parcial de la identidad química de cada uno de los materiales que son procesados. Estos últimos procesos, son controlados por **Químicos Farmacéuticos**, que se dedican a obtener productos medicamentosos estables bajo ciertas condiciones, por un período relativamente largo de tiempo.

Los cálculos de los balances de masas, son sencillos para aquellos procesos y unidades de proceso en donde solamente ocurren transformaciones de tipo físico; como ocurre generalmente en los procesos de fabricación de productos farmacéuticos, tales como: tabletas, polvos, grageas, granulados, jarabes, elixires, suspensiones, soluciones estériles, supositorios, labiales, etc.

Los balances de masas, constituyen los cálculos que con mayor frecuencia realizan los profesionales Químicos Farmacéuticos que se dedican al diseño y control de productos medicamentosos, de productos cosméticos, etc. Estos balances de masas ayudan a dar respuestas a preguntas como:

¿Qué cantidad de auxiliar de formulación se debe adicionar para elaborar un lote de un producto medicamentoso sólido, de un producto medicamentoso líquido, de un producto medicamentoso semisólido, etc?.

¿Qué cantidad de agua y sacarosa se deben tomar para elaborar 1 000 kg. de jarabe simple?.

¿A qué ritmo, deben entrar los materiales en un proceso continuo?.

¿Qué cantidad de fármaco queda en el organismo, después de cierto tiempo de administrarle el medicamento?.

¿Qué cantidad de materias primas quedan en bodega después de elaborar un determinado número de lotes de un producto medicamentoso?.

¿Cuál es la capacidad de cada una de las unidades de proceso?.

¿Qué unidad de proceso produce más pérdida en un proceso productivo?.

¿Qué cantidad de antioxidante, de reductor, de ácido, de secuestrante, etc., se debe adicionar para obtener un fármaco estable en un producto medicamentoso?.

¿A qué flujo, se debe aplicar un fluido de arrastre a un cromatógrafo de gases o un cromatógrafo líquido de alta eficiencia para que de un tiempo de retención aceptable de un fármaco determinado?.

Balance de Materia

El balance de materia de un proceso industrial, se puede definir como la contabilidad exacta de todos los materiales que entran, salen, se acumulan o se agotan en el curso de un intervalo de tiempo de operación de un proceso o de una unidad de proceso.

El balance de material, visto de este modo es una expresión del principio de la conservación de la materia. Principio muy sólido, ya que jamás hasta la fecha se ha podido demostrar experimentalmente su falsedad. Los cálculos del balance de materia son de utilidad práctica en la determinación del flujo de materiales, composición, masas, etc., de todas las corrientes que entran o salen de un proceso o de una unidad de proceso.

Los cálculos del balance de materia, sólo se pueden desarrollar con la información específica o supuesta de las propiedades físicas, propiedades químicas o de las propiedades fisicoquímicas de cada una de las corrientes de proceso. Debido al hecho, de que es poco probable medir o tener el valor de todas las variables de las corrientes del proceso utilizando la información conocida sobre algunas de las corrientes del mismo, se puede utilizar el balance de material para estimar los flujos, las masas y las composiciones de cada una de las corrientes desconocidas que entran, salen o se acumulan en un proceso.

Tipos de balances.

Se pueden formular dos tipos de balances: balances diferenciales y balances integrales.

Balances Diferenciales

Estos balances, indican que sucede en un proceso o unidad de proceso en un instante dado de tiempo. Cada termino de la ecuación del balance se expresa en función del tiempo. Cada termino de esta ecuación tiene unidades de la cantidad que se considera (masa, temperatura, entalpía, volumen, moles, etc.) en la formulación del balance dividida por la unidad de tiempo. Así por ejemplo: Cantidad de fármaco absorbido, cantidad de fármaco eliminado, cantidad fármaco en el cuerpo en un tiempo determinado; cantidad de medicamentos sólidos, líquidos, semisólidos empacados en la unidad de tiempo. Estos balances, se aplican a los procesos continuos.

Muchos fármacos son susceptibles a descomponerse cuando son formulados en una forma farmacéutica líquida o en una forma farmacéutica sólida. Tal degradación no solamente lleva a la pérdida de la potencia del fármaco, pero en algunos casos también puede causar cambios en la apariencia física de estos sistemas de entrega del fármaco (SENF), tal como la decoloración causada por la descomposición fotoquímica de un fármaco o la aparición de color en la superficie de un comprimido.

Todos los cambios anotados anteriormente que pueden sufrir los materiales objetos del proceso pueden ser estudiados e interpretados a la luz de los balances diferenciales de masas. Balances que se presentan en forma de modelo matemáticos.

Dentro de estos balances los mas comunes y los mas utilizados en farmacia entre otros, son:

Balances Diferenciales de Orden Cero.

En estos balances, se considera que el proceso se realiza u ocurre a una velocidad constante. Por ejemplo, la compresión de un granulado, el llenado de ampollas con líquidos estériles, la velocidad agitación, etc. También, pueden considerarse dentro de estos balances, la descomposición de ciertos materiales de proceso que ocurren a una velocidad constante e independiente de su masa o concentración inicial. Muchas reacciones de descomposición en fase sólida o en suspensión pueden investigarse bajo este modelo así como también la velocidad de disolución de muchos fármacos de baja solubilidad en una forma farmacéutica sólida tal como una tableta o una cápsula. Un ejemplo de descomposición que sigue este modelo es la hidrólisis (degradación en presencia de agua) del ácido acetil salicílico (Aspirina) en suspensión acuosa.

Balances Diferenciales de Orden Uno

En estos balances, se considera que la velocidad de degradación de los materiales de proceso es proporcional a la cantidad de material inicial. La descomposición de muchos materiales de proceso en solución y la velocidad de disolución de muchos fármacos en formas farmacéuticas sólidas así como también, muchas reacciones químicas suceden bajo este modelo. Estos modelos son de gran utilidad en farmacia ya que mediante ellos se puede investigar:

- La degradación de un fármaco en un sistema de entrega determinado.
- La estabilidad de los fármacos en un sistema de entrega determinado.
- La velocidad de absorción y de eliminación de los fármacos en el organismo.
- La velocidad de distribución y de biotransformación de los fármacos en el organismo.
- La velocidad de disolución de los fármacos en una forma farmacéutica sólida.
- Velocidad de sedimentación de los fármacos insolubles en un sistema heterodisperso tipo suspensión

Balances Integrales

Estos balances describen que pasa en un proceso o unidad de proceso entre dos instantes. Estos instantes corresponden al intervalo de tiempo transcurrido entre la entrada de los materiales al proceso o unidad de proceso y el momento anterior a la salida del producto. Cada término de la ecuación del balance, resulta en una cantidad, una medida. Este tipo de balances, se aplica a procesos intermitentes o procesos en lotes.

Cada término del balance, posee unidades correspondientes a la magnitud que se considera. Así por ejemplo: Cantidad de inyectables de dos mL producidos en una jornada de trabajo, número de tabletas de 25 mg. producidas durante la mañana, cantidad de materias primas que quedan después de fabricar varios lotes de un producto medicamentoso, cantidad de reactivos consumidos durante el análisis de cinco lotes de un producto farmacéutico, etc.

Ecuación General de Balance

Con el fin, de poder plantear la ecuación general de balance de materia, se va a suponer, que existe una entidad química **A** sobre la cual se va a realizar el balance. Este balance, se va a realizar bajo las siguientes suposiciones:

La sustancia A, entra a una unidad de proceso (A_e)

La sustancia A, se produce o se genera en la unidad de proceso (A_g)

La sustancia A, se consume o se agota en la unidad de proceso (A_c)

La sustancia A, sale de la unidad de proceso (A_s)

La sustancia A, se acumula en la unidad de proceso (A_a)

Si los valores que toman cada una de las magnitudes sobre las cuales, se va a realizar el balance están dentro una determinada desviación, por ejemplo, desviación menor o igual a un 5 %. ; se puede establecer la siguiente ecuación general de balance.

$$A_e + A_g = A_s + A_a + A_c \quad (3.1)$$

En general, cuando se trata de procesos en los cuales entran a una unidad de proceso o a un proceso uno o más materiales. Materiales, que pueden ser puros tal como: Alcohol etílico, agua purificada, propileno glicol, glicerina, aceite mineral, aceite de ricino, etc. Soluciones verdaderas tal como: Jarabe simple USP, Sorbitol USP al 70 % en peso; Jarabe de maíz; Jarabe invertido, etc. Soluciones coloidales y sólidos.

En general, en estos caso, la ecuación del balance general dada por 3.1, para efectos del balance de materia toma la siguiente forma:

$$\sum_e m_i + \sum_g m_i = \sum_s m_i + \sum_a m_i + \sum_c m_i \quad (3.2)$$

En donde:

e, corresponde a las corrientes de entrada al proceso o a una unidad de proceso.

g, corresponde a las corrientes generadas en el proceso o en una unidad de proceso.

s, corresponde a las corrientes de salida del proceso o de una unidad de proceso.

a, corresponde a las corrientes acumuladas en el proceso o en una unidad de proceso.

c, corresponde a las corrientes consumidas en el proceso o en una unidad de proceso.

La ecuación 3.2, cuando de trata de hacer el balance de cada uno de los componentes que entran con las corrientes de proceso toma la siguiente expresión matemática.

$$\sum_e m_i f_i + \sum_g m_i f_i = \sum_s m_i f_i + \sum_a m_i f_i + \sum_c m_i f_i \quad (3.3)$$

En la ecuación 3.3, f_i representa la fracción del componente i-esímo en la corriente i-esíma.

En las ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.3, los términos generación y consumo en este libro, se refieren a la ganancia o pérdida de uno o mas materiales de proceso mediante reacción química.

Cálculos de los Balances de Material

El principio general de los cálculos de balance de material, es establecer un número de ecuaciones independientes igual al número de incógnitas de composición y masa. La variación en la resolución de los problemas de balance de masas dependerá de los términos particulares que se desconozcan ya sean; variables de masas, variables de flujos, variables de composición de cada una de las corrientes que entran o salen del proceso o de una unidad de proceso.

Guía para la Realización de los Cálculos de Balances de Materiales

Si no existe reacción química, de nada sirve establecer balance de masas para los elementos químicos presentes en un proceso o en una unidad de proceso. Los balances de masa deberán basarse en las entidades químicas mejor que en los elementos que la componen, o en los componentes de composición fija aún, cuando no sean entidades químicas puras.

Si existe reacción química, se hace necesario desarrollar balances de masa basados sobre los elementos químicos, sobre radicales compuestos o sobre sustancias que no se alteren, descompongan o se formen durante el proceso.

Para procesos donde no tengan lugar reacciones químicas, es preferible el empleo de unidades de masas, unidades de volumen, en general, unidades acordes con el estado de agregación de los materiales procesados.

En procesos unitarios, es conveniente utilizar unidades tales como: el gramo mol, la libra mol, el átomo gramo, etc.

El número de variables desconocidas que han de ser calculadas, no puede ser mayor que el número de ecuaciones de balances independientes que se pueden plantear, de otra manera, la solución al problema es indeterminada.

Si el número de ecuaciones de balances independientes, es mayor que el número de variables desconocidas que se pretende calcular, ha de aplicarse un cierto criterio para determinar que ecuaciones deberán elegirse para resolver el problema.

Si dos o más entidades químicas cualesquiera, se encuentran en proporciones fijas una con respecto a la otra en cada corriente, sólo puede escribirse una ecuación de balance de materia independiente con respecto a aquella entidad química.

Un elemento o componente que aparece en una corriente de proceso (entrada o alimentación) y que es transferido en su totalidad a otra corriente (salida o producto), sirve como referencia para los cálculos. Este elemento o componente se denomina, **componente de unión o componente de enlace**. El conocimiento de la composición del componente de enlace en dos corrientes diferentes, establece la relación entre los pesos o volúmenes de corriente, de tal forma que, si una se conoce la otra puede calcularse.

Todos los problemas de balances de masa, son variaciones sobre un mismo tema. Conocidos los valores de algunas variables de corriente de entrada y de salida de un proceso o de una unidad de proceso, calcular los valores de las demás. Conocidos los valores de las variables de composición de cada una de las corrientes que entran o salen de un proceso o de una unidad de proceso, calcular la masa, volumen o flujo de las corrientes de proceso. Conocidas las variables de masa, volumen o flujo de cada una de las corrientes que entran o salen de un proceso o de una unidad de proceso, calcular la composición de cada una de la corriente de proceso.

Frecuentemente se da el caso, en que se conocen algunas variables de composición y se conocen algunas variables de masa, volumen o flujo de las corrientes que entran o salen de un proceso o de una unidad de proceso, calcular las variables de composición, calcular las variables de masa, flujos o volumen que hacen falta.

La resolución de estos problemas requiere la formulación y solución de ecuaciones sencillas para las variables desconocidas de las corrientes. La solución de estas ecuaciones resultantes se hace mediante la aplicación del álgebra elemental.

Procedimiento para el Cálculo de Balances de Materiales

Antes de proceder con los cálculos correspondientes para la resolución de problemas de balances de masas se deben tener en cuenta lo siguiente:

- Trácese de acuerdo con el enunciado del problema el diagrama en bloques del proceso u operación
- Identifique y trace con flechas apuntando hacia la unidad de proceso todas las corrientes que entran y apuntando hacia fuera de la unidad de proceso todas las corrientes que salen de la misma.
- Enumere cada una de las corrientes de proceso comenzando dicha enumeración por la parte izquierda del diagrama y de arriba hacia abajo y terminar en el lado de derecho en el mismo sentido. También, se pueden usar letras.
- Rotule en la parte superior de cada una de las corrientes de proceso con el nombre, así como también, con su valor y sus unidades.
- Rotule en la parte inferior de cada una de las corrientes las variables de composición y las condiciones en que entran o salen cada una de ellas. Si la corriente en la parte superior esta rotulada como masa, use fracción másica en la parte inferior para rotular todas las variables de composición de todos los componentes que entran con ella. Si la corriente en la parte superior esta rotulada como moles, use la fracción molar en la parte inferior para rotular todas las variables de composición de todos los componentes que entran con dicha corriente.

Ejemplo 3.1: El jarabe simple al 65 % en peso de sacarosa y densidad 1.318 g/mL circula por una tubería a razón de 400 kg/min. Esta corriente puede rotularse usando el sistema internacional de unidades de las siguientes formas:

$$400 \frac{\text{kg de jarabe simple}}{\text{min}}$$

—————>

$$0.65 \frac{\text{kg de sacarosa}}{\text{kg de jarabe simple min}}$$

$$0.35 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de jarabe simple min}}$$

$$\rho = 1.318 \frac{g}{mL}$$

$$400 \frac{\text{kg de jarabe simple}}{\text{min}}$$

—————>

$$0.65 \frac{\text{kg de sacarosa}}{\text{kg min}}$$

$$0.35 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg min}}$$

$$\rho = 1.318 \frac{g}{mL}$$

$$400 \frac{\text{kg de jarabe simple}}{\text{min}}$$

—————>

$$260 \frac{\text{kg de sacarosa}}{\text{kg min}}$$

$$140 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg min}}$$

$$\rho = 1.318 \frac{g}{mL}$$

Ejemplo 3.2: 200 kg de una solución contienen: 30 % en peso de sacarosa, 10 % en peso de alcohol etílico, 2 % en peso de glicerina y agua purificada.

Esta corriente puede rotularse usando el sistema internacional de unidades de las siguientes maneras:

200kg de solución

—————>

$$0.30 \frac{\text{kg de sacarosa}}{\text{kg de solución}}$$

$$0.1 \frac{\text{kg de Alcohol Etílico}}{\text{kg de solución}}$$

$$0.02 \frac{\text{kg de glicerina}}{\text{kg de solución}}$$

$$0.58 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de solución}}$$

200kg de solución

—————>

60kg de sacarosa

20kg de Alcohol Etílico

4kg de glicerina

116kg de agua

200kg de solución

—————>

$$0.30 \frac{\text{kg de sacarosa}}{\text{kg}}$$

$$0.1 \frac{\text{kg de Alcohol Etílico}}{\text{kg}}$$

$$0.02 \frac{\text{kg de glicerina}}{\text{kg}}$$

$$0.58 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg}}$$

Rotule las variables desconocidas en el diagrama, asignando símbolos algebraicos a las corrientes desconocidas así por ejemplo: para rotular flujo másico de una solución (\dot{m}) use: masa de la solución/min; para rotular la masa de una solución use: m (masa de la solución); para rotular una fracción másica de un componente en una solución use: x (masa del componente/unidad de masa de la solución).

Ejemplo 3.3: Una masa determinada de un granulado contiene un 5 % en peso de un fármaco analgésico sale de un secador. Esta corriente, se puede rotular usando el sistema internacional de unidades de la siguiente manera:

m(kg de granulado)

—————>

$$0.05 \frac{\text{kg de fármaco}}{\text{kg}}$$

$$x \frac{\text{kg de auxiliares de formulación}}{\text{kg}}$$

$$(0.95 - x) \frac{\text{kg de Agua}}{\text{kg}}$$

también, se puede rotular en unidades del sistema inglés de la siguiente manera:

m(lbm de granulado)

—————>

$$0.05 \frac{\text{lbm de fármaco}}{\text{lbm}}$$

$$x \frac{\text{lbm de auxiliares de formulación}}{\text{lbm}}$$

$$(0.95 - x) \frac{\text{lbm de Agua}}{\text{lbm}}$$

- Cuando se trata de procesos en los cuales intervienen reacciones químicas, es conveniente rotular todas las variables en términos de moles para las corrientes principales y fracción molar para las variables de composición de cada uno de componentes que entran con dicha corriente.
- Si se usaron diferentes sistemas de unidades en la rotulación de las corrientes, antes de comenzar a resolver el problema utilice factores de conversión para llevar el valor de todas las variables a un mismo sistema de unidades.
- Formular las ecuaciones de balance de masa siguiendo un orden tal que aparezcan primero las ecuaciones que tengan el menor número de incógnitas.

- Formular el balance general de masa para el proceso.
- Formular el balance de masas para cada uno de los componentes que entran con las corrientes.

Resolver el sistema de ecuaciones y determinar las incógnitas. Cuando se ha calculado el valor de una incógnita, colocar inmediatamente su valor en el diagrama de flujo.

Si en el enunciado del problema, se dio el valor de una corriente y se empleo otro valor como base para el cálculo por ejemplo, 100; para obtener el resultado final del problema, se debe corregir la escala del proceso, mediante el factor de conversión formado por el cociente entre el valor el valor tomado como base para el cálculo y el valor encontrado para una o todas las corrientes del proceso.

BALANCE DE MASAS EN SISTEMAS NO REACCIONANTES

Balance de Masas en Procesos Continuos en Régimen Permanente

En los sistemas no reaccionantes (operaciones unitarias) es decir, no hay pérdida de la entidad química de los elementos que componen las corrientes de proceso, los términos correspondientes a la generación y al consumo de la sustancia que se considera en el balance son iguales a cero.

Debido al hecho, de que el sistema que considera opera en régimen continuo, el termino correspondiente a la acumulación en la ecuación 3.2 también es igual a cero, por consiguiente la ecuación 3.2 toma la siguiente forma.

$$\sum_e m_i = \sum_s m_i \quad (3.4)$$

La ecuación 3.4, cuando se trata de calcular los flujos de todos los componentes que entran con c/u de las corrientes de proceso puede escribirse de la siguiente manera.

$$\sum_e m_i f_i = \sum_s m_i f_i \quad (3.5)$$

En donde cada uno de los términos de esta ecuación tiene el mismo significado dado anteriormente.

EJERCICIOS DE APLICACION

Ejemplo 3.4: Ilustra la utilización del balance de masas a la resolución de problemas de mezclas en procesos continuos.

Un experimento acerca de la velocidad de crecimiento de ciertos microorganismos requiere el establecimiento de un ambiente de aire húmedo enriquecido con oxígeno. Se alimentan tres corrientes a una cámara de evaporación, con el fin de producir una corriente salida con la composición deseada. Las corrientes que entran a la cámara son las siguientes:

- Agua líquida alimentada con un flujo de $20 \text{ cm}^3/\text{min}$.
- Aire.
- Oxígeno puro, con un flujo molar equivalente a una quinta parte del flujo molar de la corriente aire.

Se analiza la corriente salida y se encuentra que contiene 1.5 moles % de agua. Trazar, rotular y calcular todas las variables desconocidas.

Análisis del problema.

Durante el desarrollo de este proceso, no existe ningún cambio en las entidades químicas que componen cada una de las corrientes de proceso; por consiguiente, los términos correspondientes a generación y consumo en la ecuación general de balance son iguales a cero. Por ser un proceso continuo, el término acumulación en la ecuación general de balance también es igual a cero.

Bajo estas condiciones, el proceso es netamente una mezcla de materiales y la ecuación general de balance se reduce a la suma de los flujos molares de las corrientes de entrada es igual a la suma de los flujos molares de las corrientes de salida.

Solución

Al analizar la información de las variables conocidas de este problema, la mayoría de las corrientes se les conoce su flujo molar; por esta razón es más conveniente

rotular el diagrama de flujo en términos de flujos molares. Utilizando flujos molares en este caso, solamente hay que convertir el flujo volumétrico del agua a flujo molar utilizando para el cálculo, dos propiedades ampliamente conocidas del agua como son; su densidad y su peso molecular. En el caso de rotular las corrientes como flujo volumétrico, tendría que conocer la densidad del aire y resolver el problema con la suposición de que las corrientes y cada uno de sus componentes siguen las leyes de los gases ideales.

Para rotular el diagrama con unidades consistentes, hay que convertir el flujo volumétrico del agua a flujo molar utilizando su densidad y su peso molecular, así:

$$20 \frac{cm^3}{min} \times 1 \frac{g}{cm^3} \times 1 \frac{mol}{18g} = 1.11 \frac{\text{moles de agua}}{\text{minutos}} = \dot{m}_1$$

Diagrama de flujo y rotulación.

Rotular cada una de las corrientes de proceso de acuerdo con las normas generales dadas anteriormente.

Como se trata de un proceso continuo, los términos correspondientes a todas las corrientes de entrada y de salida del proceso o de una unidad de proceso, así como también, las variables de composición se rotularon como flujos.

Cálculos

Los cálculos, se comienzan una vez, que las variables rotuladas en el diagrama de flujo tenga unidades consistentes, es decir, todas las variables estén en el mismo sistema de unidades tanto para las variables conocidas como para las variables desconocidas

Base de calculo: 1 minuto

Componente de enlace.

En este problema, el componente de enlace es el agua. Nótese, que toda el agua que aparece en la corriente de alimentación es transferida a la corriente producto.

Por lo tanto, planteando el balance de flujo para el agua, se obtiene la siguiente expresión.

$$1.11 = 0.015m_4$$

$$m_4 = \frac{1.11}{0.015} = 74 \frac{\text{moles}}{\text{min}}$$

$$m_4 = 74 \frac{\text{moles}}{\text{min}}$$

Balance de flujos

La suma de los flujos de las corrientes de entrada es igual a la suma de los flujos de las corrientes de salida.

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_3 = \dot{m}_4$$

$$1.11 + \dot{m}_2 + 0.2\dot{m}_2 = 74$$

$$\dot{m}_2 = 60.74 \frac{\text{moles}}{\text{min}}$$

$$\dot{m}_3 = 0.2\dot{m}_2 = 0.2 \times 60.74 = 12.14 \frac{\text{moles}}{\text{min}}$$

$$\dot{m}_3 = 12.14 \frac{\text{moles}}{\text{min}}$$

Cálculo de las variables de Composición

Balance de Componentes

- Balance de Oxígeno

La cantidad de oxígeno que entra con cada una de las corrientes es igual a la cantidad de oxígeno que sale con cada una de las corrientes de proceso.

$$0.21 \times 60.74 + 12.14 = 74x$$

$$x = \frac{0.21 \times 60.74 + 12.14}{74} = 0.3345 \frac{\text{moles de oxígeno}}{\text{mol de M}}$$

$$\text{fracción molar de nitrógeno} = 0.985 - 0.3345 = 0.6505$$

$$\text{fracción molar del nitrógeno} = 0.6505$$

Ejemplo 3.5: Este ejemplo, ilustra el uso de las ecuaciones de balance de material a la resolución de problemas en procesos de separaciones continuas.

Se tiene una mezcla compuesta de un 45 % en peso de etanol y 55 % en peso de agua. Esta mezcla, se alimenta a una torre de destilación. La corriente superior tiene una concentración del 95 % en peso de etanol; mientras que el 8 % en peso de etanol que se alimenta a la torre de destilación sale con la corriente inferior. El flujo de alimentación es de 2 000 kg. / hora. Determinar el flujo de la corriente superior y los flujos máxicos de etanol y agua en la corriente inferior.

Análisis del Problema

Durante el desarrollo del proceso a que hace referencia el problema, no hay ningún cambio en las entidades químicas de los componentes de las corrientes de proceso; por consiguiente, los términos generación y consumo son iguales a cero. Por ser un proceso que opera en régimen continuo el término acumulación también es igual a cero.

Cabe anotar, que el proceso de separación objeto de este problema se realiza con un cambio de fase, del componente más volátil, ocasionado por un suministro de energía de una fuente externa.

De acuerdo a las consideraciones expuestas anteriormente la ecuación del balance de masas, se reduce a suma de los flujos de las corrientes de entrada es igual a la suma de los flujos de las corrientes de salida. Supuesto que debe cumplirse para cada uno de los componentes de las corrientes de proceso.

Diagrama de Flujo y Rotulación

Según el enunciado del problema, las corrientes de proceso al igual que las variables de concentración deben ser rotuladas como flujos.

Cálculos.

Observando la rotulación del diagrama de flujo se ve que todas las corrientes y las variables de flujo están expresadas en el mismo sistema de unidades.

Base de calculo : 2000 kg/h

Balance de Flujos.

Flujo de etanol en la corriente de alimentación

$$\frac{0.45 \text{ kg EtOH}}{\text{kg h}} \times 2000 \text{ kg} = \frac{900 \text{ kg EtOH}}{\text{h}}$$

Flujo de etanol en la corriente 3

$$\frac{8\text{kg EtOH}}{100\text{kg EtOH}} \times \frac{900\text{kg EtOH}}{h} = 72 \frac{\text{kg}}{h}$$

Balance de Etanol en el Proceso

$$0.45 \times 2000 = 0.95 \times m_2 + 72$$

$$m_2 = \frac{0.45 \times 2000 - 72}{0.95} = 871.6 \frac{\text{kg}}{h}$$

$$m_2 = 871.6 \frac{\text{kg}}{h}$$

Flujo de Etanol en la corriente 2

$$\frac{0.96\text{kg EtOH}}{\text{kg h}} \times 871.6\text{kg} = 828 \frac{\text{kg} \cdot \text{EtOH}}{h}$$

$$\text{Flujo de Agua} = 871.6 - 828 = 43.6 \frac{\text{kg}}{h}$$

Flujo de la Corriente 3

$$m_3 = 2000 - 871.6 = 1.128 \frac{\text{kg}}{h}$$

Flujo de Componentes en la Corriente 3

$$\text{Flujo de Etanol} = 72 \frac{\text{kg}}{h}$$

$$\text{Flujo de Agua} = 1.128 - 72 = 1.056 \frac{\text{kg}}{h}$$

Balance de Masas en Procesos Intermitentes en Régimen Transitorio

Al igual que en el caso anterior, los términos correspondientes a generación y consumo en la ecuación 3.2, son iguales a cero. Por ser un proceso intermitente el término acumulación es diferente de cero. De tal manera, la ecuación 3.2 se transforma en:

$$\sum_e m_i = \sum_s m_i + \sum_a m_i \quad (3.6)$$

Como se trata de procesos intermitentes, los términos correspondientes a todas las corrientes de entrada, a todas las corrientes acumuladas y a todas las corrientes de salida, de un proceso o de una unidad de proceso, se deben rotular como cantidades sin tener en cuenta las unidades de tiempo pero si el tamaño del lote.

La ecuación 3.6, cuando se usa para calcular la masa de cada uno de los componentes que entran, que salen o se acumulan en el proceso o en una unidad de proceso toma la siguiente forma.

$$\sum_e m_i x_i = \sum_s m_i x_i + \sum_a m_i x_i \quad (3.7)$$

En este caso, x_i es la fracción másica del componente i-ésimo en la corriente de proceso i-ésima.

En el balance de masas en un proceso de fabricación de medicamentos sólidos, de medicamentos líquidos homogéneos, de medicamentos heterodispersos, etc, que son procesos que generalmente se elaboran en lotes, el término acumulación se puede tomar como las pérdidas ocurridas en el proceso o en cada una unidad de proceso. Este último caso, es especialmente importante en los procesos, ya que se puede establecer cual o cuales operaciones del proceso son las responsables de las pérdidas en un proceso productivo.

Ejemplo 3.6: Este ejemplo, ilustra la utilización de las ecuaciones del balance de masas en la resolución de problemas de secado. Operación sumamente importante en el desarrollo de formas farmacéuticas sólidas.

400 lb de un granulado analgésico contienen un 38 % en peso de agua. Agua introducida durante la operación de aglutinación. Este granulado, es introducido a un secador de donde sale con un contenido de humedad del 2 % en peso. Para la realización de este proceso, al secador entra aire con un contenido de humedad de 0.0154 lb de H_2O/lb A.S y sale del mismo con un contenido de humedad de 0.0454 lb de H_2O/lb A.S . Calcule, el volumen de aire en pie^3 a 15 ° C y 560 mmHg que debe entrar al secador.

Análisis del problema.

Al igual que en el caso anterior, los términos correspondientes a generación y consumo son iguales a cero y el término acumulación puede tomarse también igual a cero. El proceso se realiza en lote y corresponde a una transferencia simultánea de energía en forma de calor y masa. Durante la realización del proceso de secado solamente ocurren cambios de tipo físico.

Bajo estas condiciones, la ecuación de balance de materia se reduce a la suma de las masas de las corrientes de entrada que deben ser iguales a la suma de las masas de las corrientes de salida. Balance que debe cumplirse para cada uno de los componentes que entran con cada una de las corrientes de proceso.

Diagrama de Flujo y Rotulación.

Según el enunciado del problema, las corrientes de proceso al igual que las variables de composición deben ser rotuladas en unidades del sistema inglés.

En los casos de balance de masas, aplicado a la resolución de problemas de secado es muy ventajoso rotular la corriente aire (gas de arrastre de la humedad que pierde el material) a la entrada y a la salida del secador como aire seco. Bajo estas condiciones la masa o el flujo másico del aire seco a la entrada del secador tiene que ser igual a la masa o al flujo másico del aire seco a la salida del mismo.

En caso tal, de que se rotularan las corrientes de aire a la entrada y a la salida del secador como aire húmedo, no se obtendría la igualdad escrita anteriormente.

Cálculos.

Base de calculo: 400 lb de granulado analgésico.

Componente de Enlace.

En este caso, el componente de enlace es el granulado seco. Obsérvese, que todo el granulado seco en la corriente de alimentación aparece totalmente en la corriente producto. También, puede ser componente de enlace el aire seco.

Balance de Granulado Seco.

Granulado Seco a la Entrada = Granulado Seco a la Salida

$$0.98m_4 = 400 \times 0.62$$

$$m_4 = \frac{400 \times 0.62}{0.98} = 253lb$$

Balance de Agua

Agua Pérdida por el Granulado = Agua Ganada por el Aire

$$400 - 253 = (0.0454 - 0.0154)m_1$$

$$m_1 = m_3 = \frac{400 - 253}{(0.0454 - 0.0154)} = 4900lb \text{ A.S}$$

Agua que entra con el Aire al Secador

$$0.0154 \times 4900 = 75.46 \text{ lb}$$

Aire húmedo que entra del Secador = Masa de Aire Seco + Masa de Agua; o sea:

$$4900 + 75.46 = 4975.46 \text{ lb de Aire Húmedo}$$

Agua que sale con el aire del Secador

$$0.0454 \times 4900 = 222.46 \text{ lb}$$

Aire húmedo que sale del Secador = Masa de Aire Seco + Masa de Agua; o sea:

$$4900 + 222.46 = 5122.46 \text{ lb de Aire Húmedo}$$

Cálculo del Volumen de Aire

Bajo las condiciones de operación del proceso de secado, la mezcla binaria aire seco vapor de agua sigue la ley de los gases ideales a saber:

$$PV = nRT$$

$$V = \frac{nRT}{P}$$

$$n_{A.S} = 4900 \text{ lb} \frac{\text{lbmol}}{28.84 \text{ lb}} = 169.9 \text{ lb.mol}$$

$$n_{H_2O} = 75.46 \text{ lb} \frac{\text{lbmol}}{18 \text{ lb}} = 4.19 \text{ lb.mol}$$

$$V_{A.S} = \frac{169.9 \text{ lbmol} \times 0.08205 \text{ Latm} \times 288 \text{ K} \times 760 \text{ mmHg} \times 454 \text{ mol } \cancel{\text{pie}^3}}{560 \text{ mmHg} \text{ K mol L atm lb mol} \times 28.32 \text{ L}}$$

$$V_{A.S} = 87.348 \text{ pie}^3$$

$$V_{H_2O} = \frac{75.46 \text{ lbmol} \times 0.08205 \text{ Latm} \times 288 \text{ K} \times 760 \text{ mmHg} \times 454 \text{ mol } \cancel{\text{pie}^3}}{560 \text{ mmHg} \text{ K mol L atm lb mol} \times 28.32 \text{ L}}$$

$$V_{H_2O} = 38.842 \text{ pie}^3$$

El volumen de Aire húmedo que entra al secador durante todo el tiempo que dure el proceso de secado, es igual a la suma del volumen de aire seco más el volumen de vapor de agua que lo acompaña. Este volumen es de 126.190 pies cúbicos.

Ejemplo 3.7: 100 kg. de un vehículo para la elaboración de un elixir contiene un 80 % en peso de solución de sorbitol U.S.P. y 20 % en peso de etanol. Se desea elaborar un vehículo para disolver un fármaco depresor del sistema nervioso central que contenga un 45 % en peso de sorbitol sólido. Qué cantidad de agua hay que adicionarle y cual es la composición de la corriente de salida. Calcular las cantidades de cada una de las corrientes de entrada para elaborar 5 000 litros de solución.

Este problema al igual que los anteriores, corresponde a una operación unitaria en lote y en régimen transitorio, por consiguiente, los términos generación, consumo y acumulación son iguales a cero. Por estas razones la ecuación general del balance se reduce a la suma de las masas de las corrientes de entrada es igual a la suma de las masas de las corrientes de salida. Balance que debe cumplirse para cada uno de los componentes que entran con las corrientes de proceso.

Diagrama de Flujo y Rotulación.

Según los datos proporcionados por el problema, las corrientes de entrada al proceso así como también las corrientes de salidas del mismo deben ser rotuladas en unidades del sistema internacional o en unidades del sistema M.K.S.

Las variables de composición deben ser rotuladas también en el mismo sistema de unidades que se usaron para rotular las corrientes de entrada y corrientes de salida del proceso.

Cálculos.

Base de calculo: 100 kg de vehículo.

La solución de sorbitol U.S.P., es una solución de sorbitol sólido en agua al 70 % en peso. Para comenzar la resolución de éste problema, es preciso convertir la composición del sorbitol en la corriente de entrada así:

$$\frac{0.80kg.S.S.U.S.P \times 0.7 \text{ kg Solido}}{kg.kg.S.S.U.S.P} = 0.56 \frac{kg.S.Solido}{Kg.}$$

Componente de Enlace

El componente de enlace es el sorbitol sólido

Balance de Sorbitol Sólido.

Masa de Sorbitol sólido a la Entrada = Masa de Sorbitol Sólido a la Salida

$$0.56 \times 100 = 0.45 \times m_3$$

$$m_3 = \frac{0.56 \times 100}{0.45} = 124.44kg$$

$$m_3 = 124.44kg$$

Balance general de Masas

$$m_2 + 100 = 124.44$$

$$m_2 = 24.44kg$$

Balance de Componentes

Balance de Etanol

$$0.2 \times 100 = 124.44x$$

$$x = \frac{0.2 \times 100}{124.44} = 0.16 \frac{kgEtOH}{kg}$$

Composición del Agua

$$0.55 - 0.16 = 0.39 \frac{kg.H_2O}{kg.}$$

Composición en peso de la corriente de salida

Sorbitol Sólido 45 kg.

Etanol 16 kg.

Agua 39 kg.

Cálculo de las cantidades para 5000 litros

Cálculo de la densidad de la solución a partir de las densidades de los componentes.

$$\rho_M = \frac{M_M}{V_M} = \frac{45 + 16 + 39}{\frac{45}{1.49} + \frac{16}{0.7904} + \frac{39}{0.9971}} = 1.1166 \frac{kg}{L}$$

Con la densidad de la solución se calcula el peso de la mezcla así:

Peso de la mezcla igual a 5583 kg.

Cálculo de las cantidades necesarias para elaborar los cinco mil litros de la solución.

$$\frac{100kgV}{124.44kgSol.} \times 5583kgSol. = 44865kg. \text{ de Vehículo}$$

$$\frac{22.44kg.H_2O}{124.44kgSol.} \times 5583kgSol. = 1.0965kg.H_2O$$

Estos últimos cálculos corresponden al escalonamiento de un diagrama de flujo, lo cual implica también el escalonamiento del proceso. Ya que de un volumen a preparar inicialmente de 111.5 litros se pasa a 5 000 litros. Esta elaboración puede hacerse en cinco lotes de 1 000 litros en un recipiente con una capacidad superior al volumen a preparar o en un solo lote de 5 000 litros. Para este último caso, se tendría que y construir un recipiente (a escala) de mayor capacidad que el existente. El procedimiento, para diseñar y construir este recipiente, esta basado en la teoría de los modelos, la cual depende de varios criterios de similitud a saber:

- **Similitud geométrica.** Esta similitud, se establece en los cursos elementales de geometría. Hay similitud entre dos figuras geométricas si todas las longitudes equivalentes tiene una relación constante.
- **Similitud cinemática.** Esta similitud existe en un sistema geoméricamente similar de modelos de diferentes tamaños y todas las velocidades equivalentes sostienen una relación constante. La similitud geométrica debe existir, pues de otra manera no habría posiciones equivalente.

- **Similitud dinámica.** La similitud dinámica, existe en un sistema geoméricamente similar de dos modelos, si todas las fuerzas de las posiciones equivalentes sostienen una relación constante.

BALANCE DE MASAS EN SISTEMAS REACCIONANTES

El marco conceptual de referencia, en que cada uno de los componentes de una corriente de proceso conserva su identidad química cuando se trata de procesos puramente físicos es razonable y fácilmente verificable por cualquier procedimiento físico, químico o fisicoquímico. De igual manera, cuando se trata de procesos unitarios, cada uno de los cambios producidos en la identidad química de uno o más componentes de las corrientes de proceso, puede ser comprobado, verificado por procedimientos físicos, químicos o fisicoquímicos. Todo esto es debido, a que durante el tiempo que dure el proceso unitario hay cambio parcial o total en la entidad química de uno o más componentes que pueden ser detectados midiendo una propiedad física como un punto de fusión, un punto de ebullición, una solubilidad o por medio de una reacción química que sea capaz de detectar el cambio.

El conocimiento de estos procesos unitarios, para el profesional **Químico Farmacéutico** que se dedique al diseño y control especialmente de productos medicamentosos líquidos homogéneos y heterogéneos es de primordial importancia, por que es posible bajo condiciones experimentales determinar la descomposición de un fármaco en un medicamento existente en el mercado, o de un fármaco en los estados iniciales de formulación, o de un fármaco en el organismo después de ser administrado el medicamento.

La aplicación del conocimiento de los procesos unitarios ha permitido al profesional **Químico Farmacéutico** obtener preparados farmacéuticos de mayor estabilidad cuya administración y dosificación pueden establecerse sobre bases científicas sólidas.

En general, el **Químico Farmacéutico** dedicado al diseño de productos medicamentosos debe conocer todos los posibles procesos unitarios que puedan ocurrir entre el fármaco y cada uno de los auxiliares de formulación especialmente, bajo las variables en que se realiza el proceso de producción.

Estos conocimientos, lleva al **Químico Farmacéutico** a evitar el proceso unitario en el medicamento o a controlarlo por un período de tiempo más o menos prolongado. Estos conocimientos, también hacen a una industria farmacéutica sólida y por consiguiente a una buena estabilidad económica debido a que sus productos llegan al paciente con las características de calidad requerida.

Todo lo anterior puede ser resumido de la manera siguiente: **Gracias al conocimiento y control de los Procesos Unitarios, el Profesional Químico Farmacéutico puede desarrollar Operaciones Unitarias conducentes a obtener Productos medicamentosos estables y seguros.**

Generalmente, las materias primas utilizadas en el desarrollo de procesos unitarios contienen impurezas. Impurezas que pueden en un momento dado interferir con la formación de la entidad química útil lo cual, llevaría a una baja en el rendimiento. Por todo lo anterior, antes de abordar el tema de los balances de materias con reacciones químicas es necesario incluir un glosario de los términos más comúnmente utilizados.

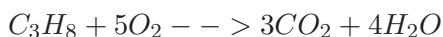
Estequiometria

Estudia las proporciones en las que se combinan entre sí las entidades químicas.

Ecuación Estequiométrica

Es una ecuación de balance que nos indica las cantidades relativas de los moles de reactivos y productos que participan en la reacción.

La ecuación estequiométrica, suministra una información de tipo cualitativo, la cual nos indica que especies químicas entran en la reacción y cuales son los productos formados y una información de tipo cuantitativo que nos indica las cantidades de reactivos y las cantidades de producto formado. Por ejemplo, la reacción de combustión del propano.



Esta ecuación indica, que una molécula de propano reacciona con cinco moléculas de oxígeno para producir tres moles de dióxido de carbono y cuatro moles de agua.

Coefficientes Estequiométricos

Los coeficientes estequiométricos, son los números que se le anteponen a la fórmula de cada entidad química que interviene en la reacción. En el ejemplo anterior.

Coefficiente estequiométrico del propano es igual a 1

Coefficiente estequiométrico del oxígeno es igual a 5

Coefficiente estequiométrico del dióxido de carbono es igual a 3

Coefficiente estequiométrico del agua es igual a 4

Relación Estequiométrica

La relación estequiométrica es el coeficiente formado por los coeficientes estequiométricos de dos entidades químicas que participan en la reacción. Estas relaciones estequiométricas se pueden tomar como factores de conversión. Para la combustión del propano se pueden formar las siguientes relaciones estequiométricas:

$$\frac{1\text{molC}_3\text{H}_8}{5\text{molesO}_2}, \frac{1\text{molC}_3\text{H}_8}{3\text{molesCO}_2}, \frac{5\text{molesO}_2}{3\text{molesCO}_2}, \frac{5\text{molesCO}_2}{4\text{molesO}_2}, \text{etc.}$$

Reactivo Limitador

Es el reactivo que se encuentra en una proporción tal que su consumo limitará la extensión de la reacción. También, este reactivo puede ser definido como el reactivo que se agotaría primero si una reacción se completara.

Un reactivo es limitador si se encuentra presente en una proporción menor que la estequiométrica con respecto a los otros reactivos.. Si todos los reactivos se encuentran en proporción estequiométrica, entonces, no hay reactivo limitador.

Reactivo Exceso

Un reactivo está en exceso si se encuentra presente en la corriente de alimentación en una proporción mayor que la proporción estequiométrica con respecto a los demás reactivos. Este exceso, puede ser expresado en porcentaje así:

$$\%Exceso = \frac{n - n_T}{n_T} \times 100$$

n = Moles alimentados de reactivo

n_T = Moles teóricos necesarios para consumir todo el reactivo limitador

Fracción de Conversión

La fracción de conversión para un reactivo, es el cociente entre los moles consumidos del reactivo sobre los moles alimentados.

Rendimiento

El rendimiento puede ser definido de las siguientes maneras:

$$R = \frac{\text{Moles de Producto Deseado}}{\text{Moles Alimentados R.L.}}$$

$$R = \frac{\text{Moles de Producto Deseado}}{\text{Moles Consumidos R.L.}}$$

Selectividad

La selectividad, se ve afectada por las reacciones paralelas las cuales, la disminuyen.

$$S = \frac{\text{Moles Formados de Producto Deseado}}{\text{Moles Formado de Producto Indeseado}}$$

Ecuación del Proceso

La ecuación del proceso, es el balance total de masa del proceso. En esta ecuación, se deben incluir todos los materiales que entran y salen del proceso reaccionen o no reaccionen en las cantidades en las cuales intervienen.

Ecuación de la Reacción

La ecuación de la reacción, es el balance de masa solamente para los materiales que reaccionan. Esta ecuación solamente contiene los materiales que reaccionan junto con los productos formados, en las cantidades en que intervienen en la reacción.

Dos o más reactivos están en presentes en proporción estequiométrica, si su relación estequiométrica en la corriente de alimentación equivale a la relación estequiométrica de la ecuación balanceada de la reacción

Balance de Masa en Procesos Unitarios Intermitentes

En este caso, el término correspondiente a acumulación es diferente de cero para cada uno de las entidades químicas que componen las corrientes de proceso. Los términos generación y consumo como en el caso anterior, son diferentes de cero para los componentes que sufren el proceso que se está considerando. De esta manera, la ecuación general del balance (3.1) se puede escribir de la siguiente manera:

$$\sum_e n_i + \sum_g n_i = \sum_s n_i + \sum_c n_i + \sum_a n_i \quad (3.8)$$

En esta ecuación n_i representa los moles totales de cada una de las corrientes del proceso.

Cuando las corrientes del proceso están compuestas por más de una entidad química, la ecuación 3.8 puede ser escrita de la siguiente manera:

$$\sum_e n_i y_i + \sum_g n_i y_i = \sum_s n_i y_i + \sum_c n_i y_i + \sum_a n_i y_i \quad (3.9)$$

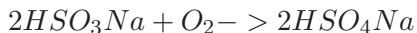
En la ecuación 3.9 los términos, corresponden a los moles y la composición molar del componente i -ésimo en la corriente i -ésima del proceso o de una unidad de proceso.

EJERCICIOS DE APLICACIÓN.

Ejemplo 3.8: El captopril, sufre degradación oxidativa en solución acuosa. Su máxima estabilidad es en ausencia de oxígeno y Ph menores o iguales a 4.0. En presencia de oxígeno el captopril se oxida a bisulfuro de captopril, según la siguiente reacción.



El bisulfuro de sodio, un antioxidante terminador de cadena, se oxida fácilmente por el oxígeno del aire y por el oxígeno disuelto en el agua, según la siguiente reacción.



El bisulfito de sodio y el captopril, compiten por el oxígeno. Siendo más afín el bisulfito que el captopril, razón por la cual se utiliza como antioxidante.

La solubilidad del oxígeno en el agua a una atmósfera de presión y 25 °C es de 5.75 mL/L.

La densidad del aire a 25 ° C y una atmósfera de presión es de 0.001185 g / mL. El aire, contiene un 21 % de oxígeno.

Calcular la cantidad de bisulfito necesario para proteger al captopril del oxígeno presente en una ampolla que contiene 2.0 mg en 2.0 mL de agua. Suponga, que sobre la solución de captopril hay un espacio de cabeza de 1.0 mL.

Análisis del problema.

El problema trata de un proceso unitario; por lo que hay un cambio en la entidad química del captopril bajo la influencia del oxígeno presente en la ampolleta. Durante el tiempo que dura el proceso, no hay transferencia de masas del sistema con sus alrededores; por esta razón, el término correspondiente a la acumulación se puede tomar como igual a cero. De esta manera, la ecuación del balance de masas se reduce para cualquier componente de las corrientes del proceso a entradas más generación es igual a las salidas más lo consumido.

Cálculos

Base de Cálculo: 2 mg de captopril.

Entradas

Captopril. PM = 217.29

$$\frac{2mgCP}{2mL} \times \frac{1m.molCP}{217.29mgCP} = 9.2 \frac{m.molCP}{2mL}$$

Oxígeno.

Oxígeno, que entra con el agua

Solubilidad del oxígeno en el agua 5.75 mL / L

Agua en la ampolleta = 2.0 mL.

$$\frac{5.75mLO_2}{1000mLH_2O} \times 2.0mLH_2O = 1.15 \times 10^{-2}mLO_2$$

$$n_{O_2} = \frac{1atm \times 1.15 \times 10^{-2}mL \times K \times mol \times 1000m.mol \times L}{0.08205Latm \times 298K \times mol \times 1000mL} = 4.70 \times 10^{-4}m.moles$$

Oxígeno que entra con el agua = $4.70 \times 10^{-4}m.moles$

Oxígeno que entra con el aire

Volumen de aire = 1.0 mL

Densidad = 0.001185 g / mL

PM = 28.84

$$n(Aire) = 1.0ml \times \frac{0.001185g}{mL} \times \frac{1.0mol}{28.84g} \times \frac{1000m.mol}{mol} = 4.11 \times 10^{-2}m.moles$$

Oxígeno que entra con el aire

$$n(Oxígeno) = \frac{0.21m.molesO_2}{m.moles Aire} \times 4.11 \times 10^{-2}m.moles Aire = 8.631 \times 10^{-3}m.moles$$

Oxígeno total en la ampolleta = Oxígeno en el Agua + Oxígeno en el Aire

Oxígeno Total = $9.1 \times 10^{-3}m.moles$

Cálculo del bisulfito necesario para consumir todo el oxígeno de la ampolleta, según la reacción de oxidación.

$$\frac{2m.molHSO_3Na}{1m.molO_2} \times 9.1 \times 10^{-3}m.molO_2 = 1.82 \times 10^{-2}m.molesHSO_3Na$$

Peso molecular del bisulfito de sodio 104

$$\frac{1.82 \times 10^{-2}m.molesHSO_3Na}{1m.molesHSO_3Na} \times 104mgHSO_3Na = 1.872mg. \text{ de bisulfito de sodio}$$

Para consumir todo el oxígeno presente en la ampolleta se necesitan 1.872 mg de bisulfito de sodio en el supuesto caso, que durante el llenado de la ampolleta no se halla inyectado un gas inerte como el nitrógeno.

Con los datos calculados de oxígeno total y bisulfito de sodio se pueden obtener las siguientes relaciones.

$$\frac{1.872mgH_2SO_3Na}{9.1 \times 10^{-3}m.molO_2} = \frac{205.71mgH_2SO_3Na}{m.molO_2}$$

Cálculo del Nitrógeno aportado por el Aire contenido en el Espacio de Cabeza.

Con la composición del aire, se forma un factor de conversión muy útil para calcular la cantidad de nitrógeno que entra con el oxígeno así:

$$\frac{0.79m.molesN_2}{0.21m.molesO_2} \times 8.631 \times 10^{-3}m.molesO_2 = 3.25 \times 10^{-2}m.molesN_2$$

Cantidad de Nitrógeno que entra con el oxígeno = $3.25 \times 10^{-2}m.moles$

Este último cálculo significa. En caso tal, de que el bisulfito se agote por el consumo del oxígeno aportado por el aire y el oxígeno aportado por el agua; quedará una atmósfera inerte de nitrógeno sobre la solución del captopril, la cual ayuda a mantener la estabilidad de esta solución.

Supongamos ahora, que no se le adicionó el bisulfito a la solución y al momento de llenar las ampollitas no se les inyectó nitrógeno como gas inerte.

Según la reacción de oxidación del captopril, se puede calcular el número de mili moles de captopril oxidado por el oxígeno presente, tanto en la solución como en el espacio de cabeza.

Utilizando la relación estequiométrica entre el captopril y el oxígeno tenemos:

$$\frac{4m.molesCP}{10m.molesO_2} \times 9.1m.molesO_2 = 3.64 \times 10^{-2}m.molesCP$$

El cálculo anterior, significa que 3.64×10^{-2} mili moles de captopril son oxidadas a bisulfuro de captopril. Con este dato, se puede calcular la cantidad de captopril que queda en la ampollita.

Captopril que queda en la ampollita = $9.2 - 0.0364 = 9.16$ m. moles.

Porcentaje de Captopril que queda en la ampollita después de haberse consumido todo el oxígeno presente.

$$\frac{9.16}{9.2} \times 100 = 99.6\%$$

Captopril degradado por el oxígeno = 0.40 %.

Los resultados correspondientes, a los cálculos del captopril remanente en la ampollita; son dependientes del tipo de cinética que sigue su descomposición y por consiguiente, de la constante de velocidad de la reacción.

Balance de Masas en Procesos Unitarios Continuos

En los procesos con reacción química, los términos correspondientes a generación y consumo de cada una de las entidades químicas que sufren la reacción, son diferentes de cero. El término correspondiente a acumulación es cero. Por lo tanto, la ecuación 3.8 puede escribirse de la siguiente forma:

$$\sum_e n_i + \sum_g n_i = \sum_s n_i + \sum_c n_i \quad (3.10)$$

En esta ecuación, n_i representa el número de moles de la corriente i -ésima, a la entrada, generada, a la salida y consumida en el proceso o en una unidad de proceso.

Cuando las corrientes de proceso, están compuestas por más de una entidad química; el número de moles para cada una de estas entidades químicas puede ser calculado mediante una transformación de la ecuación 3.10 la cual, toma la siguiente forma:

$$\sum_e n_i y_i + \sum_g n_i y_i = \sum_s n_i y_i + \sum_c n_i y_i \quad (3.11)$$

En esta ecuación, y_i representa la fracción molar del componente i -ésimo en la corriente i -ésima del proceso o de una unidad de proceso.

Ejemplo 3.9: Se alimenta un horno con gas a un ritmo de 20 lb / h y aire. El gas, está compuesto de un 90 % en peso de propano, un 8 % en peso de vapor de agua y el resto corresponde a dióxido de carbono. Calcular, los flujos molares de cada uno de los componentes del gas de chimenea, su composición, la ecuación de la reacción y la ecuación del proceso.

Análisis del problema.

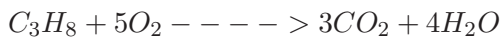
El problema corresponde a un proceso unitario continuo de combustión en presencia de oxígeno en exceso suministrado por el aire y con un tiempo de contacto entre los gases suficiente para que la reacción sea completa.

Por ser éste un proceso continuo, el término correspondiente a la acumulación es cero. De esta manera la ecuación general del balance de masas se reduce, para cada uno de los componentes de las corrientes de proceso a moles de entradas más moles generados tiene que ser igual a los moles de salida más los moles consumidos.

Por ser un proceso continuo con reacción química, se recomienda rotular todas las corrientes de proceso como flujos molares; facilitándose de esta manera los cálculos.

Diagrama de flujo y rotulación.

Reacción en el horno.



Relaciones Estequimétricas.

$$\frac{1lb.molC_3H_8}{5lb.molO_2}; \frac{1lb.molC_3H_8}{3lb.molCO_2}; \frac{1lb.molC_3H_8}{4lb.molH_2O}$$

Cálculos.

Base de calculo: 1 hora

Entradas

Propano

$$20 \text{ lbG} \times \frac{0.90 \text{ lbC}_3\text{H}_8}{\text{lbG}} = 18 \text{ lbC}_3\text{H}_8$$

$$n(\text{C}_3\text{H}_8) = 18 \text{ lbC}_3\text{H}_8 \times \frac{1 \text{ molC}_3\text{H}_8}{44 \text{ lbC}_3\text{H}_8} = 0.409 \text{ lb.mol}$$

$$20 \text{ lbG} \times \frac{0.08 \text{ lbH}_2\text{O}}{\text{lbG}} = 1.6 \text{ lbH}_2\text{O}$$

$$n(\text{H}_2\text{O}) = 1.6 \text{ lbH}_2\text{O} \times \frac{1 \text{ molH}_2\text{O}}{18 \text{ lbH}_2\text{O}} = 0.888 \text{ lb.mol}$$

Dióxido de Carbono

$$20 - (18 + 1.6) = 0.40 \text{ lb}$$

$$n(\text{CO}_2) = 0.40 \text{ lbCO}_2 \times \frac{1 \text{ molCO}_2}{44 \text{ lbCO}_2} = 0.0091 \text{ lb.mol}$$

Aire.

Oxígeno

De la relación Estequiométrica.

$$n(\text{O}_2) = \frac{5 \text{ lb.molO}_2}{1 \text{ lb.molC}_3\text{H}_8} \times 0.409 \text{ lb.molC}_3\text{H}_8 = 2.045 \text{ lb.mol}$$

Nitrógeno.

De la composición del Aire.

$$n(\text{N}_2) = 2.045 \text{ lb.molO}_2 \times \frac{0.79 \text{ lb.molN}_2}{0.21 \text{ lb.molO}_2} = 7.693 \text{ lb.mol}$$

Aire que entra al Horno

9.738 lb.mol

Consumido.

Propano, Oxígeno, Nitrógeno y Agua.

$$2.045 \text{ lb.mol } O_2 \times \frac{1 \text{ lb.mol } C_3H_8}{5 \text{ lb.mol } O_2} = 0.409 \text{ lb.mol}$$

$$n(C_3H_8) = 0.409 \text{ lb.mol}$$

$$n(O_2) = 2.045 \text{ lb.mol}$$

$$n(H_2O) = 0$$

$$n(N_2) = 0$$

Generación

Las únicas entidades químicas que se generan en el proceso son el agua y el dióxido de Carbono.

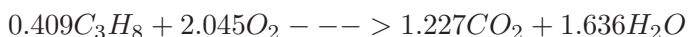
De las relaciones Estequiométricas.

$$n(CO_2) = 0.409 \text{ lb.mol } C_3H_8 \times \frac{3 \text{ lb.mol } CO_2}{1 \text{ lb.mol } C_3H_8} = 1.227 \text{ lb.mol}$$

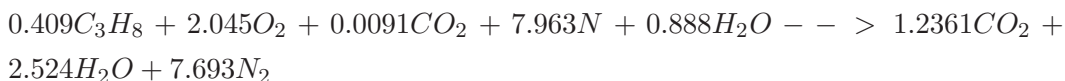
$$n(H_2O) = 0.409 \text{ lb.mol } C_3H_8 \times \frac{4 \text{ lb.mol } H_2O}{1 \text{ lb.mol } C_3H_8} = 1.636 \text{ lb.mol}$$

RESUMEN DEL BALANCE (lb.mol)				
E. Química	Entradas	Generación	Consumo	Salidas
Propano	0.4090		0.409	0.0000
Oxígeno	2.0450		2.045	0.0000
D. Carbono	0.0091	1.227		1.2361
Agua	0.8880	1.636		2.5240
Nitrógeno	7.6930			7.6930

Ecuación de la Reacción



Ecuación del Proceso



BALANCES DE MATERIA EN PROCESOS CON RECIRCULACIÓN

La recirculación de corrientes de fluidos (líquido, gases o vapores) en los procesos unitarios y en algunas operaciones unitarias es una práctica común para incrementar el rendimiento de una reacción química, enriquecer un producto, conservar el calor o para corregir una operación.

En una columna de destilación, parte del destilado retorna a través de la columna para enriquecer el producto, lo mismo sucede en la extracción de los principios solubles de materiales de origen vegetal, de origen animal o de origen mineral por la acción de un solvente o de una mezcla de solventes.

Los procesos con recirculación se pueden usar en los siguientes casos.

Cuando se quiere mantener la temperatura a un nivel constante en un punto del proceso, parte de una corriente caliente se hace circular a través de un intercambiador de calor.

Cuando los materiales que no reaccionan en la unidad de proceso o durante el proceso pueden separarse y enviarse nuevamente a la misma unidad de proceso; especialmente, cuando el rendimiento de la reacción es muy bajo y los materiales de procesos son muy costosos.

Cuando se quiere secar un material lentamente, la corriente de salida cargada de humedad se hace recircular por el secador, de esta manera, la velocidad de secado del material disminuye. Cuando por cualquier circunstancia, un producto farmacéutico no cumple con las especificaciones; se puede estudiar la posibilidad de reprocesarlo. En este caso, se incrementan los costos de cada unidad de producto.

Cuando en una planta de tratamiento de aguas negras o aguas residuales, parte de los lodos activos de un tanque de sedimentación se recirculan al tanque de aireación donde se tratan los líquidos.

Cuando se quiere mantener un ambiente con humedad y temperatura constante.

Cuando se quiere obtener una entidad química pura se hace una recristalización.

Recirculación

Es un proceso en el cual parte de la corriente producto, que contiene todos o una parte de los componentes se vuelve a la unidad de proceso para ser reprocesada o reutilizada. A esta, también se le conoce como corriente de recirculación.

Relación de Recirculación

Es la relación entre la cantidad de un material recirculado y la cantidad del mismo material que entra al proceso como alimentación nueva.

Alimentación Fresca

Es aquella parte de la alimentación al proceso o unidad de proceso que entra por primera vez al mismo. También esta corriente es conocida como alimentación nueva.

Alimentación al Proceso o Unidad de Proceso

Es aquella corriente de proceso que esta compuesta de la corriente de alimentación fresca y la corriente de recirculación.

Volumen de Control

Se entiende por volumen de control, aquella parte de un sistema o el sistema en su totalidad que se delimita con el fin de analizarla o realizar los diferentes tipos de balances. Las corrientes anteriormente mencionadas y de igual manera el volumen de control, se pueden representar en el siguiente diagrama.

En el diagrama anterior.

La secuencia de líneas (- - - -) , representa el volumen de control **I**, el cual encierra la unidad de proceso (UP).

La secuencia de línea y puntos (- · - · - · - · - ·), representa el volumen de control **II**, el cual encierra todo el proceso.

En estos volumen de control, se pueden realizar los respectivos balances de masas.

1 = Corriente de alimentación nueva o corriente de alimentación fresca.

2 = Corriente de alimentación combinada o corriente de alimentación al proceso.

3 = Corriente subproducto.

4 = Corriente de recirculación.

5 = Corriente producto

M = Mezclador de flujo de corriente

D = Divisor de flujo de corriente

Una de las características importantes de los procesos con recirculación, es que, la composición de las corrientes que entran y salen del divisor de flujo (**D**) es la misma; mientras que la composición de las corrientes de entrada y de salida en el mezclador de flujo (**M**) son diferentes.

En estos procesos se pueden hacer balance de masas y de componentes en la unidad de proceso, en el divisor de flujo, en el mezclador de flujo y en el proceso.

Ejemplo 3.10: Con el propósito, de obtener un secado suave de un granulado para comprimir, el aire fresco con una temperatura de bulbo seco de 60 ° F, temperatura de bulbo húmedo de 45 ° F y humedad absoluta de 0.003 lb agua /lb aire seco, se mezcla con aire recirculado a 112 ° F, punto de rocío de 104.3 ° F y humedad absoluta de 0.049 lb agua/lb aire seco. Esta mezcla se calienta hasta 200 ° F, punto de rocío de 88.5 ° F y humedad absoluta de 0.0295 lb.agua / lb.aire seco y luego, se introduce al secador. El secador se alimenta con 250 lb. de granulado húmedo con un 25 % en peso de agua. Si el granulado, sale con un 2.5 % en peso de agua, calcular:

Lb.A.S / h y lb.A.H. / h que entran al secador.

lb.A.S / h y lb.A.H / h recirculado.

Calcular el volumen de aire húmedo que entra y que se recircula, suponiendo que la unidad de secado se encuentra en el laboratorio de Farmacia Industrial del Departamento de Farmacia.

Antes de emprender la solución a este problema hay que tener en cuenta los siguientes conceptos de la sicrometría a saber:

Temperatura del bulbo seco. (T.b.s) Es la temperatura de una mezcla gas vapor determinada en la forma ordinaria por inmersión de un termómetro o cualquier otro dispositivo en la mezcla.

Temperatura del bulbo húmedo. (T.b.h) Es la temperatura en estado estacionario alcanzada por una pequeña cantidad de líquido que se evapora en una gran cantidad de una mezcla gas vapor no saturada. Con este propósito, se enrolla un material húmedo y poroso (una mecha o un trozo de tela desengrasado), alrededor del bulbo de un termómetro. Si se coloca este dispositivo en una corriente de aire húmedo insaturado manteniendo húmeda la mecha, la evaporación de líquido desde la mecha provoca una pérdida de calor en el bulbo, lo que trae como consecuencia una caída en la temperatura del bulbo y por consiguiente en la lectura del termómetro. Esta temperatura, es inferior a la temperatura del bulbo seco.

Temperatura de rocío o punto de rocío. (Tr) Es la temperatura a la cual hay que enfriar isobaricamente una mezcla de gas vapor insaturada para que se sature.

Humedad relativa (H.R) o saturación relativa (S.R). Se define como la relación entre la presión parcial del vapor en la mezcla y la presión de vapor del líquido a la temperatura de la mezcla. Esta se expresa en porcentaje. Cuando estas dos presiones son iguales, se dice que el sistema está saturado, es decir, la humedad relativa es del 100 %. Cuando la presión de vapor del líquido es mayor que la presión parcial del vapor en la mezcla a la misma temperatura, se habla de un sistema insaturado es decir, la humedad relativa es inferior al 100 %.

Análisis del problema.

El proceso con recirculación, al cual hace referencia este problema, es con transferencia continua y simultánea de masa y de energía, en el cual no hay ningún cambio en las entidades químicas de cada uno de los componentes de las corrientes de proceso. Por estas razones, los términos generación, consumo y acumulación son iguales a cero.

Al igual que los ejemplos desarrollados anteriormente, la ecuación general de balance de masa se reduce a la masa de las corrientes de entrada son iguales a las masas de las corrientes de salida, condición que debe ser cumplida para cada uno de los componentes de las corrientes de proceso, así como también en cada uno de los puntos en donde se plantee la ecuación del balance de masas.

De los datos del problema, se deduce que debe haber mayor consumo de energía para el proceso en el cual no hay recirculación de parte del aire que sale del secador. Porque llevar aire de una temperatura inicial de $15.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $93.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ consume más energía que llevar aire de una temperatura comprendida entre $15.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $44\text{ }^{\circ}\text{C}$ (temperatura dentro de la cual se debe encontrar la mezcla de aire nuevo y aire recirculado) hasta $93.3\text{ }^{\circ}\text{C}$., para el caso de recirculación de esta problema.

Diagrama de Flujo y Rotulación.

Como el proceso es continuo, todas las corrientes de proceso deben ser rotuladas como flujos másicos. La corriente de aire que entra y la corriente de aire que sale del proceso o de cada unidad de proceso, se rotulan como aire seco para facilitar los cálculos. De ésta manera, como aire seco $m_2 = m_3 = m_4$.

En el diagrama correspondiente a este problema, se pueden trazar dos volumen de control a saber;

Un volumen de control **I**, el cual encierra a la unidad de proceso.

Volumen de control **II**, el cual encierra a todo el proceso.

Sobre el volumen de control I, el cual encierra a la unidad de proceso se pueden realizar los siguientes balances:

- Balance de masas de las corrientes de proceso que entran y salen.
- Balances de cada uno de los componentes que entran y salen con cada una de las corrientes de proceso.

De igual manera, sobre el volumen de control II, se pueden realizar los mismos balances que para el volumen de control I.

Los valores que toman cada una de las corrientes de proceso con sus respectivas composiciones son:

Corriente 1

T.b.s = 60 ° F; T.b.h. = 45 ° F; $y = 0.003$ lb. H₂O / lb. A.S.

Corriente 3

T.bs = 200 ° F; T.r = 88.5 ° F; $y = 0.0295$ lb. H₂O / lb. A.S; H.R = 2.0 % bajo estas condiciones, esta corriente no está saturada.

Corrientes 4, 5 y 6

T.b.s. = 112 ° F; T.r. = 104.3 ° F; $y = 0.049$ lb. H₂O / lb. A.S; H.R = 75 % bajo estas condiciones, estas corrientes no están saturadas.

Corriente 7

Granulado Húmedo (GH) = 250 lb.

Agua = 0.32 lb H_2O / lb GH.

Granulado Seco (GS) = 0.68 lb. GS / lb GH

Corriente 8

Agua = 0.025 lb H_2O / lb GH

Granulado Seco (GS) = 0.975 lb GS / lb GH

Cálculos.

Como todas las variables de proceso, están rotuladas en el mismo sistema de unidades y en espacial para las variables de masas, se omite durante los cálculos las unidades.

Sustancia de Enlace. En éste caso, se toma como tal el granulado completamente seco.

Base de calculo: 250 lb de granulado húmedo.

- Balances alrededor del Volumen de Control I

Balance de sólido Seco.

$$0.975 \times m_8 = 250 \times 0.68$$

$$m_8 = \frac{250 \times 0.68}{0.975} = 174.36lb$$

Agua pérdida por el granulado.

$$250-174.36 = 75.64lb$$

Balance de Agua en el Secador

Agua transportada por el Aire = Agua pérdida por el Granulado

$$(0.049 - 0.0295)m_3 = 75.64$$

$$m_3 = \frac{75.46}{0.0049 - 0.0295} = 3878.79 \text{ lb A.S}$$

$$m_2 = m_3 = m_5 = 3878.97 \text{ lb A.S}$$

Agua que entra al secador con al corriente tres.

$$\text{Agua} = AS.y$$

$$\text{Agua} = 3878.97 \times 0.0295 = 38.78 \text{ lb}$$

$$AH = AS + \text{Agua}$$

$$AH_3 = 3878.97 + 37.78 = 3393.40 \text{ lb.}$$

En general el Aire húmedo se puede calcular mediante la fórmula.

$$AH = AS(1 + y)$$

Siendo y , la humedad del aire expresada en base seca.

Aire húmedo que sale del secador.

$$AH_4 = 3878.97(1 + 0.049) = 4069.04 \text{ lb.}$$

Balance en el Mezclador de Flujo.

$$m_1 + m_5 = m_2 = 3878.97 \text{ lb}$$

Balance de Agua

$$0.003m_1 + 0.049m_5 = 0.0295 \times 3878.97 = 114.43$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones, dada en el mezclador de flujo y la ecuación del balance de agua. Se tiene:

$$m_1 = 1644.41 \text{ lb}$$

$$AH_1 = 1644.41(1 + 0.003) = 1649.34 \text{ lb}$$

$$m_5 = 2234.56lb$$

$$AH_5 = 2234.56(1 + 0.049) = 2344.05lb$$

- Balance alrededor del Volumen de Control II

Balance de Aire seco en el Proceso

Aire seco a la entrada = Aire seco a la salida

$$m_1 = m_6 = 1644.41lb$$

Aire húmedo que sale del proceso

$$AH_6 = 1644.41(1 + 0.49) = 1724.98lb$$

Volumen de Aire húmedo correspondiente a la corriente uno.

$$V.AH = V.AS + V.H_2O$$

Bajo estas condiciones, el volumen se puede calcular por la ley de los gases ideales.

Número de moles de Aire Seco = 58.018 lb.mol

Número de moles de agua = 0.274 lb.mol

$$V.AH = \frac{58.29lb.mol \times 0.08205L.atm \times 291K \times 454mol \times 760mmHg \times pie^3}{560mmHg \times K \times mol \times lb.mol \times atm \times 28.317L}$$

$$V.AH = 30285.14pie^3$$

Volumen de aire húmedo Recirculado

Número de moles de aire seco = 77.48 lb.mol

Número de moles de agua = 6.083 lb.mol

$$V.AHr = \frac{83.56lb.mol \times 0.08205L.atm \times 317.45K \times 454mol \times 760mmHg \times pie^3}{560mmHg \times K \times mol \times lb.mol \times atm \times 28.317L}$$

$$V.AHr = 47357pie^3$$

BALANCE DE MATERIA CON DERIVACIÓN DE FLUJO

Estos procesos, son aquellos en que parte de la corriente alimentación entra al proceso o a una unidad de proceso para ser sometida a una operación unitaria o a un proceso unitario y la otra parte de la corriente alimentación no entra a la unidad de proceso, es decir, no sufre ningún cambio.

A diferencia de los balances de masa con recirculación, estos balances de masa poseen las siguientes características. El mezclador de corriente se encuentra después de la unidad de proceso mientras que el divisor de corriente se encuentra antes de la unidad de proceso. Al igual que en el caso anterior, la composición de las corrientes que entran y salen del divisor de flujo, tiene la misma composición; en cambio, la composición de las corrientes que entran y salen del mezclador de flujo son completamente diferentes.

Los procesos que presentan divisores de flujos, permiten llevar el mismo fluido (líquido, gas o vapor) a diferentes unidades de procesos dentro de un proceso productivo. Un ejemplo correspondiente a estos procesos, es la distribución de la sangre por todo el organismo y la distribución del agua las ciudades.

Los procesos con derivación de flujo, pueden ser representados de la siguiente manera:

En este diagrama.

1 = Corriente de alimentación.

2 = Corriente de alimentación a la unidad de proceso.

3 = Corriente subproducto.

4 = Corriente derivada o corriente bifurcada.

5 = Corriente producto

D = Divisor de flujo de corriente.

M = Mezclador de flujo de corriente.

Los puntos en donde se pueden realizar los balances de masas, son los mismos que para los procesos con recirculación.

Estos procesos con derivación de flujo pueden producir cambios de tipo físico solamente o cambios de tipo químico.

Ejemplo 3.11: Para la realización del proceso de fabricación de un granulado efervescente se requieren $1000 \text{ pie}^3/\text{minuto}$ de aire a 75° F , 60 % de humedad relativa y contenido de humedad de $0.01826 \text{ lbmol agua} / \text{lb.mol aire seco}$. Para tal fin, se dispone de aire a 95° F , 90 % de humedad relativa y contenido de humedad de $0.05287 \text{ lb.mol agua} / \text{lb.mol aire seco}$; el cual, se acondiciona pasando parte de él por un enfriador condensador de donde sale a 50° F y humedad absoluta de $0.0125 \text{ lb mol agua} / \text{lb mol aire seco}$ para luego, ser mezclado con la corriente derivada y recalentado hasta la temperatura requerida. Calcular: Volumen de aire derivado, volumen de aire que entra al enfriador condensador.

Análisis del problema.

Al igual que en el caso anterior, no hay ningún tipo de cambio en las entidades químicas que componen cada una de las corrientes de proceso. Dadas las condiciones anteriores y por ser éste un proceso continuo, los términos correspondientes a generación, consumo y acumulación son iguales a cero.

El aire, bajo las condiciones iniciales del problema, no es apropiado para almacenar materias primas o productos que se descompongan fácilmente en presencia de humedad. Por tales circunstancias, este aire se somete a un conjunto de operaciones controladas (enfriar, condensar y calentar) con el fin de obtener un aire a las condiciones pedidas.

De la unidad de proceso enriador condensador, salen dos corrientes a saber: una corriente de aire frío y completamente saturada con vapor de agua y una corriente de agua líquida o vapor condensado.

Rotulación y Diagrama de Flujo.

Todas las corrientes del proceso deben ser rotuladas como flujos.

Los valores que toman cada una de las corrientes de proceso con sus respectivas composiciones:

Corriente 1.

$T = 95 \text{ }^\circ \text{ F}$; $H = \text{Humedad} = 90 \%$;

$y = \text{Contenido de humedad} = 0.05287 \text{ lb.mol } H_2O/\text{lb.mol AS}$

La corriente 2 y la corriente 3, tienen la misma composición que la corriente 1; las condiciones de estas corrientes, son las mismas de la corriente 1.

Corriente 4.

$T = 50^\circ \text{ F}$; $H = \text{Humedad} = 100 \%$;

$y = \text{Contenido de humedad} = 0.0125 \text{ lb.mol } H_2O/\text{lb.mol AS}$.

Corriente 5

Lb.mol H_2O/min

Corriente 6

$V = \text{Volumen de Aire húmedo} = 1\,000 \text{ pies cúbicos}$; $T = 75^\circ \text{ F}$; $H = \text{Humedad} = 60 \%$

$y = \text{Contenido de humedad} = 0.01826 \text{ lb.mol } H_2O/\text{lb.mol AS}$; $P = \text{Presión} = 760 \text{ mmHg}$.

Las corrientes 1, 2, 3 y 4 pueden rotularse como flujos molares de aire seco o como flujos molares de aire húmedo. En este caso, se rotularon como flujos molares de aire húmedo.

Cálculos.

Base de calculo: 1 minuto

Flujo molar de aire húmedo de la corriente 6.

Bajo las condiciones del problema, la mezcla binaria aire vapor de agua cumple con la ley de los gases ideales.

Por lo tanto, se puede calcular el número de moles de aire húmedo, de la corriente 6.

$$PV = nRT$$

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{1000 \text{pie}^3 \cdot 1 \text{atm} \cdot \text{K mol lb.mol} \cdot 28.317 \text{L}}{0.08205 \text{Latm} \cdot 296.9 \text{K} \cdot 454 \text{molpie}^3} = 2.56 \frac{\text{lb.molAH}}{\text{min}}$$

- Balance alrededor del Volumen de Control I

Balance general de flujo en el proceso.

$$m_1 = m_5 + m_6$$

$$m_1 = m_5 + 2.56$$

Balance de Agua

Como las corrientes fueron rotuladas como flujos de aire húmedo, los contenidos de humedad del aire deben ser expresado en base húmeda.

$$m_1 \frac{0.05287}{1.05287} + m_5 = 2.56 \frac{0.01826}{1.01826}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones simultáneas, formadas por el balance de flujos y el balance de agua tenemos:

$$m_1 = 2.6469 \text{ lb.mol AH/min}$$

$$m_5 = 0.0869 \text{ lb.mol } H_2O/\text{min} = \text{Agua líquida que sale del enfriador condensador/minuto.}$$

Balance en el mezclador de Flujo

$$m_3 + m_4 = m_6 = 2.56$$

Balance de Agua.

$$m_3 \frac{0.05287}{1.05287} + m_4 \frac{0.0125}{1.0125} = 2.56 \frac{0.01826}{1.01826}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones simultáneas, formadas por el balance de flujos y el balance de agua tenemos:

$$m_3 = 0.380 \text{ lb.mol AH/min}$$

$$m_4 = 2.18 \text{ lb.mol AH/min}$$

Balance en el Divisor de Flujo

$$m_1 = m_2 + m_3$$

$$m_2 = 2.2629 \text{ lb.mol AH/min}$$

Volumen de aire húmedo que entra al proceso. Aplicando nuevamente la ecuación de los gases ideales.

$$V = \frac{2.646 \text{ lb.mol} \times 0.08205 \text{ L.atm} \times 308 \text{ K} \times 454 \text{ mol} \times 1 \text{ pie}^3}{\text{K mol atm lb.mol } 28.317 \text{ L}} = 1072.45 \frac{\text{pie}^3}{\text{min}}$$

Volumen del aire en pie^3/min que entran en el proceso = 1072.45

Calculo del volumen de aire por minuto que entra a la unidad de Proceso (enfriador condensador)

$$V_2 = \frac{2.2669 \text{ lb.mol} \times 0.08205 \text{ L.atm} \times 308 \text{ K} \times \text{pie}^3 \times 454 \text{ mol}}{\text{K} \times \text{mol} \times \text{atm} \times 28.317 \text{ L} \times \text{lb.mol}}$$

$$V_2 = 918.45 \frac{\text{pie}^3}{\text{min}}$$

Calculo del volumen de aire por minuto derivado o bifurcado.

$$V_3 = \frac{0.38 \text{ lb.mol} \times 0.08205 \text{ Latm} \times 308 \text{ K} \times \text{pie}^3 \times 454 \text{ mol}}{\text{K} \times \text{mol} \times \text{atm} \times 28.317 \text{ L} \times \text{lb.mol}}$$

$$V_3 = 153.96 \frac{\text{pie}^3}{\text{min}}$$

EJERCICIOS DE APLICACION

1. Se quiere preparar 5 000 L de jarabe al 50 % en peso, a partir de jarabe simple U.S.P. y de un jarabe al 40 % en peso. En que proporción deben mezclarse. Calcular: la densidad de los jarabes y su composición peso a volumen.
2. En dos horas se separa por destilación una mezcla de alcohol y agua, la cual contiene un 60 % en peso de alcohol. La corriente superior es una mezcla de alcohol y agua que contiene 820 kg. de alcohol, la corriente inferior es también, una mezcla de alcohol y agua y contiene 510 kg. de agua. Si la operación se hace en régimen continuo. Calcular: los flujos másicos, la fracción másica y la composición molar de la corriente salida.
3. Se alimenta a una columna de destilación una corriente compuesta de un 40 % en peso de benceno y 60 % en peso de tolueno. El destilado o corriente de cima tiene un 96 % en peso de benceno y el producto de los fondos tiene un 91% en peso de tolueno. Si la cantidad alimentada es de 2 500 kg./h de mezcla calcular, el benceno y el tolueno recuperado, la composición de la corriente salida.
4. 500 kg. de un granulado para tabletear con un 20 % en peso de agua, se somete a una operación isotérmica de secado de donde sale con un 2.0% en peso de agua. Cual es el peso del granulado seco y cuanta agua perdió.
5. Cuanto jarabe del 50 % en peso y cuanta sacarosa se necesita para preparar 1 000 kg. de jarabe simple U.S.P. Cual es la densidad del jarabe.
6. Una premezcla de un concentrado para animales contiene un 40 % en peso de un fármaco. Cuantos kg. de auxiliar de formulación hay que adicionarle para que la mezcla resultante tenga un 5 % en peso del fármaco.
7. 200 kg. de un granulado para comprimir, con un 20 % en peso de agua, se somete a una operación de secado en una estufa de donde sale con un 2 % en peso de agua. Si a dicha estufa, entra aire con un contenido de humedad de 0.02 lb de agua / lb de A.S y sale con un contenido de humedad de 0.100 lb de agua / lb A.S. Calcular: Las libras de aire seco que entran al secador, las libras de aire húmedo que entran y salen del secador, agua total transportada por el aire.

8. Para obtener un secado suave de un material vegetal, parte del aire que sale de un secador adiabático ($T=38\text{ }^{\circ}\text{C}$ y humedad absoluta de $0.0351\text{ kg de }H_2O/\text{kg}$ de aire seco) se mezcla con aire fresco ($T=15\text{ }^{\circ}\text{C}$ y humedad absoluta de $0.0083\text{ kg de }H_2O/\text{kg}$ de aire seco) para formar la alimentación combinada ($T=26\text{ }^{\circ}\text{C}$ y humedad absoluta de $0.0173\text{ kg de }H_2O/\text{kg}$ de aire seco). Esta alimentación combinada se introduce en el secador previamente calentada a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Si al secador, entran 10.0 kg del material vegetal y después de 24 horas salen 3.0 kg del material completamente seco, calcular el flujo volumétrico de aire a la entrada del secador, flujo de aire recirculado y el flujo de la alimentación fresca en pie^3/min . Nota el secador se encuentra en el laboratorio de Recursos naturales del Departamento de Farmacia de La Universidad nacional de Colombia.

9. Para la zona de producción de efervescentes se requieren $800\text{ pies}^3\text{aire}/\text{minuto}$ a $75\text{ }^{\circ}\text{F}$ y humedad absoluta de $0.01826\text{ lb de agua}/\text{lb A.S.}$ Para tal efecto, se dispone de aire a $95\text{ }^{\circ}\text{F}$ y humedad absoluta $0.05287\text{ lb de agua}/\text{lb A.S.}$ Este aire, se acondiciona pasando parte de él por un enfriador condensador de donde sale a $50\text{ }^{\circ}\text{F}$ y con humedad absoluta de $0.0125\text{ lb de agua}/\text{lb A.S}$ para luego ser mezclado con la corriente derivada y ser calentado hasta $75\text{ }^{\circ}\text{F}$. Calcular los pies cúbicos de aire que entran al proceso, el % de aire derivado y el agua condensada.

10. El jugo de naranjas fresco, contiene un 12% en peso de sólidos totales, mientras que el jugo concentrado contiene un 42% en peso de sólidos totales. Inicialmente se empleaba un sólo proceso de evaporación para concentrar el jugo, pero sus componentes volátiles se arrastraban con el vapor de agua afectando las propiedades organolépticas del concentrado. El proceso actual, supera éste problema mediante la derivación de una porción de jugo fresco que no pasa por el evaporador. El jugo que entra al evaporador, sale con un 58% en peso de sólidos totales, mezclándose este producto con la corriente derivada para lograr la concentración de jugo concentrado. Calcular la cantidad de jugo concentrado obtenida con $2\ 500\text{ kg.}$ de jugo fresco, fracción de jugo derivado y cantidad de agua evaporada.

11. En una planta de tratamiento que opera bajo condiciones estables, se reduce el contenido de impurezas a un líquido residual de 0.5 % en peso a 0.01 % en peso. Sólo se permite una concentración máxima de estas impurezas de 0.1 % en peso para su descarga al río local. Qué % de líquido residual inicial puede ser derivado y cumpla aún con las normas establecidas, si se procesa una tonelada del mismo.
12. En una planta farmacéutica, se requiere preparar un granulado de un fármaco muy activo. Para ello, se mezclan inicialmente 10 kg. del fármaco con 10 kg. de un diluyente. Qué cantidad de diluyente debe ser adicionada para que la concentración del fármaco sea del 0.2 % en peso. Cuantas tabletas de 25 mg pueden ser obtenidas si las pérdidas del proceso son del 1 %.
13. Para obtener 100 000 comprimidos cardioactivos de 50 mg cada uno, se requieren realizar un conjunto de operaciones físicas entre ellas, una premezcla; en la cual, se mezcla todo el fármaco con parte de los auxiliares de formulación hasta alcanzar una composición en peso del 25 %. Si cada comprimido debe contener 7.5 mg del fármaco, se pregunta, cuanto auxiliar de formulación se necesita para alcanzar la composición pedida.
14. Una premezcla de un fármaco hipotensor contiene un 40 % en peso del fármaco. Cuanto de diluyente, hay que adicionarle para fabricar 1000 000 de tabletas de 2.0 mg de fármaco y 50 mg de peso. Cuanto diluyente, lleva la premezcla.
15. Cierta tipo de microorganismo requiere para su crecimiento de un ambiente de aire húmedo enriquecido con oxígeno. Para esto, se alimenta a una cámara de evaporación agua líquida con un flujo de 20 mL/min y oxígeno puro con un flujo molar igual a un quinto del flujo molar del aire. El análisis de la corriente producto dice que hay 1.5 % moles de agua. Calcular el flujo del aire, el flujo de oxígeno, fracción molar y la fracción másica de todos los componentes.
16. Se bombea agua a baja presión a un proceso de fabricación de un jarabe. Se quiere adicionar sacarosa al agua con el fin de que tenga un 30 % en peso de sacarosa. Por lo difícil de bombear un sólido se utiliza el siguiente procedimiento. Parte del agua que entra es derivada a un recipiente en donde se satura de sacarosa (70 % en peso), luego, esta corriente saturada se mezcla con agua para obtener el jarabe del 30 % en peso. Completar el balance para elaborar 50 kg. de jarabe.

17. 40 lb. de gas propano, se queman en un horno con 582.4 lb. de oxígeno proveniente del aire. Si los gases de combustión contienen 0.10 moles de propano. Calcular el aire que entra al horno y la composición de los gases de la combustión en base seca y en base húmeda. Determinar la ecuación de la reacción y la ecuación del proceso. Proponga una solución para evitar la salida del dióxido de carbono a la atmósfera.

18. Un granulado para tabletería obtenido por vía húmeda tiene un 28 % en peso de agua. Se quiere reducir su contenido de humedad a un 2.8 % en peso. Calcular el % de agua que debe retirarse de 250 kg de granulado húmedo.

19. Resolver el problema del ejemplo 3.6, para un grado de conversión del propano del 90 %.

20. Como quedaría la siguiente ecuación de balance de masas.

$$m_e + m_g = m_s + m_a + m_c$$

Para los siguientes casos:

- a. Operación unitaria de mezclado sólido - líquido.
- b. Proceso unitario continuo, de la oxidación parcial del fenobarbital.
- c. Disolución continua de un sólido en un líquido.
- d. Operación de aglutinación por vía húmeda y por vía seca.
- e. Operación de compresión de un granulado.

21. Se mezcla jarabe simple USP con alcohol del 60 % en peso de etanol, para obtener 150 kg. de un vehículo con un 12 % en peso de etanol. Vehículo, que se utilizará en la elaboración de un elixir de un fármaco depresor del sistema nervioso central. Clasificar el proceso, hacer el diagrama de flujo, rotularlo, calcular la cantidad de jarabe, la cantidad de alcohol y la composición del vehículo.

22. Se está usando un evaporador para concentrar soluciones de azúcar de caña. Se evaporan 10 000 kg/día de una solución que contiene 38 % en peso de sacarosa, obteniéndose una solución con un 74 % en peso de sacarosa. Calcúlese el peso de solución obtenida y la cantidad de agua evaporada.
23. Algunos peces se procesan para obtener harina de pescado para utilizarse como suplemento en alimentos. En el proceso empleado, primero se extrae el aceite para obtener una pasta que contiene 80 % en peso de agua y 20 % en peso de harina seca. Esta pasta, se seca en un secador de tambor rotatorio para obtener un producto seco con un 40 % en peso de agua. Finalmente, el producto se muele a grano fino y se empaqueta. Calcúlese la alimentación de pasta en kg./h necesaria para producir 1000 kg/h de harina seca.
24. Un lote de 100 kg de hojas húmeda conteniendo 70 % en peso de humedad se seca hasta reducir el contenido de agua a 63.8 Kg. ¿Cuál es el peso de las hojas "seca" y la cantidad de agua que se elimina?
25. Una pulpa de fruta húmeda contiene 68 % de peso en agua. Después de secarla se determina que se ha eliminado el 55 % del agua original de la pulpa. Calcúlese la composición de la pulpa "seca" y su peso para una alimentación de 1000 kg/min de pulpa húmeda.
26. En un proceso para fabricar jalea, la fruta macerada conteniendo 14 % en peso de sólidos solubles se mezcla con azúcar (1.22 kg azúcar / 1.00 kg de fruta) y pectina (0.0025 kg de pectina / 1.00 kg de fruta). La mezcla resultante se evapora en una olla para producir una jalea conteniendo 67 % en peso de sólidos solubles. Calcúlese, para una alimentación de 1000 kg de fruta macerada, los kg de mezcla obtenida, los kg de agua evaporada y los kg de jalea producida.
27. La harina de tapioca se usa en muchos países para hacer pan y productos similares. La harina se procesa secando los granos gruesos de la raíz de casabe (que contienen 66 % de humedad en peso) hasta reducirla al 5 % y moliendo hasta finura de harina. ¿Cuántos kg de granos deben secarse y qué cantidad de agua tiene que extraerse para producir 5000 kg de harina por hora?

28. Un material sólido con un 15.0 % de humedad en peso, se seca hasta reducirlo a un 7.0 % en peso por medio de una corriente de aire caliente mezclada con aire de recirculación del secador. La corriente de aire no recirculada contiene 0.01 kg de agua/kg de aire seco, el aire de recirculación tiene 0.1 kg de agua/kg de aire seco y el aire mezclado contiene 0.03 kg de agua/kg de aire seco. Para una alimentación de 100 kg de sólidos/hr al secador, calcúlense los kg de aire seco/hr de aire nuevo, los kg de aire seco/hr del aire de recirculación.

29. En un proceso para concentrar 1000 kg de jugo de naranja recién obtenido, que contiene el 12.5 % en peso de sólidos. La maceración produce 800 kg de jugo y 200 kg de pulpa. El jugo exprimido se concentra en un evaporador al vacío para obtener una concentración de 58 % de sólidos. Los 200 kg de pulpa se derivan extrayéndolos antes de entrar al evaporador y se mezclan con el jugo evaporado en un mezclador para mejorar el sabor. Este jugo concentrado final contiene 42% de sólidos en peso. Calcúlese la concentración de sólidos en el jugo exprimido, los kg de jugo concentrado final y la concentración de sólidos en la pulpa que se derivan. (Sugerencia: Procédase primero a un balance total y después a un balance de sólidos en el proceso total. Después, hágase el balance en el evaporador y, finalmente, el balance en el mezclador)

BIBLIOGRAFIA

1. LANGHAAR Henry. Dimensional. Analysis and Theory of Model John Wiley and Son N.Y 1967.
2. HUNTLEY H. E. Dimensional Analysis. Dover Publications. Inc. N.Y. USA 1967.
3. MANGEOT. Jeanning. Ingeniería Farmacéutica. Editorial. El Manual Moderno. Mexico 1986.
4. FOUST Alan, WENZEL Leonard, CURTIS Clumb, MAUSS Louis, ANDERSEN Brice. Principios de Operaciones Unitarias. Compañía Editorial Continental 1993.
5. SOUDERS Moott. Manual de Ingeniería. Editorial Limusa. Mexico 1989
6. BRYCE L Andersen AND WENZEL Leonard. Introduction to Chemical Engineering. Mc Graw Hill Book Company. 1961.
7. MARTIN A, SWARBRICK J, CAMMARATA A. Physical Pharmacy. Philadelphia. 1983.
8. TIPLER Paul A. Física. Editorial Reverté. Barcelona 1978.
9. HUSTON Mervyn J. A Texbook of Pharmaceutical Arithmetic. The Canadian Pharmaceutical Association. Toronto-Canadá. 1975.
10. CROMER Alan H. Física para la Ciencias de la Vida. Editorial Reverté. S.A. Barcelona. 1982.
11. METZ Clyde. Fisicoquímica. McGraw-Hill. Colombia 1991.
12. The United State Pharmacopoeia, The National Formulary. Twin book Parkway Rockville. Printed by Rand Mc Nally. 1995.
13. The Merck Index. eleventh edition. Merck and Co. Inc Rahway U.S.A. 1982.
14. Tablas para Laboratorios. Merck.

15. Handbook of Pharmaceutical Excipients. American Pharmaceutical Assotiation. Washington. 1986.
16. LOPEZ Luis y RAMIREZ Jesús. Determinación de algunas Constantes Fisicoquímicas en Vehículos Acuomiscibles de Uso Farmacéutico. Parte I. Tesis de Grado. Departamento de Farmacia, Universidad Nacional 1982.
17. BEANAH. S., BECKETT A. H.. and CARLESS J. E. Advances in Pharmaceutical Sciences. Vol 2, Academic Press. London. 1967.
18. FONTAN Sandro, NORBIS Mario. Química General Universitaria. Fondo Educativo Interamericano. México 1983.
19. STOKLOSA Mitchel and ANSEL Howard. Pharmaceutical Calculations. Ninth Edition Lea and Febiger Philadelphia. 1991.
20. HERZKA A. and PICKTHAL J. Prezurized Packin (Aerosols). Butterworths Scientific Publications. 1958.
21. SHEPHERD H.R Aerosols Sciences and Technology. Intersciencie Publishers. Inc. N.Y. 1961.
22. PERRY. Manual del Ingeniero Químico. Sexta Edición Tomo. Mc Graw Hill 1992.
23. GEANKOPLIS Christie J. Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias. Compañía Editorial Continental. México. 1998.
24. ULRICH G.D. Procesos de Ingeniería Química. Mc Graw Hill. 1986.
25. McCABE Warren, SMITH Julián, HARRIOTT Peter. Operaciones básicas de Ingeniería Química. Cuarta edición. Mc Graw Hill. 1991.
26. TREYBAL Robert. Operaciones de Transferencia de Masa. Segunda Edición. Mc Graw Hill. 1989.
27. HIMMELBLAU David. Balance de Materia y Energía. Cuarta Edición. Practice Hall. 1988.
28. REKLAITIS G.V. Balances de Materia y Energía. Mc Graw Hill. 1989.

29. FELDERD Richard, ROUSSEAU Ronald. Principios Básicos de los Procesos Químicos. Editorial El Manual Moderno. México. 1981.
30. HOUGEN Olaf, WATSON K, Ragatz. Chemical Process Principles. John Wiley & son. 1964.
31. KRICK Edward. Introducción a la Ingeniería y al diseño en la Ingeniería. Segunda Edición. Editorial Limusa.
32. HELMAN José. Farmacotecnia Teórica y Práctica. Tomo III. Editorial Continental. 1984.
33. DOCUMENTA GEYGY. Tablas Científicas. Séptima Edición . Basilea, Suiza