



**Conceptualización y análisis de información bibliográfica para la identificación de unidades de procesos, variables y composiciones utilizadas en procesos químicos**

Andrade Calvopiña, María Cristina

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Petroquímica

Trabajo de Unidad de Integración Curricular, previo a la obtención del título de Petroquímico

Ing. Luna Ortiz, Eduardo David

27 de agosto del 2021



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE PETROQUÍMICA

#### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de unidad de integración curricular, '**Conceptualización y análisis de información bibliográfica para la identificación de unidades de procesos, variables y composiciones utilizadas en procesos químicos**' fue realizado por la señorita **Andrade Calvopiña, María Cristina** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 27 de agosto del 2021



---

Ing. Luna Ortiz, Eduardo David

C.C.: 1802724912




DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE PETROQUÍMICA



REPORTE DE VERIFICACIÓN

Original

#### Document Information

Analyzed document	Andrade_C_Integración_Curricular.pdf (D111762911)	
Submitted	8/27/2021 9:36:00 PM	
Submitted by	Lorena Ibarra	 Firmado digitalmente por: <b>EDUARDO</b> <b>DAVID LUNA</b>
Submitter email	loretaibarra@yahoo.es	
Similarity	4%	
Analysis address	lorenadibarra.uta@analysis.orkund.com	

#### Sources included in the report

<b>SA</b>	1529891070_896__Termodinamica.pdf Document 1529891070_896__Termodinamica.pdf (D40447566)	 1
<b>W</b>	URL: <a href="https://docplayer.es/37306392-Balance-de-masa-y-energia.html">https://docplayer.es/37306392-Balance-de-masa-y-energia.html</a> Fetched: 8/2/2020 10:03:23 AM	 1
<b>W</b>	URL: <a href="https://pdfcoffee.com/balances-de-materia-felder-2-pdf-free.html">https://pdfcoffee.com/balances-de-materia-felder-2-pdf-free.html</a> Fetched: 5/17/2021 6:22:05 PM	 1
<b>W</b>	URL: <a href="https://pdfcoffee.com/introduccion-a-los-procesos-quimicos-regina-m-murphy-4-pdf-free.html">https://pdfcoffee.com/introduccion-a-los-procesos-quimicos-regina-m-murphy-4-pdf-free.html</a> Fetched: 6/12/2021 2:36:29 AM	 4
<b>W</b>	URL: <a href="https://pdfcookie.com/documents/principios-elementales-de-los-procesos-quimicos-felder-52e1d009ydv8">https://pdfcookie.com/documents/principios-elementales-de-los-procesos-quimicos-felder-52e1d009ydv8</a> Fetched: 5/18/2021 5:42:31 AM	 1



Firmado digitalmente por:  
**EDUARDO**  
**DAVID LUNA**

Ing. Luna Ortiz, Eduardo David

C.C.: 1802724912



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE PETROQUÍMICA

#### RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Andrade Calvopiña, María Cristina** con cédula de ciudadanía N.º 0503622110, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de unidad de integración curricular: '**Conceptualización y análisis de información bibliográfica para la identificación de unidades de procesos, variables y composiciones utilizadas en procesos químicos**' es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 27 de agosto del 2021

---

**Andrade Calvopiña, María Cristina**  
C.C.: 0503622110





## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE PETROQUÍMICA

### AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Andrade Calvopiña, María Cristina**, con cédula de ciudadanía N.º 0503622110, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de unidad de integración curricular '**Conceptualización y análisis de información bibliográfica para la identificación de unidades de procesos, variables y composiciones utilizadas en procesos químicos**' en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 27 de agosto del 2021

---

**Andrade Calvopiña, María Cristina**  
C.C.: 0503622110

## DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a:

A mí, por el esfuerzo y dedicación que le he puesto a mi carrera universitaria para alcanzar las metas que me propuse desde que empecé mi vida estudiantil.

A mi madre Katy que siempre estuvo y está apoyándome e impulsándome a seguir adelante, dándome ánimos, brindándome su cariño, creyendo en mí sobre todas las cosas y dándome su amor incondicional. Sin ti nada de esto sería posible porque siempre estuviste ahí y me ayudaste a creer en mí, me siento muy afortunada por tenerte conmigo.

A David y Amelia por el simple hecho de existir, confiar plenamente en las cosas que hago, por esas palabras de apoyo cuando más las necesito, esto recién es el inicio de algo bueno que hay que forjarlo para que sea duradero. Han sido ese motor para seguir adelante y no rendirme.

A mis tíos por haber confiado en mí y apoyarme emocionalmente para poder culminar mis estudios.

A mis primos por ser como mis hermanos y siempre darme consejos para mi vida y para mis estudios.

A mi abuelita por estar pendiente, confiar en mí y sobre todas las cosas siempre creyó que lograría culminar mi carrera.

## **AGRADECIMIENTOS**

Estoy agradecida con Dios y con la vida por no desampararme cuando más lo he necesitado y me ha ayudado a tomar las mejores decisiones en mi vida estudiantil y personal.

A mi madre que ha sido una luz al final del camino más oscuro, cuando sentía que no podía avanzar más siempre estuvo dándome ánimos y recordándome cuales eran los objetivos y las metas por las cuales empezó todo.

También quiero agradecerle al Ing. David Luna por haber sido un excelente profesor y tutor que ha estado pendiente, brindándome su apoyo y creyendo en mí. Muchas gracias también Dr. Román Rodríguez, Dr. Pablo Tuza por haber sido buenos docentes, enseñándome varias cosas importantes para la vida personal y profesional.

Agradezco mucho a mis amigos May y José con los que pude entablar una amistad muy grande que espero que dure muchos años más, han sido una clave fundamental en esta etapa.

## Tabla de Contenidos

<b>Carátula</b> .....	1
<b>Certificación</b> .....	2
<b>Reporte de verificación</b> .....	3
<b>Responsabilidad de autoría</b> .....	4
<b>Autorización de publicación</b> .....	5
<b>Dedicatoria</b> .....	6
<b>Agradecimientos</b> .....	7
<b>Resumen</b> .....	9
<b>Abstract</b> .....	10
<b>Generalidades</b> .....	11
<b>Antecedentes</b> .....	11
<b>Planteamiento del Problema</b> .....	11
<b>Justificación e Importancia</b> .....	12
<b>Objetivos</b> .....	13
<i>Objetivo General</i> .....	13
<i>Objetivos Específicos</i> .....	13
<b>Capítulo II</b> .....	14
<b>Conclusiones y Recomendaciones</b> .....	15
<b>Conclusiones</b> .....	15
<b>Recomendaciones</b> .....	16
<b>Bibliografía</b> .....	17
<b>Anexos</b> .....	18

## RESUMEN

En la ingeniería química, petroquímica y afines se involucran diseños de operaciones de plantas para la transformación física y/o química de materias primas en productos intermedios y finales con un valor agregado. Las unidades importantes en las operaciones unitarias son los mezcladores, separadores, divisores, reactores, torres de destilación, entre otros.

Las unidades y dimensiones son utilizadas en los cálculos de ingeniería, expresadas en términos de unidades estándar de medida, la propiedad que tienen las dimensiones es que se pueden medir y se expresan en términos de masa, longitud, tiempo, temperatura, un número siempre debe ir acompañado de una dimensión para que tenga sentido. La conversión de unidades se aplica cuando se requiere transformar una unidad en otro valor de medida, considerando la homogeneidad dimensional.

Los diagramas de flujo de bloque y proceso son representaciones visuales de procesos químicos, donde se proporciona la información necesaria de las condiciones empleadas, al momento de resolver los balances de materia no se sabe si la información proporcionada es suficiente, para esto se utiliza el análisis de grados de libertad con el fin de saber si un problema está subespecificado, sobreespecificado o totalmente especificado.

Palabras clave:

- **OPERACIONES UNITARIAS**
- **UNIDADES**
- **DIMENSIONES**
- **DIAGRAMAS DE FLUJO**
- **ANÁLISIS DE GRADOS DE LIBERTAD**

## ABSTRACT

Chemical, petrochemical and related engineering involve plant operations designs for the physical and/or chemical transformation of raw materials into intermediate and final products with added value. Important units in unit operations are mixers, separators, dividers, reactors, distillation towers, among others.

Units and dimensions are used in engineering calculations, expressed in terms of standard units of measurement, the property that dimensions have is that they can be measured and are expressed in terms of mass, length, time, temperature, a number must always be accompanied by a dimension to make sense. Unit conversion is applied when it is required to transform one unit into another measurement value, considering dimensional homogeneity.

Block and process flow diagrams are visual representations of chemical processes, where the necessary information of the conditions used is provided, at the time of solving the balances of matter it is not known if the information provided is sufficient, for this the analysis of degrees of freedom is used in order to know if a problem is underspecified, overspecified or totally specified.

Keywords:

- **UNIT OPERATIONS**
- **UNITS**
- **DIMENSIONS**
- **FLOWCHARTS**
- **ANALYSIS OF DEGREES OF FREEDOM**

## Capítulo I

### 1.Generalidades

#### 1.1 Antecedentes

La industria petroquímica es una de las actividades más importantes, porque se dedica a la obtención de productos con alto valor agregado, tiene una alta influencia en las cadenas productivas porque a partir de los productos básicos, intermedios o finales se obtienen materiales útiles para la vida (Pangtay, 2014)

Las unidades y dimensiones son importantes para dar valor a una cantidad, en la actualidad el sistema internacional es el más utilizado, consta de siete unidades fundamentales que son la masa, longitud, tiempo, corriente eléctrica, temperatura, cantidad de sustancia, intensidad luminosa, a partir de ellas se derivan otras unidades importantes como la velocidad, densidad, volumen, etc. Los factores de conversión se emplean para poder expresar ciertas cantidades en otras unidades, tomando en cuenta la homogeneidad dimensional (Ledanois & López, 1996).

Los diagramas de flujo de procesos son representaciones graficas que muestran las condiciones, materias primas, equipos empleados, etc en la industria, además permite la visualización de actividades innecesarias, considerándose como el principal instrumento para el diseño de nuevos procesos o la innovación de los ya existentes (Manene, 2011).

El análisis de grados de libertad es un método matemático riguroso que se emplea en los diagramas de flujo para determinar si un problema está subespecificado, sobreespecificado o totalmente especificado.

#### 1.2 Planteamiento del Problema

En los problemas de ingeniería es necesario expresar las cantidades en términos de dimensiones para poder ser cuantificadas y tengan un valor lógico, si se realizan operaciones entre dimensiones que no sean del mismo tipo no va a existir homogeneidad dimensional y los resultados no van a ser los correctos, para esto se emplean factores de conversión que permiten la transformación de una unidad a otra.

En la industria es necesario tener información detallada de la producción o método empleado para realizar algún procedimiento, como la obtención de productos deseados, la remoción de contaminantes, entre otros, para esto se utiliza diagramas de flujo que cuentan con la mayor información necesaria para poder replicar o mejorar un procedimiento, además, se debe verificar si el proceso está completamente especificado con un análisis de grados de libertad.

### **1.3 Justificación e Importancia**

La ingeniería química involucra el diseño y operación de plantas de procesos químicos, que son instalaciones donde se van a obtener productos deseados mediante la transformación química y/o física de la materia prima, la planta debe constar con instalaciones de preparación de la materia, separadores, mezcladores, reactores, tanques de almacenamiento, instalaciones para tratar los residuos, equipo de transferencia de materia y energía.

En los procesos químicos se usan valores, unidades y dimensiones que son importantes para los cálculos en ingeniería. Algunas de las dimensiones básicas son la masa, longitud, tiempo, temperatura y dimensiones derivadas como velocidad, volumen, energía. Hay dos sistemas importantes que es el sistema inglés y el sistema internacional. La conversión de unidades es la transformación de un valor con una medida expresada en otra unidad de medida de la misma naturaleza. La homogeneidad dimensional se utiliza para poder visualizar las ecuaciones que son válidas e inválidas, donde se relacionan las magnitudes físicas de una manera algebraica, es muy importante tener en cuenta que se pueden realizar las operaciones matemáticas únicamente magnitudes de la misma naturaleza.

Para poder entender los procesos químicos se utilizan diagramas de flujo de bloques (BFD), diagramas de flujo de procesos (PFD), diagramas de instrumentación (PID), que brindan una información cuantitativa y cualitativa sobre las variables del proceso como moles, composición, concentración, presión, temperatura, densidad.

El presente trabajo tiene la finalidad de compilar y analizar información bibliográfica acerca de la identificación de todas las unidades de proceso, variables y composiciones utilizadas en los procesos químicos, petroquímicos y afines.



## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Conceptualizar y analizar información bibliográfica para la identificación de unidades de procesos, variables y composiciones utilizadas en procesos químicos.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Buscar y compilar información bibliográfica referente a las unidades de procesos, variables y composiciones
- Identificar la información bibliográfica referente a los sistemas de unidades y su respectivo análisis dimensional.
- Analizar la información bibliográfica referente a los diagramas de flujo de entradas-salidas, diagramas de flujo de bloques y diagrama de flujo de procesos.
- Contextualizar la bibliografía referente a los grados de libertad en los diagramas de flujo con uno y varios procesos en la industria química, petroquímica y a fines
- Elaborar material bibliográfico referente a las unidades de proceso, variables, composiciones utilizadas en la industria química, petroquímica y afines.

## Capítulo II

El producto acreditable para presentar es el material bibliográfico compilado sobre la identificación de unidades de procesos, variables y composiciones utilizadas en procesos químicos, para ser utilizado en la elaboración de un capítulo de un libro de balance de materia y energía se encuentra detallado en el anexo 1.

## Capítulo III

### Conclusiones y Recomendaciones

#### 3.1 Conclusiones

- A partir de la investigación bibliográfica realizada se determinó el rol de la ingeniería química, petroquímica y afines en los procesos que se encargan de la transformación física y/o química de materia prima en productos valiosos, mediante el uso de diagramas utilizados en balances de materia y energía.
- La revisión bibliográfica permitió conocer acerca de las unidades y dimensiones que se emplean en los cálculos realizados en ingeniería, debido que son las encargadas de darle un valor real y válido a las cantidades.
- Mediante la investigación bibliográfica se analizó la importancia de realizar un análisis dimensional para conocer que valor necesita ser expresado en otras unidades, teniendo en consideración que no siempre se pueden utilizar factores de conversión para sus respectivas transformaciones, como es el caso de la temperatura donde se utilizan ecuaciones.
- La revisión bibliográfica llevada a cabo permitió conocer acerca de las unidades de proceso, que es donde ocurren los cambios físicos y/o químicos, separaciones, mezclas y contienen corrientes de entrada y salida que generalmente son representadas por líneas. A este conjunto de unidades de proceso se las denomina diagramas de flujo que generalmente son precisos, compactos y específicos para detallar un proceso. Los diagramas de flujo representan los procesos químicos brindando información de materiales, especificaciones, condiciones de presión y temperatura.
- Se pudo conocer bibliográficamente acerca de las características y diferencias de las especificaciones para calcular los flujos de proceso, que puede ser la composición del sistema que brinda información de la cantidad de materia de corriente y el desempeño del sistema que se describen en los cambios físicos y/o químicos del proceso.

- El análisis de los grados de libertad que es utilizado para conocer si un diagrama de procesos tiene la información necesaria para poder ser resuelto mediante un balance de materia, es decir si un problema de cálculo de flujo específico se encuentra completamente especificado cuando tiene un número igual de variables y ecuaciones independientes, sobreespecificado cuando existen más ecuaciones que variables o subespecificado cuando hay más variables que ecuaciones.
- La compilación de material bibliográfico sobre la identificación de unidades de procesos, variables y composiciones utilizadas en procesos químicos va a ser utilizada en la resolución de problemas de ingeniería y en el diseño de diagramas de flujo para especificar procesos ya sean a nivel industriales o de laboratorio.

### **3.2 Recomendaciones**

- Se recomienda utilizar la información referente a los factores de conversión, en la elaboración de una matriz digital de transformaciones de unidades afines a los problemas de ingeniería química o petroquímica.
- Es recomendable buscar alternativas que permitan dibujar los diagramas de flujo, puede ser mediante el uso de software o simulaciones.
- Es recomendable estudiar acerca de los procedimientos empleados en la biorrefinería, que transforma la biomasa en productos valiosos y en bioenergía, se puede plasmar en diagramas de flujo donde se pueda observar las condiciones que se necesita para que sean procesos eficaces y útiles en la industria.

## Bibliografía

- Beens, J., & Blomberg, J. (2009). Petrochemistry. *ELSEVIER*.
- Coulson, J., & Richardson, J. (2001). *Chemical Engineering: Vol. VOL 1*.
- Felder, R. M., & Rousseau, R. W. (2004). Principios elementales de los procesos químicos. In *Limusa Wiley* (Vol. 3th).
- Ghasem, N., & Henda, R. (2015). *Principles of Chemical Engineering Processes MATERIAL AND ENERGY BALANCES SECOND EDITION*.
- Ledanois, J., & López, A. (1996). *Magnitudes, Dimensiones y Conversiones de Unidades*. Equinoccio.
- LLópez, M., & Gómez, O. (1988). El Sistema Internacional de Unidades. *Salud Pública de México*.
- Lockwood, A. (1969). Diagrams: A Visual Survey of Graphs, Maps, Charts and Diagrams for the Graphic Designer. *ERIC*.
- Manene, L. M. (2011). LOS DIAGRAMAS DE FLUJO: SU DEFINICIÓN, OBJETIVO, VENTAJAS, ELABORACIÓN, FASES, REGLAS Y EJEMPLOS DE APLICACIONES. *Academia*.
- Matar, S., & Hatch, L. (2000). *Chemistry of Petrochemical Processes* (Vol. 2).
- Montoya, C., Monsalve A, & Patiño, M. (2011). Tabla de conversión de unidades. *Textos Académicos*.
- Morris, A. E., Geiger, G., & Fine, A. (2011). Handbook on Material and Energy Balance Calculations. In *John Wiley & Sons* (Vol. 3th).
- Murphy, R. M. (2007). Introducción a los procesos químicos: Principios, Análisis y Síntesis. In *McGraw-Hill Interamericana*.
- Pangtay, S. (2014). *Petroquímica y Sociedad*.
- Torres Robles, Rafael., & Castro Arellano, J. J. (2002). *Análisis y simulación de procesos de refinación del petróleo*. Instituto Politécnico Nacional.
- Turton, R., Bailie Richard, Whiting, W., & Shaeiwitz, J. (2009). *Analysis, synthesis, and design of chemical processes* (Vol. 3).

**ANEXOS**

**Anexo 1**

**Conceptualización y análisis de  
información bibliográfica para la  
identificación de unidades de  
procesos, variables y  
composiciones utilizadas en  
procesos químicos**

## Contenidos

<i>Sistema de Unidades y Análisis Dimensional</i> .....	7
1.1 Ingeniería Química.....	7
1.2 Industria Petroquímica.....	8
1.3 Dimensiones y Unidades.....	9
1.3.1 Unidades en el Sistema Internacional.....	9
1.3.1.1 Unidades Básicas del Sistema Internacional.....	9
1.3.1.2 Unidades derivadas.....	11
1.4 Unidades fuera del Sistema Internacional.....	12
1.4.1 Unidades aceptadas temporalmente.....	13
1.4.2 Unidades aceptada.....	13
1.4.3 Unidades no aceptadas.....	13
1.5 Unidades en el Sistema de Ingeniería Americano.....	13
1.6 Conversión de Unidades.....	17
1.6.1 Ecuaciones de conversión.....	23
1.6.1.1 Temperatura.....	23
1.6.1.2 Conversión de Temperatura.....	24
1.6.2 Recomendaciones para Resolución de Problemas.....	26
1.7 Presión.....	26
1.7.1 Tipos de Presión.....	29
1.7.2 Sensores de Presión.....	30
1.7.2.1 Tipos de Manómetros.....	32
1.8 Cifras Significativas.....	33
1.8.1 Reglas para la Determinación y Redondeo de Cifras Significativas.....	33
1.8.2 Operaciones Matemáticas.....	35
1.8.3 Homogeneidad Dimensional.....	35
1.8.3.1 Cantidades Adimensionales.....	37
1.9 Flujo Másico y Volumétrico.....	37
1.10 Peso Molecular y Moles.....	39
1.11 Unidad Molar.....	41
1.11.1 Composición Másica y Molar.....	42
1.11.2 Concentración.....	45



Ejercicios Propuestos.....	47
Referencias Bibliográficas .....	49
<i>Diagramas de Flujo</i> .....	50
2.1 Procesos y Variables de Procesos.....	50
2.1.1 Diagrama de Flujo de Proceso.....	50
2.1.2 Unidad de Proceso.....	51
2.1.3 Corrientes de Proceso .....	51
2.1 Diagramas de Flujo de Procesos.....	51
2.3 Unidades de Proceso en Diagramas de Flujo de Bloques.....	52
2.3.1 Mezcladores.....	53
2.3.2 Reactores .....	53
2.3.3 Divisores .....	54
2.3.4 Separadores .....	55
2.4 Diagrama de Flujo de Entrada-Salida.....	55
2.5 Diagrama de Flujo de Bloques.....	56
2.5.1 Como Diseñar un Diagrama de Flujo de Bloques .....	56
2.6 Unidades de Procesos de Operaciones Unitarias .....	58
2.6.1 Secadores .....	58
2.6.2 Filtros.....	59
2.6.3 Columna de destilación.....	59
2.6.4 Evaporador de efectos múltiples.....	60
2.6.5 Deshumidificadores.....	61
2.6.6 Humidificador .....	61
2.6.7 Lixiviación y extracción.....	62
2.6.8 Absorbedor / Desorbedor.....	63
2.6.9 Condensador parcial.....	64
2.6.10 Separador flash .....	64
2.6.11 Cristalizador.....	65
2.7 Diagrama de Flujo de Procesos .....	66
2.8 Operaciones Unitarias en una Refinería .....	69
2.8.1 Destilación Primaria .....	69
2.8.2 Destilación al Vacío.....	69

2.8.3 Hidrodesulfuración.....	69
2.8.4 Reformación .....	70
2.8.5 Isomerización.....	70
2.8.6 Desintegración Catalítica .....	71
2.8.7 Alquilación .....	72
2.8.8 Polimerización.....	72
2.8.9 Coquización.....	73
2.8.10 Recuperación de Azufre.....	74
2.8.11 Mezclado de Gasolina .....	75
2.8.12 Unidad de Servicios Auxiliares .....	75
Ejercicios Propuestos.....	76
Referencias Bibliográficas .....	78
<i>Análisis de Grados de Libertad.....</i>	<i>79</i>
3.1 Definiciones .....	79
3.1.1 Base de cálculo .....	79
3.1.2 Sistemas y Corrientes.....	80
3.1.3 Especificaciones.....	80
3.2 Ecuaciones para Balance de Masa.....	82
3.2.1 Tipos de Componentes.....	82
3.2.2 Procedimiento Calcular los Flujos en el Proceso.....	83
3.2.3 Consejos para el Cálculo Correcto de los Flujos .....	84
3.3 Análisis de Grados de Libertad .....	95
3.3.1 Ecuaciones Independientes .....	97
3.4 Análisis de Grados de Libertad para Múltiples Unidades.....	103
Ejercicios Propuestos.....	108
Referencias Bibliográficas .....	110

## Simbología

La simbología utilizada se encuentra a continuación:

SI	Sistema internacional
AES	Sistema americano, (American Engineering System) por sus siglas en inglés
F	Fuerza
W	Peso de un cuerpo
a	Aceleración
g	Gravedad
$g_c$	Factor de conversión gravitacional
$\rho$	Densidad
v	Velocidad
$\mu$	Viscosidad
D	Diámetro
PE	Punto de ebullición
PF	Punto de fusión
$P_{abs}$	Presión absoluta
$P_{man}$	Presión manométrica
$P_{atm}$	Presión atmosférica
$\dot{m}$	Flujo másico
$\dot{V}$	Flujo volumétrico
SG	Gravedad específica
R	Constante de los gases ideales
$\overline{M}_W$	Peso molecular promedio
$M_W$	Peso molecular
$y_i$	Fracción molar del componente

$x_i$	Fracción másica del componente
$m_i$	Masa del compuesto
$n_i$	Moles del compuesto
$M_i$	Masa molar
PFD	Diagrama de flujo de procesos, (Fluid Process Diagram), por sus siglas en inglés
GLP	Gas licuado de petróleo
E	Entrada
S	Salida
G	Generación
C	Consumo
A	Acumulación
$\gamma_i$	Coefficiente estequiométrico
DOF	Análisis de grados de libertad, (Degress Of Freedom), por sus siglas en inglés

# 1

## *Sistema de Unidades y Análisis Dimensional*

La ingeniería química es una rama de las ciencias que se enfoca en el diseño, modelado y operación de plantas de procesos químicos y físicos, utilizados para la transformación o modificación de materia prima en productos terminados útiles para la vida diaria. Para la realización de los cálculos es necesario considerar el correcto uso de unidades y dimensiones que serán revisados en el presente capítulo, en donde, se va a conocer sobre la conversión de unidades para el sistema internacional e inglés, conceptos útiles para la transformación de un valor de una unidad a otra teniendo en cuenta la homogeneidad dimensional utilizada para la validación de las ecuaciones donde se relacionan las magnitudes físicas de manera algebraica

### **Objetivos de Aprendizaje**

- Comprender el concepto de ingeniería química, petroquímica y procesos afines.
- Conocer y entender las unidades y dimensiones en el sistema inglés e internacional.
- Analizar el uso adecuado de cifras significativas para la exactitud de las medidas.
- Identificar las tácticas para la conversión de unidades y la homogeneidad dimensional.

### **1.1 Ingeniería Química**

La ingeniería química es la capacidad de realizar procedimientos para la transformación de la estructura de la materia de forma química y física en uno o varios productos, otra definición se enfoca en el conocimiento de química, biología, ciencias naturales y otras

artes que se adquieren a lo largo de la vida profesional, y de esta manera establecer un criterio de optimización para generar procesos más eficaces y sostenibles.

Las áreas de dominio de la ingeniería química son la minería, producción de papel, obtención de plástico, caucho, petroquímica, productos sintéticos, medio ambiente, etc. Además de aportar en la producción de semiconductores, biotecnología, nanotecnología, medicina, entre otras áreas.

En los procesos de transformación de la materia prima en productos terminados, se debe considerar las cantidades a ser utilizada en la alimentación, además de comprender las condiciones y los principios de los balances de materia y energía que se desarrollarán en las distintas unidades de proceso previo a la obtención del producto.

## **1.2 Industria Petroquímica**

La industria petroquímica utiliza como materia prima hidrocarburos gaseosos y líquidos, para la transformación en productos útiles que están divididos en básicos, intermedios y productos finales, los principales son:

Combustibles

Resinas termoplásticas

Fibras sintéticas, las más conocidas son las poliamidas, poliéster y acrílicas

Elastómeros sintéticos

Fertilizantes nitrogenados

Plastificantes y aditivos para plásticos

Entre otros

La ingeniería química es afín con los procesos de refinación del crudo de petróleo, en donde se utiliza las operaciones unitarias principales como las columnas de destilación, compresores, turbinas, reactores, intercambiadores de calor, bombas, absorbedores, entre otras. En tanto que la petroquímica utiliza como materia

prima al gas natural y al petróleo para refinarlos y transformarlos en productos con valor agregado, la mayoría de los hidrocarburos utilizados son las parafinas, olefinas y compuestos aromáticos.

### **1.3 Dimensiones y Unidades**

En la ingeniería química se realizan operaciones en donde es necesario expresar cantidades en términos de dimensiones que puedan ser cuantificadas, como la longitud, masa, temperatura, tiempo, velocidad, corriente, cantidad de sustancia, etc. Las dimensiones vienen acompañadas por unidades que son las que le dan un valor relativo.

Existen dos sistemas importantes en los que se expresan las unidades de medida, el Sistema Internacional (SI) que es el más utilizado en la ingeniería y en el mundo científico, en donde las unidades de longitud están expresadas en metros (m), la masa en kilogramos (kg), la temperatura en kelvin (K), el tiempo en segundos (s), etc. El otro es el Sistema Inglés que expresa a las unidades de longitud en pie (ft), masa en libra-masa (lbm), temperatura en grados Fahrenheit (°F), etc.

#### **1.3.1 Unidades en el Sistema Internacional**

El sistema internacional se clasifica en 3 importantes grupos: unidades básicas, derivadas y suplementarias.

##### **1.3.1.1 Unidades Básicas del Sistema Internacional**

En el sistema internacional se tienen siete unidades básicas que se utilizan en los cálculos, las demás unidades utilizadas se derivan de estas.

**Tabla 1.1**

Unidades Básicas en SI

<b>Dimensiones</b>	<b>Unidades</b>
Longitud	Metro (m)
Masa	Kilogramo (kg)
Tiempo	Segundo (s)
Corriente eléctrica	Amperios (A)
Temperatura	Kelvin (K)
Cantidad de Sustancia	Moles (mol)
Intensidad luminosa	Candela (cd)

Los prefijos son utilizados para formar múltiplos y submúltiplos de las unidades en el sistema internacional, en la tabla 1.2 se muestran algunos prefijos en el sistema internacional.

**Tabla 1.2**

Prefijos en SI

<b>Prefijos</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Factor</b>
Yotta	Y	$10^{24}$
Zetta	Z	$10^{21}$
Exa	E	$10^{18}$
Peta	P	$10^{15}$
Tera	T	$10^{12}$
Giga	G	$10^9$
Mega	M	$10^6$
Kilo	k	$10^3$



Hecto	h	$10^2$
Deca	da	$10^1$
Deci	d	$10^{-1}$
Centi	c	$10^{-2}$
Milo	m	$10^{-3}$
Micro	$\mu$	$10^{-6}$
Nano	n	$10^{-9}$
Pico	p	$10^{-12}$
Femto	f	$10^{-15}$
Atto	a	$10^{-18}$
Zepto	z	$10^{-21}$
Yocto	y	$10^{-24}$

---

### 1.3.1.2 Unidades derivadas.

Las unidades derivadas se obtienen mediante operaciones matemáticas de las unidades fundamentales, como es el caso de la velocidad (m/s), densidad ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), densidad de corriente ( $\text{A}/\text{m}^2$ ), fuerza (N), energía (J).

**Tabla 1.3**

Unidades Derivadas en SI

Cantidad derivada	Unidad derivada
Área	$\text{m}^2$
Volumen	$\text{m}^3$
Velocidad	$\text{m}/\text{s}$
Aceleración	$\text{m}/\text{s}^2$
Densidad	$\text{kg}/\text{m}^3$
Volumen específico	$\text{m}^3/\text{kg}$

Densidad actual	$A/m^2$
Concentración	$mol/m^3$

---

**Tabla 1.4**

Unidades Derivadas en Otros Términos de SI y en Unidades Básicas.

<b>Cantidad derivada</b>	<b>Unidad derivada</b>	<b>Expresión en otros términos de SI</b>	<b>Expresión en términos de unidades básicas de SI</b>
Frecuencia	Hertz (Hz)		$s^{-1}$
Fuerza	Newton (N)		$m*kg*s^{-2}$
Presión	Pascal (Pa)	$N/m^2$	$m^{-1}*kg*s^{-2}$
Trabajo	Joule (J)	$N*m$	$m^2*kg*s^{-2}$
Energía	Watt (W)	$J/s$	$m^2*kg*s^{-3}$
Cantidad de electricidad	Coulomb (C)		$s*A$
Potencial eléctrico	Voltios (V)	$W/A$	$m^3*kg*s^{-3}*A^{-1}$

#### 1.4 Unidades fuera del Sistema Internacional

Las unidades que se encuentran fuera del sistema internacional deben cumplir las siguientes consideraciones:

Se aceptan de manera temporal para usarse con el SI

Se aceptan para usarse junto al SI

Unidades que hay que evitar porque no son aceptadas para usarse

#### 1.4.1 Unidades aceptadas temporalmente

Un ejemplo es el caso de la presión en bares, en algunos textos bibliográficos, tablas termodinámicas mencionan que 1 bar es la presión estándar, (1 atm equivale a 1.013 bar).

#### 1.4.2 Unidades aceptada

La dimensión de tiempo acepta otras unidades como son minutos, días, horas en lugar de segundos, la dimensión de volumen el litro y la dimensión de masa en tonelada.

#### 1.4.3 Unidades no aceptadas

Para resolver problemas de ingeniería no es posible mezclar el sistema internacional con el sistema inglés, las unidades métricas que no son aceptadas son el ergio y la dina, en dimensiones de presión las torres y en dimensiones de fuerza el kilogramo-fuerza.

### 1.5 Unidades en el Sistema de Ingeniería Americano

El AES (American Engineering System) por sus siglas en inglés, se utiliza en la industria, y la información referente a este sistema se lo puede encontrar en tablas específicas.

**Tabla 1.5**

Unidades en el Sistema Americano

<b>Dimensión</b>	<b>Unidad</b>
Longitud	Pie (ft)
Masa	Libra (lb)
Tiempo	Segundo (s)
Área	ft <sup>2</sup>
Volumen	ft <sup>3</sup>

Velocidad	ft/s
Aceleración	ft/s <sup>2</sup>
Fuerza	Poundal (lbf/s <sup>2</sup> )
Trabajo y energía	Poundal*ft
Presión	Poundal/ft <sup>2</sup>

---

La unidad de fuerza tiene diferencia en el sistema internacional y en el americano, donde en el SI la unidad es el newton que está basado en la unidad de fuerza natural mientras que en el AES se puede hacer una selección arbitraria de fuerza o masa, para ello se utiliza la ley de Newton:

$$\text{Fuerza} = \text{masa} \times \text{aceleración} \quad (1.1)$$

Por ejemplo, si se llega a seleccionar la unidad de libra masa, esta puede estar en función de kilogramos para lo cual se debe saber que 1lbm equivale a 0.4536kg, la aceleración va a tener las unidades de ft/s<sup>2</sup>, la unidad de fuerza va a estar en poundal (ft/s<sup>2</sup>).

La unidad de libra fuerza (lbf) viene dada por una aceleración de 32.174 ft/s<sup>2</sup> a libras masa (lbm), este valor es también la fuerza de gravedad que se aplica sobre la tierra, cuando se está trabajando con lbf, la unidad de masa con lbm y una aceleración en ft/s<sup>2</sup>, la unidad de masa derivada se la conoce como slug que es equivalente a 14.5939 kg

Para evitar errores en los resultados numéricos cuando se trabaja con unidades de lbf y lbm la ecuación 1.1 debe reescribirse de la siguiente forma:

$$\text{Fuerza} = \text{masa} \times \frac{\text{aceleración}}{g_c} \quad (1.2)$$

Donde

$g_c$  = Es el factor de conversión gravitacional y tiene un valor de  $32.174 \frac{\text{lbm}\cdot\text{ft}}{\text{lbf}\cdot\text{s}^2}$

El peso de un cuerpo es la fuerza de gravedad que existe entre este y la tierra, y se lo expresa en unidades de lbf, transformándose la ecuación 1.2 en:

$$F = W \times \frac{a}{g} \quad (1.3)$$

Donde:

F= Fuerza que actúa sobre un cuerpo en lbf

W= peso de un cuerpo en unidades de lbf

a= aceleración del cuerpo en dirección de la fuerza,  $\text{ft}/\text{s}^2$

g= aceleración de la gravedad,  $\text{ft}/\text{s}^2$

El peso de un cuerpo que este expresado en unidades de lbf va a ser numéricamente igual a la masa del cuerpo en unidades de lbf, por ejemplo, el agua pesa 2.2046 lbf y la masa del agua es igual a 2.2046 lbf.

### **Ejemplo 1.1 Masa y Peso**

Calcule la masa de un bloque de aluminio que tiene un volumen de  $6\text{ft}^3$  ( $0.17 \text{ m}^3$ ), el alambre que sostiene al bloque de aluminio tiene un diámetro de  $0,25\text{in}$  ( $0,635 \text{ cm}$ ). Además calcule la fuerza gravitacional y la tensión. Realice los cálculos en el sistema internacional e inglés. (La densidad del aluminio es de  $168,7 \text{ lbf}/\text{ft}^3$  ( $2702 \text{ kg}/\text{m}^3$ )). Suponga la masa del alambre.

### **Solución**

Se calcula la masa del bloque:

$$m = \rho \times V$$

En SI:  $m = (2702 \text{ kg/m}^3)(0,17 \text{ m}^3) = 459.34\text{kg}$

En AES  $m = (168.7 \text{ lbm/ft}^3)(6\text{ft}^3) = 1012.2 \text{ lbm}$

El peso del bloque viene dado por:

$$W = m \times g$$

En SI:  $W = (459.34 \text{ kg})(9.8066 \text{ m/s}^2) = 4504.563 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 4504.563 \text{ N}$

Se aplica la ecuación de lbf=lbm cuando la aceleración de la gravedad es igual a  $g_c$

En AES  $W = (168.7 \text{ lbm/ft}^3)(6\text{ft}^3) = 1012.2 \text{ lbm} = 1012.2 \text{ lbf}$

Calculando el área del alambre:

$$A = \pi r^2$$

En SI:  $A = \pi \left(0,317\text{cm} \times \frac{1\text{m}}{100\text{cm}}\right)^2 = 3.156 \times 10^{-5} \text{m}^2$

En AES  $A = \pi(0.125 \text{ in})^2 = 0.05 \text{ in}^2$

Finalmente se encuentra la tensión:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

En SI:  $\sigma = \frac{4504.563 \text{ N}}{3.156 \times 10^{-5} \text{m}^2} = 1.427 \times 10^8 \text{ Pa}$

En AES  $\sigma = \frac{1012.2 \text{ lbf}}{0.05 \text{ in}^2} = 2.024 \times 10^3 \text{ lbf/in}^2$

### Ejemplo 1.2 Energía Cinética

1 mol de nitrógeno viaja a una velocidad de 150 m/s (492.126 ft/s), calcule la energía cinética en el sistema SI y AES.

## Solución

La expresión de la energía cinética viene dada por:

$$E_k = \frac{1}{2} m \times v^2$$

La masa de un mol de nitrógeno es 0.028 kg (0.061 lbm)

En SI:  $E_k = \frac{1}{2} (0.028 \text{ kg})(150 \text{ m/s})^2 = 315 \text{ J}$

En AES  $E_k = \frac{1}{2} (0.061 \text{ lbm}) \frac{(492.126 \text{ ft/s})^2}{32.174 \frac{\text{lbm} \cdot \text{ft}}{\text{lb}_f \cdot \text{s}^2}} = 229.587 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f$

### 1.6 Conversión de Unidades

La conversión de unidades es importante para el desarrollo de problemas de ingeniería, en los ejemplos anteriores hubo la necesidad de convertir ciertas unidades para poder llegar a la respuesta correcta del ejercicio. Existen conversiones sencillas como la transformación del tiempo, se sabe que 1 hora tiene 60 minutos; o, en unidades de longitud es conocido que 1 pie tiene 12 pulgadas.

Se debe realizar un análisis dimensional donde se verifica que las dimensiones se encuentren en las mismas unidades, si no es ese el caso se debe multiplicar por un factor de conversión para transformarlas.

Cantidad que se desea cambiar de unidades	Factor de Conversión	Cantidad en las nuevas unidades
↓	↓	↓
$\text{Número de unidad original} \left[ \frac{\text{nueva unidad}}{\text{unidad original}} \right] = \text{Nuevo número en nueva unidad}$		

Cuando se multiplica la cantidad que se desea cambiar de unidades, por el factor de conversión, se simplifican algunas unidades quedando como resultado la

cantidad con las nuevas unidades a este procedimiento se lo conoce como método de factor unitario.

En muchos casos los resultados son números extremadamente grandes o pequeños para ello se recomienda la utilización de números exponenciales, donde se simplifican las cantidades en múltiplos de las potencias de 10, el exponente de la potencia puede ser negativo o positivo donde:

Exponente positivo  $1,23 \times 10^{n+}$ : Significa que se va a multiplicar por 10  $n$  veces, es decir la coma decimal se mueve  $n$  lugares a la derecha.

Exponente negativo  $1,23 \times 10^{-m}$ : Se va a dividir por 10  $m$  veces, es decir la coma decimal se mueve  $m$  lugares a la izquierda.

**Tabla 1.6**

Equivalentes exponenciales de números sencillos

Número	Equivalentes exponenciales
0,000001	$1 \times 10^{-6}$
0,00001	$1 \times 10^{-5}$
0,0001	$1 \times 10^{-4}$
0,001	$1 \times 10^{-3}$
0,01	$1 \times 10^{-2}$
0,1	$1 \times 10^{-1}$
1	$1 \times 10^0$
10	$1 \times 10^1$
100	$1 \times 10^2$
1000	$1 \times 10^3$
10000	$1 \times 10^4$
100000	$1 \times 10^5$



1000000

 $1 \times 10^6$ **Tabla 1.7**

Factores de Conversión de Algunas Unidades

<b>Masa</b>				
1 kilogramo	1000 g	2,205 lb	35,27 oz	
1 gramo	10 dg	100 cg	1000 mg	
1 tonelada	1000 kg	2205 lb	106 g	
1 libra	454 g	16 oz		
1 gramo	6,022 x 10 <sup>23</sup> unidades de masa atómica			
1 unidad de masa atómica	1,6605 x 10 <sup>-24</sup> gramos			
<b>Volumen</b>				
1 m <sup>3</sup>	1000 mL	35,31 ft <sup>3</sup>	106 cm <sup>3</sup>	
1 L	1 dm <sup>3</sup>	0,001 m <sup>3</sup>	1000 cm <sup>3</sup>	61,02 in <sup>3</sup>
1mL	1 cm <sup>3</sup>	0,001 L		
1 ft <sup>3</sup>	28,316 L	29,924 cuartos	7,481 gal	1728 in <sup>3</sup>
1 gal	3,84 L			
<b>Longitud</b>				
1 milla	5280 ft	1,609 km		
1 yarda	36 in	0,9144 m		
1 pulgada	2,54 cm			
1 metro	100 cm	39,37 in	3,281 ft	
1 kilómetro	1000 m	1094 yd	0,6215 millas	
1 ft	30,48 cm	12 in	0,3048 m	

	1 x 10 <sup>-8</sup>	0,10 nm		
	cm 1 x 10 <sup>-</sup>	3,937 x 10 <sup>-9</sup>		
1 angstrom	10 m	in	100 pm	
<b>Densidad</b>				
	1000			
1 g/cm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	1 g/mL	1 kg/L	62,43 lb/ft <sup>3</sup>
				1,6x10 <sup>2</sup>
1 lb/ft <sup>3</sup>	16,02 kg/m <sup>3</sup>		1,6 X10 <sup>2</sup> g/MI	g/cm <sup>3</sup>
	27,68			
1 lb/in <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>			1728 lb/ft <sup>3</sup>
<b>Energía</b>				
		1,163 x10 <sup>-6</sup>	3,969 x10 <sup>-3</sup>	
1 cal	4,186 J	kW h	BTU	3,088 ft lb
			2,93 x 10 <sup>-4</sup> kW	
1 BTU	252 cal	1055 J	h	
1 lb ft	1,356 J	0,3238 cal		
1 cal/min	Potencia	0,251 kw		
<b>Tiempo</b>				
1 año	12 meses	365 días		
1 día	24 horas	1440 minutos		
	60			
1 hora	minutos	3600 segundos		
	60			
1 minuto	segundos			

**Tabla 1.8**

Unidades Básicas en SI y AES

Sistema	Masa	Longitud	Tiempo	Temperatura
SI	Kilogramo (kg)	Metro (m)	Segundo (s)	Kelvin (K)
AES	Libra (lbm)	masa Pie (ft)	Segundo (s)	Fahrenheit (F)

**Tabla 1.9**

Constantes de los Gases Ideales

10,731	psia ft <sup>3</sup> / lbmol
0,082056	atm L/ mol K
8,3143	Pa m <sup>3</sup> / mol K
0,08314	bar L/ mol K
8314,3	J/ kgmol K
1,987	Btu/ lbmol
62,36	L mmHg/ mol K

**Ejemplo 1. 3 Conversión de Masa**

Determinar a cuantas libras equivalen 21 kg.

**Solución:**

Cantidad que se desea cambiar de unidad: 21 kg

$$21 \text{ kg} \times \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \times \frac{1 \text{ lb}}{454 \text{ g}} = 26,4317 \text{ lb}$$

Es importante colocar en las cantidades numéricas las unidades, porque un valor sin unidades carece de sentido técnico y no se puede llegar a la homogeneidad dimensional.

### Ejemplo 1.4 Análisis Dimensional

Se desea calcular cuantas libras se emplea en una receta de galletas, cuando se ocupa un galón de leche, dos galones de jugo de naranja fresco y 1 funda grande de harina de trigo. ¿Cómo podría sumar los galones con las libras para encontrar la respuesta?

#### Solución

$$1 \text{ galón de leche} \times \frac{8,3 \text{ lb}}{1 \text{ galón}} = 8,3 \text{ lb de leche}$$

$$2 \text{ galones de jugo de naranja} \times \frac{8,3 \text{ lb}}{1 \text{ galón}} = 16,6 \text{ lb de jugo de naranja}$$

$$1 \text{ funda de harina grande} \times \frac{6,6 \text{ lb}}{1 \text{ funda grande}} = 6,6 \text{ lb de harina}$$

$$(8,3 \text{ lb de leche}) + (16,6 \text{ lb de jugo de naranja}) + (6,6 \text{ lb de harina}) = 31,5 \text{ lb}$$

### Ejemplo 1.5 Conversión de Área

Un mantel mide 80 cm de largo y 50,7 cm de ancho, calcule el área en metros que ocupa en la mesa de centro.

#### Solución

$$\text{Largo: } 80\text{cm} \times \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} = 0,80 \text{ m}$$

$$\text{Ancho: } 50,7\text{cm} \times \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} = 0,507 \text{ m}$$

Cálculo del área:

$$A = \text{largo} \times \text{ancho}$$

$$A = (0,80\text{m}) \times (0,507\text{m})$$

$$A = 0,4056 \text{ m}^2$$

### 1.6.1 Ecuaciones de conversión

Algunas conversiones de unidades no se pueden realizar por medio del uso de tablas, la temperatura y la presión son claros ejemplos que se requiere ecuaciones de conversión, ya que se necesita sumar, restar o multiplicar valores para cambiar de una escala otra.

#### 1.6.1.1 Temperatura

Para la temperatura en una escala absoluta la unidad en el sistema internacional es el kelvin (K), como escalas de temperatura relativa se conoce a la escala Fahrenheit (°F) y Celsius (°C), debido a que sus puntos de cero se encuentran en posiciones arbitrarias en sus escalas respectivamente.

Las escalas comunes de temperatura son:

**Fahrenheit (°F):** El punto de congelación del agua en esta escala es de 32 °F y el punto de ebullición 212°F

**Celsius (°C):** El punto de congelación del agua en esta escala es 0°C y el punto de ebullición 100°C

**Rankine (°R):** El cero absoluto es 0°R, cuando aumenta 1 grado Rankine incrementa un grado Fahrenheit, es decir 0°F=459,67°R

**Kelvin (K):** El cero absoluto es 0K, cuando aumenta 1 grado Kelvin incrementa un grado Celsius, es decir 0°C=273,15 K

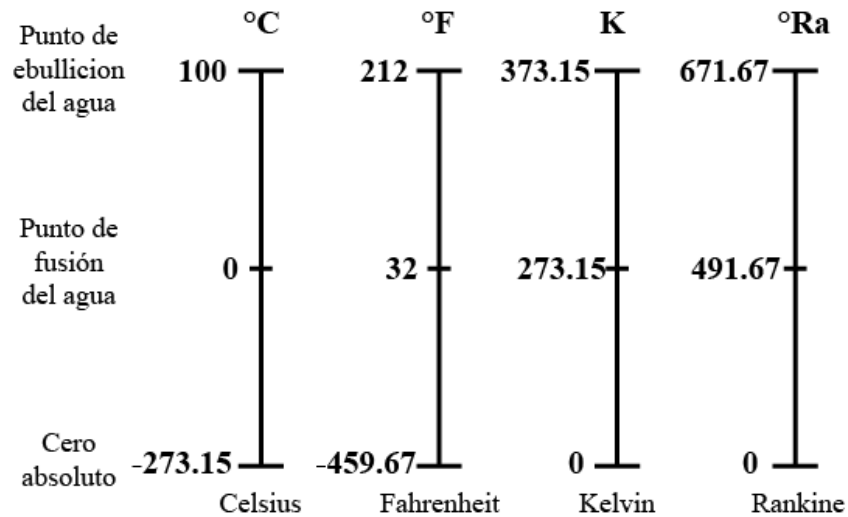
Para realizar la conversión entre las distintas escalas de temperatura se hará uso de la ecuación:

$$\frac{\text{escala 1} - \text{PF}_{\text{escala1}}}{\text{PE}_{\text{escala1}} - \text{PF}_{\text{escala1}}} = \frac{\text{escala 2} - \text{PF}_{\text{escala2}}}{\text{PE}_{\text{escala2}} - \text{PF}_{\text{escala2}}} \quad (1.4)$$

Dónde:

PF es punto de fusión

PE es punto de ebullición.



**FIGURA 1.1**

Escala de Temperatura

### 1.6.1.2 Conversión de Temperatura

Para poder convertir las unidades de temperatura se tienen algunas ecuaciones para poder cambiar de escala.

$$T(^{\circ}\text{F}) = 1,8 \times T(^{\circ}\text{C}) + 32 \quad (1.5)$$

$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15 \quad (1.6)$$

$$T(^{\circ}\text{R}) = T(^{\circ}\text{F}) + 459,67 \quad (1.7)$$

$$T(^{\circ}\text{R}) = 1,8 \times T(\text{K}) \quad (1.8)$$

### Ejemplo 1.6 Conversión de agua líquida

Se tiene agua líquida a  $40^{\circ}\text{C}$  en condiciones normales, convierta esta temperatura

a *a*) K y *b*)  $^{\circ}\text{F}$

**Solución**

- a) Se hará uso de la ecuación (1.4), en donde la escala una es el valor de temperatura conocida, en este caso 40°C y la escala dos es la temperatura a la que queremos llegar, los puntos de fusión y ebullición

$$\frac{\text{escala 1} - \text{PF}_{\text{escala1}}}{\text{PE}_{\text{escala1}} - \text{PF}_{\text{escala1}}} = \frac{\text{escala 2} - \text{PF}_{\text{escala2}}}{\text{PE}_{\text{escala2}} - \text{PF}_{\text{escala2}}}$$

$$\frac{^{\circ}\text{C} - 0}{100 - 0} = \frac{\text{K} - 273.15}{373.15 - 273.15}$$

$$\frac{^{\circ}\text{C}}{100} = \frac{\text{K} - 273.15}{100}$$

Despejar la variable  $K$

$$\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.15$$

Reemplazar valores y resolver

$$\text{K} = 40 + 273.15$$

$$\text{K} = 313.15$$

- b) Se repite en procedimiento del literal a

$$\frac{\text{escala 1} - \text{PF}_{\text{escala1}}}{\text{PE}_{\text{escala1}} - \text{PF}_{\text{escala1}}} = \frac{\text{escala 2} - \text{PF}_{\text{escala2}}}{\text{PE}_{\text{escala2}} - \text{PF}_{\text{escala2}}}$$

$$\frac{^{\circ}\text{C} - 0}{100 - 0} = \frac{^{\circ}\text{F} - 32}{212 - 32}$$

$$\frac{^{\circ}\text{C}}{100} = \frac{^{\circ}\text{F} - 32}{180}$$

Despejar la variable  $^{\circ}F$

$$^{\circ}F = \frac{9}{5}^{\circ}C + 32$$

Reemplazamos valores y resolvemos

$$^{\circ}F = \frac{9}{5}(40) + 32K$$

$$^{\circ}F = 104$$

### 1.6.2 Recomendaciones para Resolución de Problemas

Al momento de realizar problemas de conversión de unidades puede resultar un poco confuso, por ello se recomienda los siguiente:

Leer el problema

Analizar y volver a leer el problema si es necesario

Anotar los datos del enunciado

Convertir las unidades que sean necesarias para poder resolver el ejercicio

Resolver paso a paso para evitar confusiones

Obtener la respuesta final del ejercicio

### 1.7 Presión

Se define a la presión como la fuerza ejercida sobre una unidad de área o superficie.

La unidad estándar para la presión en el sistema internacional es  $N/m^2$  también llamada pascal (Pa), pero en ingeniería usualmente se adoptado la utilización de las unidades de psig (presiones relativas) y psia (presiones absolutas). La ecuación para la presión se describe como:

$$P = \frac{F}{A} \quad (1.9)$$



La presión se puede expresar como relativa o absoluta, las unidades de presión según los dos sistemas de unidades serían:

$$\text{SI} : \frac{\text{N}}{\text{m}^2} (\text{Pa})$$

$$\text{AES} : \frac{\text{lb}_f}{\text{in}^2} (\text{psi})$$

Los fluidos pueden ser líquidos o gaseosos, se encuentran sujetos a grandes variaciones de presión según el estado de agregación, por ejemplo, el agua de una laguna tiene la presión que ejerce el aire sobre sí misma, pero si el agua fluye por el interior de una tubería, la presión es más grande que la atmosférica y variará dependiendo del diámetro de la tubería.

La presión al igual que la temperatura se puede expresar en escalas absolutas o relativas. Las escalas absolutas de la presión se basan en lecturas efectuadas en un vacío perfecto para un punto de referencia de presión cero y se denomina presión absoluta, y las escalas relativas tienen las mismas unidades, pero aquí el punto cero es tomado a una atmosfera a diferencia del vacío perfecto. La presión que se obtiene de la medición de los fluidos se denomina presión manométrica.

A continuación, se presenta la ecuación que relaciona los sistemas de medición de presión:

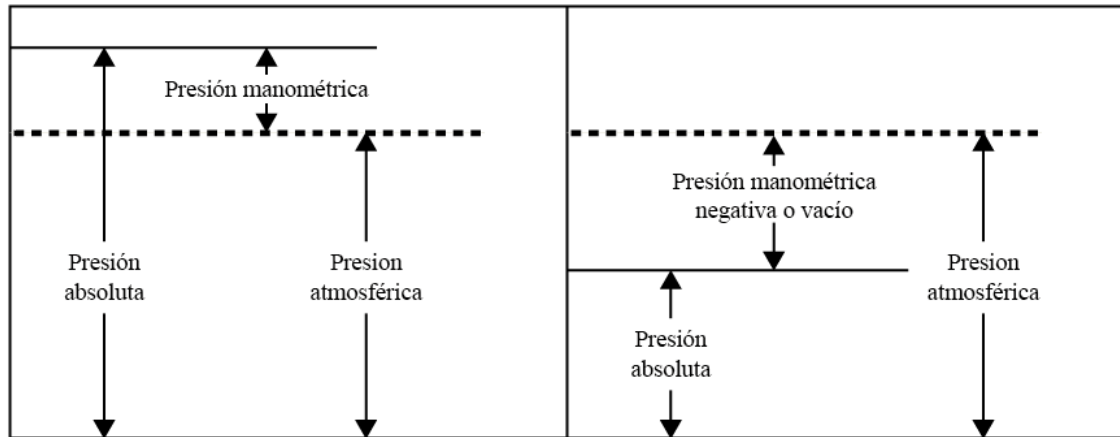
$$P_{\text{abs}} = P_{\text{man}} + P_{\text{atm}} \quad (1.10)$$

Donde:

$P_{\text{abs}}$  es presión absoluta

$P_{\text{man}}$  es presión manométrica

$P_{\text{atm}}$  es presión manométrica



**FIGURA 1.2**

Relaciones de Presiones

### Ejemplo 1.7 Presión Absoluta

Se desea eliminar gases disueltos de una aleación en unos sistemas de procesamiento al vacío. El termopar insertado en este sistema es un medidor de vacío el cual indica una presión de 15 micrones de mercurio. Calcular la presión absoluta en el interior del sistema en pascales si el valor de la presión atmosférica es de una atmósfera.

#### Solución:

El problema indica que la presión dada ha sido medida al vacío, por cuanto esa es la presión absoluta, por tanto, la solución será únicamente una conversión de unidades.

$$15\mu\text{mHg} \times \frac{1\text{mmHg}}{1 \times 10^3\mu\text{mHg}} \times \frac{1,01325 \times 10^5\text{Pa}}{760\text{mmHg}} = 1,999 \text{ Pa}$$

Para las condiciones de vacío tener en cuenta que nunca se debe usar la presión manométrica (relativa).

### EJEMPLO 1.8 Presión Absoluta del Aire

De un ventilador industrial sale aire de 11.3 psig, y la presión barométrica (atmosférica) es de 28,5 pulgadas de mercurio. Calcular la presión absoluta del aire que sale del ventilador en pascuales y psia.

#### Solución:

Se debe convertir todas las presiones a un mismo sistema de unidades.

Para la presión manométrica se debe tener en cuenta que un psig es igual a  $lb_f/in^2$

$$11,3 \frac{lb_f}{in^2} \times \frac{1in^2}{(0,0254m)^2} \times \frac{4,448N}{lb_f} = 76098.65 \frac{N}{m^2} = 76098,65 Pa$$

Para la presión barométrica

$$28,5 in Hg \times \frac{1mm Hg}{0,03937 in Hg} \times \frac{1,01325 \times 10^5 Pa}{760 mmHg} = 96512,25 Pa$$

Para calcular la presión absoluta usaremos la ecuación (1.10)

$$P_{abs} = P_{man} + P_{atm}$$

$$P_{abs} = 76098.65 Pa + 96512.25 Pa$$

$$P_{abs} = 172610.9 Pa$$

Para obtener la presión absoluta en psia se hará uso de factores de conversión.

$$P_{abs} = 172610.9 Pa \frac{1psia}{6895 Pa} = 25.034 psia$$

#### 1.7.1 Tipos de Presión

**1. Presión atmosférica:** Es causada por el peso de la atmósfera, también es conocida como presión barométrica, el valor estándar que se toma es de 1 atm que puede ser expresada en diferentes unidades.

$$1 atm = 760 mmHg = 101.3 kPa = 14.696 psi$$

**2. Presión absoluta:** Se define a la presión total, se dice que es un vacío perfecto cuando  $P_{\text{abs}}$  es igual a 0.

**3. Presión manométrica:** Cuando la presión tiene un valor de 0, se dice que la presión absoluta es igual a la atmosférica. Si se tiene un valor negativo de esta presión se trata de una presión de vacío.

**4. Presión de vacío:** Se encuentra por debajo de la presión atmosférica.

Al momento de escribir las unidades de presión en psi pueden tener un sufijo a o g, donde psig se refiere a la presión manométrica y psia es la presión absoluta.

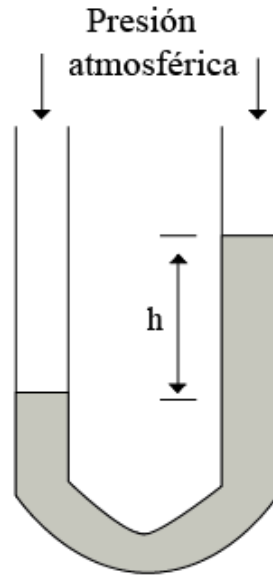
### 1.7.2 Sensores de Presión

Los dispositivos empleados para medir la presión son el manómetro Bourdon, diagrama cápsula, columna de fluido, barómetro, medidores de tensión de silicio y semiconductores. El manómetro tiene forma de U, utiliza fluidos de mayor densidad, su funcionamiento se basa en la presión hidrostática y el nivel del fluido, para poder entender de mejor manera su funcionamiento se debe saber cómo calcular la presión hidrostática causada por la masa de una columna de fluido.

$$P = \frac{F}{A} = \frac{mg}{A} = \frac{\rho Vg}{A} = \frac{\rho AVhg}{A} = \rho gh \quad (1.11)$$

#### EJEMPLO 1.9 Presión Manométrica y Absoluta

Para medir la presión de un sistema se empleó un manómetro, la altura  $h$  es 12 in y la densidad del mercurio es  $\rho = 13.6 \text{ g/cm}^3$  calcule la presión manométrica y la presión absoluta del sistema.



**FIGURA DEL EJEMPLO 1.9.1**

Manómetro de Mercurio

**Solución**

Para encontrar la presión manométrica se procede de la siguiente manera:

$$P_{\text{man}} = \rho \times \frac{g}{g_c} \times h$$

$$P_{\text{man}} = \left( 13.6 \times \frac{62.4 \text{ lb}}{\text{ft}^3} \times \frac{(1\text{ft})^3}{(12\text{in})^3} \right) \left( \frac{32.174 \frac{\text{ft}}{\text{s}^2}}{32.174 \frac{\text{lb ft}}{\text{lbf s}^2}} \right) (12 \text{ in})$$

$$P_{\text{man}} = 5.89 \text{ psig}$$

Para calcular la presión absoluta se emplea la ecuación (1.10)

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{man}} + P_{\text{atm}}$$

$$P_{\text{abs}} = 5.89 \text{ psig} + 14.7 \text{ psi}$$

$$P_{\text{abs}} = 20.59 \text{ psia}$$

### EJEMPLO 1.10 Presión de Vacío

Encuentre la presión de vacío en un tanque de 400mmHg de vacío, la presión atmosférica en el tanque es 760mmHg.

#### Solución

Para encontrar la presión de vacío del tanque se debe proceder de la siguiente manera:

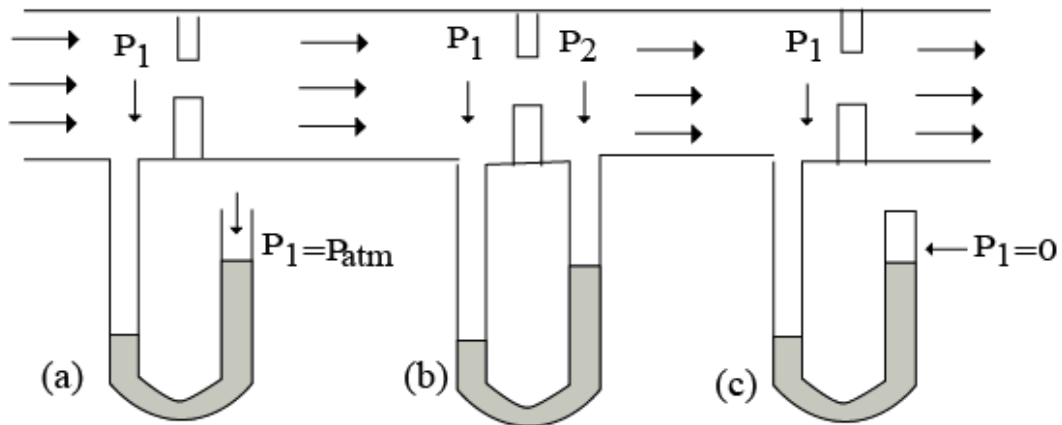
$$P_{\text{abs}} = P_{\text{atm}} - P_{\text{vac}}$$

$$P_{\text{abs}} = 760 \text{ mmHg} - 400\text{mmHg}$$

$$P_{\text{abs}} = 360\text{mmHg}$$

#### 1.7.2.1 Tipos de Manómetros

Existen distintos tipos de manómetros que se utilizan para medir la presión, como se observa en la Figura 1.3



**FIGURA 1.3**

a) manómetro abierto b) manómetro diferencial y c) manómetro extremo cerrado

1. Manómetro abierto sirve para el cálculo de la presión manométrica
2. Manómetro diferencial tiene una diferencia de presiones en dos puntos
3. Manómetro extremo cerrado sirve para el cálculo de la presión absoluta

## 1.8 Cifras Significativas

Se denominan cifras significativas a los números que se encuentran al inicio y son distintos de cero de izquierda a derecha hasta el último número, si existen decimales o el número final es distinto de cero, es más fácil verificar esto cuando se utiliza notación científica

1. Punto decimal: Se debe contar de izquierda a derecha los números diferentes de cero, por ejemplo, en 0,0024 se tienen 2 cifras significativas y en 0,002400 se tienen 4 cifras significativas.
2. Sin punto decimal: Contar los números distintos de cero de izquierda a derecha en 30600 se tiene 3 cifras significativas
3. Notación científica: Solo se escriben las cifras significativas un ejemplo es  $1.13 \times 10^{10}$  que consta de 3 cifras.

El número de cifras significativas presentes en el valor de una medida da una indicación de precisión esto quiere decir que mientras más cifras haya el valor que se encontró va a ser más preciso y confiable, los resultados por lo general se expresan con 3. También se puede emplear el redondeo que consiste en aproximar un dígito al inmediato superior descartando el último dígito del lado derecho, esto se lo puede realizar siempre y cuando este número sea mayor a 5.

### 1.8.1 Reglas para la Determinación y Redondeo de Cifras Significativas

1. Los números distintos de cero son cifras significativas contando de izquierda a derecha, donde 0,50 kg tiene 2 cifras significativas.
2. Si existen ceros entre los números también cuentan como cifras, por ejemplo 1.05 m tiene 3 cifras significativas.
3. Si existen ceros antes de la coma decimal no se considera como cifras significativas: 0,007 cm tiene 1 cifra significativa.

4. Los ceros que se encuentran después de un número si se considera como cifra: 5,08 tiene 3 cifras significativas.
5. Cuando un número después de la coma decimal termina en cero se puede o no considerar como cifra significativa: 60,400 puede decir que se tiene tres, cuatro o cinco cifras significativas
6. Cuando el dígito que se va a descartar es menor que 5 se puede redondear con ceros si es necesario, por ejemplo, si se tiene 5,621 y se requiere solo dos cifras se lo puede expresar como 5,6.
7. Cuando el dígito que se va a descartar es mayor que 5 se puede redondear aumentándolo al inmediato superior, por ejemplo, 78,48 y se requiere solo 3 cifras significativas el valor sería 78,5.
8. Cuando el dígito que se va a descartar es igual a 5 se aumenta solamente en 1 por ejemplo, 4,45 sería 4,5 y si se tiene un número impar 4,35 el redondeo sería 4,4.
8. Se puede emplear notación científica para expresar los valores numéricos más grandes.  $3,04 \times 10^4$  consta de 3 cifras significativas y  $3,0400 \times 10^4$  de 5 cifras significativas.

### **Ejemplo 1.11 Cifras Significativas**

Indique el número de cifras significativas que tienen los siguientes valores:

#### **Tabla de Ejemplo 1.11.1**

Cifras Significativas

<b>Números</b>	<b>Cifras Significativas</b>
4500	4
349,009	6



0456,20	5
0,03030	4
3,00400 x10 <sup>4</sup>	6

---

### 1.8.2 Operaciones Matemáticas

Cuando se van a realizar operaciones matemáticas como suma, resta, multiplicación o división se debe tener en cuenta que el número de cifras significativas que se utilizan en las operaciones.

**Multiplicación y División:** En el resultado debe tener un número igual de cifras significativas que el número que tenga menos cifras significativas de los números involucrados en el cálculo, si no se cumple esta regla es necesario aplicar el redondeo para reducir este número, es recomendable mantener cifras adicionales en los cálculos intermedios para aplicar el redondeo únicamente en el resultado final del problema.

$$(4,78)(8,876) = 42,42728 = 42,4$$

Como se observa en la operación el primer multiplicando tiene 3 cifras significativas y el segundo tiene 4 cifras, como dice la regla se aplica el redondeo al final y se obtiene un resultado con 3 cifras significativas.

**Suma y Resta:** La posición de donde se encuentre la coma decimal se debe tomar en cuenta porque al momento de sumar o restar algún número es necesario la comparación de la posición de las cifras significativas, el dígito que se encuentre a la izquierda indica la última posición.

$$2,000 + 0,098 + 0,13 = 2,228$$

### 1.8.3 Homogeneidad Dimensional

Es importante que los números involucrados en las operaciones matemáticas se encuentren en las mismas dimensiones, si no se encuentran en las mismas unidades

se aplica la conversión de unidades porque es importante recordar que no se puede sumar o restar números que se encuentren en distintas unidades, sumar cm con m es totalmente incorrecto.

### Ejemplo 1.12 Análisis de Homogeneidad Dimensional

En las operaciones presentadas, analice las unidades y mencione cuál es la que tiene homogeneidad dimensional.

$$1. \quad y(m) = y_o(m) + 0,3048 \left(\frac{m}{ft}\right) \times v\left(\frac{ft}{s}\right) \times t(s) + 0.4 \left(\frac{m}{s^2}\right) \times t(s^2)$$

$$2. \quad P\left(\frac{kg}{m s^2}\right) = 101,325 \left(\frac{Pa}{atm}\right) \times 1 \left(\frac{\frac{kg}{ms^2}}{Pa}\right) \times P_o(atm) + \rho\left(\frac{kg}{m^3}\right) \times v\left(\frac{m}{s}\right)$$

### Solución

Para poder saber si existe homogeneidad dimensional se deben simplificar las unidades y observar si se pueden realizar las operaciones

Analizando la ecuación 1

$$y(m) = y_o(m) + 0,3048 \left(\frac{m}{ft}\right) \times v\left(\frac{ft}{s}\right) \times t(s) + 0.4 \left(\frac{m}{s^2}\right) \times t(s^2)$$

$$y(m) = m + m + m$$

Simplificando las unidades se puede observar que todos los números están en las mismas unidades por lo tanto si tiene homogeneidad dimensional.

$$P\left(\frac{kg}{m s^2}\right) = 101,325 \left(\frac{Pa}{atm}\right) \times 1 \left(\frac{\frac{kg}{ms^2}}{Pa}\right) \times P_o(atm) + \rho\left(\frac{kg}{m^3}\right) \times v\left(\frac{m}{s}\right)$$

$$P\left(\frac{kg}{m s^2}\right) = \left(\frac{kg}{ms^2}\right) + \left(\frac{kg}{m^2s}\right)$$

En la ecuación 2 simplificando las unidades iguales, se puede observar que no existe homogeneidad dimensional por lo tanto no se puede resolver el ejercicio.

### 1.8.3.1 Cantidades Adimensionales

Un ejemplo de cantidades adimensionales es el número de Reynolds (Re)

$$\text{Re} = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (1.12)$$

Donde:

$\rho$  = Densidad del fluido

$v$  = Velocidad del fluido

$D$  = Diámetro del tubo

$\mu$  = Viscosidad del fluido

Haciendo un análisis de dimensional se tiene:

$$\text{Re} = \frac{\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right) (\text{m})}{\left(\frac{\text{kg}}{\text{m s}}\right)} \quad (1.13)$$

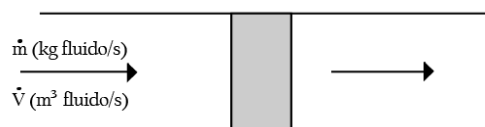
Simplificando las unidades se puede observar que el número de Reynolds es un número adimensional.

### 1.9 Flujo Másico y Volumétrico

El flujo másico y volumétrico están en función del tiempo en la cual se va a transportar cierta cantidad o volumen de material en un proceso.

$$\text{Flujo másico } (\dot{m}) = \frac{\text{Masa}}{\text{Tiempo}}$$

$$\text{Flujo volumétrico } (\dot{V}) = \frac{\text{Volumen}}{\text{Tiempo}}$$



**FIGURA 1.4**

Flujo de Material en una Tubería

El punto encima de la masa y volumen significa caudal o flujo, quiere decir que va a estar en función del tiempo, la densidad de un fluido se puede utilizar para transformar de caudal volumétrico a caudal másico o viceversa, como se muestra a continuación:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\dot{m}}{\dot{V}} \quad (1.14)$$

Para la mayoría de los compuestos la densidad va a disminuir con la temperatura debido a que se expande el volumen, los sólidos y líquidos son incomprensibles lo que significa que la densidad no va a cambiar con la variación de presión, mientras que los gases son comprensibles.

La gravedad específica relaciona la densidad de un compuesto con una densidad de referencia a condiciones específicas.

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{\text{ref}}} \quad (1.15)$$

La densidad de referencia para los líquidos y sólidos comúnmente es agua a 4°C donde la densidad es  $\rho_{H_2O@4^\circ C} = 1 \frac{g}{cm^3} = 1000 \frac{kg}{m^3} = 62.43 \frac{lbm}{ft^3}$  y para los gases se usa como referencia al aire.

### Ejemplo 1.13 Flujo Volumétrico

Utilizando la ley de los gases ideales calcular el flujo volumétrico ( $m^3/\text{min}$ ) y flujo másico ( $g/\text{min}$ ) de  $10g/\text{min}$  de  $O_2$  que tiene un peso molecular de  $32 \text{ kg/kmol}$ , una densidad de  $1,429 \text{ kg/m}^3$ , considere las condiciones de presión y temperatura como las atmosféricas.

### Solución

Primero se debe encontrar el número de moles:

$$\dot{n} = \left( \frac{10 \text{ g}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ mol}}{32 \text{ g}} \right) = 0,312 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

Aplicando la ley de los gases ideales se encuentra el flujo volumétrico:

$$P \dot{V} = \dot{n} R T$$

$$\dot{V} = \frac{\dot{n} R T}{P}$$

La constante de los gases ideales es  $R = 0,082057 \frac{\text{atm L}}{\text{mol K}}$

$$\dot{V} = \frac{\left(0,312 \frac{\text{mol}}{\text{min}}\right) \left(0,082057 \frac{\text{atm L}}{\text{mol K}}\right) (298,15\text{K})}{1 \text{ atm}}$$

$$\dot{V} = 7,633 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

Hay que transformar las unidades del flujo volumétrico para obtener la respuesta en  $\text{m}^3/\text{min}$ .

$$\dot{V} = 7,633 \frac{\text{L}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000\text{L}} = 0,00763 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

Para calcular el flujo másico se puede emplear la fórmula de la densidad:

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

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

$$\dot{m} = \left(1,429 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(0,00763 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}\right)$$

$$\dot{m} = 0,010 \frac{\text{kg}}{\text{min}} \times \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}}$$

$$\dot{m} = 10,903 \frac{\text{g}}{\text{min}}$$

### 1.10 Peso Molecular y Moles

El peso molecular es la masa atómica que tiene un elemento o compuesto esta expresada en unidades de masa/ moles, 1 mol equivale al número de Avogadro que es  $6,023 \times 10^{23}$

El peso molecular promedio viene dado por la siguiente ecuación:

$$\overline{M}_W = y_A M_{W,A} + y_B M_{W,B} \quad (1.16)$$

El peso molecular promedio en función de la fracción másica

$$\frac{1}{\overline{M}_w} = \frac{x_A}{M_{W,A}} + \frac{x_B}{M_{W,B}} \quad (1.17)$$

Donde

$\overline{M}_w$  = Peso molecular promedio

$y_{A,B}$  = Fracción molar del componente

$x_{A,B}$  = Fracción másica del componente

### Ejemplo 1.14 Flujo Molar de una Mezcla Gaseosa

Una mezcla gaseosa de 150 g/s contiene 0,45 moles de metano, 0,15 de etano y 0,40 de propano, calcule el flujo molar total e individual de cada componente y también encuentre el peso molecular promedio.

#### Solución:

Primero se debe conocer los pesos moleculares de los componentes presentes en el proceso.

Metano: 16,04 g/mol

Etano: 30,07 g/mol

Propano: 44,1 g/mol

Se aplica la ecuación (1.16) para encontrar el peso molecular promedio

$$\overline{M}_W = y_M M_{W,M} + y_E M_{W,E} + y_P M_{W,P}$$

$$\overline{M}_W = \left(0,45 \times 16,04 \frac{\text{g}}{\text{mol}}\right) + \left(0,15 \times 30,07 \frac{\text{g}}{\text{mol}}\right) + \left(0,40 \times 44,1 \frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)$$

$$\overline{M}_W = 29,37 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

Calculando el flujo molar total del proceso:

$$\dot{n}_T = \left( 150 \frac{\text{g}}{\text{s}} \times \frac{\text{mol}}{29,37 \text{ g}} \right) = 5,11 \text{ mol/s}$$

El flujo molar de cada componente se obtiene multiplicando la fracción molar por el flujo molar total

$$\dot{n}_M = 0,45 \times 5,11 \frac{\text{mol}}{\text{s}} = 2,30 \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

$$\dot{n}_E = 0,15 \times 5,11 \frac{\text{mol}}{\text{s}} = 0,76 \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

$$\dot{n}_M = 0,4 \times 5,11 \frac{\text{mol}}{\text{s}} = 2,04 \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

### 1.11 Unidad Molar

Para realizar un balance de masa es necesario especificar las cantidades de cada sustancia, para ello se presentan unidades de masa y moles, siendo esta última la que especifica una cantidad de masa determinada. Un mol se define como la cantidad de cada sustancia en un sistema que contiene tantas unidades elementales ya sean átomos, electrones, moléculas, etc como átomos existentes en 12 g del elemento carbono 12. Al aplicar esta definición es necesario aclarar la unidad elemental.

Con el fin de determinar la masa molecular se aplica la suma de las masas atómicas relativas de los átomos que conforman una molécula, se miden en unidades de masa atómica ( $\mu$ ), es decir masa/moles (g/mol o su equivalente kg/kmol). Cuando se considera una cantidad definida de alguna sustancia es necesario considerar la masa molecular, con el fin de obtener el número de moles que tiene dicha sustancia.

El número de Avogadro, es una cantidad de gran valor que hace referencia a la unidad de masa (mol) de cualquier sustancia. Su valor es  $6.02 \times 10^{23}$  partículas (considerándose a las partículas como átomos o moléculas). Por ejemplo, un mol de agua contiene en su composición  $6.02 \times 10^{23}$  partículas.

### Ejemplo 1.15 Moles de Carbonato de Propileno

El compuesto de carbonato de propileno  $C_4H_6O_3$  es usado como plastificante y disolvente especial, se produce por medio de la reacción de propileno y el dióxido de carbono. Para la elaboración a escala laboratorio se ha usado 500g de este compuesto con el fin de plastificar un producto. Determine la cantidad de moles usadas de carbonato de propileno.

$$500\text{g de } C_4H_6O_3 \times \frac{1 \text{ mol de } C_4H_6O_3}{102,9 \text{ g de } C_4H_6O_3} = 4.85 \text{ mol de } C_4H_6O_3$$

#### 1.11.1 Composición Másica y Molar

Para poder convertir las unidades de masa a moles se debe dividir la masa del compuesto para la masa molar, mientras si se quiere transformar de moles a masa se deben multiplicar dichos valores.

$$m_i = n_i \times M_i \quad (1.18)$$

Donde

$m_i$  = Masa del compuesto

$n_i$  = Moles del compuesto

$M_i$  = Masa molar

Para obtener la masa total de un elemento en una cantidad de compuesto:

$$n_{hi} = \epsilon_{hi} n_i = \epsilon_{hi} \frac{m_i}{M_i} \quad (1.19)$$

Donde se está obteniendo las moles de un elemento h en un compuesto i.



Cuando se tienen mezclas a veces es necesario o importante conocer la composición de cada compuesto presente, esto se lo puede representar en fracción másica o molar. Si dichos valores se multiplican por 100% se obtiene el porcentaje másico o molar. La suma de las fracciones siempre debe ser igual a 1.

Fracción másica ( $x_i$ ):

$$x_i = \frac{m_i}{m} \quad (1.20)$$

$$\sum_i x_i = 1 \quad (1.21)$$

$$\text{Porcentaje másico} = (x_i) \times 100\% \quad (1.22)$$

Fracción molar ( $y_i$ ):

$$y_i = \frac{n_i}{n} \quad (1.23)$$

$$\sum_i y_i = 1 \quad (1.24)$$

$$\text{Porcentaje molar} = (y_i) \times 100\% \quad (1.25)$$

Donde:

$m_i$  = masa del compuesto i

$m$  = masa total

$n_i$  = moles del compuesto i

$n$  = moles totales

En las conversiones de masa y moles es necesario conocer la masa molar de los compuestos que se encuentran en la mezcla.

$$x_i = \frac{y_i M_i}{\sum_i y_i M_i} \quad (1.26)$$

$$y_i = \frac{x_i/M_i}{\sum_i(y_i)} \quad (1.27)$$

### Ejemplo 1.16 Cloruro de Sodio

El cloruro de sodio es la sal de mesa que se usa diariamente en el hogar se desea saber la cantidad de gramos NaCl y cuántos gmol de Cl se encuentran presentes en el salero, si se tiene 20 gmol de NaCl.

#### Solución

Para encontrar los gramos de NaCl se multiplica los moles presentes por el peso molecular

$$m_{\text{NaCl}} = n_{\text{NaCl}} \times M_{\text{NaCl}}$$

$$m_{\text{NaCl}} = 20 \text{ gmol NaCl} \times \frac{58,44 \text{ g NaCl}}{1 \text{ gmol NaCl}} = 1168,8 \text{ g NaCl}$$

Los gmol de Cl se obtienen mediante la ecuación (1.19)

$$n_{\text{Cl en NaCl}} = \epsilon_{\text{Cl en NaCl}} \times n_{\text{NaCl}}$$

$$n_{\text{Cl en NaCl}} = \frac{1 \text{ gmol Cl}}{\text{gmol de NaCl}} \times 20 \text{ gmol de NaCl} = 20 \text{ gmol de NaCl}$$

### Ejemplo 1.17 Disolución de azúcar en agua

Calcule las fracciones másicas, molares y los porcentajes másicos, molares de una disolución de 20 g de azúcar en 80 g de agua.

#### Solución

Encontramos la fracción másica del azúcar y del agua aplicando la ecuación (1.20) y (1.21)

$$x_{\text{azúcar}} = \frac{20 \text{ g de azúcar}}{20 \text{ g de azúcar} + 80 \text{ g de agua}} = 0,20$$

$$x_{\text{agua}} = 1 - w_{\text{azúcar}}$$

$$x_{\text{agua}} = 1 - 0,20 = 0,80$$

Para encontrar el porcentaje másico se debe aplicar la ecuación (1.22) donde se multiplica por 100 los valores de la fracción másica

$$\text{Porcentaje másico del azúcar} = 0,20 \times 100\% = 20\% \text{ (wt\%)}$$

$$\text{Porcentaje másico del agua} = 0,80 \times 100\% = 80\% \text{ (wt\%)}$$

Encontramos la fracción molar del azúcar y del agua.

$$y_{\text{azúcar}} = \frac{20 \text{ g de azúcar} / 180 \text{ g/mol}}{20 \text{ g de azúcar} / 180 \text{ g/mol} + 80 \text{ g de agua} / 18 \text{ g/mol}} = 0,0243$$

$$y_{\text{agua}} = 1 - y_{\text{azúcar}}$$

$$y_{\text{agua}} = 1 - 0,0243 = 0,975$$

Para encontrar el porcentaje másico se debe aplicar la ecuación (1.25) donde se multiplica por 100 los valores de la fracción másica

$$\text{Porcentaje molar del azúcar} = 0,0243 \times 100\% = 2,43\% \text{ (mol\%)}$$

$$\text{Porcentaje molar del agua} = 0,975 \times 100\% = 97,56\% \text{ (mol\%)}$$

### 1.11.2 Concentración

La concentración de una solución se puede expresar en peso/fracción peso (p/p) que es el peso del soluto dividido para el peso total, fracción peso/volumen (p/v) donde el peso de la solución se debe dividir para el volumen total, concentración molar (M) es el número de moles dividido para el volumen de la solución, fracción másica o molar donde se divide la fracción de cada especie para la fracción total.

#### Ejemplo 1.18 Concentración de NaCl en AGUA

En un recipiente de 150 kg de agua se añade 25 kg de NaCl, la densidad de la solución es de 1500 kg/m<sup>3</sup> Calcule la concentración de NaCl en:

- a) Fracción peso/peso (p/p)

b) Peso/Volumen (p/V)

c) Fracción molar

### Solución

a)

$$\text{Fracción peso de NaCl} = \frac{m_{\text{NaCl}}}{m_{\text{T}}}$$

$$\text{Fracción peso de NaCl} = \frac{25\text{kg}}{(150\text{ kg} + 25\text{kg})} = 0.142$$

b) Para calcular la concentración en peso/volumen se debe calcular el volumen de toda la solución empleando la densidad del líquido

$$V_{\text{T}} = \frac{m_{\text{T}}}{\rho}$$

$$V_{\text{T}} = \frac{175\text{ kg}}{1500\text{ kg/m}^3}$$

$$V_{\text{T}} = 0.116\text{ m}^3$$

Ya encontrado el valor del volumen de la solución se puede encontrar la concentración en peso/volumen

$$\frac{\text{Peso}}{\text{Volumen}} = \frac{25\text{kg}}{0.116\text{ m}^3}$$

$$\frac{\text{Peso}}{\text{Volumen}} = 215.52 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

c) Se debe encontrar el número de moles de NaCl y de agua para el cálculo de la fracción molar

$$\text{Moles de NaCl} = \frac{25\text{ kg de NaCl}}{58.5\text{ kg NaCl/kmol}} = 0.43\text{ kmol}$$

$$\text{Moles de H}_2\text{O} = \frac{150\text{ kg de H}_2\text{O}}{18\text{ kgH}_2\text{O /kmol}} = 8.33\text{ kmol}$$

$$\text{Fracción molar NaCl} = \frac{0.43 \text{ kmol}}{8.76 \text{ kmol}} = 0.05$$

## Ejercicios Propuestos

### Sistema de Unidades

- 1.1 Calcule el trabajo que se necesita para obtener 2 toneladas de hierro a una distancia de 100 m, el trabajo debe ser expresado en kW\*h, como dato adicional se sabe que la fuerza es la aceleración multiplicada por la masa.
- 1.2 Calcule el tiempo que se necesita para acelerar la masa del N<sub>2</sub> que se encuentra en reposo, la fuerza que se aplica es de 2 N.

### Conversión de Unidades

- 1.3 Convierta  $30 \frac{lbm}{s}$  a su equivalente en  $\frac{kg}{h}$ .
- 1.4 Se producen 200 ton de leche por semana. Calcule la producción de leche en g/h.
- 1.5 Determine el volumen en litros de un reactor que tiene las siguientes dimensiones: 300 cm de largo por 2.5 m de ancho por 1,6 cm de altura.
- 1.6 Un litro de leche cuesta en Ecuador \$0,60, se puede exportar hacia Europa y su costo es de 1,5 euros, cuánto sería la ganancia de la venta de los galones de leche en el exterior.
- 1.7 Repita el ejemplo 1.5 empleando las ecuaciones de conversión de temperatura.
- 1.8 El platino tiene un punto de fusión de 2042,15 K, convierta esta temperatura a a) °C, b) °F, c) °Ra y d) °Re.
- 1.9 Para el análisis de un nuevo biocombustible se inventó un termómetro en escala °Z, con un punto de fusión del hielo de 45 °Z y para la ebullición del agua 250 °Z, cuántos grados marcará el nuevo termómetro cuando un líquido desconocido marca una temperatura de 32°C.

1.10 Transformar 15 Psia a a) pascal, b) atmosfera y c) bar

1.11 Un instrumento para medir presiones marca una presión manométrica de 9 psig, si se desea alcanzar una presión absoluta que sea el triple de la manométrica cuanto deberá ser la presión atmosférica, calcular en atmosferas y en milímetros de mercurio.

### **Cifras Significativas**

1.12 Escriba el número de cifras significativas de los siguientes valores y expéselos como notación científica: a) 0,0078 b) 456,098 c) 45,0000 d) 67,0089 e) 0,00678

1.13 Escriba las cifras significativas del ejemplo 1.11 en notación científica.

### **Flujo Másico y Volumétrico**

1.14 Ingresar agua pura a una tubería de 2 in de diámetro a una velocidad de flujo másico de 200 lbmol/s, calcule el flujo volumétrico.

1.15 Una mezcla de hexano y heptano entran a razón de 3m<sup>3</sup>/h y 6m<sup>3</sup>/h a una temperatura de 313 K y 2 atm, calcule el flujo volumétrico y el volumen específico de los dos componentes.

### **Peso Molecular y Moles**

1.16 Encuentre 4 isómeros del buteno y encuentre sus pesos moleculares, ¿qué isómero tendrá un mayor peso o todos serán iguales? Explique el por qué de la respuesta escogida.

1.17 Una mezcla líquida de 30% (wt%) de benceno y 70% (wt%) de tolueno entra a una unidad de proceso, encuentre el flujo másico y el flujo molar de la corriente de alimentación.

### **Unidad Molar**

1.18 Calcular el peso molecular de los compuestos principales que conforman el gas licuado de petróleo (GLP).

1.19 Calcule la cantidad de g/mol presentes de C, H y O en 120g/mol de Glucosa.

### Referencias Bibliográficas

Felder, R. M., & Rousseau, R. W. (2004). Principios elementales de los procesos químicos. In *Limusa Wiley* (Vol. 3th).

Ghasem, N., & Henda, R. (2015). *Principles of Chemical Engineering Processes MATERIAL AND ENERGY BALANCES SECOND EDITION*.

Morris, A. E., Geiger, G., & Fine, A. (2011). Handbook on Material and Energy Balance Calculations. In *John Wiley & Sons* (Vol. 3th).

Murphy, R. M. (2007). Introducción a los procesos químicos: Principios, Análisis y Síntesis. In *McGraw-Hill Interamericana*.

Torres Robles, Rafael., & Castro Arellano, J. J. (2002). *Análisis y simulación de procesos de refinación del petróleo*. Instituto Politécnico Nacional.

## *Diagramas de Flujo*

Los procesos químicos, petroquímicos y afines utilizan diagramas de flujo para una mejor comprensión de cómo se llevan a cabo dichos procesos, mediante un análisis de las variables y composiciones utilizadas, con información técnica los diagramas brindan información cuantitativa acerca de las variables de proceso como son la concentración, la presión, la temperatura, el número de moles, etc. Los diagramas se pueden clasificar en entrada-salida, de flujo de bloques y flujo de procesos.

### **Objetivos de Aprendizaje**

- Analizar las variables de proceso usadas para caracterizar un proceso químico.
- Conocer las unidades de proceso básicas de los diagramas de flujo y las unidades de las operaciones unitarias presentes en los procesos químicos.
- Definir las operaciones unitarias principales usadas en la ingeniería química y afines.
- Analizar los diagramas de flujo de entrada-salida, flujo de bloques y flujo de procesos.

### **2.1 Procesos y Variables de Procesos**

Se denomina proceso a una operación o conjunto de operaciones en las que existan cambios químicos o físicos de un compuesto o mezcla de ellos, para su transformación se emplean operaciones unitarias según el producto que se desee obtener.

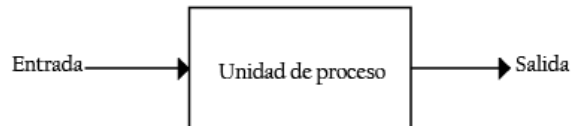
#### **2.1.1 Diagrama de Flujo de Proceso**

El diagrama PFD (Fluid Process Diagram) por sus siglas en inglés es la secuencia de las unidades de procesos que son conectadas por corrientes, donde se puede ver el flujo de los componentes y de la energía.



### 2.1.2 Unidad de Proceso

La unidad de proceso es el lugar en el cual se lleva a cabo las operaciones, está asociada con los flujos que entran y salen de cada equipo. En la figura 2.1 se observa una unidad de proceso simple con entrada y salida.



**FIGURA 2.1**

Diagrama de Flujo de Proceso

### 2.1.3 Corrientes de Proceso

Las corrientes de proceso son representadas por una línea que significa la entrada o la salida de materia de las distintas unidades de proceso, contienen información de cantidad, composición, energía, presión, temperatura o condiciones necesarias para la realización del mismo.

## 2.1 Diagramas de Flujo de Procesos

Los diagramas de flujos de procesos químicos y petroquímicos son específicos, compactos y precisos, además presentan gran cantidad de información técnica.

Se clasifican en 3 tipos de diagramas:

Diagrama de Flujo de entrada-salida

Diagrama de Flujo de bloques

Diagrama de Flujo de proceso

**Tabla 2.1**

Clasificación de los Diagramas de Flujo de Proceso

<b>Diagrama de Flujo de Entrada-Salida</b>	<b>Diagrama de Flujo de Bloques</b>	<b>Diagrama de Flujo de Proceso</b>
-Materias primas	-Materias primas	-Materias primas
-Reacciones químicas	-Reacciones químicas	-Reacciones químicas
-Productos obtenidos	-Productos obtenidos	-Productos obtenidos
	-Balance de materia	-Balance de materia
	-Unidades básicas del proceso	-Balance de energía
	-Especificaciones del diseño	-Equipos empleados en la planta
		-Especificaciones de los equipos
		-Condiciones de T y P

Los tres tipos de diagramas de flujo deben especificar las materias primas empleadas, los cambios químicos y físicos que ocurren en el proceso y los productos que se obtienen.

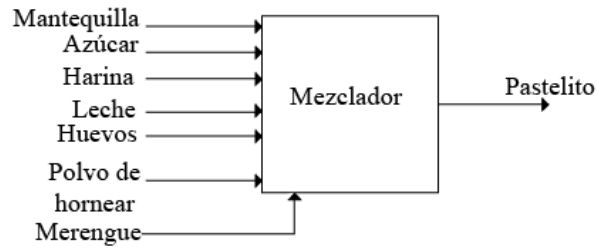
### **2.3 Unidades de Proceso en Diagramas de Flujo de Bloques**

Existen solo cuatro unidades básicas que se emplean en los diagramas de flujo de bloques. Si bien existe gran variedad de procesos químicos, la clasificación de las unidades de proceso se basa en la función y en las necesidades que se tienen para convertir las materias primas en los productos ya terminados.

Las unidades básicas son mezcladores, reactores, divisores y separadores.

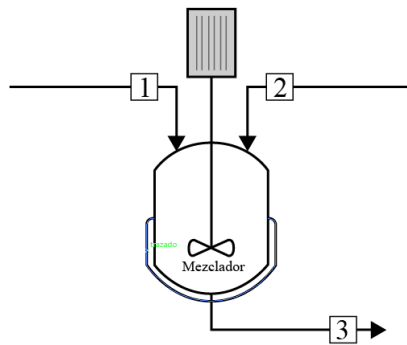
### 2.3.1 Mezcladores

En esta unidad de proceso se combinan dos o más corrientes de alimentación en una sola corriente de salida.



**FIGURA 2.2**

Mezclador

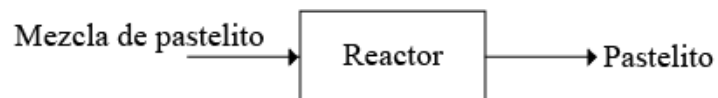


**FIGURA 2.3**

Mezclador en Diagramas de Flujo

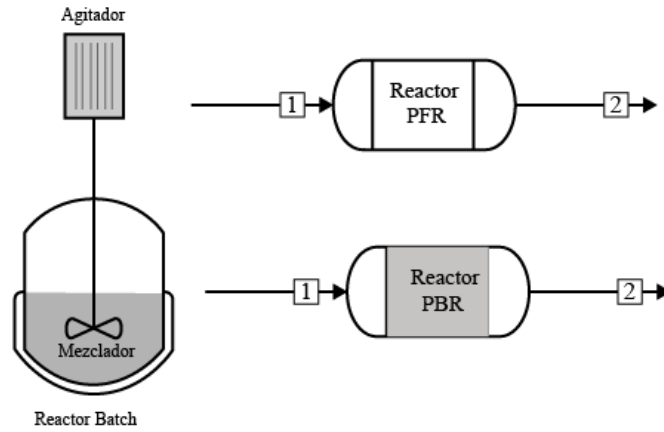
### 2.3.2 Reactores

Las corrientes de alimentación contienen reactivos, en el reactor pueden realizar una o más reacciones químicas, y por la corriente de salida se van a obtener los productos y también los reactivos que no se han consumido.



**FIGURA 2.4**

Reactor

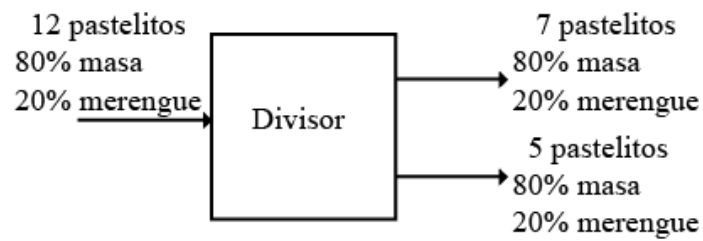


**FIGURA 2.5**

Tipos de Reactores

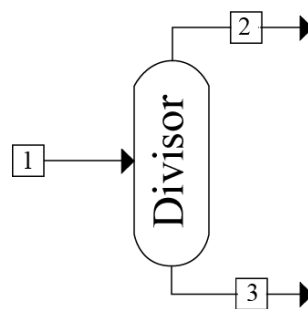
**2.3.3 Divisores**

Esta unidad va a dividir la entrada o alimentación en una o más salidas, sin variar la composición de la alimentación.



**FIGURA 2.6**

Divisor

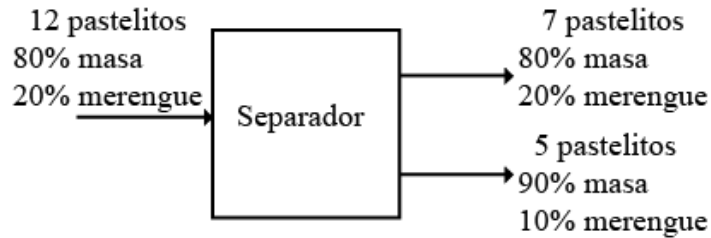


**FIGURA 2.7**

Divisor en Diagramas de Flujo

### 2.3.4 Separadores

La diferencia con los divisores es que la entrada se va a separar en una o más salidas, pero con diferente composición.



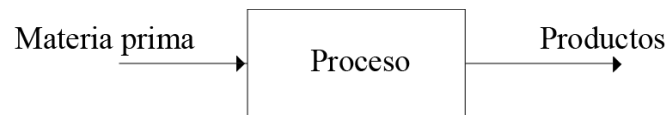
**FIGURA 2.8**

Separador

Las cuatro unidades de proceso se pueden combinar en diagramas de flujo de bloques, las corrientes de salida de una unidad van a ser la entrada a la otra unidad de proceso.

### 2.4 Diagrama de Flujo de Entrada-Salida

Este tipo de diagrama es el más sencillo de todos, porque cuenta con un solo bloque, se especifica la materia prima y los productos obtenidos, no tiene mucha información acerca de las condiciones en las cuales se los obtiene.



**FIGURA 2.9**

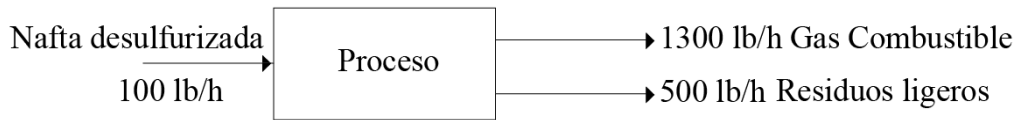
Diagrama de Flujo de Entrada y Salida

### Ejemplo 2.1 Diagrama de Entrada-Salida de la Reformación de la Nafta Desulfurizada

La desulfuración es un proceso que realizan las refinerías donde se purifica al crudo eliminando los compuestos de azufre, además nitrógeno, oxígeno y metales

pesados. La alimentación al proceso es 100 lb/h de nafta desulfurizada y se obtiene 1300 lb/h de gas combustible y 500 lb/h de residuos ligeros. Realice un diagrama de entrada-salida.

### Solución



**FIGURA DEL EJEMPLO 2.1.1**

Diagrama de Flujo de Entrada-Salida de la Reformación de la Nafta Desulfurizada

Como se puede observar en la figura 2.1.1 no se tiene mucha información de qué condiciones se deben aplicar, equipos necesarios, cantidad de materia prima necesaria para poder obtener el gas combustible y los residuos ligeros.

## 2.5 Diagrama de Flujo de Bloques

Los diagramas de flujo de bloques tienen únicamente 4 unidades básicas que se representan en el proceso como se observó en la sección 2.3, cada unidad de proceso va a representar los cambios químicos y físicos que sufren los compuestos, como en todo diagrama la materia prima entra por la izquierda y salen los productos por la derecha.

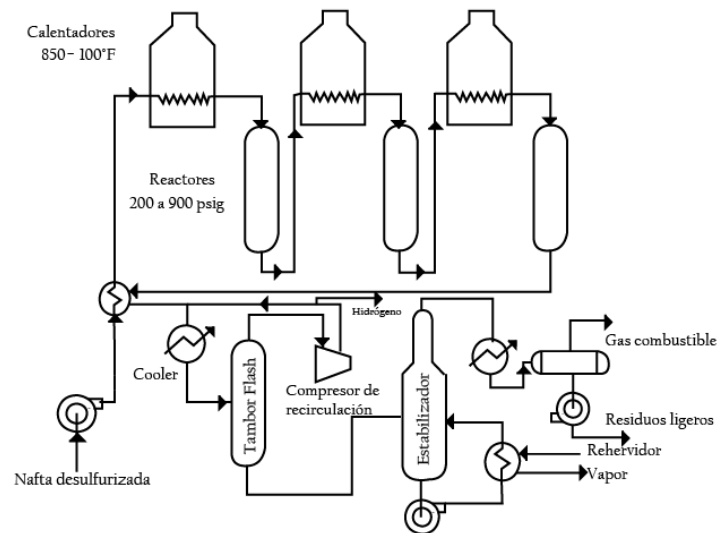
### 2.5.1 Como Diseñar un Diagrama de Flujo de Bloques

1. Los equipos son representados por rectángulos.
2. Se coloca de una manera clara y correcta las flechas en las corrientes que indiquen la dirección del flujo.
3. Se debe enumerar las corrientes y los equipos
4. Por lo general el flujo se mueve de izquierda a derecha.

5. Las corrientes livianas van en la parte superior y las pesadas como son los líquidos y sólidos por la parte de abajo.
6. Se debe colocar toda información adicional que especifique el proceso.
7. Por lo general los datos de velocidad de flujo, presión, temperatura se muestran en una tabla.

### Ejemplo 2.2 Diagrama de Flujo de Bloques del Proceso de Desulfuración

Observe la figura del ejemplo 2.2.1 y realice el diagrama de flujo de bloques del proceso de desulfuración de crudo con el fin de eliminar el azufre, oxígeno, nitrógeno y metales pesados. (Únicamente realice la representación del diagrama sin cantidades de flujos).

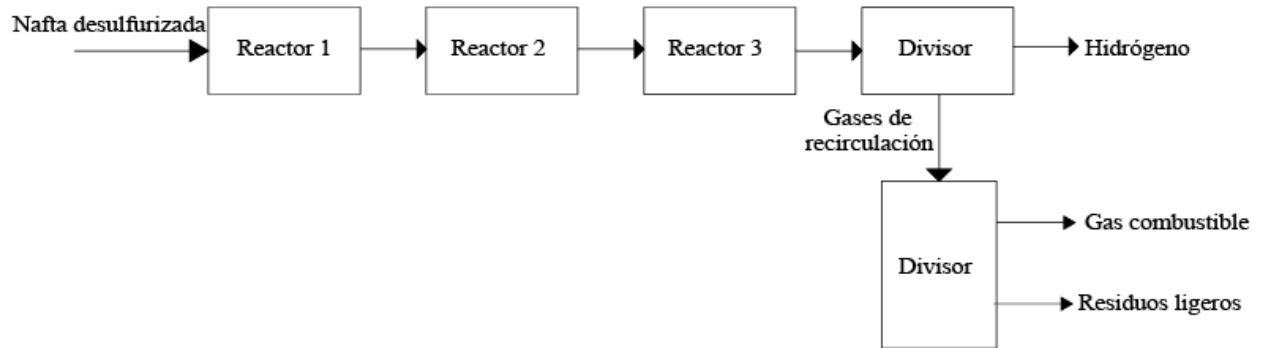


**FIGURA DEL EJEMPLO 2.2.1**

Diagrama de Flujo de la Reformación de la Nafta Desulfurizada

## Solución

Hay que tener en cuenta que en los diagramas de flujo de bloque solo existen 4 unidades básicas que se emplean para representar los procesos, los mezcladores y divisores no se muestran como un rectángulo, se los representa con un punto.



**FIGURA DEL EJEMPLO 2.2.2**

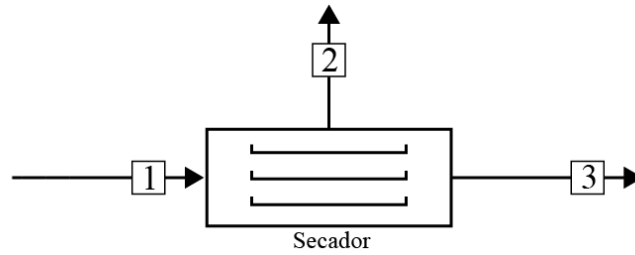
Diagrama de Flujo de Bloques de la Reformación de la Nafta Desulfurizada

## 2.6 Unidades de Procesos de Operaciones Unitarias

### 2.6.1 Secadores

Son equipos que utilizan una fuente de calor para eliminar la humedad por evaporación de un sólido, semisólido o líquido. Como se muestra en la figura 2.10 el secador es un separador en donde en la corriente de salida 2 se obtiene como disolvente vapor puro, el cual no posee sólidos. Generalmente los productos resultantes se obtienen en estado sólido, los cuales no siempre están 100% libres del solvente. Existen diferentes tipos de secadores como continuos y por lotes; y estos pueden ser de calor directo o indirecto.



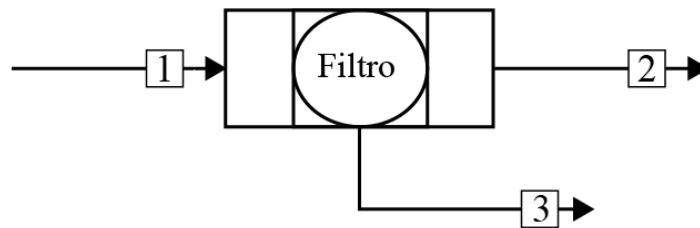


**FIGURA 2.10**

Secador

### 2.6.2 Filtros

Es una técnica utilizada en la remoción o eliminación de impurezas de líquidos o para aislar un sólido de un fluido. Este procedimiento es una operación unitaria física que se puede utilizar también para separar partículas suspendidas en un fluido (líquido, gas o fluido supercrítico).



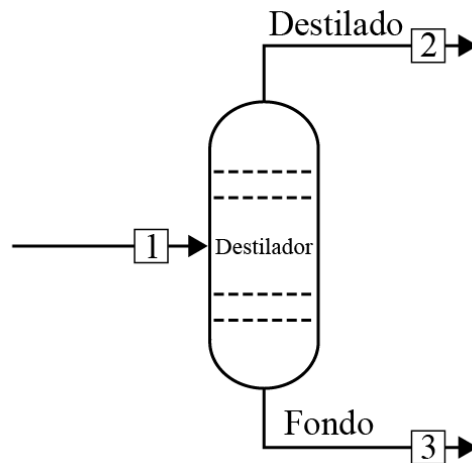
**FIGURA 2.11**

Filtro

### 2.6.3 Columna de destilación

Este equipo permite separar diferentes sustancias químicas con respecto a la volatilidad, en donde, los componentes más volátiles forman parte del destilado que generalmente se encuentran en fase gaseosa y los más pesados se encuentran en el fondo, obteniéndose en fase líquida. Para llevar a cabo la separación se debe proporcionar calor de tal forma que los compuestos químicos lleguen al punto de ebullición. La destilación es uno de los procesos químicos con mayor aplicación, en donde, para realizar los balances de masa y energía se puede tomar en cuenta

un plato individual, la columna, el hervidor o el condensador, o todo el sistema en general.

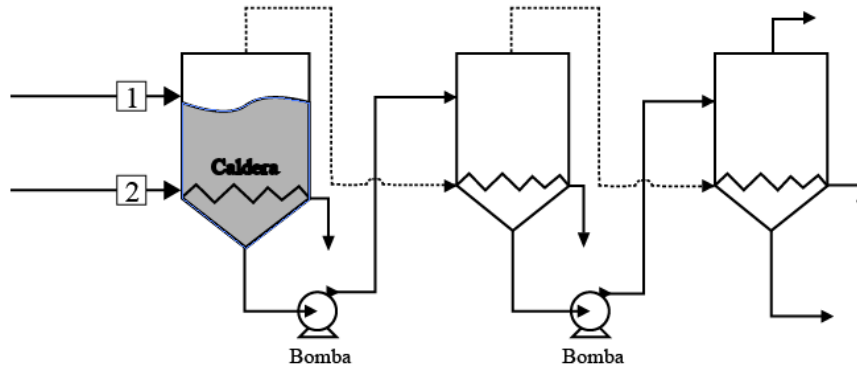


**FIGURA 2.12**

Columna de Destilación

#### **2.6.4 Evaporador de efectos múltiples**

La evaporación se utiliza en las industrias que requieran una alta concentración de compuestos, los evaporadores utilizan una menor cantidad de energía y se obtiene una concentración directamente proporcional al número de evaporadores. La desventaja de este tipo de equipos es que los evaporadores son costosos y es necesario disminuir el número de estos. Las corrientes de entrada y de salida para un evaporador se encuentran en estado líquido. Generalmente las soluciones acuosas de sales y bases inorgánicas se concentran en un evaporador, así como también estos son utilizados con soluciones acuosas de compuestos orgánicos que poseen poca volatilidad.

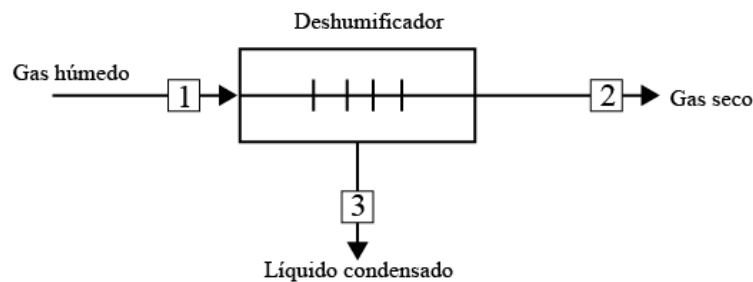


**FIGURA 2.13**

Evaporador de Multiefecto

### 2.6.5 Deshumidificadores

Es un equipo encargado de reducir el nivel de humedad en el aire o en un gas, se caracteriza porque la corriente de alimentación se encuentra conformada por un componente condensable como el agua y uno no condensable.



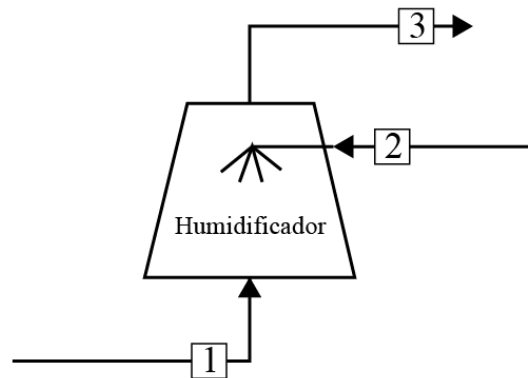
**FIGURA 2.14**

Deshumificador

### 2.6.6 Humidificador

Es un equipo que realiza lo contrario que el deshumidificador, es decir, incrementa la cantidad de humedad que existe en el aire o en una corriente de un gas. Es un dispositivo que permite que el agua que se encuentra en una superficie mojada o en una olla se evapore, o que posibilita que el aire circule mediante un compartimiento de lavado de aire, el cual posee humedad. Para dicho

procedimiento en la alimentación el gas no debe estar saturado, la unidad de proceso debe evaporar el líquido y finalmente el producto de salida no es necesario que este saturado.



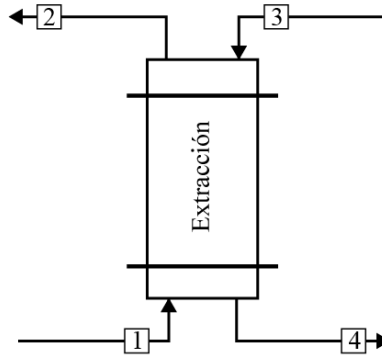
**FIGURA 2.15**

Humidificador

### 2.6.7 Lixiviación y extracción

La lixiviación generalmente se conoce como extracción líquido – sólido y es la eliminación por disolución de materiales sólidos. En tanto que la extracción por lo general se conoce como extracción líquido – líquido, se caracteriza por poseer dos disolventes líquidos los cuales deben tener una densidad específica diferente y ser inmiscibles, y que por una diferencia de solubilidad un componente se transfiera de un disolvente a otro.

Al poner en contacto el disolvente y la mezcla a tratar se obtiene la extracción líquido – líquido, en la que las dos fases líquidas diferentes se llaman extracto y refinado, sus nombres dependen de quien predomine en el producto. El disolvente es selectivo, depende del componente que se encuentre en mayor cantidad en el extracto. Este disolvente puede ser un compuesto puro o una mezcla de compuestos.

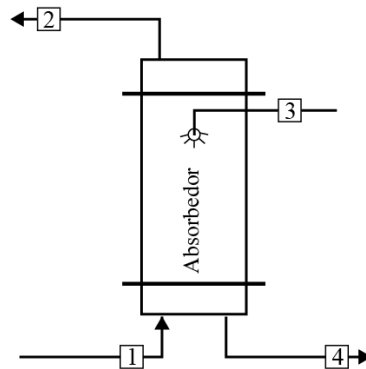


**FIGURA 2.16**

Extractor/Lixiviación

### 2.6.8 Absorbedor / Desorbedor

A este equipo también se le conoce como depurador, su función es absorber impurezas de un gas, en donde uno o más componentes solubles se absorben al ponerse en contacto con una fase líquida. En el absorbedor la corriente gaseosa es bombeada y fluye hacia arriba y la corriente líquida por la gravedad va hacia abajo. Por lo general el gas se pone en contacto con el líquido, de tal manera que el líquido absorba uno o más componentes del gas. Mientras que la desorción es cuando se desea separar una mezcla de líquidos mediante un gas. En un stripper que es una torre de extracción los componentes del líquido se transfieren al gas.

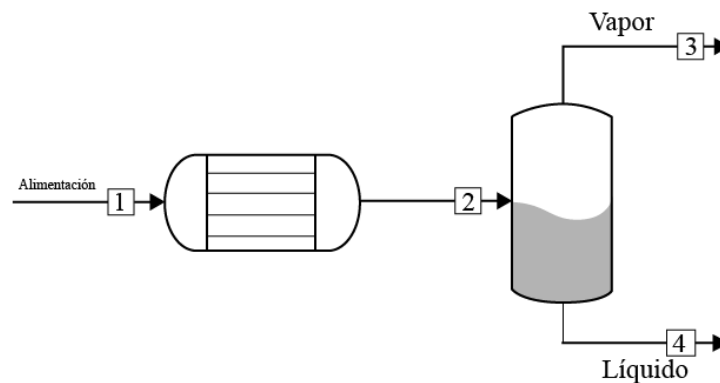


**FIGURA 2.17**

Absorbedor

### 2.6.9 Condensador parcial

Como su nombre lo indica condensa parcialmente una corriente que se encuentra en fase de vapor. La condensación es producida por la disminución de la temperatura (enfriamiento) o aumento de la presión. Las especificaciones que debe tener la corriente para el uso de este dispositivo es que en la alimentación todos los componentes deben encontrarse en fase de vapor y deben ser condensables, se debe tomar en cuenta que a la salida las corrientes que poseen líquido y vapor se encuentran en equilibrio.

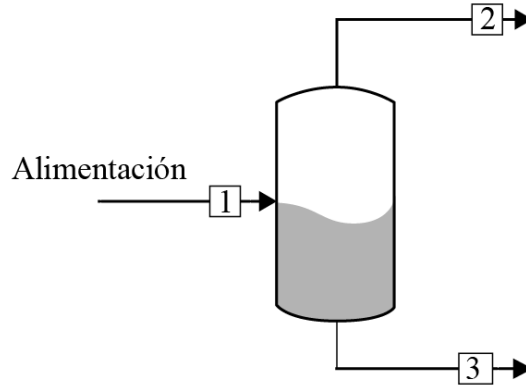


**FIGURA 2.18**

Condensador Parcial

### 2.6.10 Separador flash

Es el encargado de separar dos fases líquida y vapor producidas por el condensador. Es un procedimiento similar al condensador parcial, en donde la única diferencia es que la alimentación se encuentra en fase líquida, y la vaporización se produce al incrementar la temperatura o reducir la presión. Así mismo las corrientes de salida tanto del líquido como del vapor se encuentran en equilibrio.

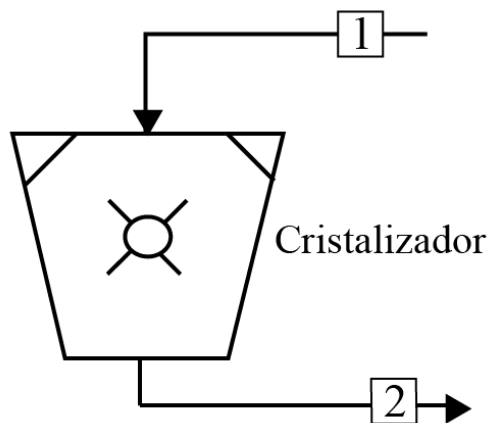


**FIGURA 2.19**

Columna de Destilación Flash

### 2.6.11 Cristalizador

El proceso de cristalización es comúnmente utilizado para separar las fases líquido – sólido. Es una combinación de cristalizador – filtro, que sirve para separar los cristales de una solución. Los cristales se forman por una reducción de la temperatura, incluso por debajo del punto de fusión y pueden contener elevada pureza. La cristalización también puede ocurrir al pasar de fase de vapor a fase sólida sin haber pasado por el estado líquido.



**FIGURA 2.20**

Cristalizador

## 2.7 Diagrama de Flujo de Procesos

Los diagramas de flujo de procesos son representaciones de los procesos químicos mediante unidades de procesos, materiales, especificaciones de los equipos, condiciones de presión y temperatura. Presentan las siguientes características:

Los equipos están conectados entre sí para poder representar el proceso químico.

Los equipos ya no son representados por rectángulos, tienen la representación mostrada en la sección 2.5.

Se utilizan representaciones de bombas, turbinas, intercambiadores de calor, hornos.

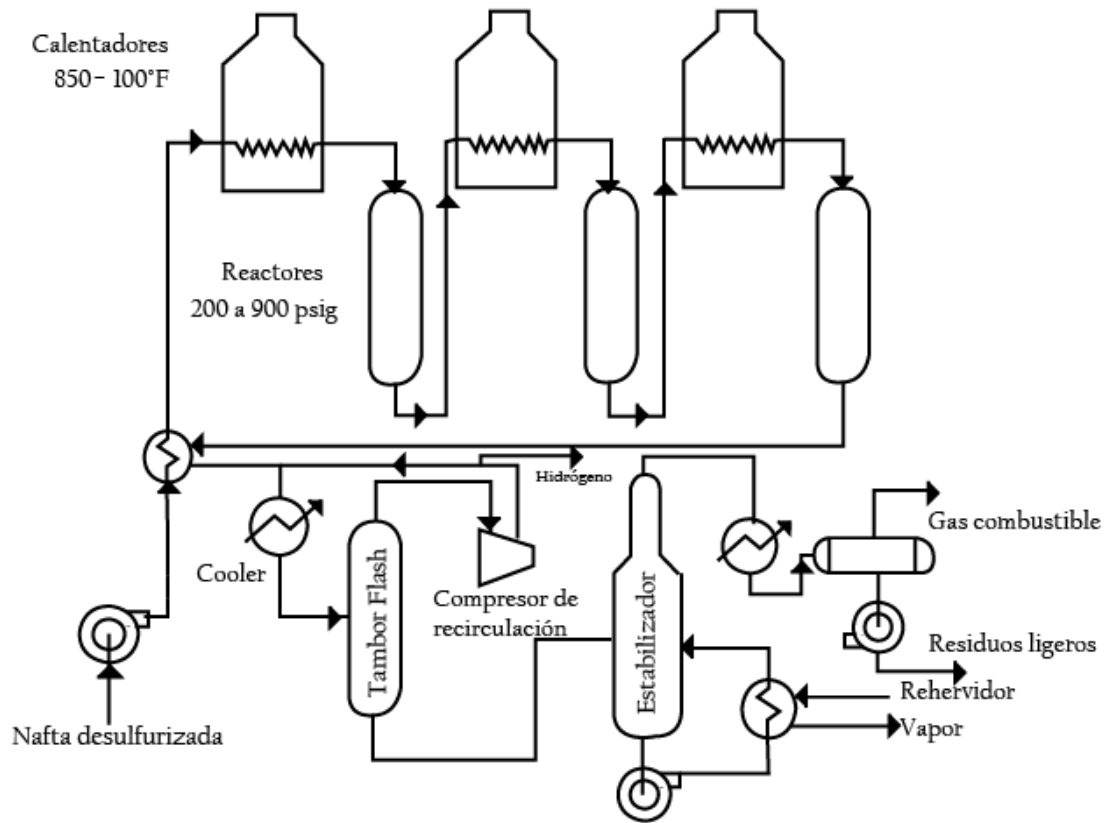
Todos los equipos y corrientes deben estar enumeradas o nombradas para poder identificarlas.

Las líneas representan las entradas y salidas de los materiales en los procesos.

Las corrientes gaseosas están en la parte superior, las líquidas en la mitad y las sólidas en el fondo.

La mayoría de las veces la información de velocidad de flujo, presión, temperatura, fases se encuentran en una tabla de información.





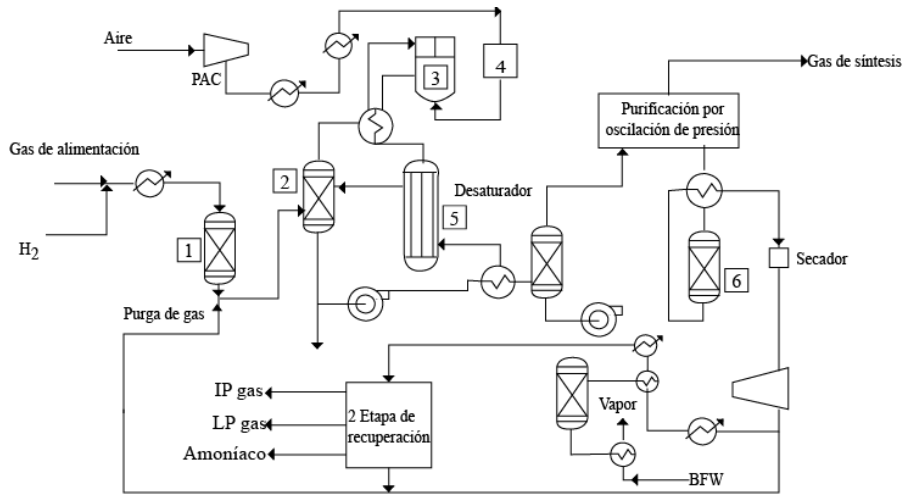
**FIGURA 2.21**

Diagrama de Flujo de Proceso de la Nafta Desulfurada

**Ejemplo 2.3 Diagrama de Flujo de Proceso de la Obtención de Gas de Síntesis y Amoníaco.**

Investigue acerca del proceso ICI (Imperial Chemical Industries) por sus siglas en inglés, para la obtención del gas de síntesis y de amoníaco, represéntelo en un diagrama de flujo de proceso.

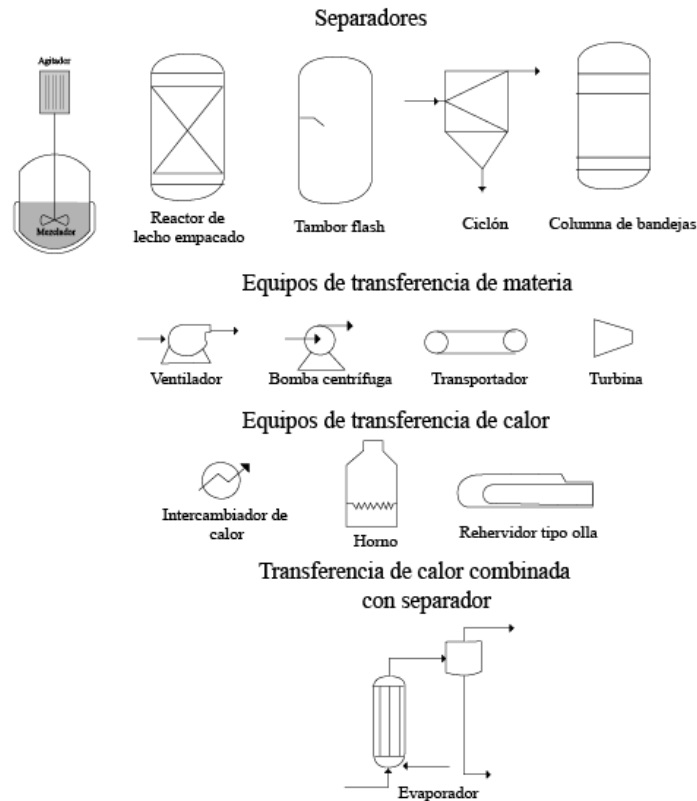
**Solución**



**FIGURA DEL EJEMPLO 2.3.1**

Diagrama de Flujo del Proceso ICI

En los diagramas de flujo se utilizan algunos de los iconos mostrados en la figura 2.22.



**FIGURA 2.22**

Equipos de Procesos Usados en los Diagramas de Flujo

## **2.8 Operaciones Unitarias en una Refinería**

En este capítulo se mencionarán brevemente las principales operaciones realizadas en una refinería para la transformación del crudo de petróleo.

### **2.8.1 Destilación Primaria**

La función de la destilación primaria es la separación de los componentes según su volatilidad en una torre de destilación, los principales productos obtenidos son el gas combustible, nafta ligera y pesada, crudo reducido.

Los equipos que se utilizan son intercambiadores de calor, bombas, desaladora, horno, torre de destilación.

### **2.8.2 Destilación al Vacío**

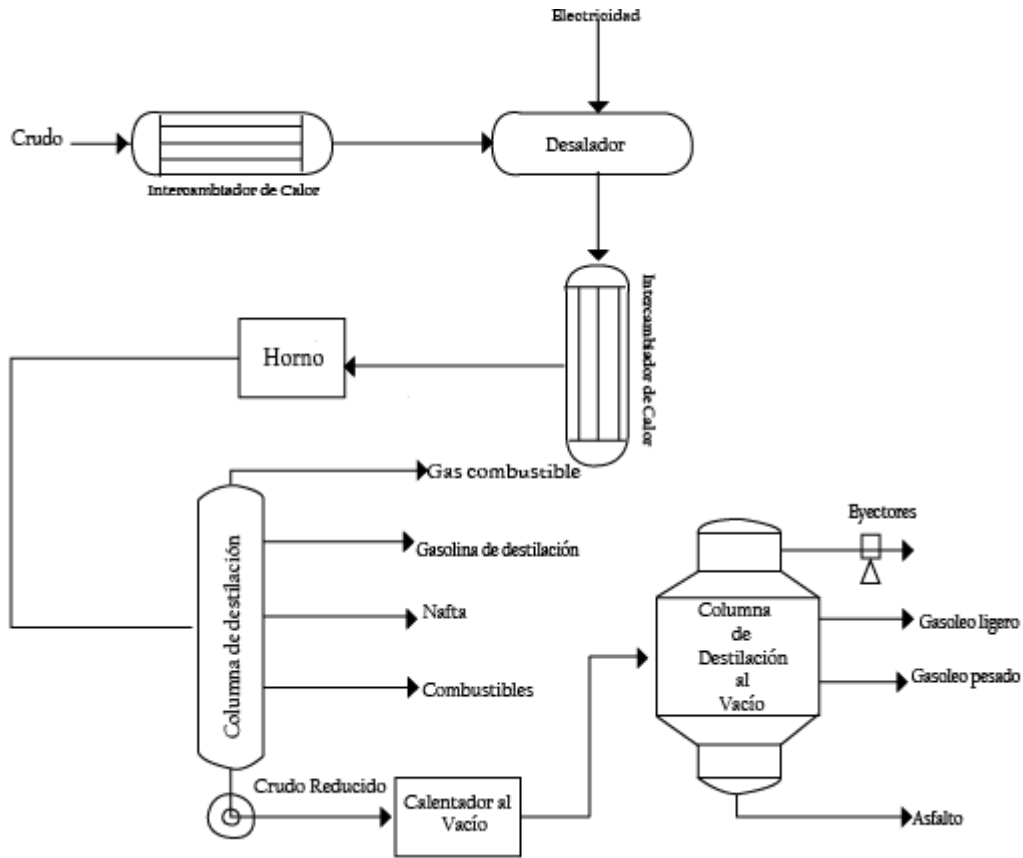
La alimentación de la torre de destilación al vacío es el crudo reducido (poner que es), siendo su función separar más componentes reduciendo la presión atmosférica con el fin de obtener gasóleo ligero y pesado, asfalto, lubricantes, etc.

Los equipos que se utilizan son horno, torre de destilación al vacío, eyector.

### **2.8.3 Hidrodesulfuración**

En esta operación se purifica al crudo eliminando los compuestos de azufre, además nitrógeno, oxígeno y metales pesados. Es importante la desulfuración del petróleo porque estos compuestos dañan o desactivan a los catalizadores, los compuestos de azufre son transformados en sulfuro de hidrógeno que se eliminan de forma gaseosa. Se obtienen naftas ligeras y pesadas, combustibles desulfurizados, combustibles catalíticos desulfurizados.

Los equipos que se utilizan son tanques, intercambiadores de calor, horno, reactor, vaporizador, compresor, rehervidor, condensador y acumulador.



**FIGURA 2.23**

Destilación Primaria y al Vacío

#### 2.8.4 Reformación

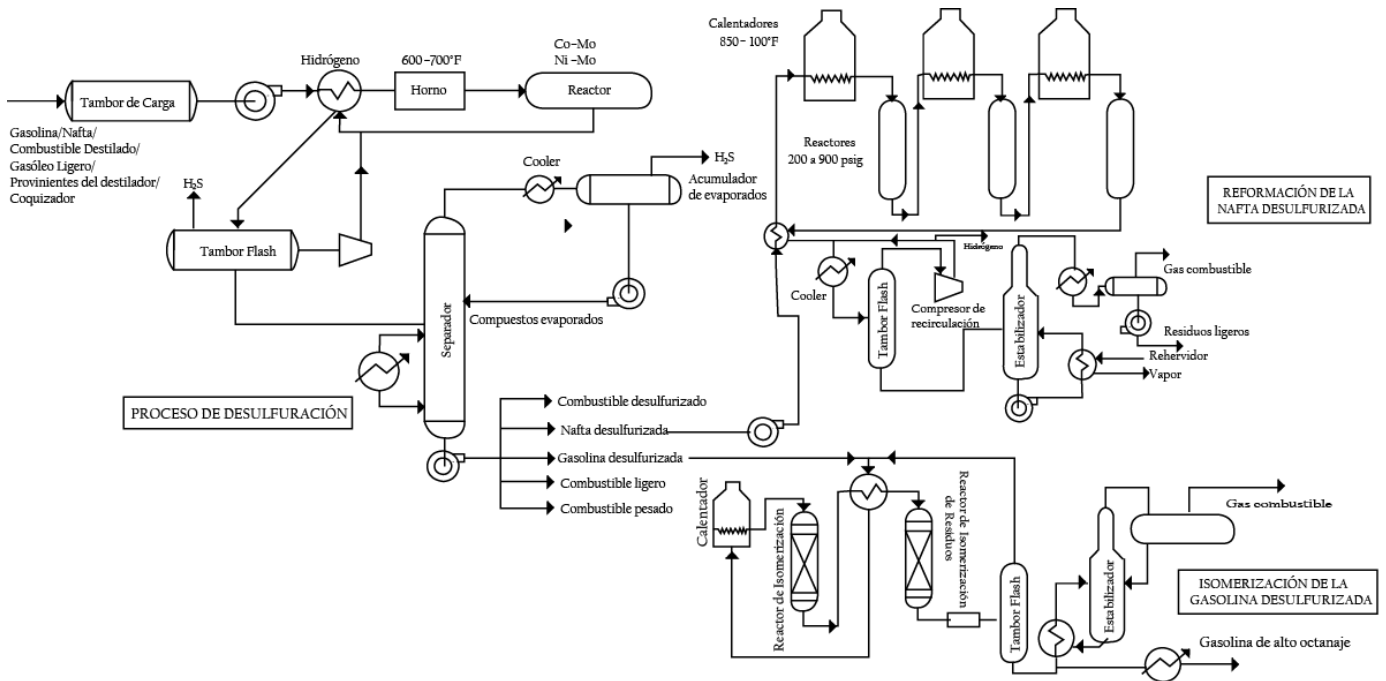
La nafta desulfurizada se bombea para modificar los hidrocarburos mediante la desintegración de catalizadores de Pt-Al y bimetálicos para la producción de gasolina con alto octanaje, los productos más valiosos de esta reformación son gas combustible, propano, butano, hidrógeno.

Los equipos que se utilizan son intercambiadores de calor, bombas, desaladora, torre de destilación.

#### 2.8.5 Isomerización

La gasolina que se obtienen en la destilación primaria y desulfurizada se utiliza para la isomerización por medio de catalizadores de Pt o  $AlCl_3$ . Se obtiene gasolina de alto octanaje.

Los equipos que se utilizan son horno, reactor, intercambiador de calor, enfriador de aire, compresor y estabilizador.



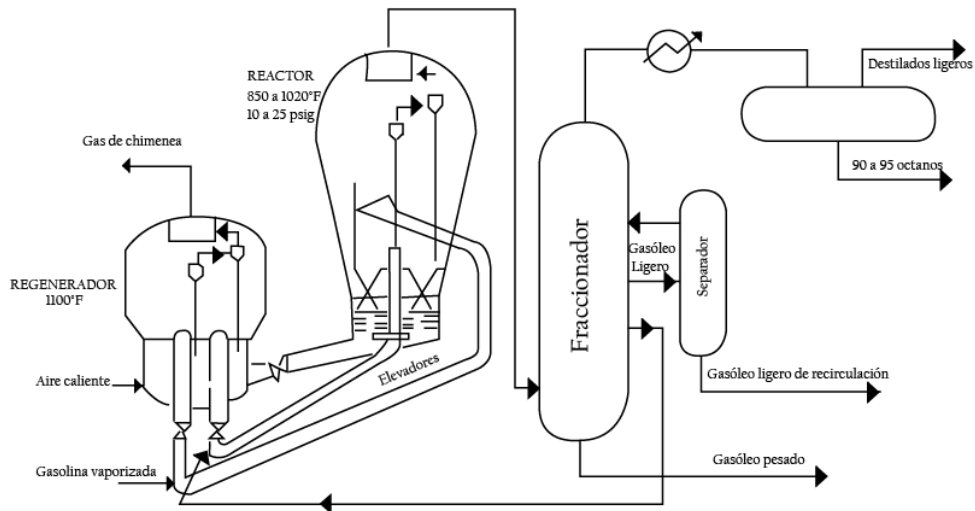
**FIGURA 2.24**

Proceso de Desulfuración, Reformación de Nafta Desulfurizada e Isomerización de Gasolina Desulfurizada

### 2.8.6 Desintegración Catalítica

El gasóleo ligero obtenido en la torre de destilación se utiliza para el craqueo catalítico donde se rompe las cadenas de los hidrocarburos con la ayuda de catalizadores de Si-Al, mediante se realiza el proceso se forma coque el cual desactiva a los catalizadores para eso se debe regenerar el catalizador quemando el carbón con aire.

Los equipos que se utilizan son reactor, sedimentador, regenerador, rehevedor, depropanizadora.



**FIGURA 2.25**

Desintegración Catalítica

### 2.8.7 Alquilación

Los compuestos que tienen tres y cuatro átomos de carbono que vienen de otras unidades de la refinería como son los propanos y butanos, reaccionan para formar alquilados ligeros, se utiliza catalizadores de HF, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Mediante este proceso se obtiene GLP.

Los equipos que se utilizan son reactor, separador, depropanizadora, acumulador y regenerador de ácido.

### 2.8.8 Polimerización

Los polipropilenos obtenidos en el craqueo catalítico reaccionan entre sí con la ayuda de un catalizador de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ó SiO<sub>2</sub> donde se obtiene GLP y gasolina de polimerización de alto octano.

Los equipos que se utilizan son intercambiadores de calor, bombas, reactor, columna de fraccionamiento (despropanizador), condensador y recalentador.

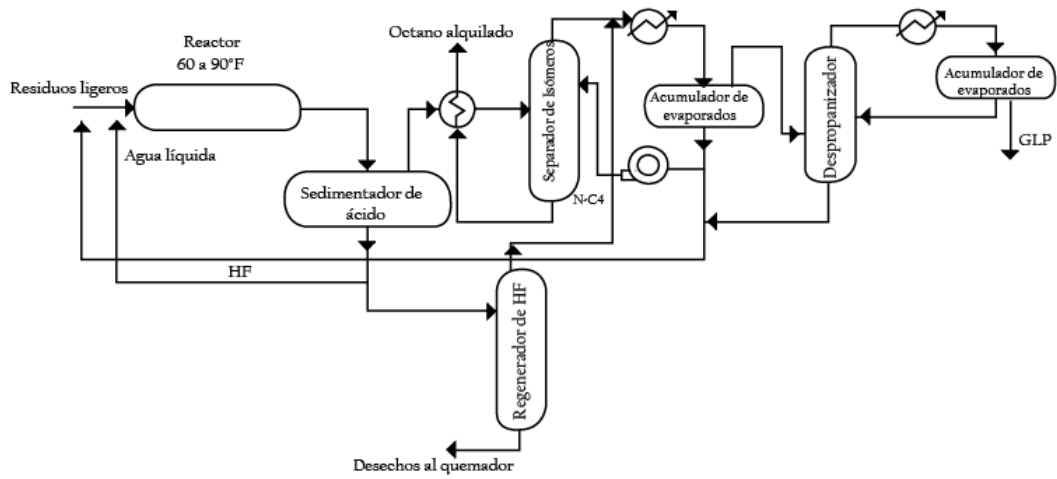


FIGURA 2.26

Alquilación

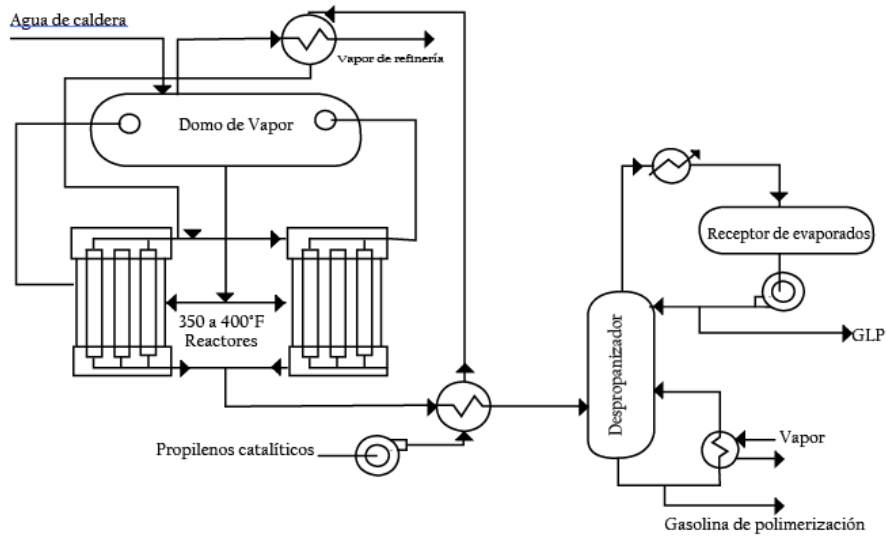


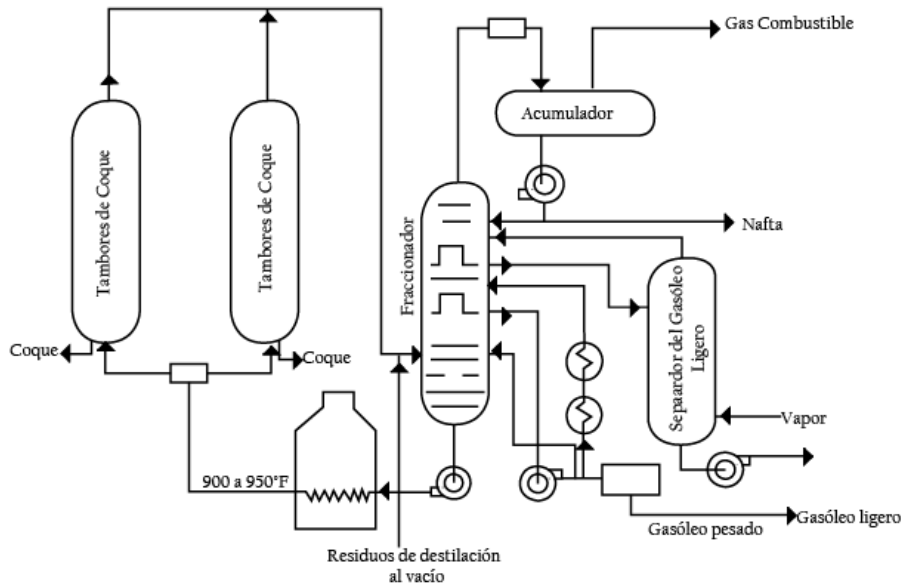
FIGURA 2.27

Polimerización

2.8.9 Coquización

Para obtener combustibles ligeros y coque se utilizan los residuos de las torres al vacío son desintegradas.

Los equipos que se utilizan son tanques de coque, horno, fraccionadora, enfriador, bomba, separador e intercambiadores de calor



**FIGURA 2.28**

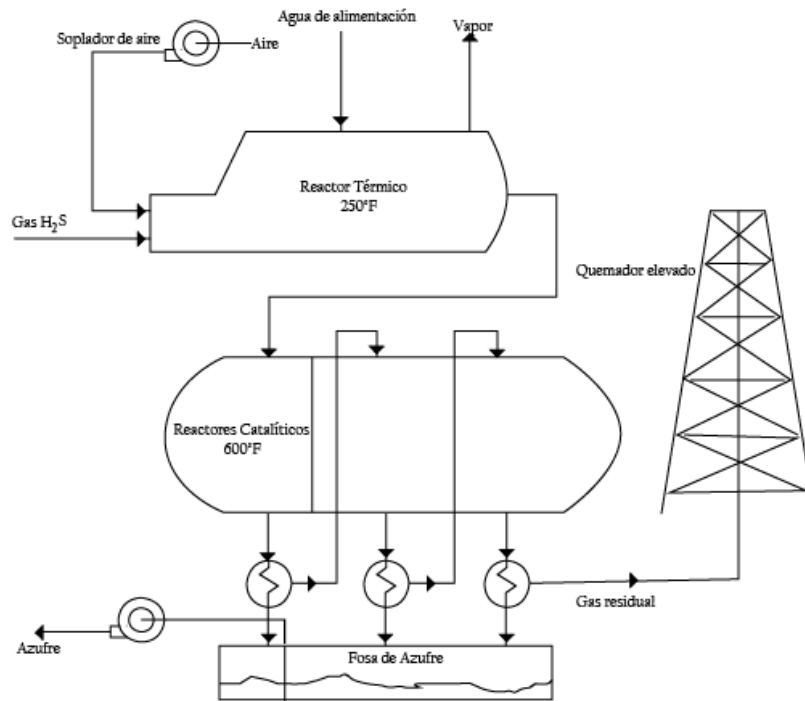
Coquización

### 2.8.10 Recuperación de Azufre

El  $H_2S$  se recolecta en las hidrodesulfuradoras en forma gaseosa o es disuelto en aminas que son convertidos es productos importantes como es el S y el  $H_2SO_4$ .

Los equipos que se utilizan son sopladores, reactores, condensadores, bomba y quemadores.





**FIGURA 2.29**

Recuperación de Azufre

### 2.8.11 Mezclado de Gasolina

Se mezclan distintas gasolinas obtenidas en las otras unidades de proceso donde se añaden aditivos que son antidetonantes y para aumentar el octanaje como es el éter metil ter-butílico (MTBE) o éter metil ter-amílico (TAME), cuando a los combustibles no se les añade nada se obtiene como producto final gasolina de alto y bajo octano y gasolina para aviones.

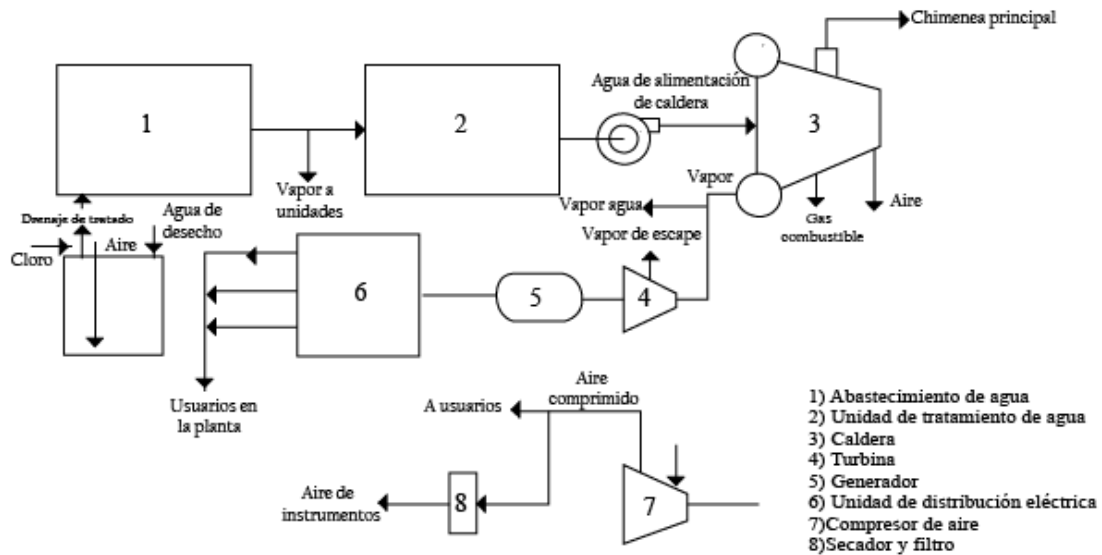
Los equipos que se utilizan son bombas y tanques de almacenamiento.

### 2.8.12 Unidad de Servicios Auxiliares

Esta unidad se utiliza para dar un soporte técnico a las otras unidades donde proporciona vapor de agua de baja, media y alta presión, aire comprimido, agua de enfriamiento. Depende de la refinería que se trate porque algunas de ellas generan su propia electricidad mediante el vapor y otras compran y emplean el vapor en una caldera para proporcionar al resto de unidades. El calor requerido

se lo obtiene mediante la quema de hidrocarburos de bajo valor comercial que son productos de los diferentes procesos de refinación.

Los equipos que se utilizan son intercambiadores de calor, bombas, calderas, sistema para tratamiento de agua y un generador eléctrico.



**FIGURA 2.30**

Unidad de Servicios Auxiliares

## Ejercicios Propuestos

### Diagramas de Flujo de Entrada-Salida

- 2.1 Enliste cuales son las ventajas de realizar un diagrama de entrada-salida para formular ecuaciones de balance de materia.
- 2.2 Realice un diagrama de entrada y salida para el proceso de destilación primaria y al vacío tratada en la sección 2.8.

### Diagrama de Flujo de Procesos

- 2.3 ¿Cuáles son las diferencias entre los diagramas de bloques y los diagramas de flujo de procesos? ¿Si tuviera que diseñar un proceso que diagramación ocuparía?

- 2.4 500 kg/h es alimentado a una torre de destilación con una composición de 40% de A y 60% B, en el destilado se obtiene un flujo de 300 kg/h, dibuje un diagrama de flujo para este proceso de destilación e indique por que corriente sale el líquido y el vapor.
- 2.5 Una torre de destilación tiene un condensador total y un recalentador, grafique en un diagrama de flujo el proceso.
- 2.6 Una mezcla de nitrógeno e hidrogeno ingresan a un mezclador, posteriormente ocurre una reacción química para producir amoniaco, los reactivos sin reaccionar son recirculados a la alimentación, diagrame el proceso mencionado.
- 2.7 Para la producción de gas licuado de petróleo (GLP) realice un diagrama de flujo de bloques y un diagrama de flujo de procesos.
- 2.8 Investigue el proceso de producción de amoniaco y realice un diagrama de entrada-salida, diagrama de bloques y un diagrama de flujo.

### **Unidades de Procesos de Operaciones Unitarias**

- 2.9 Investigue acerca de las torres de destilación y coloque las diferencias de las columnas con empaque y con platos
- 2.10 Para qué se utiliza un reactor PBR y un PFR.
- 2.11 Observe las unidades de proceso de las operaciones unitarias para los diagramas de bloques y clasifíquelas en las 4 unidades básicas que son mezclador, separador, divisor y separador.

### **Operaciones Unitarias en la Refinería**

- 2.12 Investigue acerca del proceso de desalación del crudo, que equipos y que condiciones se necesitan para lograr remover la mayor cantidad de sal.

2.13 Realice una tabla con ventajas y desventajas de la destilación primaria y destilación al vacío.

2.14 Que tipos de regeneradores existen, indique su función y las diferencias.

### **Referencias Bibliográficas**

Ghasem, N., & Henda, R. (2015). *Principles of Chemical Engineering Processes MATERIAL AND ENERGY BALANCES SECOND EDITION*.

Matar, S., & Hatch, L. (2000). *Chemistry of Petrochemical Processes* (Vol. 2).

Morris, A. E., Geiger, G., & Fine, A. (2011). Handbook on Material and Energy Balance Calculations. In *John Wiley & Sons* (Vol. 3th).

Murphy, R. M. (2007). Introducción a los procesos químicos: Principios, Análisis y Síntesis. In *McGraw-Hill Interamericana*.

Torres Robles, Rafael., & Castro Arellano, J. J. (2002). *Análisis y simulación de procesos de refinación del petróleo*. Instituto Politécnico Nacional.

Turton, R., Bailie Richard, Whiting, W., & Shaeiwitz, J. (2009). *Analysis, synthesis, and design of chemical processes* (Vol. 3th).

## 3

### *Análisis de Grados de Libertad*

El presente capítulo aclara el concepto de análisis de grados de libertad, base de cálculo, sistemas y corrientes en una sola unidad para poder resolver balances de materia y energía en procesos químicos y petroquímicos, considerando que la ecuación general de balances de materia está en función de variables de corriente y variables de sistema.

El análisis de grados de libertad es un método matemático riguroso que se utiliza para determinar si un problema está subespecificado, sobreespecificado o completamente especificado, es decir si el problema tiene información suficiente para solucionarlo.

#### **Objetivos de Aprendizaje**

- Conocer el procedimiento necesario para calcular los flujos en los diagramas de proceso.
- Identificar las variables de corriente y de sistema dependientes e independientes de un proceso químico.
- Analizar las consideraciones necesarias para realizar un análisis de grados de libertad para un diagrama de flujo de bloques.
- Buscar bibliográficamente las estrategias necesarias para el análisis de grados de libertad.

#### **3.1 Definiciones**

##### **3.1.1 Base de cálculo**

Para la resolución de ejercicios es necesario tener una base de cálculo, que es una cantidad de flujo puede ser representada en masa o moles o también se puede representar como velocidad de flujo que está en función del tiempo. En los

procesos se puede aumentar o reducir una base de cálculo para poder realizar un factor de escalamiento.

### 3.1.2 Sistemas y Corrientes

Un sistema es denominado un espacio con volumen delimitado, dentro de estos límites se define que materia se encuentra dentro, fuera y atravesando por él, mientras que las corrientes son las entradas y salidas que se encuentran en el sistema, la variable de corriente va a describir la cantidad de flujo que se encuentra en una corriente y la variable de sistema significa el cambio de cantidad de la materia dentro del sistema.

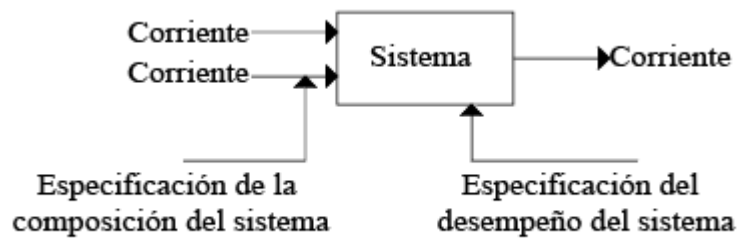


FIGURA 3.1

Definición de Corriente y Sistema

### 3.1.3 Especificaciones

Para calcular los flujos de los procesos se tienen dos tipos de especificaciones:

1. **Especificación de la composición del sistema:** Brinda información de la cantidad de materia de la corriente, esto puede ser representado como masa, moles, fracción másica o molar, concentración, velocidad de flujo.
2. **Especificación del desempeño del sistema:** Describen la cantidad de cambios físicos y/o químicos que ocurren en el sistema. Por ejemplo, el porcentaje de conversión de un reactivo en una reacción química.

### Ejemplo 3.1 Tipos de Especificaciones

Analice y clasifique las especificaciones que se muestran a continuación según su tipo si es de composición o desempeño del sistema.

- Alimentación de una solución saturada de sal al 50% de NaCl.
- En un reactor se convierte el 60% del nitrógeno en amoníaco.
- En una torre se recupera el 98% del compuesto A.
- Según la normativa se dice que una solución de agua con azúcar debe contener 1g de glucosa por 1000 g de agua

#### Solución

Se debe analizar la información proporcionada y clasificar las especificaciones.

Tabla del ejemplo 3.1

Especificación de composición del sistema	Especificación de desempeño del sistema
Alimentación de una solución saturada de sal al 50% de NaCl.	En un reactor se convierte el 60% del nitrógeno en amoníaco.
Según la normativa se dice que una solución de agua con azúcar debe contener 1g de glucosa por 1000 g de agua.	En una torre se recupera el 98% del compuesto A.

### 3.2 Ecuaciones para Balance de Masa

Para realizar un balance de masa para un sistema se debe analizar los límites que tiene el mismo, la cantidad de materia que entra, sale, se recircula, si existe un reactor se debe analizar las reacciones químicas que ocurren en el sistema.

Se puede realizar un balance de materia general para todo el sistema o un balance para cada componente o por equipo que se encuentre dentro del proceso. La ecuación general está descrita como:

$$\text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación} - \text{Consumo} = \text{Acumulación} \quad (1)$$

Donde:

Entrada: Cantidad de materia que ingresa al sistema

Salida: Cantidad de materia que sale del sistema

Generación: Cantidad de materia que se genera dentro del sistema

Consumo: Cantidad de materia que se consume dentro del sistema

Acumulación: Cambio de la materia dentro del sistema

Es importante mencionar que las entradas y salidas son variables de corriente mientras que la generación, consumo y acumulación son variables de sistema.

#### 3.2.1 Tipos de Componentes

Al momento de realizar los cálculos de flujo de procesos se puede utilizar tres diferentes tipos de componentes.

-Elementos: Carbono, Oxígeno, Nitrógeno, Hidrógeno, etc.

-Compuestos: Agua, Glucosa, Metano, Etano, etc.

-Materiales compuestos: Mezcla de compuestos que tienen una composición definida.



Por lo general son más utilizados los compuestos por el hecho que existen reactores en los procesos y se dan reacciones químicas con una estequiometria ya definida mientras que los elementos es preferible cuando la estequiometria de la reacción es desconocida o también cuando existe una serie de reacciones involucradas en el proceso.

Si existen  $x$  componentes involucrados en el sistema entonces van a existir  $x$  ecuaciones de balance de masa independientes. La generación y consumo está relacionado con los coeficientes estequiométricos de las reacciones químicas involucradas.



$$\frac{\text{Moles de A consumidos}}{\text{Moles de B consumidos}} = \frac{\gamma_A}{\gamma_B} = \frac{a}{b} \quad (2)$$

$$\frac{\text{Moles de C generados}}{\text{Moles de B consumidos}} = \frac{-\gamma_C}{\gamma_B} = \frac{c}{b} \quad (3)$$

Cuando hay  $x$  reactantes y productos se pueden escribir  $x-1$  ecuaciones independientes para poder relacionar la generación y consumo. La acumulación puede ser cero, positiva o negativa esto depende del equilibrio existente entre la materia que entra y es producida y la materia que sale y son consumidos, si se tiene el sistema en estado estacionario la acumulación va a ser cero.

### 3.2.2 Procedimiento Calcular los Flujos en el Proceso

1. Graficar el diagrama de flujo del proceso químico.
2. Definir el sistema.
3. Definir las variables de corriente y los componentes involucrados.
4. Asegurarse que todas las cantidades estén en las mismas unidades.
5. Definir una base de cálculo.

6. Definir las variables del sistema, si existe una reacción química donde se muestren ecuaciones de los reactivos consumidos, productos generados y si no se encuentra en estado estacionario se deberá plantear una ecuación para la acumulación del sistema.
7. Describir las especificaciones de las composiciones de las corrientes en forma de ecuaciones.
8. Realizar un balance de masa individual para cada especie involucrada en el sistema.
9. Resolver todas las ecuaciones presentes en el ejercicio.
10. Comprobar las respuestas.

### **3.2.3 Consejos para el Cálculo Correcto de los Flujos**

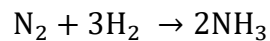
Para la resolución de balances de masa es importante seguir los pasos mencionados en la sección 3.2.2 pero también existen unos consejos adicionales que ayudan a la correcta resolución de los ejercicios.

1. No omitir el paso 1 de la construcción de un diagrama.
2. Definir el sistema, puede ser una sola unidad de proceso, grupo de unidades o el proceso químico entero.
3. Reconocer si existen reacciones químicas involucradas, si es así el caso verificar si existe una estequiometría conocida, si no es así se deberá igualar la reacción.
4. Convertir todas las cantidades en una misma unidad para que exista homogeneidad.
5. Elegir correctamente una base de cálculo esta puede ser para la entrada o la salida del sistema.
6. Definir los compuestos que se generan, consumen y/o acumulan según sea el caso

7. Describir todas las especificaciones presentes en el proceso.
8. Realizar primero un balance general de masa de todo el proceso y posteriormente un balance de masa para cada compuesto involucrado.
9. Resolver el sistema de ecuaciones que se generó con las variables desconocidas.
10. Verificar la solución, se lo puede realizar utilizando la ecuación de balance general de masa.

### Ejemplo 3.2 Producción de Amoníaco

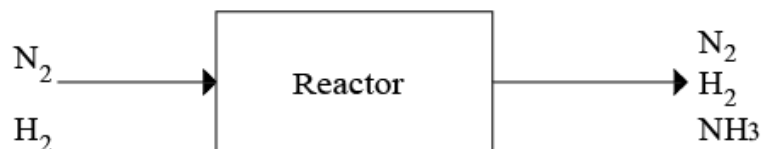
El amoníaco se produce por medio de una reacción química entre el hidrógeno y nitrógeno, donde el reactor es alimentado por 100 mol/h de nitrógeno y 3 mol de hidrógeno por cada mol de nitrógeno, el porcentaje de conversión es del 75%. Calcule la cantidad de hidrogeno y nitrógeno sin reaccionar y la cantidad de amoniaco producido. (El sistema se encuentra en estado estacionario).



#### Solución

Para poder calcular la cantidad de amoníaco producido e hidrógeno y nitrógeno sin reaccionar se debe seguir los pasos mencionados en la sección 3.2.2.

#### Paso 1 y 2:



#### FIGURA DEL EJEMPLO 3.2.1

Diagrama de Bloques de la Producción de Amoníaco.

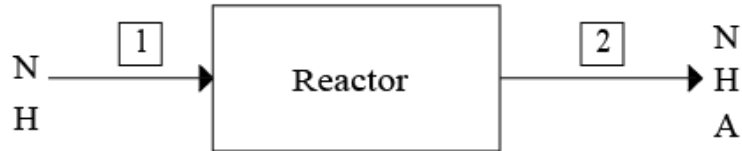
**Paso 3.** Elegir los componentes y las variables del sistema.

Donde:

N: N<sub>2</sub>

H: H<sub>2</sub>

A: NH<sub>3</sub>



**FIGURA DEL EJEMPLO 3.2.2**

Definición de las Corrientes del Diagrama de Bloques.

**Paso 4 y 5:** Definir la base de cálculo, en este caso la alimentación de nitrógeno es de 100 mol/h

**Paso 6:** Definir los reactantes consumidos y los productos generados.

$$\frac{H_{\text{consumido}}}{N_{\text{consumido}}} = \frac{3 \text{ mol}}{1 \text{ mol}} = 3$$

$$\frac{A_{\text{generado}}}{N_{\text{consumido}}} = \frac{2 \text{ mol}}{1 \text{ mol}} = 2$$

**Paso 7:** Describir las especificaciones de corriente, el ejercicio menciona que reaccionan 2 moles de hidrógeno por cada mol de nitrógeno y también menciona que la conversión del nitrógeno es del 75%

Especificación 1:

$$\frac{H_1}{N_1} = \frac{3}{1}$$

$$H_1 = 2 N_1$$

$$H_1 = 300 \text{ mol/h}$$

Especificación 2:

$$N_{\text{consumido}} = 0.75 N_1$$

$$N_{\text{consumido}} = 75 \text{ mol/h}$$

**Paso 8:** Realizar los balances de masa para cada componente utilizando la ecuación general de balance de masa.

$$E - S + G - C = A$$

-Para el Nitrógeno:

$$N_1 - N_2 - N_{\text{consumido}} = 0$$

-Para el Hidrógeno:

$$H_1 - H_2 - H_{\text{consumido}} = 0$$

-Para el Amoníaco:

$$-A_2 + A_{\text{generado}} = 0$$

**Paso 9:** Resolver las ecuaciones

-Nitrógeno sin reaccionar

$$N_2 = N_1 - N_{\text{consumido}}$$

$$N_2 = (100 - 75) \text{ mol/h} = 25 \text{ mol/h}$$

-Hidrógeno consumido

$$\frac{H_{\text{consumido}}}{N_{\text{consumido}}} = 3$$

$$H_{\text{consumido}} = 3 (75 \text{ mol/h}) = 225 \text{ mol/h}$$

-Hidrógeno sin reaccionar

$$H_2 = H_1 - H_{\text{consumido}}$$

$$H_2 = (300 - 225) \text{ mol/h} = 75 \text{ mol/h}$$

-Amoníaco producido y generado

$$A_{\text{generado}} = 2N_{\text{consumido}}$$

$$A_{\text{generado}} = 2(75 \text{ mol/h}) = 150 \text{ mol/h}$$

$$A_2 = A_{\text{generado}}$$

$$A_2 = 150 \text{ mol/h}$$

**Paso 10:** Verificar el correcto balance de masa mediante el cálculo de la cantidad de materia de entrada y de salida, lo que entra debe ser igual a lo que sale.

-Materia que entra

$$100 \frac{\text{mol N}_2}{\text{h}} \times 28 \frac{\text{g N}_2}{\text{mol N}_2} + 300 \frac{\text{mol H}_2}{\text{h}} \times 2 \frac{\text{g H}_2}{\text{mol H}_2} = 3400 \text{ g/h}$$

-Materia que sale

$$25 \frac{\text{mol N}_2}{\text{h}} \times 28 \frac{\text{g N}_2}{\text{mol N}_2} + 75 \frac{\text{mol H}_2}{\text{h}} \times 2 \frac{\text{g H}_2}{\text{mol H}_2} + 150 \frac{\text{mol NH}_3}{\text{h}} \times 17 \frac{\text{g NH}_3}{\text{mol NH}_3} = 3400 \text{ g/h}$$

Se pudo comprobar que el balance de masa esta correcto  $3400 \text{ g/h} = 3400 \text{ g/h}$

Los resultados se pueden simplificar en una tabla:

### Tabla del ejemplo 3.2

Resumen de Resultados

Componentes	Entrada (mol/h)	Generación/Consumo (mol/h)	Salida (mol/h)
Nitrógeno	100	-75	25
Hidrógeno	300	-225	75
Amoníaco	0	+150	150

### Ejemplo 3.3 Separación de una Solución Concentrada

Ingresa 2000 lb de una solución de agua y NaCl que contiene 80% en peso de agua, se requiere evaporar el 60% del agua y obtener una solución concentrada. Calcule la cantidad de agua que debe salir en el evaporador y la cantidad de solución concentrada que se obtiene al final del proceso.

#### Solución

De la misma manera que se resolvió el ejercicio 3.2 se deben seguir los pasos mencionados.

#### Paso 1 y 2:



**FIGURA DEL EJEMPLO 3.3.1**

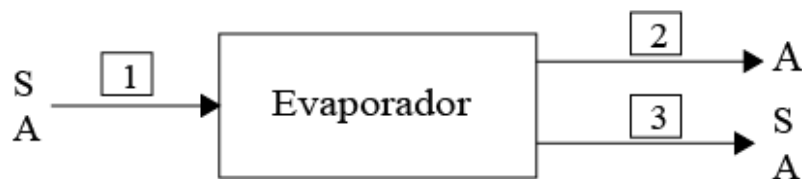
Diagrama de Bloques.

#### Paso 3. Elegir los componentes y las variables del sistema.

Donde:

S: Solución de NaCl

A: Agua



**FIGURA DEL EJEMPLO 3.3.2**

Definición de las Corrientes del Diagrama de Bloques.

**Paso 4 y 5:** Definir la base de cálculo, en este caso la alimentación es de 2000 lb de la solución de agua y NaCl, no existe reacción química porque el sistema es un evaporador.

**Paso 6:** No existe generación ni consumo porque no existe una reacción química.

**Paso 7:** Describir las especificaciones de corriente, el ejercicio menciona que ingresa 2000 lb de una solución de agua y NaCl con 80% en peso de agua y que se quiere evaporar un 60% de agua.

Especificación 1:

-Agua que ingresa

$$A_1 = 0.80 (2000 \text{ lb})$$

$$A_1 = 1600 \text{ lb}$$

-Solución de NaCl que ingresa

$$S_1 + A_1 = 2000 \text{ lb}$$

$$S_1 = 2000 \text{ lb} - A_1$$

$$S_1 = (2000 - 1600) \text{ lb} = 400 \text{ lb}$$

Especificación 2:

-Agua a evaporar

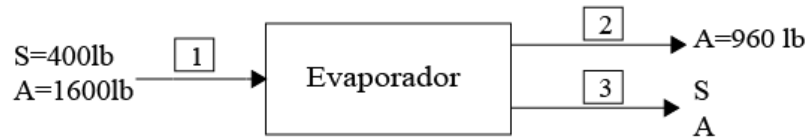
$$A_1 = 0.60 (1600 \text{ lb})$$

$$A_1 = 960 \text{ lb}$$

**Paso 8:** Realizar los balances de masa para cada componente basándose en la ecuación general de balance de materia.

$$E - S + G - C = A$$





**FIGURA DEL EJEMPLO 3.3.3**

Actualización del Diagrama de Bloques.

-Para la Solución de NaCl

$$S_1 = S_3$$

-Para el Agua

$$A_1 = A_2 + A_3$$

**Paso 9:** Resolver las ecuaciones

-Solución Concentrada

$$S_1 = S_3$$

$$S_3 = 400 \text{ lb}$$

-Cantidad de agua en la solución concentrada

$$A_3 = A_1 - A_2$$

$$A_3 = (1600 - 960) \text{ lb}$$

$$A_3 = 640 \text{ lb}$$

-Cantidad de solución concentrada

$$(400 + 640) \text{ lb} = 1040 \text{ lb}$$

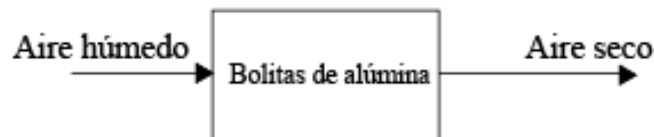
### Ejemplo 3.4 Secado del Aire

Para procesos industriales se necesita secar el aire húmedo para poder utilizarlo, el aire se comprime a 83°F y 1 atm, se bombea 1.8% molar de agua como vapor a un tanque que contiene 50 lb de alúmina. La velocidad de alimentación es de

150 ft<sup>3</sup>/min, el aire seco contiene únicamente 0,04% molar de agua, la cantidad máxima que se adsorbe de agua es de 0.20 lb de agua por lb de alúmina. Calcule el tiempo de funcionamiento del tanque sin reemplazar la alúmina y la cantidad de agua acumulada en el tanque.

### Solución

#### Paso 1 y 2:



**FIGURA DEL EJEMPLO 3.4.1**

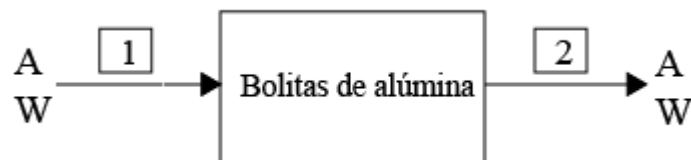
Diagrama de Bloques del Secado del Aire.

#### Paso 3: Elegir los componentes

Donde

A: Aire

W: Agua



**FIGURA DEL EJEMPLO 3.4.2**

Definición de las Corrientes del Diagrama de Bloques del Secado del Aire.

**Paso 4 y 5:** Definir la base de cálculo, en este caso se debe transformar el flujo volumétrico, la capacidad de adsorción porque se encuentran en otras unidades y no se pueden realizar los cálculos.

$$\frac{n}{V} = \frac{P}{RT}$$

$$\frac{n}{V} = \frac{(1\text{atm})}{\left(0.7302 \frac{\text{ft}^3 \text{ atm}}{\text{lbmol}^\circ\text{R}}\right) (83 + 459^\circ\text{R})} = 0.00252 \frac{\text{lbmol}}{\text{ft}^3}$$

$$150 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}} \times 0.00252 \frac{\text{lbmol}}{\text{ft}^3} = 0.38 \frac{\text{lbmol}}{\text{min}}$$

- La composición de corriente dada será:

$$A_1 + W_1 = 0.38 \frac{\text{lbmol}}{\text{min}}$$

**Paso 6:** El ejercicio no presenta una reacción química por lo tanto no va a existir generación ni consumo, pero si existe acumulación de agua dentro del tanque.

**Paso 7:** Describir las especificaciones de corriente, el ejercicio menciona que en la corriente de entrada se tiene 1.8% de agua, el aire seco tendrá 0.04% de agua y la capacidad de adsorción es de 0.20 lb agua/lb alúmina.

Especificación 1:

$$\frac{W_1}{A_1 + W_1} = 0.018 \frac{\text{lbmol de agua}}{\text{lbmol}}$$

Especificación 2:

$$\frac{W_2}{A_2 + W_2} = 0.0004 \frac{\text{lbmol de agua}}{\text{lbmol}}$$

Especificación 3:

$$50 \text{ lb alúmina} \times \frac{0.20 \text{ lb agua}}{\text{lb alúmina}} \times \frac{\text{lbmol de agua}}{18 \text{ lb de agua}} = 0.555 \text{ lbmol de agua}$$

$$W_{\text{acumulada}} = \frac{0.555 \text{ lbmol de agua}}{t \text{ (min)}}$$

**Paso 8:** Realizar los balances de masa para cada componente basándose en la ecuación general de balance de materia.

$$E - S + G - C = A$$

-Para el aire

$$A_1 = A_2$$

-Para el agua

$$W_1 - W_2 = W_{\text{acumulada}}$$

**Paso 9:** Resolver las ecuaciones

-Agua contenida en el aire húmedo

$$A_1 + W_1 = 0.38 \frac{\text{lbmol}}{\text{min}}$$

$$\frac{W_1}{0.38 \frac{\text{lbmol}}{\text{min}}} = 0.018 \frac{\text{lbmol de agua}}{\text{lbmol}}$$

$$W_1 = 6.84 \times 10^{-3} \frac{\text{lbmol}}{\text{min}}$$

-Aire a la entrada

$$\frac{6.84 \times 10^{-3} \frac{\text{lbmol}}{\text{min}}}{A_1 + 6.84 \times 10^{-3} \frac{\text{lbmol}}{\text{min}}} = 0.018 \frac{\text{lbmol de agua}}{\text{lbmol}}$$

$$A_1 = 0.386 \frac{\text{lbmol}}{\text{min}}$$

-Aire a la salida

$$A_2 = 0.386 \frac{\text{lbmol}}{\text{min}}$$

-Agua contenida en el aire seco

$$\frac{W_2}{0.386 \frac{\text{lbmol}}{\text{min}} + W_2} = 0.0004 \frac{\text{lbmol de agua}}{\text{lbmol}}$$

$$W_2 = 1.544 \times 10^{-4} \frac{\text{lbmol}}{\text{min}}$$

-Agua acumulada

$$W_1 - W_2 = W_{\text{acumulada}}$$

$$W_{\text{acumulada}} = 6.685 \times 10^{-3} \frac{\text{lbmol}}{\text{min}}$$

-Tiempo de funcionamiento

$$W_{\text{acumulada}} = \frac{0.555 \text{ lbmol de agua}}{t \text{ (min)}}$$

$$t \text{ (min)} = \frac{0.555 \text{ lbmol}}{6.685 \times 10^{-3} \frac{\text{lbmol}}{\text{min}}}$$

$$t \text{ (min)} = 83.015 \text{ min}$$

### 3.3 Análisis de Grados de Libertad

El análisis de grados de libertad es un método matemático riguroso que se utiliza para determinar si un problema tiene o no solución, no es necesario resolver el ejercicio ni plantear las ecuaciones, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Grafique un diagrama de flujo.
2. Defina los componentes.
3. Escriba las reacciones químicas, identifique si existe acumulación en el sistema y etiquete los componentes involucrados.
4. Reconozca las variables independientes. Observe la tabla 3.1.
5. Reconozca las ecuaciones independientes. Observe la tabla 3.2.
6. Realice el análisis de grados de libertad, por sus siglas en inglés se le conoce también como análisis DOF

$$\text{DOF} = \text{variables independientes} - \text{ecuaciones independientes} \quad (4)$$

Cuando:

-DOF=0 el ejercicio puede tener una solución.

-DOF<0 Se dice que el ejercicio está sobreespecificado es decir tiene muchas ecuaciones y puede llegar a ser redundante.

-DOF>0 El ejercicio subespecificado, existen más variables que ecuaciones, pero al momento de resolver el problema se puede generar más ecuaciones.

**Tabla 3.1**

Variables independientes

<b>Variables de corriente independientes</b>	Número de componentes en el sistema
<b>Variables de sistema independientes</b>	Número de reacciones químicas y componentes que se acumulan en el sistema

**Tabla 3.2**

Ecuaciones independientes

Flujos especificados	Por lo general solo es la base de cálculo.
Especificaciones de corriente	-Si existen $x$ componentes, van a existir $x-1$ . -En el caso que se tenga un divisor se debe agregar $(x-1) \cdot (x_s-1)$ donde $x_s$ es el número de corrientes en la salida.
Especificaciones de desempeño	
Ecuaciones de balance de masa	Recordemos que si se tiene $x$ componentes se va a tener $x$ ecuaciones de balance de masa.

Hay que tener mucho cuidado al momento de determinar si una ecuación es independiente, se debe saber que una ecuación independiente no se puede deducir por la unión de más ecuaciones, se cometen dos errores al momento de identificar las especificaciones y ecuaciones.

-Cuando existe una conversión completa de un reactivo, eso no se debe tomar como una especificación del desempeño.

-Si una corriente está conformada por  $n$  compuestos y se tiene el porcentaje másico o molar, las especificaciones serán  $n-1$ , por ejemplo, si ingresa a un reactor 25% A, 40% B y 35% de C, solamente se especificará dos componentes porque el tercero se lo puede calcular de la resta del 100%.

### 3.3.1 Ecuaciones Independientes

Las ecuaciones independientes no se derivan de otras ecuaciones, algunas de las ecuaciones que relacionan las variables desconocidas son:

-Balances de materia para un proceso con reacciones químicas.

-Balances de energía.

-Especificaciones de corriente o de desempeño.

-Propiedades y leyes físicas.

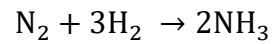
-Las fracciones másicas o molares deben ser iguales a la unidad.

-Estequiometría de una reacción.

### Ejemplo 3.5 Análisis de Grados de Libertad del Amoníaco

Realice el análisis de grados de libertad del ejercicio 3.2, donde mencionaba que el amoníaco se produce por medio de una reacción química entre el hidrógeno y nitrógeno, donde el reactor es alimentado por 100 mol/h de nitrógeno y 3 mol de hidrógeno por cada mol de nitrógeno, el porcentaje de conversión es del 75%.

Calcule la cantidad de hidrogeno y nitrógeno sin reaccionar y la cantidad de amoniaco producido. (El sistema se encuentra en estado estacionario).



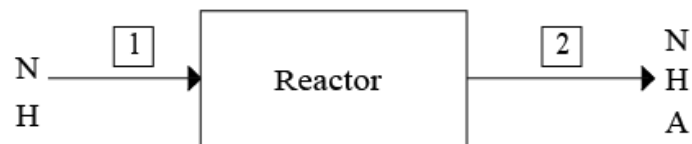
### Solución

Graficar el diagrama de bloques especificando los componentes involucrados en el sistema. Se tienen 3 componentes.

N:  $\text{N}_2$

H:  $\text{H}_2$

A:  $\text{NH}_3$



### FIGURA DEL EJEMPLO 3.5.1

Diagrama de Bloques para la Síntesis del Amoníaco.

Se debe primero identificar las variables independientes:

-Variables de corriente: 5 (2 componentes de entrada y 3 de salida)

-Variables de sistema: 1 (1 reacción química)

**Total variables independientes: 6**

Identificar las ecuaciones independientes:

-Base de cálculo: 1

-Relación de alimentación de nitrógeno: hidrógeno: 1

-Especificación de desempeño: 1



-Ecuaciones de balance de masa por componente: 3

**Total ecuaciones independientes: 6**

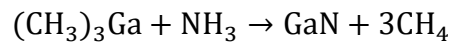
Análisis DOF

$$\text{DOF} = 6 - 6 = 0$$

El problema se comprobó que tiene una única solución porque el  $\text{DOF}=0$ .

### Ejemplo 3.6 Análisis de Grados de Libertad de un Circuito

En un proceso MOCVD ingresan amoniaco y trimetilo de galio a un reactor con una relación de 1:1, es empleado un gas transportador de galio que se incluye en el circuito con la alúmina y metano (Existe una purga). Analice si el problema tiene solución mediante un análisis DOF.



#### Solución

Graficar un diagrama de bloques definiendo las corrientes

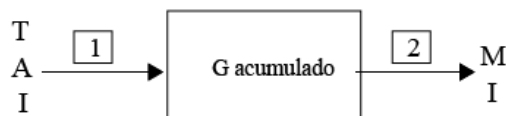
Donde

T: Trimetilo de galio

A: Alúmina

I: Gas transportador

M: Metano



**FIGURA DEL EJEMPLO 3.6.1**

Diagrama de Bloques para el Circuito.

Se debe primero identificar las variables independientes:

-Variables de corriente: 5 (3 componentes de entrada y 2 de salida)

-Variables de sistema: 2 (1 reacción química y acumulación)

**Total variables independientes: 7**

Identificar las ecuaciones independientes:

-Ecuaciones de balance de masa por componente: 5

Recuerde la relación 1:1 no es una especificación de corriente y la conversión completa en el reactor tampoco es una especificación de desempeño

**Total ecuaciones independientes: 5**

Análisis DOF

$$\text{DOF} = 7 - 5 = 2$$

El problema se comprobó que el problema está subespecificado porque el  $\text{DOF}=2$ .

### **Ejemplo 3.7 Análisis de Grados de Libertad de Lavado de Lechugas**

Las lechugas contienen un alto contenido de bacterias, suciedades que deben ser eliminados para poder ser consumidas, en un restaurante se lavan 200 paquetes de 20 oz diarias, se ha realizado un análisis y se descubrió que hay 0.5 lb de residuos por 10 lb de lechugas, se emplean 100 galones de agua para su limpieza, se descarga 2 bbl de agua utilizada a un río que posee 1,8% de desechos. Realice el análisis de grados de libertad.

### **Solución**

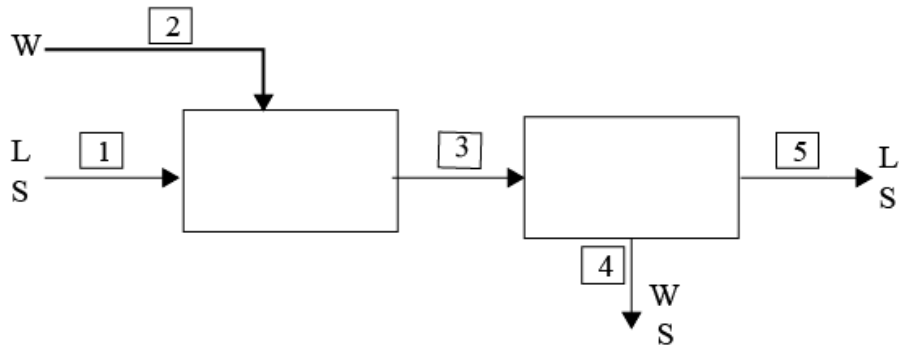
Realizar el diagrama de bloques para entender el problema.

Donde

W: Agua

L: Lechuga

S: Suciedades



**FIGURA DEL EJEMPLO 3.7.1**

Diagrama de Bloques para el Lavado de Lechuga.

Se debe primero identificar las variables independientes:

-Variables de corriente: 7 (2 componentes de entrada 1, 1 componente en la entrada 2, 2 componentes en la salida 4 y 2 componentes en la salida 5).

-Variables de sistema: 0 (no hay reacción química ni acumulación).

**Total variables independientes: 7**

Identificar las ecuaciones independientes:

-Flujos especificados: 3 (fundas de lechuga, agua necesaria para el lavado, agua descargada al río).

-Especificaciones de corriente: 2 (relación de suciedades por lb de lechugas y porcentaje de suciedades en el agua desechada).

-Especificaciones de desempeño: 1 (eliminación de suciedades).

-Ecuaciones de balance de masa por componente: 3

**Total ecuaciones independientes: 9**

Análisis DOF

$$\text{DOF} = 7 - 9 = -2$$

El problema está sobreespecificado porque el  $\text{DOF} = -2$

### **Ejemplo 3.8 Análisis de Grados de Libertad para una Columna de Destilación**

Ingresa a una torre de destilación una corriente de 100 mol/h de 30% metano y 70% pentano, el flujo del destilado es de 60 mol/h. Realice un diagrama de flujo y un análisis de grados de libertad para conocer si el ejercicio tiene solución.

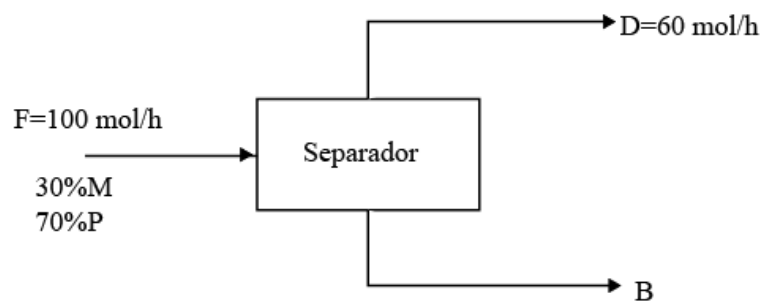
#### **Solución**

Donde:

F: Alimentación

D: Destilado

B: Fondos



**FIGURA DEL EJEMPLO 3.8.1**

Diagrama de Bloque de una Torre de Destilación.

Se debe primero identificar las variables independientes:

-Variables de corriente: 3 (1 corriente de entrada, 1 corriente de salida 2 y 1 corriente de salida 3).

-Variables de sistema: 0 (no hay reacción química ni acumulación).

**Total variables independientes: 3**

Identificar las ecuaciones independientes:

-Ecuaciones de balance de masa por componente: 2

**Total ecuaciones independientes: 2**

Análisis DOF

$$\text{DOF} = 3 - 2 = 1$$

El problema se comprobó que el problema está subespecificado porque el DOF=1.

### 3.4 Análisis de Grados de Libertad para Múltiples Unidades

Es posible calcular los grados de libertad para procesos que tienen múltiples unidades, donde se puede determinar si la información proporcionada es suficiente, el procedimiento es muy similar que cuando se trata de una sola unidad de proceso, se debe tener en cuenta lo siguiente:

-En cada unidad se debe contar las corrientes y especificaciones que estén entrando o saliendo directamente al equipo.

-Se contabiliza las ecuaciones de balance de masa para cada unidad.

Recordando que

DOF=0, el problema cuenta con la información necesaria y se puede resolver

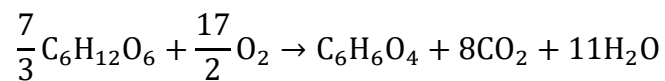
DOF>0, el problema se encuentra subespecificado.

DOF<0, el problema se encuentra sobreespecificado.

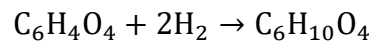
### Ejemplo 3.9 Análisis de Grados de Libertad para un Proceso de Multicomponentes

En una planta se requiere producir 15000 kg/h de ácido adípico, entra a un mezclador una corriente de aire (21% O<sub>2</sub> y 79% N<sub>2</sub>) y una solución de glucosa con agua (15mg/ml agua), observe el diagrama de bloques proporcionado y realice el análisis de grados de libertad.

Reacción 1:



Reacción 2:



Donde:

O: Oxígeno

N: Nitrógeno

G: Glucosa

W: Agua

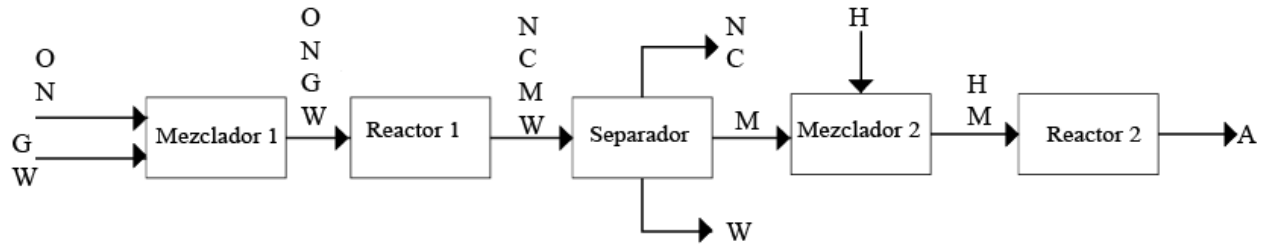
N: C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>O<sub>4</sub>

C: CO<sub>2</sub>

M: C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>O<sub>4</sub>

H: Hidrógeno

A: Ácido adípico



**FIGURA DEL EJEMPLO 3.9.1**

Diagrama de Bloques para la Producción de Ácido Adípico.

### Solución

Para mayor facilidad se realizará una tabla donde se coloquen las variables y ecuaciones independientes para realizar el análisis de grados de libertad.

### Tabla del ejercicio 3.9.1

Análisis de Grados de Libertad en el Proceso.

		Mezclador1	Reactor1	Separador	Mezclador2	Reactor2	Proceso
<b>Variables</b>							
<b>independientes</b>							
Variables de corriente		8	8	8	4	3	20
Reacciones químicas		0	1	0	0	1	2
<b>Ecuaciones</b>							
<b>independientes</b>							
Flujos		0	0	0	0	1	1
Especificación de corriente		2	0	0	0	0	2
Especificación de desempeño		0	0	0	0	0	0

Ecuaciones de balance de masa	4	6	4	2	3	19
Total	8-6	9-6	8-4	4-2	4-4	22-22
<b>DOF</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

---

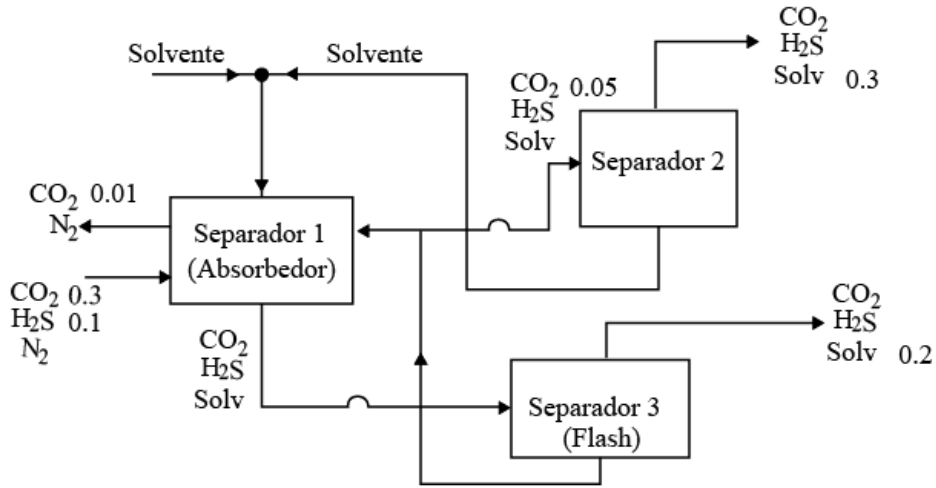
Es importante saber que la composición del aire no es una especificación independiente, la conversión total de la glucosa no es considerado como una especificación.

Según los resultados obtenidos por equipos se llega a la conclusión que solo el reactor 2 está completamente especificado y se podrá resolver. Los grados de libertad de todo el proceso dio como resultado  $DOF=0$  por lo tanto es recomendable realizar un diagrama de entrada-salida para poder realizar un balance de masa general de todo el proceso.

### **Ejemplo 3.10 Análisis de Grados de Libertad para un Proceso de Remoción de $CO_2$ Y $H_2S$**

Para la remoción del  $CO_2$  y  $H_2S$  se utiliza un sistema de absorbedor-separador, la alimentación al absorbedor es de 30% de  $CO_2$ , 10% de  $H_2S$  y  $N_2$ . Un solvente ingresa al absorbedor y también una mezcla que tiene 1% de  $CO_2$  y  $N_2$ , la corriente de salida contiene 25% de  $CO_2$  y 15% de  $H_2S$  de la alimentación inicial, la corriente ingresa a un separador flash, una corriente retorna al absorbedor y la otra alimenta al separador su composición es de 5% de  $CO_2$ . La salida del separado 2 contiene 30% de disolvente. Realice un análisis de grados de libertad para todos los equipos y un general.





**FIGURA DEL EJEMPLO 3.10.1**

Diagrama de Bloques para el Proceso de Remoción de CO<sub>2</sub> Y H<sub>2</sub>S

**Solución**

Para mayor facilidad se realizará una tabla donde se coloquen las variables y ecuaciones independientes para realizar el análisis de grados de libertad.

**Tabla del ejercicio 3.10.1**

Análisis de Grados de Libertad en el Proceso de Remoción de CO<sub>2</sub> Y H<sub>2</sub>S

		Mezclador	Separador1	Separador2	Separador3	Proceso
<b>Variables</b>						
<b>independientes</b>						
Variables	de	3	8	5	7	7
corriente						
Reacciones		0	0	0	0	0
químicas						
<b>Ecuaciones</b>						
<b>independientes</b>						
Flujos		0	0	0	0	0

Especificación de corriente	0	0	0	2	2
Especificación de desempeño	0	0	0	0	0
Ecuaciones de balance de masa	1	4	3	3	4
Total	3-1	8-4	5-3	7-5	7-6
<b>DOF</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>

---

Todo el problema está subespecificado, es decir que falta información acerca del proceso para poder resolverlo mediante un balance de materia.

## Ejercicios Propuestos

### Balance de Masa

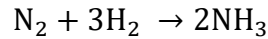
3.1 ¿La conversión total en un reactor es considerada como una especificación de rendimiento del sistema?

3.2 Observe el ejercicio 3.4 separe las variables y ecuaciones en una tabla y explique.

3.3 Realice la comprobación del balance de materia empleando los datos y el diagrama del ejercicio 3.3.

3.4 Realice la comprobación del balance de materia empleando los datos y el diagrama del ejercicio 3.4.

3.5 El amoníaco se produce por medio de una reacción química entre el hidrógeno y nitrógeno, donde el reactor es alimentado por 100 mol/h de nitrógeno y 3 mol de hidrógeno por cada 2 mol de nitrógeno, el porcentaje de conversión es del 90%. Calcule la cantidad de hidrogeno y nitrógeno sin reaccionar y la cantidad de amoniaco producido. (El sistema se encuentra en estado estacionario).



### **Análisis de Grados de Libertad**

3.6 Realice el análisis de grados de libertad para el ejercicio 3.3 y analice si el problema tiene solución.

3.7 Una columna de destilación es alimentada por 50 lb/s de A, los flujos de B y C son desconocidos, el flujo del destilado es de 100 lb/s que contiene 30 lb/s de A y 70 lb/s de B. El 50% de la alimentación de A termina en el fondo de la torre. Los flujos del destilado y de los fondos son iguales, realice un diagrama de flujo y el análisis de grados de libertad.

3.8 Una columna de destilación es alimentada por 70 lbmol/min de benceno y 20 lbmol/min de tolueno y 0.05 lbmol/min de xileno. Se obtiene benceno puro y en el fondo 100 lbmol/min de tolueno, realice el diagrama de flujo y el análisis de grados de libertad.

3.9 En una torre de destilación ingresa 2000 kg/h que consta de 60% metano y etano, el destilado tiene 80% de metano y el flujo de los fondos es de 800 kg/h, realice el diagrama de flujo y el análisis de grados de libertad.

### **Análisis de Grados de Libertad para Multicomponentes**

3.10 Revise el ejercicio 3.9 y realice un diagrama de entrada-salida para la resolución del ejercicio y también realice el análisis de grados de libertad. Compare las respuestas con las obtenidas en el ejercicio propuesto.

3.11 Para la eliminación de gases tóxicos como es el  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  se emplea un proceso de absorbedor-separador, se alimenta 40% de  $\text{CO}_2$ , 15% de  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{N}_2$ , por la parte superior del absorbedor sale 2% de  $\text{CO}_2$ , la corriente rica del disolvente sale del absorbedor, en la parte superior existe 25% de solvente, 15% de  $\text{CO}_2$  Y 20% de  $\text{H}_2\text{S}$ , el separador flash divide en proporciones iguales los flujos y estos

son devueltos al absorbedor, la corriente que alimenta al separador tiene la composición de 10% de CO<sub>2</sub>. Realice un diagrama de flujo y el respectivo análisis de grados de libertad para cada equipo involucrado en el proceso.

3.12 Se alimenta a un tanque de lavado 50% wt de TiO<sub>2</sub> y 20% wt de agua salada, el rutilo lavado sale con una composición de 40% wt, se seca en una unidad, se va a producir 5000 kg de un sólido seco que es la mezcla de TiO<sub>2</sub>/NaCl, mediante un balance de masa se puede determinar la cantidad de agua necesaria, realice un diagrama de flujo y el análisis de grados de libertad.

3.13 Se alimenta a una torre de destilación 50% de A y 40% B, el porcentaje del destilado es de 80% donde el 75% es del compuesto B, realice un diagrama de bloque y de flujo posteriormente un análisis de grados de libertad.

3.14 Escoja una operación unitaria realizada en la refinería tratado en el capítulo 2 y realice un diagrama de bloques con su respectivo análisis de grados de libertad.

### Referencias Bibliográficas

Ghasem, N., & Henda, R. (2015). *Principles of Chemical Engineering Processes MATERIAL AND ENERGY BALANCES SECOND EDITION*.

Himmelblau, D.M. (1974) *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*, 3rd edn., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Morris, A. E., Geiger, G., & Fine, A. (2011). Handbook on Material and Energy Balance Calculations. In *John Wiley & Sons* (Vol. 3th).

Murphy, R. M. (2007). Introducción a los procesos químicos: Principios, Análisis y Síntesis. In *McGraw-Hill Interamericana*.

Turton, R., Bailie Richard, Whiting, W., & Shaeiwitz, J. (2009). *Analysis, synthesis, and design of chemical processes* (Vol. 3).