Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

ESTUDIO SOBRE LAS OPERACIONES UNITARIAS MÁS UTILIZADAS EN LOS PROCESOS DE MANUFACTURA POR LAS INDUSTRIAS DE PROCESAMIENTO DE MATERIALES INSTALADAS EN GUATEMALA

Paula Karina Gaitan Ovalle
Asesorado por el M.Sc. Ing. Williams Alvarez Mejía

Guatemala, mayo de 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTUDIO SOBRE LAS OPERACIONES UNITARIAS MÁS UTILIZADAS EN LOS PROCESOS DE MANUFACTURA POR LAS INDUSTRIAS DE PROCESAMIENTO DE MATERIALES INSTALADAS EN GUATEMALA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR:

PAULA KARINA GAITAN OVALLE

ASESORADO POR EL M.SC.ING. WILLIAMS ALVAREZ MEJÍA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, MAYO DE 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jaime Domingo Carranza González
EXAMINADOR	Ing. José Eduardo Calderón García
EXAMINADORA	Inga. Hilda Piedad Palma de Martini
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ESTUDIO SOBRE LAS OPERACIONES UNITARIAS MÁS UTILIZADAS EN LOS PROCESOS DE MANUFACTURA POR LAS INDUSTRIAS DE PROCESAMIENTO DE MATERIALES INSTALADAS EN GUATEMALA,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha de enero de 2006.

Paula Kanné Gaitan Ovalle

Ref. WGM. TE. ASE. 00011.2008-01-10
Guatemala, 10 de enero del 2008

Señor
Director
Escuela Ingeniería Química
Presente.

Estimado Director:

Atentamente me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que he revisado el informe final de graduación de la estudiante PAULA KARINA GAITAN OVALLE, carné No. 2001-12750, titulado: **"ESTUDIO SOBRE LAS OPERACIONES UNITARIAS MÁS UTILIZADAS EN LOS PROCESOS DE MANUFACTURA POR LAS INDUSTRIAS DE PROCESAMIENTO DE MATERIALES INSTALADAS EN GUATEMALA",** el cual he asesorado y le informo que ésta reúne los requisitos de rigor, coherencia y calidad requeridos para los trabajos de ésta naturaleza, por lo cual lo he aprobado.

Agradeciendo la atención a la presente, le saluda respetuosamente,

Ing. Williams G. Alvarez Mejía, M.Sc.;
Profesor Titular X
Área de Operaciones Unitarias

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 17 de abril del 2008
Ref. EIQ. 111.2008

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG-001-08-B-IF le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del informe final del trabajo de graduación, para optar al título de INGENIERO QUÍMICO a la estudiante universitaria **PAULA KARINA GAITAN OVALLE**, identificada con carné No. **2001-12750**, titulado: **ESTUDIO SOBRE LAS OPERACIONES UNITARIAS MÁS UTILIZADAS EN LOS PROCESOS DE MANUFACTURA POR LAS INDUSTRIAS DE PROCESAMIENTO DE MATERIALES INSTALADAS EN GUATEMALA** , el cual ha sido asesorado por el Ingeniero Químico, Williams Guillermo Álvarez Mejía, como consta en el Acta.

Habiendo encontrado el referido informe final **satisfactorio**, se procede a recomendarle autorice a la estudiante **Gaitan Ovalle** proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Inga. Teresa Lisely de León Arana, M.Sc.
COORDINADORA
Tribunal que revisó el informe final
Del trabajo de graduación

ESCUELA DE
INGENIERIA QUIMICA

C.c.: archivo

El Director de la Escuela de Ingeniería Química Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía M. Sc. Después de conocer el dictamen del Asesor con el Visto Bueno del Jefe del Departamento al trabajo de Graduación de la estudiante **Paula Karina Gaitan Ovalle** titulado: **"ESTUDIO SOBRE LAS OPERACIONES UNITARIAS MÁS UTILIZADAS EN LOS PROCESOS DE MANUFACTURA POR LAS INDUSTRIAS DE PROCESAMIENTO DE MATERIALES INSTALADAS EN GUATEMALA"**, procede a la autorización del mismo.

Ing. Williams Guillermo Alvarez Mejía
DIRECTOR ESCUELA INGENIERÍA QUÍMICA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECTOR
ESCUELA
INGENIERÍA QUÍMICA
U. S. A. C.

Guatemala, mayo de 2,008.

Universidad de San Carlos
de Guatemala

Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG. 158.2008

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO SOBRE LAS OPERACIONES UNITARIAS MÁS UTILIZADAS EN LOS PROCESOS DE MANUFACTURA POR LAS INDUSTRIAS DE PROCESAMIENTO DE MATERIALES INSTALADAS EN GUATEMALA,** presentado por la estudiante universitaria **Paula Karina Gaitan Ovalle,** procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANO
FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, mayo de 2008

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Dios, por darme sabiduría e inteligencia para alcanzar este triunfo, por estar en cada momento de mi vida protegiendo, proveyéndome y llenarme de fuerzas cada día, sin ti en mi vida no sería nada, eres el centro de mi vida, te amo Dios.

Mi madre, Sonia Ovalle, este triunfo es tuyo, juntas podemos decir hasta aquí nos ayudo Jehová, sin ti no hubiera podido ser la mujer que soy hoy, eres mi ejemplo de inspiración a seguir, gracias mami, por todos tus cuidados, tus sabios consejos tu entrega total y sobre todo por tu sacrificio incondicional para que yo llegara a esta meta, Dios te bendiga te amo ma…

Mi padre, Julio Gaitan, gracias por todo tu apoyo y por todo el amor que me has dado durante toda mi vida, por tus consejos y palabras de aliento para que yo alcanzara otra meta más; te estaré agradecida toda mi vida, te quiero pa…

AGRADECIMIENTOS A:

Dios, por ser la roca firme en mi vida.

Mi padre: Julio Gaitan, por su amor y apoyo durante toda mi vida.

Mi madre: Sonia Ovalle, por estar a mi lado todo este tiempo dándome palabras de aliento, por retarme a ser cada día mejor y por tu entrega y amor en el transcurso de mi vida.

Mis hermanos: Mortimer y Job Gaitan, por ser pilares importantes en mi formación y por su apoyo incondicional durante toda mi vida, los quiero mucho.

Mi familia en general: por sus sabios consejos y ayuda los aprecio.

Mi asesor: Ing. Qco. Williams Alvarez Mejía, por su apoyo durante la realización de este trabajo.

Mi catedrático: Ing. Qco. Otto Raúl de León de Paz, por sus enseñanzas y consejos durante mi carrera.

Mi revisora: Inga. Qco. Liseliy De León Arana, por su ayuda en la elaboración del presente trabajo.

A mis amigos: gracias por creer con migo que soñar es posible.

Y a todas las personas que colaboraron con migo para que este trabajo se realizara.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES…..……..…… XV
LISTA DE SÍMBOLOS …….. XXV
GLOSARIO……..……... XXVII
RESUMEN…….. XXIX
OBJETIVOS…… XXXI
INTRODUCCIÓN…….. XXXIII

1. MARCO TEÓRICO: LAS OPERACIONES UNITARIAS……..…… 1
1.1. Operaciones unitarias físicas controladas por la transferencia de cantidad de movimiento…… 3
1.1.1 Operaciones en las que el fluido circula contenido por un sólido (circulación interna de fluidos por conducciones)…… 4
1.1.1.1 Conducciones…….. 4
1.1.1.1.1 Tubos y tuberías…….. 4
1.1.1.1.1.1 Tubos y tuberías metálicas…..... 5
1.1.1.1.1.2 Tubos y tuberías no metálicas... 5
1.1.1.1.2 Accesorios……. 8
1.1.1.2 Dispositivos que suministran energía mecánica al fluido……..……..... 9
1.1.1.2.1 Bombas……..……..……. 9
1.1.1.2.1.1 Bombas centrífugas……..... 9

1.1.1.2.1.2 Bombas de propulsor y de turbina…… 9
1.1.1.2.1.3 Bombas de desplazamiento positivo…….. 10
1.1.1.2.1.4 Bombas de chorro……... 10
1.1.1.2.1.5 Bombas electromagnéticas…… 11
1.1.1.2.2. Compresores, sopladores, ventiladores y eyectores…….. 14
1.1.1.3 Válvulas…….. 17
1.1.1.3.1 Válvulas de compuerta…… 17
1.1.1.3.2 Válvulas de globo…… 18
1.1.1.3.3 Válvulas angulares……... 18
1.1.1.3.4 Válvulas de diafragma…… 18
1.1.1.3.5 Llaves de macho o tapón…..…. 18
1.1.1.3.6 Válvula de bola…… 19
1.1.1.3.7 Válvulas de mariposa…….. 19
1.1.1.3.8 Válvulas de retención de columpio…….…… 19
1.1.1.3.9 Válvulas de retención de elevación…….…… 20
1.1.1.3.10 Válvulas de disco inclinado……. 20
1.1.1.4 Medidores de caudal……... 23
1.1.1.4.1 Medidores de perforación total.. 23
1.1.1.4.1.1 Medidor Venturi..…… 23
1.1.1.4.1.2 Medidor de orificio……... 24
1.1.1.4.1.3 Medidor de elemento V……..... 24
1.1.1.4.1.4 Medidor de objetivo…… 25
1.1.1.4.1.5 Medidor de desbordamiento de vórtice…. …….. 25

1.1.1.4.1.6 Medidores de turbina…….. 25
1.1.1.4.1.7 Medidores de desplazamiento positivo……. 26
1.1.1.4.1.8 Medidores magnéticos…… 26
1.1.1.4.1.9 Medidor de Coriolis…… 26
1.1.1.4.1.10 Boquillas para flujo…….. 27
1.1.1.4.2 Medidores de inserción……... 29
1.1.1.4.2.1 Tubo pitot…...…… 29
1.1.1.4.2.2 Térmico…… 30
1.1.1.4.3 Medidores de área…….. 31
1.1.1.4.3.1 Rotámetros…….. 31
1.1.1.4.4 Vertederos…… 32
1.1.2 Operaciones en las que el fluido circula a través de un lecho de sólido, llamados comúnmente de circulación externa de fluidos……... 33
1.1.2.1 Fluidización y transporte neumático…….. 33
1.1.2.2 Filtración…… 37
1.1.2.2.1 Filtros clarificadores o de lecho profundo…… 41
1.1.2.2.2 Filtros de torta……... 41
1.1.2.2.2.1 Filtro prensa…… 41
1.1.2.2.2.2 Filtro de hojas…….. 42
1.1.2.2.2.3 Filtro rotativos a vacío……... 43
1.1.2.2.2.4 Filtro de banda…… 44
1.1.2.2.2.5 Filtro Nutscha…….. 44
1.1.2.2.3 Filtros centrífugos…… 45
1.1.3 Operaciones en las que las partículas de un sólido se mueven en el seno de un fluido……... 50
1.1.3.1 Sedimentación……..… 51

1.1.3.1.1 Sedimentación de partículas discretas…… 51
1.1.3.1.2 Sedimentación floculenta…… 51
1.1.3.1.3 Sedimentación retardada, también llamada zonal…… 51
1.1.3.1.4 Sedimentación por compresión. 51
1.1.3.2 Clasificación Hidráulica…… 52
1.1.3.3 Flotación…… 55
1.1.3.4 Centrifugación…….. 58
1.1.3.4.1 Centrífugas de sedimentación… 58
1.1.3.4.1.1 Centrífugas de tazón tubular…. 58
1.1.3.4.1.2 Centrífugas de cámaras múltiples…… 59
1.1.3.4.1.3 Centrífugas de disco……..…… 59
1.1.3.4.1.4 Centrífugas decantadoras continuas (con transportador helicoidal)……..… 60
1.1.3.4.2 Centrífugas de filtración…….. 60
1.1.3.4.2.1 Centrífugas de cesta……..…… 60
1.1.3.4.2.2 Centrífuga de tornillo helicoidal. 61
1.1.3.4.2.3 Centrífugas de rascadora o "*peeler*"…….. 61
1.1.3.4.2.4 Centrífugas de empuje……... 61
1.1.3.5 Agitación y mezcla de líquidos……. 63
1.1.3.5.1 Agitadores (impulsores)…….. 64
1.1.3.5.1.1 Hélices (propulsor)…..…… 64
1.1.3.5.1.2 Turbinas…… 64
1.1.3.5.1.3 Impulsores de alta eficiencia…. 65
1.1.3.5.2 Mezclado…… 65

1.1.3.5.2.1 Mezcla en tanques de proceso. 66
1.1.3.5.2.2 Mezcla estratificada en tanques de almacenamiento……. 66
1.1.3.5.2.3 Mezcladores de chorro…….. 67
1.1.3.5.2.4 Mezcladores estáticos……..….. 67
1.2 Operaciones Unitarias físicas controladas por la transferencia de energía……... 68
1.2.1 Aislamiento térmico…… 69
1.2.1.1 Materiales de aislamiento……... 69
1.2.2 Calentamiento o refrigeración de fluidos como un intercambio de calor sin cambio de fase……. 70
1.2.2.1 Intercambiadores de calor de doble tubo o tubos concéntricos……. 70
1.2.2.2 Intercambiadores de calor de carcasa (concha) y tubos……. 71
1.2.2.2.1 Intercambiador de calor de espejo fijo…….. 71
1.2.2.2.2 Intercambiador de calor de tubo en U……. 72
1.2.2.2.3 Intercambiadores de cabezal flotante con empaque exterior… 72
1.2.2.2.4 Intercambiadores de cabezal flotante interno…….. 72
1.2.2.2.5 Intercambiadores de cabezal flotante removible……. 73
1.2.2.2.6 Intercambiadores de tubería doble y secciones multitubulares……... 73
1.2.2.3 Intercambiadores de calor de placas……. 73

1.2.2.3.1 Intercambiadores de placa en espiral…… 74
1.2.2.3.2 Intercambiadores de placa y armazón……..…… 74
1.2.2.3.3 Intercambiadores de calor de aleta y placa con soldadura fuerte…….. 74
1.2.2.4 Intercambiadores de calor de grafito……. 75
1.2.2.5 Intercambiadores tubulares tipo bayoneta… 75
1.2.2.6 Intercambiadores de tubo espiral……... 75
1.2.2.7 Intercambiadores de tubo espiral para servicio criogénico……. 76
1.2.2.8 Intercambiadores de película descendente. 76
1.2.2.9 Intercambiadores de calor de superficie escariada (raspada)…….. 77
1.2.2.10 Intercambiadores de calor enfriados por aire (Aerorrefrigerantes)……..... 77
1.2.2.11 Hornos……. 80
1.2.2.11.1 Hornos por lotes……..... 80
1.2.2.11.1.1 Hornos de tiro por convección forzada …….. 80
1.2.2.11.1.2 Hornos de hogar rotatorio..... 81
1.2.2.11.1.3 Hornos de tipo mufla……. 81
1.2.2.11.1.4 Hornos de cuba……. 81
1.2.2.11.2 Hornos continuos……. 82
1.2.2.11.3 Hornos rotatorios de calor directo……. 83
1.2.2.11.4 Hornos de hogar……..... 83
1.2.2.11.5 Hornos de hogares múltiples….. 84

1.2.2.11.6 Hornos de cubilote……..... 84
1.2.2.12 Calderas…….…. 86
1.2.2.12.1 Calderas pirotubulares…….. 88
1.2.2.12.2 Calderas acuotubulares…….. 88
1.2.3 Evaporación, condensación, sublimación y solidificación, como un intercambio de calor con cambio de fase……..... 89
1.2.3.1 Evaporadores……. 89
1.2.3.1.1 Evaporadores de circulación forzada……..... 90
1.2.3.1.2 Evaporadores verticales de tubo corto……..... 91
1.2.3.1.3 Evaporadores verticales de tubo largo……..... 91
1.2.3.1.4 Evaporadores de tubo horizontal……..... 91
1.2.3.1.5 Evaporadores agitados de película delgada…… 92
1.2.3.1.6 Evaporadores sin superficies de calentamiento…… 93
1.2.3.2 Condensadores…… 95
1.2.3.2.1 Condensadores de superficie… 95
1.2.3.2.2 Condensadores de contacto directo…… 96
1.3 Operaciones Unitarias físicas controladas por la transferencia de materia…… 98
1.3.1 Por medio de la existencia de una interfase…… 99
1.3.1.1 Contacto interfacial gas- líquido…… 99
1.3.1.1.1 Destilación…… 105

1.3.1.1.1.1 Destilación flash o instantánea. 106
1.3.1.1.1.2 Destilación continua con rectificación…….. 106
1.3.1.1.1.3 Destilación discontinua……. 107
1.3.1.1.1.4 Destilación de multicomponentes……. 107
1.3.1.1.1.5 Destilación azeotrópica y extractiva……. 108
1.3.1.1.2 Absorción…….. 108
1.3.1.1.3 Desabsorción……. 109
1.3.1.2 Contacto interfacial liquido-líquido……. 109
1.3.1.2.1 Extracción líquido-líquido……. 109
1.3.1.3 Contacto interfacial líquido-sólido…….. 110
1.3.1.3.1 Adsorción…….. 110
1.3.1.3.1.1 Unidades por lotes……. 112
1.3.1.3.1.2 Lechos fijos……. 113
1.3.1.3.1.3 Operaciones continuas y casi continuas…….. 113
1.3.1.3.2 Desadsorción……. 113
1.3.1.3.3 Lixiviación…….. 114
1.3.1.3.3.1 Lixiviación por percolación……. 114
1.3.1.3.3.2 Lixiviación de sólidos dispersos 115
1.3.1.3.4 Intercambio iónico……. 116
1.3.1.3.4.1 Columnas típicas de intercambio de iones…..……. 117
1.3.1.4 Contacto interfacial gas-sólido……. 118
1.3.1.4.1 Adsorción…….. 118
1.3.1.4.2 Desadsorción……. 119
1.3.2 Por medio de la existencia de una membrana……. 119

1.3.2.1 Diálisis…… 120
1.3.2.2 Ósmosis inversa…… 121
1.3.2.3 Ultrafiltración…….. 123
1.4 Operaciones Unitarias físicas controladas por la transferencia simultánea de materia y energía…… 124
1.4.1 Contacto interfacial gas-líquido…… 125
1.4.1.1 Acondicionamiento de aire…….. 125
1.4.1.1.1 Humidificación de aire…… 125
1.4.1.1.2 Deshumidificación del aire…….. 125
1.4.1.1.3 Enfriamiento de agua…….. 126
1.4.1.1.3.1 Torres de tiro mecánico……... 126
1.4.1.1.3.2 Torres de tiro natural…….. 127
1.4.1.1.3.3 Tanques de rocío…….. 127
1.4.2 Contacto interfacial líquido-sólido…… 129
1.4.2.1 Cristalización…….. 129
1.4.2.1.1 Cristalización a partir de la fusión…….. 129
1.4.2.1.1.1 Cristalización en columna…..... 130
1.4.2.1.2 Cristalización a partir de solución…….. 130
1.4.2.1.2.1 Cristalizadores de suspensión mezclada y de retiro de productos combinados…… 131
1.4.3 Contacto interfacial gas-sólido…… 132
1.4.3.1 Secado…… 132
1.4.3.1.1 Secadores para sólidos y pastas…… 133
1.4.3.1.1.1 Secadores de platos perforados…… 134

1.4.3.1.1.2 Secadores de tamices transportadores..…….. 134
1.4.3.1.1.3 Torres de secado..... 135
1.4.3.1.1.4 Secadores rotatorios……... 135
1.4.3.1.1.5 Secadores de tornillo transportador…….. …….. 136
1.4.3.1.1.6 Secadores de lecho fluidizado……. 136
1.4.3.1.1.7 Secadores flash……. 146
1.4.3.1.2 Secadores para soluciones y suspensiones……. 137
1.4.3.1.2.1 Secadores de pulverización…... 137
1.4.3.1.2.2 Secadores de película delgada. 138
1.4.3.1.2.3 Secadores de tambor…… 138
1.4.3.2 Liofilización……. 141
1.5 Operaciones Unitarias físicas complementarias……. 141
1.5.1 Trituración y molienda……... 142
1.5.1.1 Trituradores de mandíbulas……. 143
1.5.1.2 Trituradores giratorias…….. 143
1.5.1.3 Trituradoras de rodillo..... 144
1.5.1.4 Molinos de martillos e impactos…….. 144
1.5.1.5 Molinos de rodillo…….. 145
1.5.1.6 Molinos de atrición (desgaste)……. 145
1.5.1.7 Molinos de volteo…….. 146
1.5.1.8 Molinos con clasificación de martillos…… 146
1.5.1.9 Molinos agitados……. 147
1.5.1.10 Molinos de coloides…….. 147
1.5.2 Tamizado……. 151
1.5.2.1 Cribas de rejillas……. 151

1.5.2.1.1 Rejilla estacionaria……. 152
1.5.2.1.2 Rejilla planas……. 152
1.5.2.1.3 Rejillas vibratorias……. 152
1.5.2.2 Cribas giratorias ……... 152
1.5.2.3 Cribas con agitación mecánica……. 153
1.5.2.4 Tamices vibratorios……... 153
1.5.2.5 Tamices oscilantes o de movimiento alternativo……... 154
1.5.3 Mezclado de sólidos y pastas…….. 154
1.5.3.1 Mezcladores convectivos o estacionarios…. 155
1.5.3.1.1 Mezclador de banda (cinta)…… 155
1.5.3.1.2 Mezclador de tornillo vertical (gusano vertical)……... 155
1.5.3.1.3 Mezclador de rotores gemelos (tornillo sin fin)…….. 156
1.5.3.1.4 Mezclador de rotores simples (tornillo sin fin)…….. 156
1.5.3.2 Mezcladores difusivo o volteadores……... 157
1.5.3.2.1 Tambor con paletas deflectoras (tambor horizontal)……... 157
1.5.3.2.2 Mezclador de doble cono…… 157
1.5.3.2.3 Mezclador en “V” (de pantalón). 158
1.5.3.3 Mezcladores de pastas y materiales viscosos……. 159
1.5.3.3.1 Mezclador de tanques cambiables……. 159
1.5.3.3.2 Mezclador de tanques estacionario……... 160
1.5.3.3.2.1 Mezcladores de compuerta…... 160

1.5.3.3.2.2 Mezcladores de aspas helicoidales……. 160
1.5.3.3.3 Extrusores de tornillo simple(Mezcladoras continuas). 161
1.5.3.3.4 Mezcladoras continuas de tornillos gemelos……. 161
1.5.4 Almacenaje de materiales……... 164
1.5.4.1 Almacenaje de sólidos……. 164
1.5.4.1.1 Almacenaje al aire libre……... 164
1.5.4.1.2 Bajo techo y protegido……. 165
1.5.4.1.3 Silos y Tolvas……. 165
1.5.4.1.4 Almacenaje en forma segmental ……. 166
1.5.4.2 Almacenaje de líquidos……. 168
1.5.4.2.1 Tanques atmosféricos ……. 168
1.5.4.2.1.1 Tanques elevados……. 169
1.5.4.2.1.2 Tanques abiertos……... 169
1.5.4.2.2 Tanques a presión……. 169
1.5.4.2.3 Estanques y almacenamiento subterráneo……... 170
1.5.4.3 Almacenaje de gases……... 171
1.5.5 Transporte de materiales……... 171
1.5.5.1 Transportadores de cinta o banda……. 171
1.5.5.2 Elevador de cangilones……... 172
1.5.5.3 Tornillo sin fin o gusano (Auger)……. 172
1.5.5.4 Transportador de cadena……. 173
1.5.5.5 Transporte vibratorio……. 173
1.5.5.6 Transporte con lecho fluidizado…….. 173
1.6 Operaciones Unitarias químicas……. 177

1.6.1 Reactores químicos…….. 177
1.6.1.1 Reactores de tanque agitados……. 178
1.6.1.1.1 Reactores biológicos…….. 179
1.6.1.2 Reactores tubulares……. 179
1.6.1.2.1 Reactores tubulares calentados a fuego directo…… 180
1.6.1.2.2 Reactores tubulares de carcasa y tubos……. 180
1.6.1.2.3 Reactores tubulares de lecho: (fijo, móvil, fluilizado)……. 180
1.6.1.2.4 Reactores tubulares de hornos rotatorios……. 181
1.6.1.2.5 Reactores electroquímicos……. 181
2. METODOLOGÍA……. 193
2.1. Unidad de análisis……. 193
2.2. Recursos materiales……. 193
2.3. Recursos humanos…….. 194
2.4. Metodología de la encuesta……. 194
3. RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN…….. 199

CONCLUSIONES…….. 251
RECOMENDACIONES……. 255
BIBLIOGRAFÍA……..... 257
APÉNDICE ……. 259
ANEXOS…….. 265

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Tubos metálicos doblados……... 6
2. Tubos metálicos……..... 7
3. Tuberías metálicas……. 7
4. Tubos no metálicos de vidrio……. 7
5. Accesorios Bridados……... 8
6. Bomba Vertical……... 11
7. Bomba de acoplamiento cerrado……. 12
8. Bomba de turbina……. 12
9. Bomba medidora de émbolo……. 13
10. Bomba de diafragma de acción mecánica…….. 13
11. Compresor centrífugo de cinco etapas……. 15
12. Compresor rotatorio de tipo del tipo de pistón de líquido……... 16
13. Eyector típico de chorro de vapor……. 16
14. Eyector elevador de toberas múltiples……... 17
15. Válvula de compuerta……. 20
16. Válvula de bola……. 21
17. Válvula esférica o de globo …….. 21
18. Válvula de diafragma……. 21
19. Válvula de mariposa……... 22
20. Válvula de retención, esférica……... 22
21. Medidor Venturi…….. 27
22. Medidor de flujo de orificio……. 28

23. Medidor de turbina…….. 38
24. Tubo pitot estático…….. 30
25. Rotámetro……... 31
26. Tipos de vertederos: Rectangular y triangular……... 33
27. Sistema de fluidización…….. 37
28. Tipos de mallas para el medio filtrante…….. 38
29. Filtración por torta …… 39
30. Filtración en lecho profundo…… 39
31. Filtro prensa de placas circulares metálicas…….. 46
32. Filtro de hojas a presión, de tanque horizontal…… 46
33. Filtro de hojas verticales…… 47
34. Filtro de disco rotativo…… 47
35. Filtro de banda horizontal…….. 48
36. Diagrama de filtros con torta…… 48
37. Diagrama de filtros de presión…… 49
38. Diagrama de filtros de vacío…… 49
39. Sedimentador convencional de forma rectangular y flujo horizontal 52
40. Clasificador hidráulico Jet Sizer……... 53
41. Clasificador hidráulico Supersorter…….. 54
42. Clasificador hidráulico Siphon Sizer D-O…… 54
43. Tanque de Flotación…….. 56
44. Máquina de Flotación Fagezgren…… 57
45. Tanque de flotación Agitair……... 57
46. Centrífuga de disco hermético con alimentación y descarga…… 62
47. Centrífuga cilíndrica y cónica de transporte helicoidal …… 62
48. Filtro centrífugo de fondo sólido y cojinete en bancada…….. 63
49. Agitadores para líquido de viscosidad moderada…… 67
50. Agitadores para líquidos de alta velocidad: a) agitador de cinta de doble trayectoria helicoidal, b) agitador de ancla…….. 68

51. Intercambiador de calor de carcasa (concha) y tubo…….. 78
52. Intercambiadores de calor de doble tubo …….. 78
53. Intercambiador de calor enfriado por aire, de tiro forzado……... 79
54. Intercambiador de placas y armazón…….. 79
55. Horno de cubo……. 84
56. Horno de hogar rotatorio……... 85
57. Hornos rotatorios……. 85
58. Calderas Pirotubulares y acuotubulares……. 89
59. Tipos de evaporadores…….. 94
60. Condensadores barométricos…….. 98
61. Columna de platos……. 103
62. Columna empacada …….. 103
63. Columna de rocío……... 104
64. Torres de destilación…….. 104
65. Torres de absorción……... 105
66. Extractor Bollman……... 115
67. Extractor Rotocel……. 116
68. Columnas de intercambio iónico…….. 118
69. Equipo de ósmosis inversa……... 122
70. Equipo de ultrafiltración tipo hoja paralela……. 124
71. Arreglo de trayectoria en una torre de enfriamiento……. 128
72. Torre de enfriamiento……. 128
73. Cristalizador cónico-esférico……. 131
74. Cristalizador de circulación forzada……. 132
75. Secador rotatorio……. 139
76. Secador de platos perforados…….. 139
77. Secador continuo de lecho fluidizado……. 140
78. Secador de doble tambor…….. 140
79. Triturador de quijada……. 148

80. Triturador giratorio primario …… 148
81. Trituradora de martillos…… 149
82. Trituradora de impacto…… 149
83. Desintegradora de doble jaula…… 150
84. Molino de bolas continuo…….. 150
85. Tipos de máquina mezcladoras de sólidos…… 158
86. Mezcladora de pastas y materiales viscosos de listón helicoidal….. 162
87. Mezcladora intensivas de pastas y materiales viscosos *Banbury…* 163
88. Mezcladora de pastas y materiales viscosos amasadora de brazo doble…… 163
89. Disposiciones de descarga de transportadores de bandeja…… 167
90. Tolva de flujo de masa……... 167
91. Tolva de flujo de embudo…….. 168
92. Tanques de almacenamiento de líquidos de tipo atmosférico…….. 170
93. Transportadores de cinta o banda……... 174
94. Elevadoradores de cangilones…… 175
95. Tornillo como elevador…….. 175
96. Tipos de sistemas de transporte de aire…… 176
97. Reactores de tanque agitado…… 182
98. Reactores tubulares…… 183
99 Diagrama del proceso de elaboración de Azúcar (Ingenio Azucarero 1)…… 186
100. Diagrama del proceso de elaboración de Azúcar (Ingenio Azucarero 2)…… 192
101. Rango de edades…….. 200
102. Grado académico profesional ……... 201
103. Tipo de industria en la cual trabajan actualmente…… 202
104. Puesto que ocupan actualmente el entrevistado en la industria en la cual trabajan …….. 205

105. Áreas en las cuales han laborado las personas encuestadas durante su carrera profesional …… 206
106. En las áreas de trabajo en las cuales ha laborado ha tenido contacto directo con las Operaciones Unitarias …….. 208
107. Equipos con los cuales ha tenido contacto en el manejo de fluidos (a. conducciones)……..…… 209
108. Equipos con los cuales ha tenido contacto en el manejo de fluidos (b. bombas)..…… 210
109. Equipos con los cuales ha tenido contacto en el manejo de fluidos (c. compresores, d. sopladores, e. ventiladores y f. eyectores) …… 211
110. Equipos con los cuales ha tenido contacto en el manejo de fluidos (g. válvulas)…….. 212
111. Equipos con los cuales ha tenido contacto en el manejo de fluidos (h. medidores de caudal)……..…….. 213
112. Equipos con los cuales ha tenido contacto en el manejo de fluidos (i. equipos de fluidización y transporte neumático) 214
113. Equipos con los cuales ha tenido contacto en el manejo de fluidos (j. filtros)……..... 215
114. Equipos con los cuales ha tenido contacto en el manejo de fluidos (k. sedimentadores)……..... 216
115. Equipos con los cuales ha tenido contacto en el manejo de fluidos (l. clarificadores hidráulicos, m. equipos de flotación)..... 217
116. Equipos con los cuales ha tenido contacto en el manejo de fluidos (n. centrífugas)……..... 218
117. Equipos con los cuales ha tenido contacto en el manejo de fluidos (o. agitadores y mezcladores de líquidos)……..... 219
118. Equipos más utilizados en el manejo de fluidos..... 220
119. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de transferencia de calor (a. aislantes térmicos)…..... 223

120.	Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de transferencia de calor (b. intercambiadores de calor)….....	224
121.	Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de transferencia de calor (c. hornos)…….....	225
122.	Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de transferencia de calor (d. calderas)…….....	226
123.	Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de transferencia de calor (e. evaporadores, f. condensadores).....	227
124.	Equipos más utilizados en el manejo de transferencia de calor….....	228
125.	Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de transferencia de materia (a. torres de destilación binaria (g-l), b. torres de destilación multicomponentes (g-l) y c. torres de absorción (g-l)…….....	230
126.	Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de transferencia de materia (d. torres de extracción, e. torres de adsorción (l-s) y f. torres de lixiviación)…….....	231
127.	Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de transferencia de materia (g. intercambiadores iónicos, h. torres de adsorción (g-s) y i. equipos de diálisis……..….....	232
128.	Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de transferencia de materia (j. equipos de ósmosis inversa y k. equipos de ultrafiltración)…….....	233
129.	Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de transferencia simultanea de materia y energía (a. torres de humidificación de aire, b. torres de deshumidificación de aire, c. torres de enfriamiento de agua, y d. cristlizadores)….....	234
130.	Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de transferencia simultanea de materia y energía (e. secadores).....	235

131. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de transferencia simultanea de materia y energía (f. liofilizadores)..... 236
132. Equipos más utilizados en el manejo de transferencia simultanea de materia y energía…….. 237
133. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de materiales (a. trituradores y molinos)……..... 240
134. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de materiales (b. tamizadores)……..... 241
135. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de materiales (c. mezcladores de sólidos y pastas) …….. 242
136. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de materiales (d. almacenaje de materiales)……..... 243
137. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de materiales (e. transporte de materiales……..... 244
138. Equipos más utilizados en el manejo de materiales..... 245
139. Reactores con los cuales han tenido contacto en el manejo de procesos químicos (a. tanque agitado, b. tubulares calentados a fuego directo, c. tubulares de carcasa y tubos)…… 247
140. Reactores con los cuales han tenido contacto en el manejo de procesos químicos (d. tubulares de lecho (fijo, móvil, fluidizado). e. de hornos rotatorios, f. biológicos, g. electroquímicos) …..... 248

TABLAS

I.	Número de personas encuestadas en las industrias clasificadas por establecimientos según la cantidad de personal ocupado para el año 2000 Código Industrial Internacional Uniforme –CIIU versión 2 que cuentan con más de 100 empleados……..……...	195
II.	Puesto que ocupa actualmente el entrevistado en la industria en la cual trabaja …….....	203
III.	Equipos más utilizados en el manejo de fluidos por las industrias de procesamiento de materiales instaladas en Guatemala y cursos de la carrera de Ingeniería Química de la USAC en los cuales son estudiados dichos equipos ……. ……...	221
IV.	Equipos más utilizados en el manejo de transferencia de calor por las industrias de procesamiento de materiales instaladas en Guatemala y cursos de la carrera de Ingeniería Química de la USAC, en los cuales son estudiados dichos equipos …..……	229
V.	Equipos más utilizados en el manejo de transferencia simultanea de materia y energía por las industrias de procesamiento de materiales instaladas en Guatemala y cursos de la carrera de Ingeniería Química de la USAC, en los cuales son estudiados dichos equipos …….....	238

VI. Equipos más utilizados en el manejo de materiales por las industrias de procesamiento de materiales instaladas en Guatemala y cursos de la carrera de Ingeniería Química de la USAC, en los cuales son estudiados dichos equipos ……. 246

LISTA DE SÍMBOLOS

kw	Kilovatios
cms	Centímetros
m	Metros
mm	Milímetros
°C	Grados Celsius
°K	Grados Kelvin
°F	Grados Farenheit
Kg	Kilogramo
Kg/h	Kilogramo por hora
tons/h	Toneladas por hora
L	Litro
gal	Galones
Hz	Herz
µm	Micrometro
rpm	Revoluciones por minuto
m^3/h	Metro cúbico por hora
CIIU	Código industrial internacional uniforme
MPa	Mega pascal
lbf/in^2	Libra fuerza por pie cuadrado
Pa•s	Pascal por segundo
kPa	Kilopascal
ft^2	Pie cuadrado
I.Q.-1	Balance de Masa y Energía (Ingeniería Química 1)
I.Q.-2	Flujo de fluidos (Ingeniería Química 2)
I.Q.-3	Transferencia de Calor (Ingeniería Química 3)

I.Q.-4	Transferencia de masa en etapas de equilibrio (Ingeniería Química 4)
I.Q.-5	Transferencia de masa en etapas de contacto continuo (Ingeniería Química 5)
USAC	Universidad de San Carlos de Guatemala
I.Q.-6	Operaciones Unitarias Complementarias (Ingeniería Química 6)
INE	Instituto Nacional de Estadística.

GLOSARIO

Azeótropo	Es una mezcla líquida de dos o más componentes que posee un único punto de ebullición constante y fijo, y que al pasar al estado vapor se comporta como un líquido puro, o sea como si fuese un solo componente.
Bagazo	Remanente de la caña de azúcar luego de la extracción del jugo de la misma.
Conducción	Es la transferencia de calor a través de un objeto sólido.
Convección	Es la transfiere calor por el intercambio de moléculas frías y calientes.
Decantación	Procedimiento para eliminar partículas no deseadas, ya sea por sedimentación o flotación.
Entalpía	La entalpía es una magnitud de termodinámica simbolizada con la letra H, la variación de entalpía expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, o, lo que es lo mismo, la cantidad de energía que tal sistema puede intercambiar con su entorno.

Punto de ebullición	El punto de ebullición de un compuesto químico es la temperatura que debe alcanzar este para pasar del estado líquido al estado gaseoso.
Punto de fusión	Es la temperatura a la cual el estado sólido y el estado líquido de una sustancia, coexisten en equilibrio térmico, a una presión de 1 atmósfera.
Radiación	Es la transferencia de calor por radiación electromagnética (generalmente infrarroja).
Sulfitación	Procedimiento auxiliar de la defecación utilizando ácido sulfúrico.
Transferencia de calor	Se le define como el proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura.

RESUMEN

Se indagó en la literatura internacional, principalmente Europea, la clasificación de las Operaciones Unitarias con base a las leyes de la naturaleza (conservación de materia, energía y cantidad de movimiento) ampliamente conocidas como fenómenos de transporte, estableciéndose por acuerdos internacionales seis grandes grupos: Operaciones Unitarias físicas controladas por la transferencia de cantidad de movimiento, de energía, de materia, transferencia simultánea de materia y energía, complementarias y unitarias químicas creando así una herramienta de apoyo para la mejor comprensión de las mismas por parte de los estudiantes de Ingeniería Química.

A partir de esta clasificación se generó una encuesta de opinión dirigida a profesionales de la Ingeniería Química, acerca de las Operaciones Unitarias más utilizadas en los procesos de manufactura, por las Industrias de procesamiento de materiales instaladas en Guatemala. Para el desarrollo de la encuesta se elaboró la muestra con base a los establecimientos industriales del país que se encuentran en el directorio nacional industrial 2000 del INE.

Como resultado de la investigación se cuenta con información de las Operaciones Unitarias más utilizadas por las industrias del país. Se determinó que en las Operaciones Unitarias Físicas controladas por la cantidad de movimiento, las bombas son las más utilizadas en un 95%, las conducciones en un 93% al igual que las válvulas; en cuanto a las controladas por la cantidad de energía, los intercambiadores de calor al igual que las calderas son las más utilizadas en un 82%, en la transferencia de materia los intercambiadores iónicos son utilizados en un 50%, en cuanto al manejo de transferencia simultanea de materia y energía, las torres de enfriamiento son las más

utilizadas en un 73% y en el manejo de materiales el transporte de materiales es la Operación más utilizadas en un 87%; en cuanto a las Operaciones Unitarias Químicas más utilizadas por las industrias los reactores de tanque agitado son los más utilizados en un 62%; a partir de estos resultados se realizó un análisis de comparación con los contenidos programáticos que aparecen en los programas de cada curso de la carrera de Ingeniería Química de la USAC, determinando así que los estudiantes en el transcurso de la carrera si aprenden a profundidad en distintos cursos las Operaciones Unitarias más empleados actualmente por las industrias de procesamiento de materiales.

OBJETIVOS

General:

Establecer una clasificación de las Operaciones Unitarias que ayude a una mejor compresión de los fenómenos de transporte controlantes que en ellas ocurren y determinar por encuesta de opinión las Operaciones Unitarias más utilizadas en los procesos de manufactura por las industrias de procesamiento de materiales instaladas en Guatemala.

Específicos:

1. Clasificar las Operaciones Unitarias Físicas controladas por la transferencia de cantidad de movimiento y determinar cuáles son las más utilizadas por las industrias de procesamiento de materiales instaladas en Guatemala.

2. Clasificar las Operaciones Unitarias Físicas controladas por la transferencia de energía y determinar cuáles son las más utilizadas por las industrias de procesamiento de materiales instaladas en Guatemala.

3. Clasificar las Operaciones Unitarias Físicas controladas por la transferencia de materia y determinar cuáles son las más utilizadas por las industrias de procesamiento de materiales instaladas en Guatemala.

4. Clasificar las Operaciones Unitarias Físicas controladas por la transferencia simultánea de materia y energía y determinar cuáles son las más utilizadas por las industrias de procesamiento de materiales instaladas en Guatemala.

5. Clasificar las Operaciones Unitarias Físicas complementarias y determinar cuáles son las más utilizadas por las industrias de procesamiento de materiales instaladas en Guatemala.

6. Clasificar las Operaciones Unitarias Químicas y determinar cuáles son las más utilizadas por las industrias de procesamiento de materiales instaladas en Guatemala.

7. Establecer a partir de los contenidos programáticos que aparecen en los programas de cada curso de la carrera de Ingeniería Química de la USAC, las operaciones Unitarias estudiadas durante la carrera.

8. Analizar si en el transcurso del proceso enseñanza-aprendizaje de la carrera de Ingeniería Química se estudian las Operaciones Unitarias más empleadas actualmente, por las industrias instaladas en Guatemala.

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo de graduación se dio a conocer una clasificación de las Operaciones Unitarias basadas con dos grandes grupos, los cuales son las Operaciones Unitarias físicas y químicas, a partir de esta clasificación se desarrollaron seis grandes grupos, los cuales son básicamente las operaciones unitarias físicas controladas por la transferencia de cantidad de movimiento, de energía, de materia, de materia y energía, complementarias y operaciones unitarias químicas.

Esta clasificación genera un enfoque de las Operaciones Unitarias de una manera general y a la vez detallada proporcionando así una herramienta que facilita al estudiante su mejor comprensión.

A partir de esta clasificación se desarrolló una encuesta, la cual fue proporcionada a una muestra de 60 personas que laboraban en diferentes industrias de procesamiento de materiales que se encuentran en Guatemala, con el fin de conocer cuales son la Operaciones Unitarias más empleadas en las industrias actualmente.

A través de figuras y tablas se muestran cuáles son estas Operaciones más empleadas por las industrias; además se generó un estudio de comparación

Además, se realizó un análisis de las Operaciones Unitarias estudiadas durante la carrera de Ingeniería Química, de la Universidad de San Carlos de Guatemala, a través de los contenidos programáticos de cada curso que aparecen en los programas.

Con los resultados obtenidos de la encuesta de opinión y con el razonamiento de los programas de cada curso de Ingeniería Química, se realizó un análisis de comparación de las Operaciones Unitarias estudiadas durante el transcurso de la carrera, a través de figuras y tablas; determinando que los estudiantes sí aprenden las Operaciones Unitarias más utilizadas en las industrias instaladas en Guatemala.

1 MARCO TEÓRICO: LAS OPERACIONES UNITARIAS

Una Operación Unitaria es cada una de las acciones necesarias de transporte, adecuación y/o transformación de las materias implicadas en un proceso de manufactura. La instalación donde se lleve a cabo una Operación Unitaria determinada constituye una unidad de proceso, cuyo diseño es específico y similar, independientemente del proceso, el tipo y las condiciones de las materias tratadas.

Clasificación de las Operaciones Unitarias

Los procesos químicos en general y cada Operación Unitaria en particular tienen como objetivo modificar las condiciones de una determinada cantidad de materia en forma más útil a nuestros fines. Este cambio puede realizarse por tres caminos:

a. Modificando su masa o composición (separación de fases, mezcla, reacción química),
b. Modificando el nivel o calidad de la energía que posee (enfriamiento, vaporización, aumento de presión, ...),
c. Modificando sus condiciones de movimiento (aumentando o disminuyendo su velocidad o su dirección).

Los tres cambios mencionados anteriormente son los únicos cambios posibles que un cuerpo puede experimentar. Un cuerpo está absolutamente definido cuando están especificadas:

a. Cantidad de materia y composición,
b. Energía total (interna, eléctrica, magnética, potencial, cinética),
c. Las componentes de velocidad de que está animado.

Este hecho experimental tiene su expresión matemática en tres leyes de conservación:

a. ley de conservación de la materia.
b. ley de conservación de la energía.
c. ley de conservación de la cantidad de movimiento.

Para la clasificación de las Operaciones Unitarias se atiende a la propiedad que predomina en una transformación. Con base a ello la clasificación se hace en dos grandes grupos:

a. Operaciones Unitarias físicas.
b. Operaciones Unitarias químicas.

A partir de esta división las Operaciones Unitarias se clasifican de acuerdo con las propiedades (materia, energía, cantidad de movimiento) que se transfiera en la operación y sea la más relevante en la misma. Aparecen así seis grandes grupos de operaciones[1]:

1.1. Operaciones Unitarias físicas controladas por la transferencia de cantidad de movimiento,
1.2. Operaciones Unitarias físicas controladas por la transferencia de energía,

[1] ALVAREZ M, Williams G. **Folleto de las Operaciones Unitarias Físicas Controladas por la Transferencia de Materia y Transferencia simultánea de Materia y Energía. Guatemala: USAC, 2005 .**

1.3. Operaciones Unitarias físicas controladas por la transferencia de materia,
1.4. Operaciones Unitarias físicas controladas por la transferencia simultánea de materia y energía,
1.5. Operaciones Unitarias físicas complementarias y
1.6. Operaciones Unitarias químicas.

En todas las Operaciones Unitarias tienen en común el concepto de fuerza impulsora. La cantidad de la propiedad transferida por unidad de tiempo y superficie es igual a la fuerza impulsora partido de la resistencia.

1.1. Operaciones Unitarias físicas controladas por la transferencia de cantidad de movimiento

Se dice que se presenta el transporte de cantidad de movimiento o momentum, cuando se ponen en contacto dos fases, o dos zonas de un fluido de distinta velocidad. La interacción entre las moléculas, denominada viscosidad, tiende a hacer que las velocidades se igualen. Este fenómeno, descrito comúnmente como rozamiento, es aprovechado por muchas operaciones de separación, entre sólidos y fluidos. Las operaciones cuyo diseño se debe hacer basándose en el criterio de rozamiento entre dos zonas o fases se dividen en tres grupos, los cuales son:

1.1.1 Operaciones en las que el fluido circula contenido por un sólido (circulación interna de fluidos por conducciones),
1.1.2 Operaciones en las que el fluido circula a través de un lecho de sólido, llamados comúnmente de circulación externa de fluidos,

1.1.3 Operaciones en las que las partículas de un sólido se mueven en el seno de un fluido.

1.1.1 Operaciones en las que el fluido circula contenido por un sólido (circulación interna de fluidos por conducciones)

Dentro de este se tienen los siguientes subgrupos de Operaciones Unitarias:

1.1.1.1 Conducciones

Estas pueden ser abiertas o canales, para transportar grandes caudales de agua entre puntos sensibles al mismo nivel; pero lo común es que se dispone de conducciones cerradas de sección circular, denominadas tuberías, aunque en algunos casos la sección puede ser cuadrada.

1.1.1.1.1 Tubos y tuberías

Los fluidos se transportan por lo general en tuberías o tubos, los cuales tienen una sección transversal disponible en una variedad de tamaños, espesores de pared y materiales de construcción. No existe una clara distinción entre los términos tubería y tubo. En general, las tuberías tienen pared gruesa y diámetros relativamente grandes y vienen en longitudes moderas de 20 a 40 ft; el tubo tiene una pared delgada y generalmente viene en rollo de varios cientos de pies de longitud. Las paredes de las tuberías son por lo general ligeramente rugosas; los tubos tienen paredes muy lisas. Los tramos de las tuberías se unen por collarines, tornillo o accesorios soldados; las piezas de los tubos están conectadas por accesorios de compresión, accesorios flameados o saldados.

Por último, los tubos se fabrican por extrusión o laminación en frío, mientras que las tuberías metálicas se hacen por soldadura, fundición, o mediante molduras o prensas.

1.1.1.1.1.1 Tubos y tuberías metálicas

Los sistemas de tuberías de metales ferrosos incluyen los aceros maleables, al carbono e inoxidable, se dividen en dos grandes clases principales: soldados y sin costura. También existen tuberías de hierro colado y hierro dúctil estos son metales más baratos que el acero en sistemas de tuberías y se emplean mucho en servicios de baja presionen los que la corrosión interna y externa puede causar una pérdida considerable de metal. Se utilizan mucho para tuberías subterráneas de distribución de agua. También existen tuberías de materiales metálicos no ferrosos como el aluminio, cobre y aleaciones de cobre, plomo, magnesio, níquel y aleaciones de níquel y titanio, etc.

1.1.1.1.1.2 Tubos y tuberías no metálicas [2]

Entre estas se encuentra las de **asbesto cemento**, no tienen costura y se hacen con óxido de silicio y cemento Pórtland, puede manejar soluciones dentro de una gama de pH de 4.5 a 14. Esta tubería se utiliza para sistema de agua subterránea, para desechos y aguas blancas de fábricas de papel y para aguas de minas.

[2] PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 6-71pp . – 6-77 pp.

En esta clasificación también se encuentran las tuberías de **grafito impermeable, las de barro químico** a prueba de ácidos resisten a la mayor parte de los ácidos, los álcalis y otros corrosivos, con excepción principal del ácido fluorhídrico; **las tuberías de drenaje de arcilla vítrea,** estas tuberías son resistentes a los productos químicos muy diluidos, con excepción del ácido fluorhídrico. También están las **tuberías de concreto** utilizadas para drenajes.

Existen también **tubos y tuberías de vidrio, tuberías de acero recubierto de vidrio, tuberías de porcelana química, tuberías de sílice o cuarzo fundido, tuberías de acero recubiertas de plástico y caucho y tuberías de plástico** las cuales están libres de corrosión interna y externa, se pueden cortar y unir con facilidad y no provocan corrosión galvánica cuando se unen a otros materiales.

Figura 1. Tubos metálicos doblados

Fuente: www.ukrindustrial.com/img/ua/catalog/small/32351.jpeg

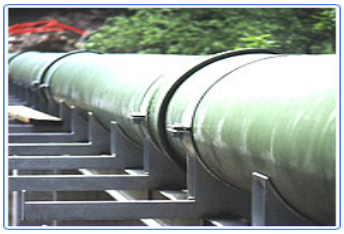
Figura 2. Tubos metálicos

Fuente: www.ukrindustrial.com/img/ua/catalog/small/32351.jpeg

Figura 3. Tuberías metálicas

Fuente: www.ukrindustrial.com/img/ua/catalog/small/32351.jpeg

Figura 4. Tubos no metálicos de vidrio

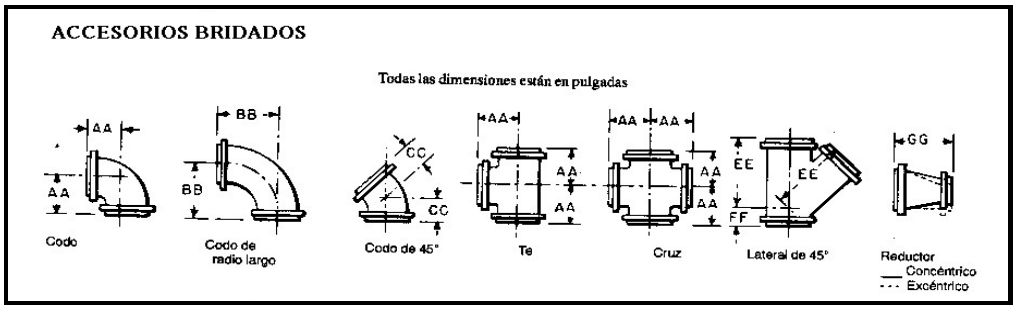


Fuente: www.ukrindustrial.com/img/ua/catalog/small/32351.jpeg

1.1.1.1.2 Accesorios [3]

Los **codos** son accesorios que se forman mediante vaciado, forja o conformación en caliente o frío mediante trozos cortados de tuberías o al soldar piezas de tuberías cortadas a inglete. Los **accesorios** bridados se emplean cuando la tubería debe ser desmantelada frecuentemente para su limpieza o revisión a fondo, también se utilizan en áreas donde no se permiten la soldadura. Entre los accesorios bridados se encuentran: codos, codos de radio largo, codos de 45° , te, cruz, lateral de 45°, reductores.

Figura 5. Accesorios Bridados



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 6-56pp . – 6-62 pp.

[3] PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 6-56pp . – 6-62 pp.

1.1.1.2 Dispositivos que suministran energía mecánica al fluido

Debido al rozamiento entre el fluido y las paredes que lo contienen, debe suministrarse energía mecánica al fluido, en forma de trabajo. Ello se consigue mediante dispositivos llamados bombas, si impulsan líquido y compresores, soplantes, ventiladores y eyectores, si impulsan gases.

1.1.1.2.1 Bombas[4]

Las bombas incrementan la energía mecánica del líquido, aumentando su velocidad, presión o elevación, o las tres anteriores.

1.1.1.2.1.1 Bombas centrífugas

Es el tipo de bomba que se utiliza más en la industria química para transferir líquidos de todos los tipos, así también para los servicios generales de abastecimiento de agua entre otros, son sencillas, de bajo costo inicial; generan altas velocidades de rotación, convirtiendo la energía cinética resultante del líquido en energía de presión.

1.1.1.2.1.2 Bombas de propulsor y de turbina

Las bombas de flujo axial (propulsor) son esencialmente unidades de capacidad muy elevadas y baja carga. Normalmente se diseñan para flujos de más de 450 m^3/h . Las bombas de turbina son unidades con impulsores de flujo mixto (o sea parte axial y parte centrífuga). Existen en capacidades de 20 m^3/h.

---

[4] PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 6-8pp. – 6-17 pp.

1.1.1.2.1.3 Bombas de desplazamiento positivo

Estas aplican presión directamente al líquido por un pistón reciprocante, o por miembros rotatorios, los cuales forman cámaras alternadamente llenas o vacías del líquido. En general, las eficiencias generales de las bombas de desplazamiento positivo son más elevadas que las de los equipos centrífugos, porque se minimizan las perdidas internas. Las bombas de desplazamiento positivo pueden ser del tipo **reciprocante o rotatorio**. En todas las bombas de desplazamiento positivo, una cavidad o cavidades están alternativamente llenas y vacías del fluido bombeado. Hay tres clases de bombas reciprocantes o de movimiento alternativo, que son las de **pistón, las de émbolo y las de diafragma.** En general, la acción de las piezas de transferencia del líquido en esas bombas es la misma, puesto que se hace que avance y retroceda en una cámara un pistón cilíndrico, un émbolo, o un diafragma redondo. El dispositivo va equipado con válvulas para la entrada y la descarga del líquido que se bombea. En las **bombas rotatorias,** el desplazamiento del líquido se produce debido a la rotación de uno o más miembros dentro de una carcasa estacionaria.

1.1.1.2.1.4 Bombas de chorro

Son una clase de dispositivos de manejo de líquidos que utilizan la cantidad de movimiento de un fluido para desplazar otro. Los **eyectores** y los **inyectores** son los dos tipos de bombas de chorro que interesan a los ingenieros químicos. El **eyector** se diseña para la utilización en operaciones en las que la carga contra la que se realiza el bombeo es baja y menor que la carga del fluido utilizado para bombear.

El **inyector** es un tipo especial de bomba de chorro, que funciona por medio de vapor y se utiliza para la alimentación de calderas y otros servicios similares, en donde el flujo se bombea por descarga a un espacio que se encuentra a la misma presión que el vapor utilizado para hacer funcionar el inyector.

1.1.1.2.1.5 Bombas electromagnéticas

Todas las bombas electromagnéticas utilizan el principio motor- el que un conductor en un campo magnético, que lleva una corriente que fluye en ángulo recto con la dirección del campo, recibe una fuerza mutuamente perpendicular tanto al campo como a la corriente-. En todas las bombas electromagnéticas el fluido es el conductor.

Figura 6. Bomba Vertical

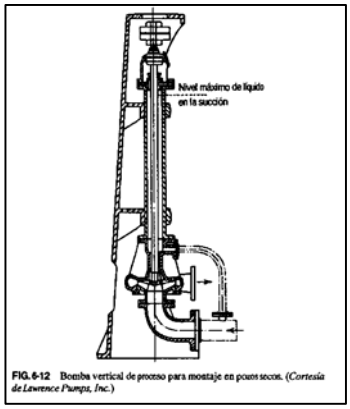
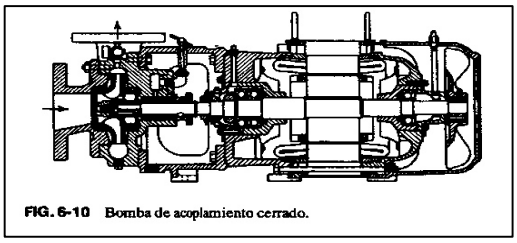


FIG. 6-12 Bomba vertical de proceso para montaje en pozos secos. (*Cortesía de Lawrence Pumps, Inc.*)

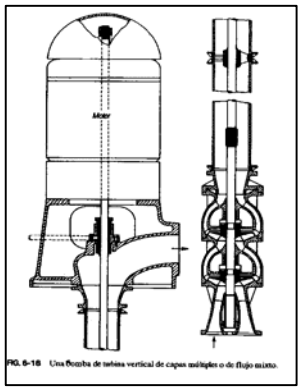
Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 6-8pp. – 6-17 pp.

Figura 7. Bomba de acoplamiento cerrado



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 6-8pp. – 6-17 pp.

Figura 8. Bomba de turbina



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 6-8pp. – 6-17 pp.

Figura 9. Bomba medidora de émbolo

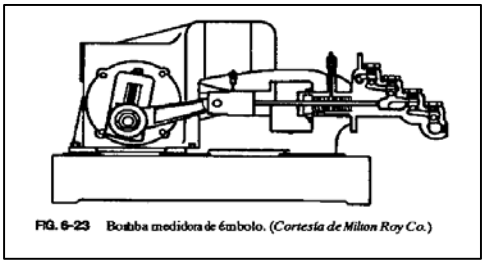


FIG. 6-23 Bomba medidora de émbolo. (*Cortesía de Milton Roy Co.*)

Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 6-8pp. – 6-17 pp.

Figura 10. Bomba de diafragma de acción mecánica

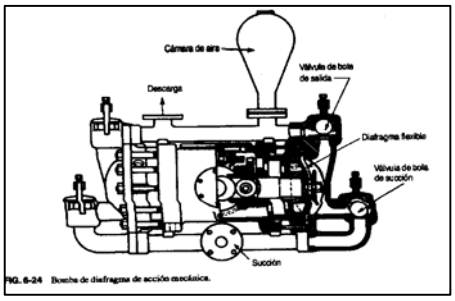


FIG. 6-24 Bomba de diafragma de acción mecánica.

Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 6-8pp. – 6-17 pp.

1.1.1.2.2. Compresores, sopladores, ventiladores y eyectores[5]

Los **compresores** son dispositivos usado para presurizar un fluido, incluyendo líquidos y gases. Hay diversas clases de compresores, pero el propósito principal de usar un compresor es incrementar la presión de un líquido o de un gas.

Un compresor convierte la potencia en un incremento de la entalpia de un fluido. El fluido, a menudo un gas, entra en el compresor a una presión baja (entalpia baja) y sale a una presión alta (entalpia alta). El eje rotatorio está unido a unas hojas rotatorias. Las hojas rotatorias empujan el gas y aumentan la presión, de tal modo que aumentan la entalpia. Los compresores son procesos continuos de flujo y pueden ser axiales o radiales.

Los **sopladores y ventiladores** se usan para hacerlo circular sin aumentar la presión. Los ventiladores se utilizan para bajas presiones, por lo común se clasifican como de tipo centrífugo o de flujo axial. Los dos tipos se utilizan para trabajos de ventilación, suministro de corriente de aire a hornos y calderas, desplazamiento de grandes volúmenes de aire o gas por ductos, eliminación de humos, etc. Los **ventiladores centrífugos** se construyen de tres tipos generales: de paletas rectas o placas de acero, de hojas curvas hacia delante y de hojas curvas hacia atrás. Los **ventiladores de flujo axial** son de dos tipos generales: de disco y de hélice.

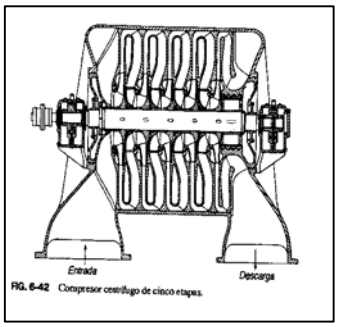
Un **eyector** es un dispositivo que aumenta la presión de un gas al ser mezclado con una pequeña cantidad de otro, comúnmente vapor de agua, a presión elevada.

---

[5] PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 6-18pp – 6-33 pp.

El trasporte de cantidad de movimiento de un fluido a otro hace que la mezcla alcance una presión superior a la del primer gas, son empleados especialmente para conseguir el vacío de una instalación. Existen **eyectores de chorro de vapor,** consiste esencialmente en una tobera de vapor que descarga un chorro a alta velocidad a través de una cámara de succión conectada al equipo que se debe evacuar. El vapor recoge el gas y lo lleva a un difusor en forma de venturi que convierte la energía de velocidad del vapor en energía de presión. También existe otro tipo de eyector de tamaño grande , que se denomina a veces **eyector reforzador**, con toberas múltiples .

Figura 11. Compresor centrífugo de cinco etapas



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 6-18pp – 6-33 pp.

Figura 12. Compresor rotatorio de tipo del tipo de pistón de líquido

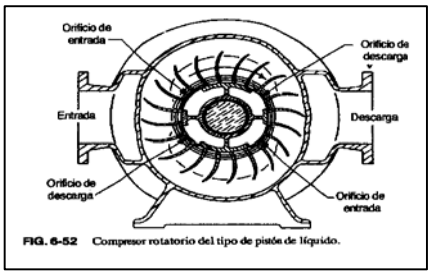


FIG. 6-52 Compresor rotatorio del tipo de pistón de líquido.

Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 6-18pp – 6-33 pp.

Figura 13. Eyector típico de chorro de vapor

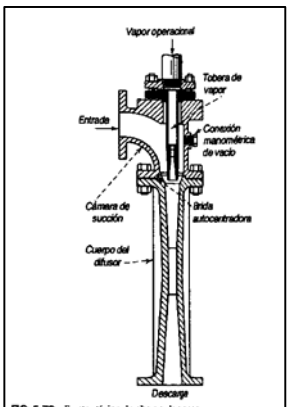
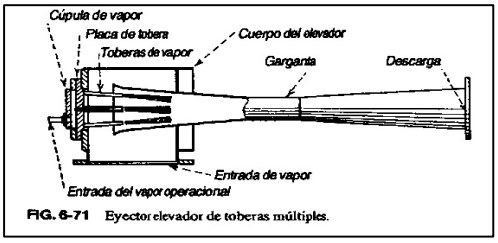


FIG. 6-70 Eyector típico de chorro de vapor.

Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 6-18pp – 6-33 pp.

Figura 14. Eyector elevador de toberas múltiples



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 6-18pp – 6-33 pp.

1.1.1.3 Válvulas[6]

Para conseguir que por una conducción circule un caudal determinado de fluido debe regularse éste mediante válvulas. Estas son dispositivos que introducen un rozamiento adicional en el sistema, lo que restringe el caudal que circula. Las válvulas sirven no sólo para regular el flujo de fluidos, sino también para aislar equipos o tuberías para el mantenimiento, sin interrumpir otras unidades conectadas. Hay muchos tipos de válvulas, entre ellas están:

1.1.1.3.1 Válvulas de compuerta

Estas válvulas se diseñan en dos tipos. La compuesta de cuña, del tipo de asiento inclinado, y las de asiento paralelo. Se utilizan válvulas de compuerta para minimizar las caídas de presión en la posición abierta y para detener el flujo de fluido más que para regularlo cuando la válvula se encuentra cerrada.

[6] PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 6-62pp – 6-65 pp.

1.1.1.3.2 Válvulas de globo

Llamadas así debido a que en los primeros diseños el cuerpo de la válvula es esférico; se utilizan con frecuencia para controlar la velocidad de flujo de un fluido. Además, la abertura aumenta en forma lineal con respecto a la posición del vástago, y su uso es uniformemente distribuido alrededor del disco. El fluido pasa a través de una abertura limitada y cambia varias veces de dirección. Como resultado, la caída de presión en este tipo de válvulas es importante.

1.1.1.3.3 Válvulas angulares

Éstas válvulas son similares a las de globo; se utilizan en ambos casos los mismos casquetes, vástagos discos. Combinan un codo y una válvula de globo en un componente con un ahorro importante de caída de presión. Las válvulas angulares bridadas son más fáciles de retirar y reemplazar que las de globo bridadas.

1.1.1.3.4 Válvulas de diafragma

Estas válvulas se limitan a presiones de aproximadamente 50lbf / in^2 . Estas válvulas son excelentes para los fluidos que contienen sólidos suspendidos y se pueden instalar en cualquier posición.

1.1.1.3.5 Llaves de macho o tapón

Estas válvulas se limitan a la temperatura por debajo de 260°C, puesto que la expansión diferencial entre el tapón y el cuerpo hace que se atore.

1.1.1.3.6 Válvulas de bola

Estas válvulas se limitan a temperaturas que tienen pocos efectos sobre sus asientos de plástico. Puesto que el elemento sellador es una bola, su alineación con el eje del vástago no es esencial para el cierre hermético.

1.1.1.3.7 Válvulas de mariposa

Estas válvulas ocupan menos espacio en la línea que cualquier otra válvula. Se logra un sellado relativamente hermético sin desgaste excesivo de los asientos ni un esfuerzo operacional de torsión demasiado grande mediante diversos métodos, como asientos elásticos, anillos de pistón sobre el disco e inclinación del vástago para limitar el contacto entre las porciones del disco más cernas al vástago y el asiento del cuerpo, en unos cuantos grados de curvatura. La distribución de presión del fluido tiende a cerrar la válvula. Por esta razón, las válvulas más pequeñas de manejo manual tienen un dispositivo de enclavamiento en la llave, mientras que las válvulas mayores de operación manual utilizan en el vástago un engranaje de gusano.

1.1.1.3.8 Válvulas de retención de columpio

Se utilizan para evitar la inversión del flujo. El diseño normal es para emplearse solamente en línea horizontal donde la fuerza de gravedad sobre el disco sea máxima al comienzo del cierre mínimo al final.

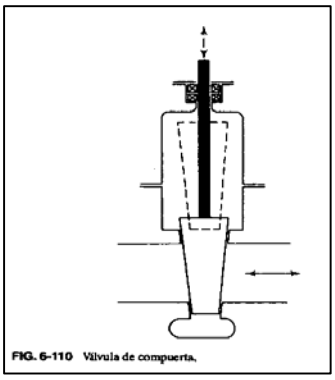
1.1.1.3.9 Válvulas de retención de elevación

Estas se producen en tres tipos. Las válvulas de *retención de elevación vertical* se deben instalar en líneas verticales donde el flujo sea normalmente ascendente; las *válvulas de retención esféricas* se emplean en líneas horizontales; las *válvulas de retención angular* se instalan en donde una línea vertical con flujo ascendente se hace horizontal.

1.1.1.4.1 Válvulas de disco inclinado

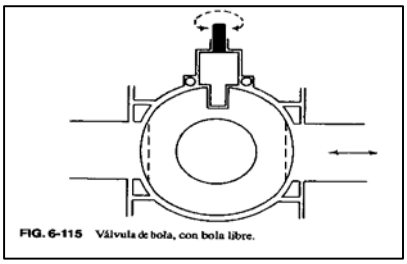
Estas válvulas se pueden instalar en una línea horizontal o en líneas en las que el flujo sea verticalmente ascendente.

Figura 15. Válvula de compuerta



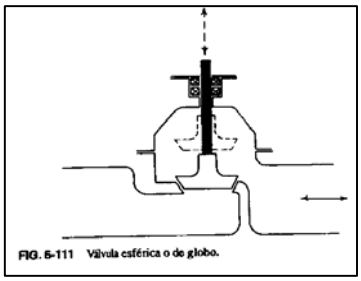
Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 6-62pp – 6-65 pp.

Figura 16. Válvula de bola



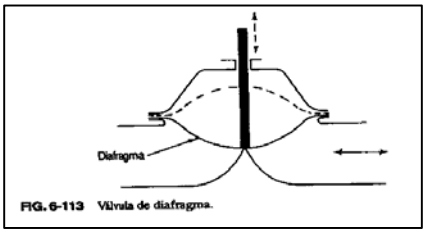
Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 6-62pp – 6-65 pp.

Figura 17. Válvula esférica o de globo



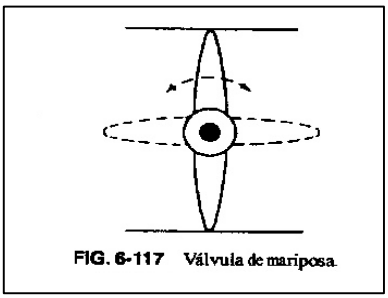
Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 6-62pp – 6-65 pp.

Figura 18. Válvula de diafragma



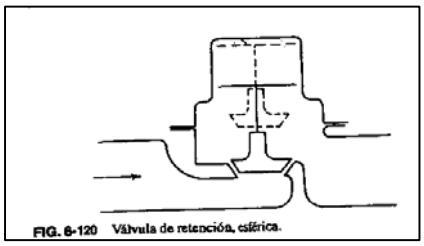
Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 6-62pp – 6-65 pp.

Figura 19. Válvula de mariposa



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 6-62pp – 6-65 pp.

Figura 20. Válvula de retención, esférica



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 6-62pp – 6-65 pp.

1.1.1.4 Medidores de caudal[7]

Para controlar los procesos industriales es necesario conocer la cantidad de materia que entra y sale de las distintas Operaciones Unitarias, para ello existen métodos directos e indirectos de medición de caudales.

Los métodos directos se basan en pesar o medir el volumen de la cantidad de fluido que pasa por las instalaciones en un cierto tiempo, entre ellos se tienen los contadores de agua y los contadores de paletas de gases. Los métodos indirectos son los más utilizados y se basan en la pérdida de presión que experimenta un fluido al atravesar un obstáculo en la conducción, estos dispositivos deben de calibrarse previamente con un medidor directo. Hay básicamente cuatro tipos de medidores:

1.1.1.4.1 Medidores de perforación total

Estos operan sobre todo el fluido dentro de la tubería o conducto y se pueden clasificar de la siguiente manera:

1.1.1.4.1.1 Medidor Venturi

Consta de una pequeña sección de entrada cónica conduce a una sección de garganta, y ésta a un largo cono de descarga. Las tomas de presión al inicio de la sección de entrada y en la garganta están conectadas a un manómetro o transmisor de presión diferencial. En el cono de corriente de entrada, la velocidad del fluido aumenta y disminuye su presión. La caída de presión en este cono se utiliza para medir la velocidad de flujo.

---

[7] McCABE, Warren y otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 2002. 238pp-255 pp.

En el cono de descarga la velocidad disminuye y la presión original se recupera ampliamente. Aunque los medidores venturi pueden utilizarse para la medición de las velocidades de flujo del gas, éstos son más comúnmente empleados para líquidos, en especial cuando se trata de flujos grandes de agua, donde debido a las grandes presiones recuperadas, el venturi requiere menos potencia que otros tipos de medidores.

1.1.1.4.1.2 Medidor de orificio

Tiene ciertas desventajas prácticas en las operaciones industriales ordinarias. Es caro, ocupa un espacio considerable y no se puede variar la relación entre el diámetro de la garganta y el diámetro de la tubería. Para un cierto medidor y un determinado sistema manométrico, la velocidad máxima de flujo medible está fijada, de forma que si varía el intervalo de flujo, el diámetro de la garganta resulta demasiado grande para obtener una lectura exacta o demasiado pequeña para acomodarse a la nueva velocidad máxima de flujo. El medidor de orificio elimina estos inconvenientes, pero en cambio origina un mayor consumo de potencia. El fundamento del medidor de orificio es idéntico al del medidor venturi.

1.1.1.4.1.3 Medidor de elemento V

En estos medidores el flujo está restringido por una hendidura en forma de V en un lado de la tubería o por una cuña de metal insertada en la tubería. Éstos son equipos relativamente caros, pero su exactitud es alta, alrededor de $\pm$ 0.5 por ciento de la velocidad medida. Éstos equipos miden velocidades de flujo de fluidos difíciles de manejar, tales como los líquidos que contienen partículas sólidas o gases no diluidos o que contengan gotas de condensado.

1.1.1.4.1.4 Medidor de objetivo

En un medidor de objetivo se coloca un disco de borde afilado en ángulo recto a la dirección del flujo, y se mide la fuerza de arrastre ejercida por el fluido sobre el disco. La velocidad del flujo es proporcional a la raíz cuadrada de esta fuerza y a la densidad del fluido.

Los medidores de objetivo son resistentes y económicos y pueden utilizarse con una variedad de fluidos, inclusive líquidos viscosos y suspensiones. Sin embargo, el mecanismo de la barra tiende a atorarse si los sólidos contenidos en la suspensión son muchos.

1.1.1.4.1.5 Medidor de desbordamiento de vórtice

En un medidor de desbordamiento de vórtice el objetivo es un cuerpo escarpado (afilado), a menudo en forma de trapezoide en la sección transversal. Este cuerpo está diseñado para crear, cuando el fluido es turbulento, un camino de vórtice en su estela. Los censores cercanos al cuerpo escarpado miden las fluctuaciones de presión y por lo tanto la frecuencia de desbordamiento del vórtice, a partir de la cual se infiere la velocidad volumétrica de flujo. Estos medidores son aplicables a muchos tipos de fluidos, incluyendo gas y vapor a temperaturas elevadas.

1.1.1.4.1.6 Medidores de turbina

En el medidor de turbina un rotor de aspa está suspendido axialmente en la corriente del flujo y gira a una velocidad proporcional a la velocidad del fluido. En muchos modelos, las aspas del motor están hechas de un material magnético que induce un voltaje alternado en la bobina de señal transductora.

Los medidores de turbina son excepcionalmente exactos cuando se utilizan en las condiciones adecuadas, pero tienden a ser frágiles y su costos de mantenimiento son elevados.

1.1.1.4.1.7 Medidores de desplazamiento positivo

Son muy exactos y aplicables a gases y líquidos limpios, inclusive los viscosos; de hecho, a viscosidades más altas, el funcionamiento mejora. Estos medidores no manejan líquidos sucios o suspensiones. Son relativamente caros y su operación resulta costosa.

1.1.1.4.1.8 Medidores magnéticos

Estos medidores son no intrusivos; esto es, no existe un lugar obstruido en la corriente del fluido y no hay reducción del canal de flujo. No crean caídas de presión en el fluido. La velocidad de flujo es medida desde el exterior del tubo. Medidores de flujo magnéticos comerciales son capaces de medir la velocidad de casi todos los líquidos a excepción de los hidrocarburos, los cuales tienen una conductividad eléctrica demasiado pequeña. Los medidores ultrasónicos son de dos tipos: **tiempo de propagación y desplazamiento Doppler**.

1.1.1.4.1.9 Medidor de Coriolis

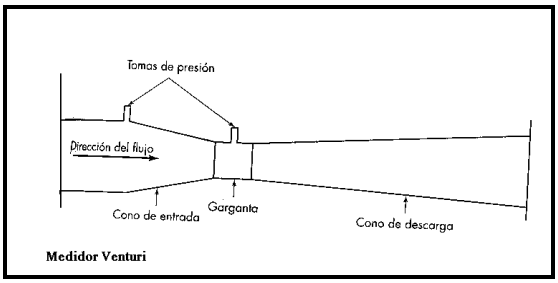
Un objetivo que se mueve en un sistema rotatorio experimenta una fuerza Coriolis proporcional a su masa y la velocidad de avance y a la velocidad angular del sistema. En un medidor de Coriolis, el fluido pasa a través de dos tubos curveados con forma de U que vibran a sus frecuencias naturales.

Esto crea una fuerza de Coriolis alternativa que produce pequeñas deformaciones elásticas en los tubos. A partir de la magnitud de las deformaciones es posible calcular la velocidad de flujo másico. Los medidores de Coriolis son muy exactos y miden directamente la velocidad de flujo de masa. Se utilizan con mayor frecuencia en tuberías pequeñas y son costosos para instalar y operar.

1.1.1.4.1.10 Boquillas para flujo[8]

Consta básicamente en un cilindro corto con una sección realzada. El corte transversal del acercamiento es de preferencia elíptico, aunque puede ser cónico. En general, la longitud de la porción recta de la garganta mide aproximadamente 0.5 de diámetro de la misma, la toma de presión corriente arriba se localiza aproximadamente a un diámetro de tubería de la cara de entrada de la boquilla y la toma de presión corriente abajo es más o menos 0.5 del diámetro de la tubería desde la cara de la entrada.

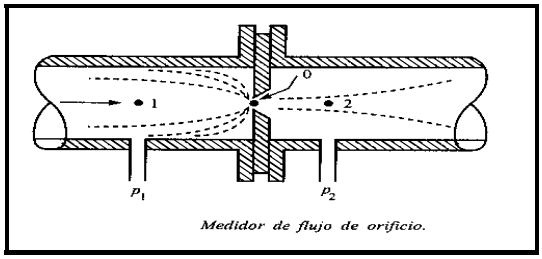
Figura 21. Medidor Venturi



Fuente: McCABE, Warren y otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 2002. 238pp-255 pp.

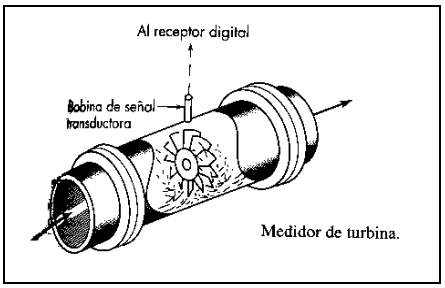
8 PERRY H, Robert **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 5-15pp.

Figura 22. Medidor de flujo de orificio



Fuente: McCABE, Warren y otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 2002. 238pp-255 pp.

Figura 23. Medidor de turbina



Fuente: McCABE, Warren y otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 2002. 238pp-255 pp.

1.1.1.4.2 Medidores de inserción [9]

Miden la velocidad de flujo, o más común la velocidad del fluido, en un solo punto. En este tipo de medidor, el elemento sensible es pequeño comparado con el tamaño del canal del flujo, por lo que se inserta dentro del flujo de la corriente. Pocos medidores de inserción miden la velocidad media de flujo, pero la mayoría miden la velocidad local en un solo punto. Por lo tanto, el posicionamiento del elemento sensible es importante si se determina la velocidad total del flujo. La velocidad local mediada debe cumplir una relación constante y conocida de la velocidad media del fluido.

1.1.1.4.2.1 Tubo pitot[10]

Se usa para medir la velocidad local en un punto dado en la corriente de flujo, y no la velocidad promedio dentro de la tubería o conducto. Un tubo, el tubo de impacto, tiene su abertura normal a la dirección del flujo, y el tubo estático tiene su abertura paralela a la dirección del flujo. El fluido fluye hacia adentro de la abertura; la presión aumenta y luego permanece estacionaria en ese punto, llamado punto de estancamiento. La diferencia de la presión de estancamiento en ese punto y la presión estática medida por el tubo estático representa la elevación de presión asociada con la desaceleración del fluido. El manómetro mide esta pequeña elevación de presión asociada con la desaceleración del fluido.

---

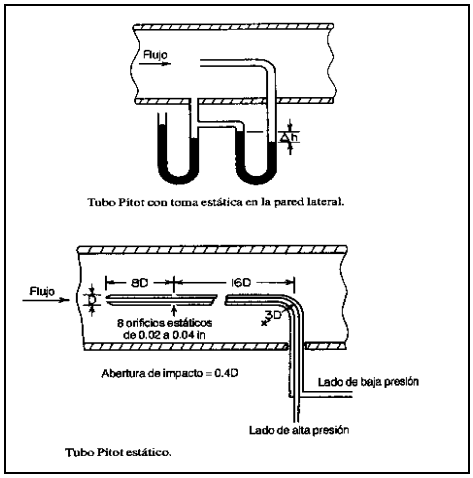
9 McCABE, Warren y otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 2002. 252pp-255 pp.

10 GEANKOPLIS, Christie J. **Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias**. 3ª Ed. México: Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V., 2003. 146pp.

1.1.1.4.2.2 Térmico [11]

Esto medidores miden directamente la velocidad de flujo mediante el aumento de la temperatura en el fluido cuando pasa sobre un elemento caliente, o la velocidad de transferencia de calor hacia la corriente desde una superficie calentada. Los medidores térmicos son comúnmente medidores de inserción usados para medir flujo de gas en ductos largos.

Figura 24. Tubo pitot estático



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 5-10pp.

[11] McCABE, Warren y otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 2002. 254pp.

1.1.1.4.3 Medidores de área[12]

Son equipos en los que la caída de presión es constante, o casi, mientras que el área a través de la cual circula el fluido varía con la velocidad de flujo. Mediante una adecuada calibración, se relaciona el área con la velocidad de flujo.

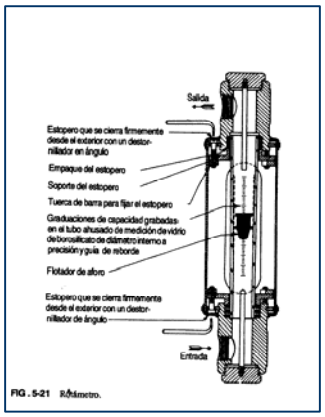
1.1.1.4.3.1 Rotámetros

El medidor de área más importante es el rotámetro; consta de un tubo cónico de vidrio, que se instala verticalmente con el extremo más ancho hacia arriba. El fluido asciende a través del tubo cónico y mantiene libremente suspendido a un flotador. El flotador es el elemento indicador, y cuando mayor es la velocidad de flujo, mayor es la altura que alcanza en el tubo. Toda la corriente del fluido tiene que circular a través del espacio anular que existe entre el flotador y la pared del tubo. El tubo está graduado y la lectura del medidor se obtiene de la escala con el borde de la lectura del flotador, que corresponde a la mayor sección transversal del mismo. Se requiere de una curva de calibración para convertir la lectura de la escala en velocidad de flujo. Los rotámetros se utilizan para la medida del flujo de líquidos, como para gases.

---

[12] McCABE, Warren y otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 2002. 246pp.

Figura 25. Rotámetro



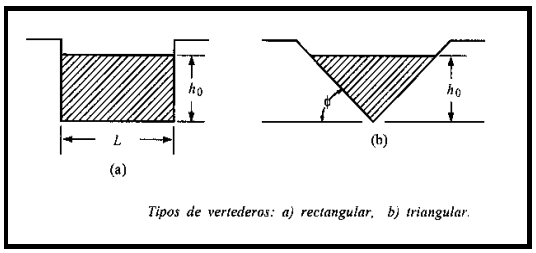
Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 5-20pp.

1.1.1.4.4 Vertederos[13]

La corriente de líquido en canales abiertos se determina utilizando un vertedero que consiste en una presa sobre cuyo borde se derrama el líquido o bien, que tiene un corte por el que pasa el líquido. Los términos “vertedero rectangular”, “vertedero triangular”, etc., se refieren generalmente a la forma de corte del mismo.

[13] PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 5-21pp.

Figura 26. Tipos de vertederos: Rectangular y triangular



Fuente: GEANKOPLIS, Christie J. **Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias**. 3ª Ed. México: Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V., 2003. 146pp.

1.1.2 Operaciones en las que el fluido circula a través de un lecho de sólido, llamados comúnmente de circulación externa de fluidos

Dentro de este se tienen los siguientes subgrupos de Operaciones Unitarias:

1.1.2.1 Fluidización y transporte neumático[14]

Un lecho consiste en una columna formada por partículas sólidas, a través de las cuales pasa un fluido (líquido o gas) el cual puede ser librado de algunas impurezas y sufre una caída de presión. Si el fluido se mueve a velocidades bajas a través del lecho no produce movimiento de las partículas, pero al ir incrementando gradualmente la velocidad llega un punto donde las partículas no permanecen estáticas sino que se levantan y agitan, dicho proceso recibe el nombre de fluidización.

---

14 McCABE, Warren y otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 2002. 186pp.

Las expresiones fluidización y lecho fluidizado se utilizan para describir la condición de las partículas completamente suspendidas, toda vez que la suspensión se comporta como un fluido denso. Si el lecho está inclinado, la superficie superior permanece horizontal y los objetos grandes flotarán o descenderán en el lecho, dependiendo de su densidad en relación con la de la suspensión. Es factible descargar los sólidos fluidizados del lecho a través de tuberías y válvulas como si se tratara de un líquido. Esta fluidez es la principal ventaja del uso de la fluidización para el manejo de sólidos.

Los diferentes tipos de fluidización son:

a) Fluidización particulada

Cuando se fluidiza arena con agua, las partículas se encuentran más separadas y su movimiento es más vigoroso a medida que aumenta la velocidad de fluidización, aunque la densidad media del lecho a una velocidad dada es la misma que en toda sus secciones. Éstas se denominan fluidización particulada y se caracteriza por una expansión grande pero uniforme del lecho a velocidades elevadas.

b) Fluidización de burbujeo o turbulento

Los lechos de sólidos fluidizados con aire presentan lo que se denomina fluidización agregativa o de burbujeo. A velocidades superficiales la mayor parte del gas pasa a través del lecho en forma de burbujas o huecos que están casi exentos de sólidos, y solamente una pequeña fracción del gas fluye por los canales existentes entre las partículas.

c) Fluidización circulante

A velocidades de gas más altas, todas las partículas de alimentación son rápidas arrastradas con el gas, pero es posible recuperarlas con un ciclón regresarlas al fondo para mantener los sólidos en la unidad. Este tipo de sistema recibe el nombre de lecho de fluido circulante.

La utilización amplia de la fluidización comienza en la industria del petróleo con el desarrollo del *cracking* (craqueo) catalítico en el lecho fluidizado. La fluidización se emplea en otros procesos catalíticos, tales como la síntesis de acrilonitrilo, y para llevar a cabo reacciones gas-sólido. Los lechos fluidizados se utilizan también para el curtido de minerales, secado de sólidos finos y absorción de gases.

En un **transporte neumático** el fluido en suspensión es un gas, generalmente aire, que fluye a velocidades de entre 15 a 30m/s en tuberías con diámetro comprendidos desde los 50 hasta 400 mm.

Los principales tipos de sistemas son:

A) Sistemas de presión negativa (vacío):

Útiles en la transferencia de sólidos desde múltiples puntos de entrada a un solo punto de entrega. Se caracteriza por el desplazamiento de materiales en una corriente de aire de presión menor que la ambiental.

B) Sistemas de presión positiva:

Adecuados para un punto de entrada y uno o más puntos de entrega. Se deja caer el material en una corriente de aire (por encima de la presión atmosférica) mediante un alimentador giratorio de exclusas. La velocidad de la corriente mantiene al material a granel en suspensión hasta que llega al recipiente receptor, donde se separa del aire mediante un filtro o un separador de ciclón.

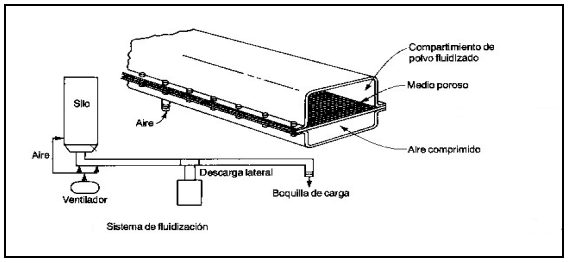
C) Sistema de presión – vacío :

Son una combinación de lo mejor de los métodos de presión y vacío. Se usa vacío para inducir al material a entrar al transportador y desplazarse a una corta distancia hasta un separador. El aire pasa por un filtro al lado de succión de un ventilador de desplazamiento positivo. Luego se alimenta el material a la corriente de aire de presión positiva del transportador mediante un alimentador giratorio, que procede del lado de descarga del ventilador.

D) Sistemas prefluidizados :

Estos requieren menos aire y consecuentemente menor potencia que cualquiera de los otros sistemas. La fluidización se logra por medio de una cámara en la que se hace pasar aire por una membrana porosa que se forma en el fondo del transportador, sobre el que reposa el material que va a ser desplazado. Conforme pasa aire por la membrana, cada partícula se ve rodeada por una película de aire. En el punto de fluidización incipiente, el material toma las características del flujo libre. Luego se pasa a una corriente de aire del transportador mediante un alimentador giratorio.

Figura 27. Sistema de fluidización



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 7-21pp.

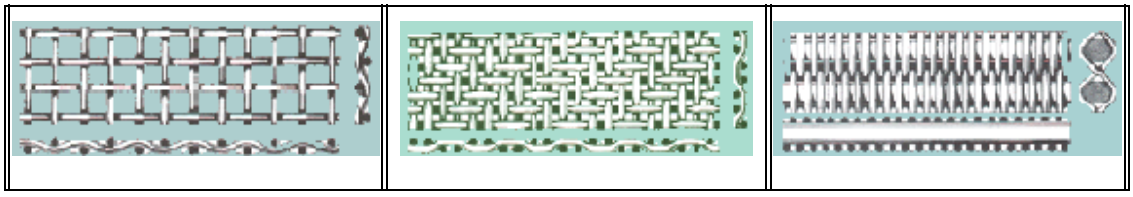
1.1.2.2 Filtración[15]

La filtración es un proceso de remoción de partículas sólidas de un fluido al pasarlo a través de un medio de filtrado o colado en el que se sedimenta el sólido. Se utiliza tanto para aprovechar el sólido presente en la suspensión a filtrar como para disminuir la turbidez de un líquido o eliminar las partículas suspendidas de un gas. La filtración se lleva a cabo provocando diferencias de presión.

El medio filtrante es la barrera que retiene los sólidos y deja pasar el líquido, puede ser un tamiz, una tela, un tejido de fibras, fieltro, membranas poliméricas o un lecho de sólidos. El líquido que atraviesa el medio filtrante se denomina filtrado.

[15] **PERRY H, Robert. Manual del Ingeniero Químico. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 19-73pp.-19-98pp.**

Figura 28. Tipos de mallas para el medio filtrante



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 19-73pp.-19-98pp.

La separación de sólido-fluido es una Operación Unitaria importante que existe en casi cada diagrama de flujos relacionado con el tratamiento químico de las industrias de proceso, de la reducción del mineral, de farmacéuticos, producción de papel, alimentos, agua y tratamiento de desechos.

Un proceso de filtración presenta diversas características que se han de tener en cuenta para clasificar el proceso y seleccionar el equipo adecuado. Los distintos criterios de clasificación que se siguen son de acuerdo a:

- **La fuerza impulsora de la filtración:**
  - gravedad
  - presión o vacío
  - centrífuga

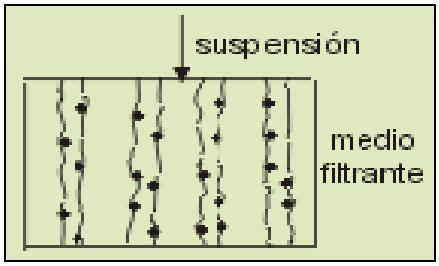
- **El mecanismo de filtración:**
  - *filtración por torta*: si la proporción de sólidos es muy elevada, las partículas quedan retenidas en la superficie del medio filtrante estableciéndose gradualmente una torta de espesor creciente sobre el medio filtrante, con lo que en realidad la filtración se va a realizar a través de la torta. Por tanto, la mayor parte de partículas se recogen en la torta filtrante y posteriormente ésta se separa del medio.

Figura 29. Filtración por torta

Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico**. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 19-73pp.-19-98pp.

- *filtración en lecho profundo*: la proporción de partículas sólidas es muy pequeña y con frecuencia su diámetro es menor que el de los poros del medio filtrante por lo que las partículas penetran hasta una profundidad considerable antes de ser atrapadas.

Figura 30. Filtración en lecho profundo



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico**. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 19-73pp.-19-98pp.

- **El objetivo de la filtración:**

El objetivo de la filtración puede ser obtener un líquido clarificado, limpio de sólidos o bien el producto sólido lo más seco posible, es decir con la menor cantidad de líquido que se pueda conseguir. Otra finalidad de la filtración, por ejemplo en los tratamientos de aguas, es simplemente depurar el efluente para hacer posible su vertido.

- **El ciclo de operación:**
  - continuo
  - discontinuo
- **La naturaleza de los sólidos**

- torta compresible: si los sólidos son deformables.
- torta incompresible: si éstos son rígidos.

Existen numerosos tipos de filtros dependiendo de la aplicación a la que estén destinados, y como se describió anteriormente, su clasificación se puede realizar atendiendo a diferentes criterios, aunque lo más frecuente es su caracterización en función de la fuerza motriz.

Los factores principales a considerar a la hora de elegir un tipo de filtro frente a otro son: la resistencia específica de la torta, la cantidad a filtrar y la concentración de sólidos.
Otra de las características del filtro a tener en cuenta es la facilidad de descarga de la torta.
Ante todo lo que va a decidir la elección del filtro es el factor económico. Normalmente, el precio del equipo está directamente relacionado con el área filtrante.

1.1.2.2.1 Filtros clarificadores o de lecho profundo

Los filtros clarificadores o de lecho profundo se suelen emplear cuando la cantidad de sólidos presentes en el líquido es muy pequeña, siendo de gran aplicación para la depuración de agua y el tratamiento de aguas residuales. En este grupo se tienen los filtros de lecho, los cartuchos filtrantes y otros. Los filtros de cartucho son cada vez más utilizados en la industria por sus buenos resultados.

1.1.2.2.2 Filtros de torta

La mayor parte de filtros empleados en la industria química son **filtros de torta** y dentro de éstos su clasificación suele hacerse en función de la fuerza impulsora (presión, vacío o centrífuga).
Si se debe seleccionar entre un filtro de presión o uno de vacío se deben conocer las ventajas e inconvenientes que presentan cada uno de ellos. Los filtros de presión permiten la obtención de tortas con un menor contenido de humedad y los filtros de vacío, aunque permiten un funcionamiento en continuo, el consumo de energía es mayor debido al sistema de vacío y existe una limitación en la diferencia de presión aplicable (ya que la presión máxima no puede sobrepasar el valor de 1 atm). A continuación se exponen algunos de los filtros de uso más habitual:

1.1.2.2.2.1 Filtro prensa

Es uno de los filtros más usados debido a su gran versatilidad, tanto en relación a la amplia gama de materiales y como las diversas condiciones de operación que se pueden aplicar, además de su bajo coste de mantenimiento.

Se emplea en los casos en que la resistencia específica de la torta es elevada y siempre que la cantidad de sólidos no sea tan elevada que obligue a desmontar frecuentemente la prensa que provocaría desgastes excesivos en las telas. Sin embargo, no está recomendado su uso para tratar grandes cantidades. Consisten en una serie de elementos cuadrados o rectangulares, que pueden ser placas y marcos alternados o cámaras, entre los que se coloca la tela filtrante. De esta forma, se distinguen dos tipos de filtros prensa: la prensa de placas y marcos y la prensa de cámaras. La diferencia entre ambas radica en que la segunda prescinde de los marcos y que el canal de alimentación se encuentra en el centro de cada una de las placas en vez de en una de las esquinas como ocurre en la prensa de placas y marcos.

1.1.2.2.2.2 Filtro de hojas

Se operan de manera discontinua o por cargas. Consisten en una serie de elementos filtrantes planos, denominados hojas, que se encuentran en el interior de una carcasa presurizada. Como características fundamentales cuenta con una mayor uniformidad y mejor separación de la torta, una mayor facilidad de lavado y de instalación de la tela. Aunque inicialmente diseñado para trabajar a vacío, los tipos posteriormente desarrollados operan a presión pudiendo aplicar presiones superiores a las que son posibles en el filtro prensa. Se emplea preferentemente en caso de que se requiera un lavado eficaz de la torta. Las hojas pueden tener diferentes formas (rectangulares o circulares) y las carcasas pueden estar dispuestas horizontal o verticalmente.

1.1.2.2.2.3 Filtro rotativos a vacío

Son muy empleados debido a que trabajan en continuo y a su bajo coste de operación motivado por su funcionamiento automático. Se emplea para materiales de filtración poco complicados. Posee una gran capacidad en relación a su tamaño. Dentro de los filtros rotativos se tienen dos tipos:

- **de tambor rotativo:** consiste en un cilindro dispuesto horizontalmente, cuya superficie exterior está formada por una plancha perforada sobre la que se fija la tela filtrante. El cilindro está dividido en una serie de sectores que se encuentran conectados a través de una válvula rotativa. El tambor está parcialmente sumergido en una cuba a que se alimenta la suspensión a filtrar y se aplica vacío en los sectores sumergidos. De esta manera se forma una torta del espesor deseado ajustando la velocidad de rotación del tambor. Para retirar la torta del tambor se pueden seguir varios procedimientos. Lo más frecuente es emplear una cuchilla fija o rasqueta para descargar la torta, pero si resulta difícil de desprender también se puede realizar dicha operación por medio de una cuerda o de un rodillo.

- **de discos:** consiste en un cierto número de hojas filtrantes circulares montadas sobre un eje horizontal. Su funcionamiento es similar al filtro de tambor, sin embargo proporciona un lavado peor de la torta y su descarga es más difícil. Como ventaja frente al filtro de tambor se tiene que ofrece un área de filtración mayor en el mismo espacio.

1.1.2.2.2.4 Filtro de banda

Presenta una gran flexibilidad de aplicación y alta capacidad. Permite la filtración en continuo. Consiste en una especie de cinta transportadora donde la cinta se ha sustituido por una banda o tela permeable. La suspensión se alimenta por la parte superior y en un extremo de la cinta, mientras que por la parte inferior de ésta se hace el vacío y se recoge el filtrado. Se van a ajustar la velocidad de la cinta y la distancia a la que se aplica la suspensión para producir una torta del espesor adecuado. La torta se desprende al final de la cinta.

1.1.2.2.2.5 Filtro Nutscha

Existen dos variantes a presión y a vacío:

- **a vacío**: son filtros de pequeña capacidad pero de una gran simplicidad constructiva. Consisten en un recipiente donde la alimentación se realiza por la parte superior y en la zona inferior se dispone el sistema de vacío. Entre ambas zonas se halla el medio filtrante.

- **a presión:** se tienen dos tipos, uno de descarga manual y otro de descarga automática. El primero es similar al filtro de vacío mientras que el segundo está dotado de un agitador que permite el mantenimiento de la suspensión durante el filtrado y la mejora de la eficacia por eliminación de la humedad residual de la torta. Sin embargo este equipo presenta un precio bastante elevado debido a la complejidad del sistema.

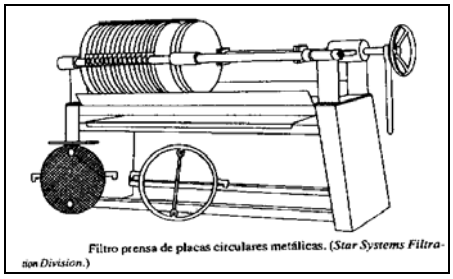
Algunos de estos filtros admiten calefacción, lo que permite disminuir la viscosidad del filtrado, aumentar la velocidad de filtración y, además, producir una torta más seca.

Si se ha de elegir entre un filtro continuo y uno discontinuo, se debe tener en cuenta que el filtro continuo proporciona una capacidad de producción más elevada para una superficie filtrante dada, aunque la mayoría presenta una limitación de la presión máxima de filtración. El filtro discontinuo se va a emplear cuando la torta filtrante tiene una resistencia elevada.

1.1.2.2.3 Filtros centrífugos

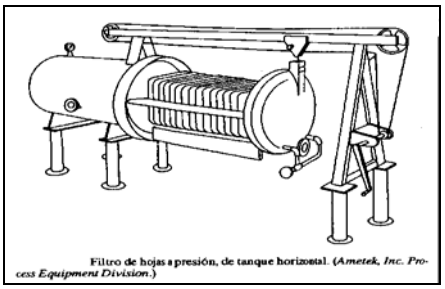
Otro tipo de filtros a señalar son los filtros centrífugos. Ofrecen ciertas ventajas frente a los filtros anteriores como la posibilidad de obtener bajas humedades residuales en los sólidos y la gran capacidad de tratamiento, mientras que, por otra parte, los principales inconvenientes son el elevado coste y el trabajar a altas velocidades, que ocasiona problemas de desgaste. Es frecuente expresar la fuerza centrífuga aplicada en términos de las veces que la aceleración centrífuga supera a la de la gravedad. Así se encuentran valores que pueden oscilar desde las 500 hasta las 50.000g. Entre los filtros centrífugos destacan: Filtros centrífugo de cesta, de tornillo helicoidal, rascadora o ‘perleer’, de empuje, los cuales se describirán más adelante en la sección de centrifugas de filtración.

Figura 31. Filtro prensa de placas circulares metálicas



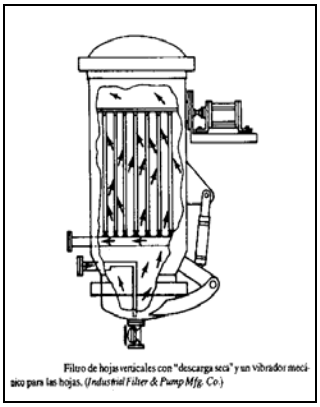
Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico**. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 19-73pp.-19-98pp.

Figura 32. Filtro de hojas a presión, de tanque horizontal



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 19-73pp.-19-98pp.

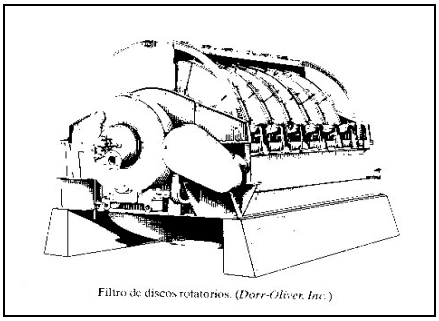
Figura 33. Filtro de hojas verticales



Filtro de hojas verticales con "descarga seca" y un vibrador mecánico para las hojas. (*Industrial Filter & Pump Mfg. Co.*)

Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico**. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 19-73pp.-19-98pp.

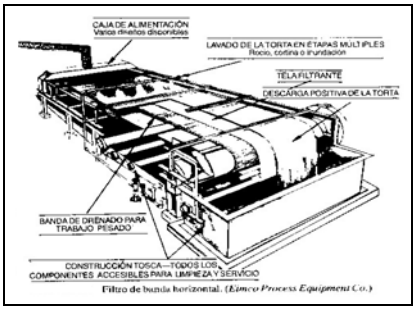
Figura 34. Filtro de disco rotativo



Filtro de discos rotatorios. (*Dorr-Oliver, Inc.*)

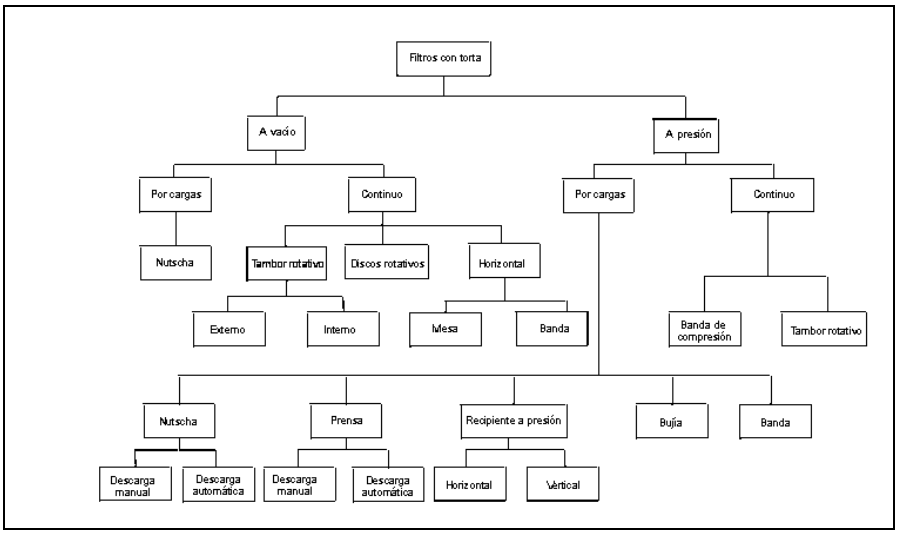
Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico**. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 19-73pp.-19-98pp.

Figura 35. Filtro de banda horizontal



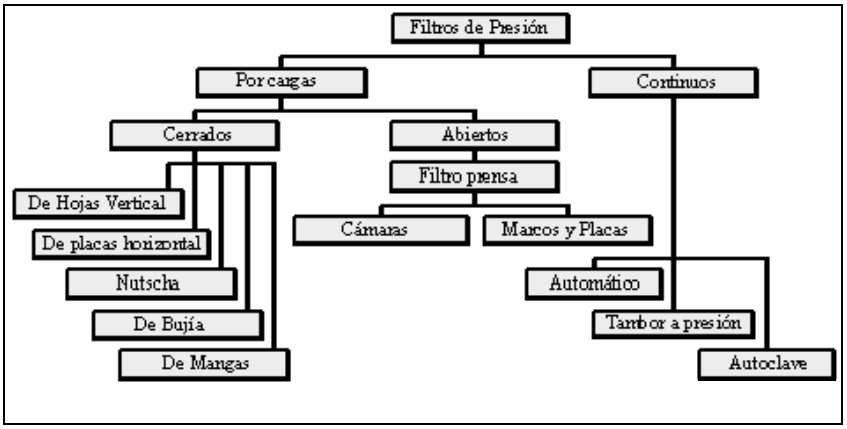
Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico**. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 19-73pp.-19-98pp.

Figura 36. Diagrama de filtros con torta



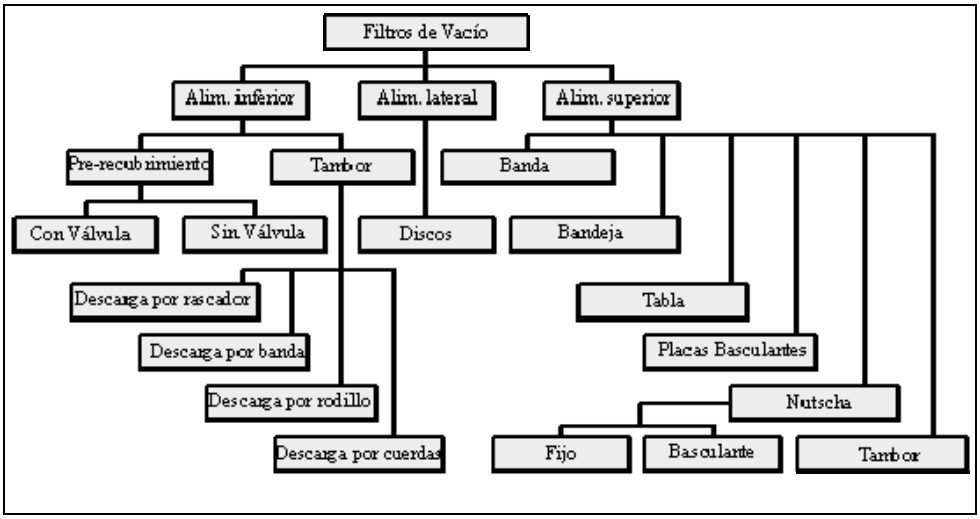
Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 19-73pp.-19-98pp.

Figura 37. Diagrama de filtros de presión



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 19-73pp.-19-98pp.

Figura 38. Diagrama de filtros de vacío



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 19-73pp.-19-98pp.

1.1.3 Operaciones en las que las partículas de un sólido se mueven en el seno de un fluido

1.1.3.1 Sedimentación [16]

Es una Operación Unitaria de separación sólido-líquido en la que las partículas sólidas se separan debido a la diferencia de densidad entre dos fases presentes. Esta Operación es una de las más utilizadas en el tratamiento de aguas residuales. En la mayoría de los casos la zona de sedimentación esta constituido por un canal rectangular con volumen, longitud y condiciones de flujo adecuadas para que sedimenten las partículas.

En función de la concentración y de la tendencia a la interacción de las partículas, se pueden producir cuatro tipos de sedimentación: **discreta, floculenta, retardada (también llamada zonal), y por compresión.**

1.1.3.1.1 Sedimentación de partículas discretas

La sedimentación de partículas es una suspensión con baja concentración de sólidos. Las partículas sedimentan como entidades individuales y no existe interacción sustancial con las partículas vecinas. Se presenta generalmente en la eliminación de las arenas del agua residual.

[16] PERRY H, Robert. Manual del Ingeniero Químico. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 5-67pp.

1.1.3.1.2 Sedimentación floculenta

Se refiere a una suspensión bastante diluida de partículas que se agregan, o floculan, durante el proceso de sedimentación. Al unirse, las partículas aumentan de masa y sedimentan a mayor velocidad. Este caso se presenta generalmente en la eliminación de una fracción de los sólidos en suspensión del agua residual bruta en los tanques de sedimentación primaria, y en la zona superior de los decantadores secundarios. También elimina los flóculos químicos de los tanques de sedimentación.

1.1.3.1.3 Sedimentación retardada, también llamada zonal

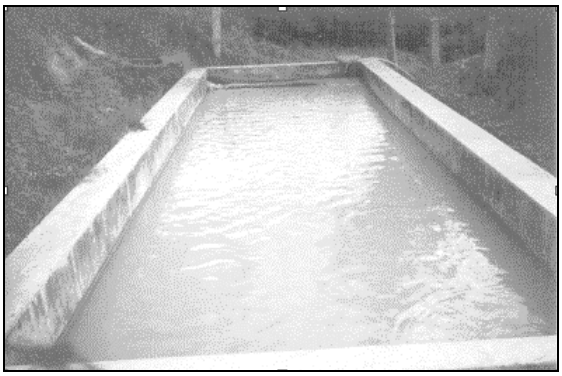
Se refiere a suspensiones de concentración intermedia, en las que las fuerzas entre partículas son suficientes para entorpecer la sedimentación de las partículas vecinas. Las partículas tienden a permanecer en posiciones relativas fijas, y la masa de partículas sedimenta como una unidad. Se desarrolla una interfase sólido-líquido en la parte superior de la masa que sedimenta.
Se presenta en los tanques de sedimentación secundaria empleados en las instalaciones de tratamiento biológico

1.1.3.1.4 Sedimentación por compresión

Se refiere a la sedimentación en la que las partículas están concentradas de tal manera que se forma una estructura, y la sedimentación sólo puede tener lugar como consecuencia de la compresión de esta estructura. La compresión se produce por el peso de las partículas, que se van añadiendo constantemente a la estructura por sedimentación desde el líquido sobrenadante.

Generalmente, se produce en las capas inferiores de una masa de fango de gran espesor, tal como ocurre en el fondo de los decantadores secundarios profundos y en las instalaciones de espesamiento de fangos.

Figura 39. Sedimentador convencional de forma rectangular y flujo horizontal



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 5-67pp.

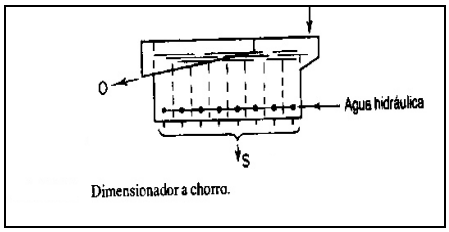
1.1.3.2 Clasificación Hidráulica[17]

Es una operación de separación de una mezcla de sólidos en distintas fracciones, basada en la diferente forma, tamaño y densidad de las partículas que constituyen la mezcla. Esta separación se efectúa en medio acuso. Cuando la separación ocurre en corriente de aire se denomina separación neumática.

[17] PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 21-25pp.

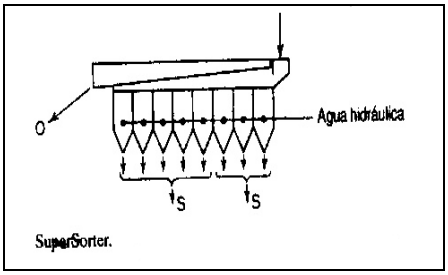
La clasificación hidráulica asegura la mayor eficiencia de separación obtenible por medios de clasificación por vía húmeda. La cantidad de agua hidráulica se controla de modo que en cada compartimiento sucesivo, las partículas más gruesas se mantienen en condiciones de asentamiento obstaculizado y las fracciones más finas siguen adelante, para recibir un tratamiento similar. Dos compartimientos capturarán. Entre los clasificadores hidráulicos estan : **Jet Sizer y SuperSorter**; la descarga de arena está controlada por válvulas accionadas por aire en el Jet Sizer y válvulas de tipo de estrangulación accionadas con motor en el SuperSorter. También existe otro tipo de clasificador hidráulico el **SiphonSizer D-O**, de alta eficiencia, desarrollado originalmente para lavar y clasificar por tamaños la roca fosfórica. Entre las aplicaciones usuales esta la clasificación cuidadosa por tamaños de arenas de vidrios de sílice, el lavado de roca fosfórica, la distribución en tamaños de abrasivo, polvo sin humo, aluminato de sodio, etc.

Figura 40. Clasificador hidráulico Jet Sizer



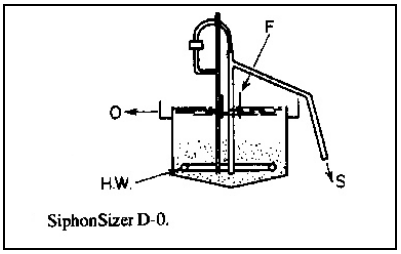
Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 21-25pp.

Figura 41. Clasificador hidráulico Supersorter



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 21-25pp.

Figura 42. Clasificador hidráulico Siphon Sizer D-O



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 21-25pp.

1.1.3.3 Flotación[18]

Utiliza un medio de separación cuya densidad es intermedia entre el material ligero y el pesado. La separación se produce porque las partículas pesadas sedimentan a través del medio, mientras que las más ligeras flotan.

Este método presenta la ventaja, en principio, de que la separación depende sólo de la diferencia de densidades de las dos sustancias y es independiente del tamaño de las partículas.

La separación se consigue introduciendo finas burbujas de gas, normalmente aire, en la fase líquida. Las burbujas se adhieren a las partículas, y la fuerza ascensional que experimenta el conjunto partícula-burbuja de aire hace que suban hasta la superficie del líquido. De esta forma, es posible hacer ascender a la superficie partículas cuya densidad es mayor que la del líquido, además de favorecer la ascensión de las partículas cuya densidad es inferior, como el caso del aceite en el agua.

En el tratamiento de aguas residuales, la flotación se emplea para la eliminación de la materia suspendida y para la concentración de los fangos biológicos. La principal ventaja del proceso de flotación frente al de sedimentación consiste en que permite eliminar mejor y en menos tiempo las partículas pequeñas o ligeras cuya deposición es lenta. Una vez las partículas se hallan en superficie, pueden recogerse mediante un rascado superficial.

---

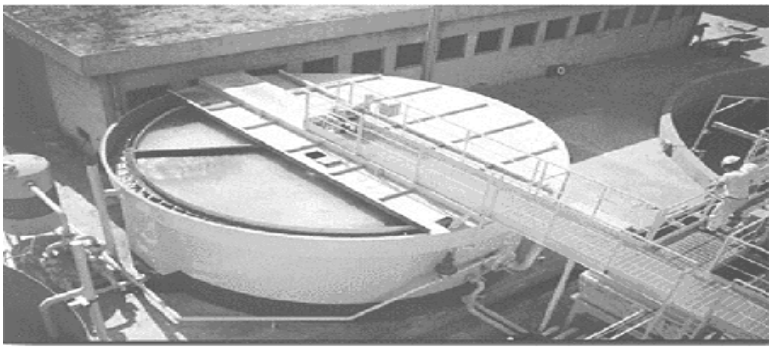
18 PERRY H, Robert. Manual del Ingeniero Químico. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 5-21pp.

La aplicación práctica de la flotación en las instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas se limita, en la actualidad, al uso del aire como agente responsable del fenómeno. Las burbujas se añaden, o se induce su formación, mediante uno de los siguientes métodos:

a) Inyección de aire en el líquido sometido a presión y posterior liberación de la presión a que está sometido el líquido *(flotación por aire disuelto)*.
b) Aireación a presión atmosférica *(flotación por aireación)*.
c) Saturación con aire a la presión atmosférica, seguido de la aplicación del vacío al líquido *(flotación por vacío).*

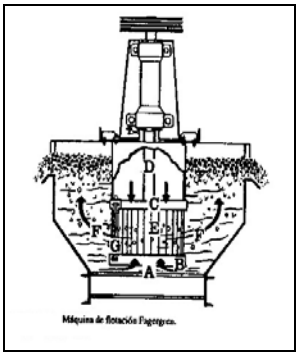
En todos estos sistemas, es posible mejorar el grado de eliminación y rendimiento mediante la introducción de aditivos químicos.

Figura 43. Tanque de Flotación



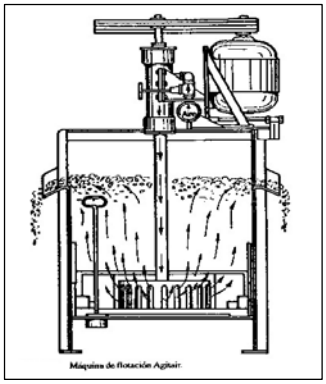
Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 5-21pp.

Figura 44. Máquina de Flotación Fagezgren



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico**. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 5-21 pp.

Figura 45. Tanque de flotación Agitair



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico**. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 5-21pp.

1.1.3.4 Centrifugación[19]

Consiste en la separación de dos fases de densidad bastante parecida creando un campo de fuerza centrífuga mediante un sistema mecánico de rotación. La fuerza centrífuga creada es varias veces superior a la de la gravedad, y el proceso es, en consecuencia, mucho más rápido que si se efectuara una separación por gravedad. Las centrífugas para la separación de sólidos contenidos en líquidos son generalmente de dos tipo: de sedimentación y de filtración, también se utilizan los ciclones e hidrociclones.

1.1.3.4.1 Centrífugas de sedimentación

Las centrífugas de sedimentación separan o concentran partículas de sólidos en un líquido haciendo que emigren a través del fluido en dirección radial hacia el eje de rotación o alejándose de él. Si no hay diferencia de densidades de las fases, la centrífugas no logrará efectuar la separación.

1.1.3.4.1.1 Centrífugas de tazón tubular

Se utilizan mucho para la purificación de lubricantes usados u otros aceites industriales, y en la industria de alimentación, bioquímica y farmacéutica.

[19] PERRY H, Robert. Manual del Ingeniero Químico. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 19-99pp – 19-114pp.

1.1.3.4.1.2 Centrífugas de cámaras múltiples

Este diseño es una modificación de la centrífuga de tazón tubular. Tiene un rotor de diámetro grande y relativamente corto. El tazón consiste en una serie de secciones tubulares cortas de diámetro creciente, colocadas de manera que formen un pasaje tubular continuo de diámetro creciente por etapas, para el flujo del líquido. La alimentación se introduce al tuvo de diámetro menor, la zona de menor fuerza centrífuga, y se somete a zonas sucesivas de fuerza centrífuga cada vez mayor al pasar por los tubos de diámetro más elevado. Las partículas más pesadas se depositan en el tuvo de diámetro menor y las más pequeñas o ligeras en la región de diámetro mayor y fuerza centrífuga más alta.

1.1.3.4.1.3 Centrífugas de disco

La alimentación se admite al centro el tazón cerca de su fondo, y se eleva a través de una pila o un montón de “discos” de lámina metálica, espaciados a distancias de 0.4 a 3 mm. El medio ángulo formado por los discos con el plano vertical es, casi siempre, del orden de 35 a 50°. Cada disco cuenta con varios orificios de 6 a13 mm de diámetro, que forman cuando se montan en el tazón, varios canales por los cuales se eleva el líquido. La finalidad de los discos es primordialmente reducir la distancia de sedimentación, puesto que una partícula sólida debe recorrer sólo una distancia corta antes de llegar a la parte inferior de uno de los discos. Una vez allí se extrae el líquido.

1.1.3.4.1.4 Centrífugas decantadoras continuas (con transportador helicoidal)

Consiste en un tazón de paredes sólidas con un eje de rotación horizontal o vertical. El tazón puede ser cónico, o bien, lo que sucede con mayor frecuencia, una combinación de ambas clases. La fuerza centrífuga hace que la superficie del líquido sea esencialmente paralela al eje de rotación. La alimentación se introduce por medio de un tuvo concéntrico hasta un punto apropiado del tazón. La fase líquida busca el nivel de los orificios en el radio mayor y se descarga continuamente por ellos. Y los sólidos pesados se sedimentan contra las paredes del tazón.

1.1.3.4.2 Centrífugas de filtración

La fase sólida está soportada y se retiene en una membrana permeable a través de la cual pasa libremente la fase líquida.

1.1.3.4.2.1 Centrífugas de cesta

Es la más sencilla y universal. Consiste en una cesta, vertical u horizontal, sobre la que se coloca el elemento filtrante. Como problema presenta la descarga de sólidos, que se debe realizar manualmente y supone una operación bastante lenta. Giran a velocidades comprendidas entre 600 y 1800 rpm.

1.1.3.4.2.2 Centrífuga de tornillo helicoidal

Tiene forma tronco-cónica y la alimentación debe ser una suspensión bastante concentrada. Las posibilidades de lavado son bastantes escasas. Alcanza aceleraciones entre 1500 y 2500g.

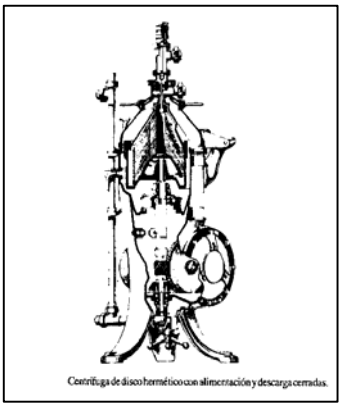
1.1.3.4.2.3 Centrífugas de rascadora o "*peeler*"

Es una máquina de funcionamiento discontinuo mientras que la descarga de la torta se realiza de manera automática por acción de un cuchillo rascador. Las velocidades alcanzadas son bajas (de 500 a 1600g). La capacidad de lavado de la torta es muy buena. Las variantes existentes de este equipo se distinguen en cuanto al tipo de rascador o a la existencia o no de un sifón para dar salida al líquido.

1.1.3.4.2.4 Centrífugas de empuje

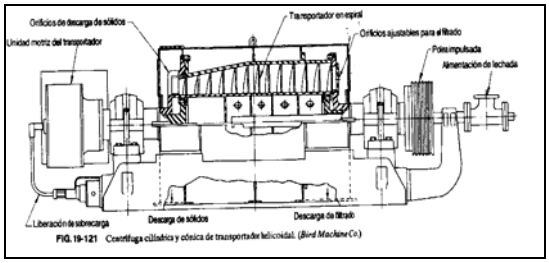
Tiene funcionamiento continuo. Consiste en una cesta de eje horizontal dotada de un falso fondo constituido por un pistón que se desplaza axial y alternativamente, empujando la torta formada y desplazándola parcialmente fuera de la cesta. La torta debe tener una cierta rigidez para que el mecanismo de empuje funcione eficazmente. Como ventaja notable destaca la posibilidad de obtención de la torta con humedades residuales muy bajas. También existen modelos con dos o más cestas concéntricas que giran solidariamente con un eje común. La torta pasa de manera sucesiva de una cesta a otra, actuando la propia cesta interior como empujadora de la exterior.

Figura 46. Centrífuga de disco hermético con alimentación y descarga cerradas



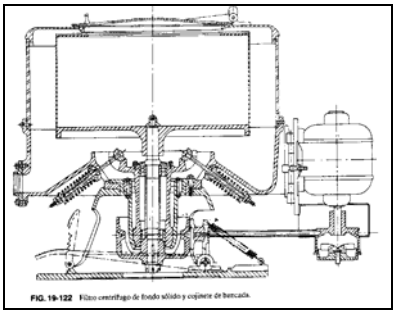
Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico**. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 19-99pp – 19-114pp.

Figura 47. Centrífuga cilíndrica y cónica de transporte helicoidal



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 19-99pp – 19-114pp.

Figura 48. Filtro centrífugo de fondo sólido y cojinete en bancada



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 19-99pp – 19-114pp.

1.1.3.5 Agitación y mezcla de líquidos[20]

El adecuado rendimiento de un proceso depende en muchos casos del grado de mezcla de los materiales. Los líquidos se agitan para: a) Mover partículas sólidas suspendidas. b) Mezclar líquidos miscibles como metanol y agua. c) Dispersar un gas dentro de un líquido en forma de burbujas. d) Dispersar un líquido inmiscible en otro para formar una emulsión o suspensión de pequeñas gotas. e) Procurar la transferencia de calor entre el líquido y un sistema serpentín o enchaquetado. La agitación se realiza en tanques, agitándose los líquidos mediante paletas accionadas por motor, llamadas comúnmente agitadores. La forma de las paletas de los agitadores es muy variable, dependiendo sobre todo del comportamiento reológico del material a dispersar.

[20] McCABE, Warren y otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 2002. 260pp-303pp.

1.1.3.5.1 Agitadores (impulsores)

Los agitadores de impulsor o rodete se dividen en dos clases. Los que generan corrientes paralelas al eje del impulsor se llaman **impulsores de flujo axial;** y aquellos que generan corriente en dirección radial o tangencial se llaman **impulsores de flujo radial.** Los tres principales tipos de impulsores para líquidos de baja a moderada viscosidad son las hélices, turbinas e impulsores de alta eficiencia.

1.1.3.5.1.1 Hélices (propulsor)

Una hélice es un impulsor de flujo axial y alta velocidad que se utiliza para líquidos de baja viscosidad. Las hélices pequeñas giran con la misma velocidad que el motor, ya sea a 1150 o 1750 rpm; las grandes giran a 400 a 800 rpm.

1.1.3.5.1.2 Turbinas

Entre los agitadores de turbina se encuentra, la **turbina sencilla de palas rectas;** que empuja el líquido en forma radial y tangencial, casi sin movimiento vertical al agitador. También existen **turbinas de disco**, con palas múltiples rectas instaladas en un disco horizontal, es útil para la dispersión de un gas en un líquido. La **turbina de disco de pala cóncava CD-6** se utiliza con frecuencia para la dispersión de gas. Y las **turbinas de pala inclinada** se emplean cuando la circulación global es importante.

1.1.3.5.1.3 Impulsores de alta eficiencia

Las variaciones de la **turbina de palas inclinadas** se desarrollaron para proporcionar un flujo axial más uniforme y mejorar la mezcla; además tienen la finalidad de reducir la potencia requerida para una velocidad de flujo dada. El **agitador de alta eficiencia HE-3**, tiene tres palas inclinadas que se ondulan al decrecer el ángulo de la pala cerca de la punta. El **agitador de lámina de fluido A310** utiliza palas con forma de fluido, que se adelgazan y son más estrechas en la punta que en la base.

Estos agitadores son muy utilizados para mezclar líquidos de baja o moderada viscosidad, pero no son recomendables para líquidos muy viscosos o para la dispersión de gases. Para líquidos altamente viscosos se puede utilizar el **agitador de cinta helicoidal,** el diámetro de la hélice es muy cercano al diámetro interior del tanque, lo que garantiza el movimiento del líquido en todas las direcciones a la pared del tanque aun con materiales muy viscosos. Para proporcionar agitación adecuada cerca del fondo del tanque, se puede utilizar un **agitador de ancla**; debido a que no crea movimiento vertical, es un mezclador menos efectivo que el de cinta helicoidal, pero promueve buena transferencia de calor hacia o desde la pared del tanque.

1.1.3.5.2 Mezclado

Con frecuencia el criterio de un buen mezclado es visual, otro criterio utilizado incluye la velocidad de caída de pequeñas muestras tomadas al azar en distintos puntos de mezcla, la velocidad de transferencia de un soluto de fase líquida a otra, y en mezclas sólido-líquido, la uniformidad que se observa visualmente en la suspensión.

La mezcla de líquidos miscibles en un tanque es un proceso relativamente corto con propulsores (hélice), turbinas o impulsores de alta eficiencia, generalmente colocados en el centro, en grandes tanques de almacenamiento.

1.1.3.5.2.1 Mezcla en tanques de proceso

El impulsor en un tanque de proceso produce una corriente de alta velocidad, y el fluido se mezcla con rapidez en la región próxima al impulsor debido a la intensa turbulencia. A medida que la corriente se modera, arrastra otro líquido y fluyendo a lo largo de la pared, hay algo de mezcla radial debido a que los grandes remolinos se rompen en otros más pequeños, pero probablemente hay poco mezclado en la dirección del flujo. El fluido completa un lazo de circulación y retorna a la entrada del impulsor, donde ocurre de nuevo una mezcla vigorosa.

1.1.3.5.2.2 Mezcla estratificada en tanques de almacenamiento

Para una mezcla efectiva en un tanque grande, un propulsor de entrada lateral debe estar orientado precisamente tomando en cuenta el ángulo con la horizontal para la circulación desde la parte superior a la inferior; para resultados óptimos este ángulo se encuentra entre 80 y 83°. El tiempo requerido para la mezcla estratificada depende de la velocidad de circulación, pero de forma más importante de la velocidad de erosión de la superficie de contacto entre las capas líquidas estratificadas.

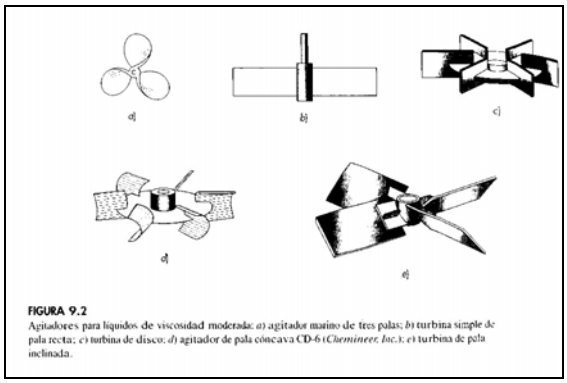
1.1.3.5.2.3 Mezcladores de chorro

La circulación en grandes tanques puede ser inducida por uno o más chorros de líquido. Algunas veces los chorros se colocan en grupos en varios puntos en el tanque. Un gran flujo de líquido, por sí solo, no logra un mezclado satisfactorio. Se debe dar suficiente espacio y tiempo a la corriente para que se mezcle con la masa del fluido por la acción del mecanismo de arrastre.

1.1.3.5.2.4 Mezcladores estáticos

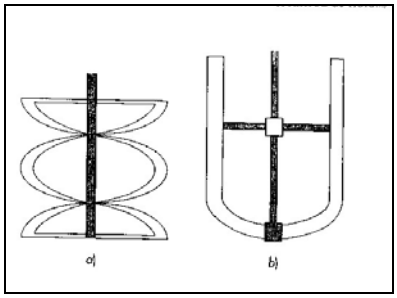
Las operaciones más difíciles de mezclado se llevan a cabo mediante mezcladores estáticos, que son equipos comerciales que consisten de una serie de metales insertados en la tubería. Uno de los principales tipos de mezclador es el de **elemento helicoidal,** se utiliza principalmente con líquidos viscosos y pastas. Otro tipo de mezclador estático, usado para gases y líquidos de baja viscosidad, es el **mezclador de vórtice turbulento**.

Figura 49. Agitadores para líquido de viscosidad moderada



Fuente: McCABE, Warren y otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 2002. 260pp-303pp.

Figura 50. Agitadores para líquidos de alta velocidad: a) agitador de cinta de doble trayectoria helicoidal, b) agitador de ancla



Fuente: McCABE, Warren y otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 2002. 260pp-303pp.

1.2 Operaciones Unitarias físicas controladas por la transferencia de energía

Las Operaciones Unitarias controladas por la transferencia de calor son sólo parte de las operaciones en las que se desea un intercambio de energía. Son dos las formas por las que se puede intercambiar energía entre un sistema y sus alrededores:

a) en forma de calor,
b) en forma de trabajo.

Las operaciones en que se intercambia trabajo son normalmente operaciones controladas por la transferencia de cantidad de movimiento o momento, mientras que las Operaciones Unitarias en las que la velocidad de transferencia de calor por medio de sus mecanismos de conducción, convección y radiación, desempeñan el papel fundamental y controlante se clasifican en tres grupos, siendo estos:

1.2.1 Aislamiento térmico[21]

Los aislantes térmicos son sustancias que dificultan el paso de calor, y que tienen, por tanto, una baja conductividad térmica. Por lo general se suele utilizar sólidos que junto a la baja conductividad térmica, tengan buenas propiedades mecánicas (fibra de vidrio, amianto, espuma de poliuretano, corcho y otros). El aire presenta buenas propiedades como aislante por lo que para evitar la pérdida de calor en algunos aparatos se les recubre con una camisa de aire a presión normal o a baja presión (vacío). En algunos materiales tales como el corcho las características de aislamiento térmico son más debidas al aire ocluido que a los propios materiales. Las conductividades térmicas de los materiales aislantes, son similares a la del aire, pues contienen grandes cantidades de aire atrapado en espacios vacíos.

1.2.1.1 Materiales de aislamiento

El aislamiento térmico se puede producir con diversos materiales o combinaciones de lo mismos, en diversas formas, tamaños y espesores.

[21] PERRY H, Robert. Manual del Ingeniero Químico. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 11-59pp – 11-66pp.

Los materiales más comunes se pueden clasificar de acuerdo con las categorías siguientes: **Minerales celulares o fibrosos:** Alúmina, asbesto, vidrio, perlita, roca, sílice, escoria o vermiculita. **Orgánicos celulares o fibrosos:** Caña, algodón, madera y corteza de árboles (corcho). **Plásticos orgánicos celulares:** Elastómeros, poliestireno, poliisocianato, poliisocianurato y acetato de polivinilo. **Cementos:** Aislamiento y/o acabado. **Metales reflejantes del calor (reflectivos):** Aluminio, níquel, acero inoxidable.

1.2.2 Calentamiento o refrigeración de fluidos como un intercambio de calor sin cambio de fase[22]

Los intercambiadores de calor, son aparatos cuyo objetivo es el de llevar una corriente de flujo a una temperatura determinada, calentándola o refrigerándola mediante otra corriente de fluido calentador o refrigerante. Los fluidos circulan separados por una superficie metálica, a través de la cual intercambian calor.

1.2.2.1 Intercambiadores de calor de doble tubo o tubos concéntricos

Estos intercambiadores están constituidos por dos tubos concéntricos, por los que circula un fluido por el interior del tubo interior y otro fluido por el espacio anular. Intercambian calor a través de la pared que separa los dos fluidos. Se usan para intercambiar pequeños caudales de calor.

[22] PERRY H, Robert. Manual del Ingeniero Químico. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 11-3pp – 11-32pp.

1.2.2.2 Intercambiadores de calor de carcasa (concha) y tubos

Están compuestos por una carcasa cilíndrica en cuyo interior se dispone un haz de tubos de pequeño diámetro, paralelamente al eje del cilindro. Un fluido se hace circular, por el interior de los tubos, mientras que el segundo fluido circula por el interior de la carcasa bañando los tubos del haz por su pared exterior, tiene diversos deflectores colocados en la carcasa los cuales hacen que el fluido externo circule en dirección lo más perpendicular posible al haz de tubos, mejorando la transmisión de calor.

1.2.2.2.1 Intercambiador de calor de espejo fijo

Se utilizan con mayor frecuencia que cualquier otro tipo y la frecuencia de su utilización se ha incrementado en años recientes. Los espejos se soldan a la coraza. Por lo común, se extienden más allá de la coraza y sirven como bridas a las que se sujetan con pernos los cabezales del lado de los tubos. Esta construcción requiere que los materiales se puedan soldar entre sí. Al usar este tipo de intercambiadores, es a menudo necesario tomar en cuanta la expansión térmica diferencial entre los tubos y la coraza durante la operación o de otra manera se desarrollarán esfuerzos térmicos a través del espejo o cabezal de tubos. Esto puede efectuarse usando una junta de expansión en la coraza, de las cuales hay disponible un buen número de ellas.

1.2.2.2.2 Intercambiador de calor de tubo en U

El haz de tubos consiste en un espejo estacionario, tubos en U (o de horquilla), deflectores o placas de soporte y espaciadores y tiras apropiadas. El haz de tubos se puede retirar de la coraza del intercambiador de calor. Se proporciona un cabezal del lado del tubo (estacionario) y una coraza con cubierta integrada, que se suelda a la coraza misma. Cada tuvo tiene libertad para dilatarse o contraerse, sin limitaciones debidas a la posición de los otros tubos. El diseño de tubo en U ofrece la ventaja de reducir el número de juntas. Este tipo de construcción es para altas presiones, esta característica es muy importante, puesto que reduce tanto el costo inicial como el de mantenimiento.

1.2.2.2.3 Intercambiadores de cabezal flotante con empaque exterior

El fluido del lado de la coraza se retiene mediante anillos de empaque, que se comprimen dentro de un prensaestopas mediante un anillo seguidor de junta. Esta construcción fue utilizada con frecuencia en la industria química; sin embargo, su empleo ha venido a menos en los años recientes.

1.2.2.2.4 Intercambiadores de cabezal flotante interno

Se utiliza mucho en las refinerías petroleras, pero su uso ha declinado en años recientes. El haz de tubos es desmontable y el espejo flotante se desplaza para acomodar las dilataciones diferenciales entre la coraza y los tubos.

1.2.2.2.5 Intercambiadores de cabezal flotante removible

La construcción es similar a la del intercambiador de cabezal flotante interno con anillo dividido de respaldo, con la excepción de que la cubierta del cabezal flotante se sujeta directamente con pernos en el espejo flotante. El haz de tubos se puede retirar de la coraza sin desmontar ni la cubierta de la coraza ni la del cabezal flotante. Esta característica reduce el tiempo de mantenimiento durante la inspección y las reparaciones.

1.2.2.2.6 Intercambiadores de tubería doble y secciones multitubulares

Durante muchos años, los intercambiadores de calor de tubería doble se han utilizado de manera preferencial para flujos bajos y altas temperaturas. Los intercambiadores de secciones multitubulares son de construcción similar, pero tienen siete o más tubos en el interior de una coraza. Las secciones de tubería doble y multitubulares permiten un flujo verdadero a contracorriente, especialmente ventajoso para grandes intervalos de temperaturas del flujo y cuando se requiere un acercamiento estrecho en las temperaturas de los fluidos.

1.2.2.3 Intercambiadores de calor de placas

El diseño de estos se basa en sustituir las superficies tubulares por superficies planas con ciertas rugosidades.

1.2.2.3.1 Intercambiadores de placa en espiral

Se hace con un par de placas laminadas para proporcionar dos pasos rectangulares relativamente largos para los fluidos con flujo en contracorriente. La trayectoria continua elimina la inversión del flujo, las desviaciones y los problemas de dilataciones diferenciales. Los sólidos se pueden mantener en suspensión.

1.2.2.3.2 Intercambiadores de placa y armazón

Consisten en placas estándares, que sirven como superficies de transferencia de calor y un armazón para su apoyo, la caída de presión es baja y resulta imposible que haya fugas de fluidos. Las placas estándares de transferencia de calor tienen estrías para recibir empaques de elastómero. El diseño corrugado de las placas les da rigidez, fomenta la turbulencia de los fluidos y asegura la distribución completa del flujo. Las limitantes de diseño incluyen una presión manométrica máxima de 2068 kPa, una temperatura máxima de 149°C.

1.2.2.3.3 Intercambiadores de calor de aleta y placa con soldadura fuerte

Se emplean en las industrias de elaboración, sobre todo en servios por debajo de -45.6°C y en los procesos de separación de gas que funcionan entre 204 y -268°C. Estos intercambiadores de calor se pueden emplear con gases, líquidos y mezcla de líquido-vapor para la transferencia de calor sensible, la evaporación y la condensación.

1.2.2.4 Intercambiadores de calor de grafito

En estos intercambiadores no hay superficies metálicas de intercambio de calor, y el fluido circula por agujeros taladrados en una masa de grafito prensada. Se usan para líquidos altamente corrosivos.

1.2.2.5 Intercambiadores tubulares tipo bayoneta

Son útiles cuando existe una diferencia extrema de temperaturas entre los fluidos del lado de la coraza y lado del tubo, ya que todas las partes sujetas a expansión diferencial son libres para moverse, independientes entre sí. Esta construcción única no sufre falla debido al congelamiento del condensador de vapor, porque el vapor en la parte interna del tubo funde cualquier hielo que pueda formase durante periodos de operación intermitente. Son de costo elevado.

1.2.2.6 Intercambiadores de tubo espiral

Consisten en un grupo de serpentines concéntricos arrollados en espiral, por lo general conectados por múltiples (manifolds). Entre sus características se incluyen flujo a contracorriente, eliminación de las dificultades de la expansión diferencial, velocidad constante y compactación.

1.2.2.7 Intercambiadores de tubo espiral para servicio criogénico

En algunos intercambiadores de servicio criogénico se requiere que exista reversibilidad termodinámica con pequeñas diferencias en temperaturas y es en estos casos cuando se utilizan unidades del tipo espiral. Los intercambiadores en planta para la separación de aire llevan el gas de alta presión dentro de los tubos y el gas de baja presión fuera de los mismos en una combinación de flujos a contracorriente y cruzado. Es importante que se tenga un espaciamiento uniforme de los tubos para evitar la canalización de la corriente del gas de baja presión y la consecuente disminución de la eficiencia.

1.2.2.8 Intercambiadores de película descendente

Los intercambiadores de calor de coraza y tubo de película descendente se han desarrollado para gran variedad de servicios: enfriadores y condensadores de líquidos, evaporadores, absorbedores, congeladores. El funcionamiento de estos intercambiadores se basa en, fluido entre la parte superior de los tubos verticales. Los distribuidores o tubos ranurados logran que el líquido se encuentre en una película que fluye en la superficie interna de los tubos y esta película se adhiere a la superficie del tubo mientras desciende hasta la parte inferior de los tubos. La película en cuestión puede enfriarse, calentarse, evaporarse o congelarse mediante un adecuado vehículo externo de transferencia de calor.

1.2.2.9 Intercambiadores de calor de superficie escariada (raspada)

Tienen un elemento rotatorio con hojas unidas un resorte para presionar o raspar la superficie interna. Por lo general, se utiliza una construcción de tubería doble; el mecanismo de raspado se encuentra en la tubería interna, que es por donde circula el fluido de proceso y el medio de calentamiento o enfriamiento está en la tubería externa. Los intercambiadores de superficie escariada son particularmente adecuados para la transferencia de calor con cristalización, transferencia de calor con gran ensuciamiento de las superficies, transferencia de calor con extracción por disolventes y para transferencia de calor de fluidos de alta viscosidad. Este tipo de intercambiadores se utiliza mucho en las plantas de ceras y parafinas y en las plantas petroquímicas, para cristalización.

1.2.2.10 Intercambiadores de calor enfriados por aire (Aerorrefrigerantes)

Constituyen un tipo especial de intercambiadores de calor en los que un fluido se enfría intercambiando calor con el aire del medio ambiente. Este circula impulsado por ventiladores colocados encima o debajo del haz de tubos, lo que hace que el tiro sea inducido o forzado. Se usan cuando no se dispone de caudales suficientes de agua de refrigeración, o bien el agua sea muy cara o bien produzca mucha corrosión en las instalaciones.

Figura 51. Intercambiador de calor de carcasa (concha) y tubo

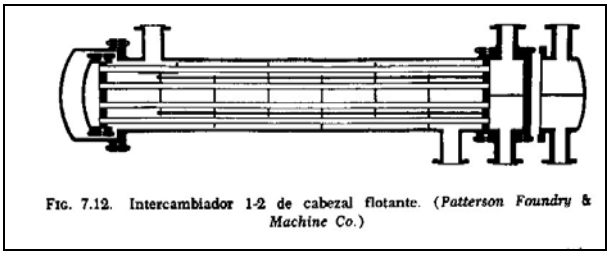


FIG. 7.12. Intercambiador 1-2 de cabezal flotante. (*Patterson Foundry & Machine Co.*)

Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 11-3pp – 11-32pp.

Figura 52. Intercambiadores de calor de doble tubo

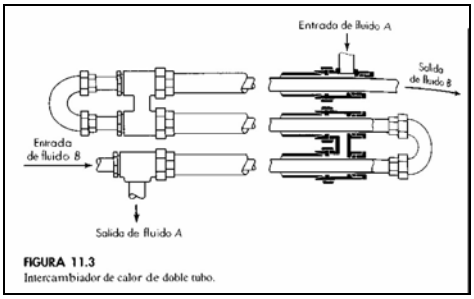
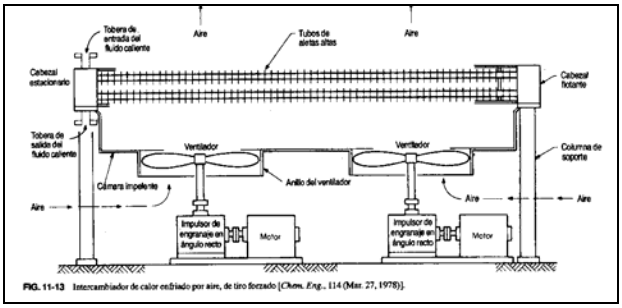


FIGURA 11.3
Intercambiador de calor de doble tubo.

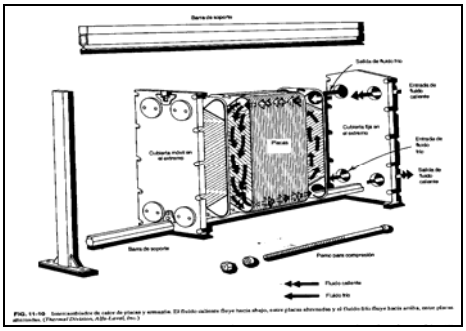
Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico**. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 11-3pp – 11-32pp.

Figura 53. Intercambiador de calor enfriado por aire, de tiro forzado



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 11-3pp – 11-32pp.

Figura 54. Intercambiador de placas y armazón



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico**. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 11-3pp – 11-32pp.

1.2.2.11 Hornos[23]

Son dispositivos de intercambio de calor en los que un sólido o un fluido se calienta básicamente por radiación, gracias a la combustión en un recinto cerrado de un combustible cualquiera, sea este sólido, líquido o gaseoso.

1.2.2.11.1 Hornos por lotes

Estos se emplean primordialmente para tratamientos térmicos de metales como templado, normalización y estiramiento, y para la desecación y la calcinación de artículos de cerámica. Los hornos por lotes se emplean en el procesamiento de compuesto químicos para los mismos fines que los secadores de bandejas y carretillas por lotes, donde la temperatura del proceso o desecación sobrepasa a la que pueden tolerar las paredes metálicas no revestidas.

1.2.2.11.1.1 Hornos de tiro por convección forzada

Se emplean para el tratamiento térmico a granel de piezas metálicas pequeñas. Éstas se suspenden en una canasta de malla, en tanto que las de mayor tamaño se colocan en estantes. El calentamiento del aire se efectúa por medio de bobinas eléctricas. Se tienen un ventilador de lata velocidad de bajo de la canasta que hace circular el aire calentado que asciende por las bobinas o los serpentines, para después bajar atravesando la canasta.

---

[23] PERRY H, Robert. Manual del Ingeniero Químico. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 20-27pp – 20-54pp.

Parte del calor se irradia hacia la cubierta externa de la canasta, pero la mayor parte se transfiere por convección directa del gas circulante a los sólidos.

1.2.2.11.1.2 Hornos de hogar rotatorio

Consta de una cámara de calentamiento recubierta con ladrillos refractarios dentro de la cual se tiene un hogar rotatorio de forma anular, revestido con material refractario. Alrededor de la periferia del hogar rotatorio se utilizan sellos de líquido circulante o arena, para evitar la infiltración del aire.

1.2.2.11.1.3 Hornos de tipo mufla

Se utilizan cuando se deben realizar trabajos que requieren la protección de la carga por medio de atmósferas especiales, como el templado brillante, el templado de herramientas, la sinterización de metales en polvo, etc. En éstos la carga se separa de los quemadores y los gases de combustión mediante un arco refractario, y el calor se transmite por radiación del gas caliente y por convección al arco, así como por radiación de éste a la carga.

1.2.2.11.1.4 Hornos de cuba

Se utilizan para calentamiento de cerámica, las operaciones realizadas en ellos incluyen desecación, oxidación, calcinación y vitrificación. Estos hornos utilizan quemadores horizontales y el combustible puede ser gaseoso, líquido o sólido. **Los hornos de cuba de tiro descendente,** constituyen el tipo más común y se utilizan para ladrillos, tubos, losetas y cerámicas.

Su nombre se deriva de la dirección del flujo del gas de combustión cuando entra en contacto con la carga. Los **hornos de cuba de tiro ascendente** son similares, excepto en lo que respecta a la dirección del flujo de gas, que es ascendente más allá de la carga. Se utilizan comúnmente para cocer utensilios de barro. Los **hornos de estufa** representan una variación de los hornos de cuba de tiro ascendente que sirven para cocer ladrillo común. Los **hornos de cuba de tipo abrazadera** constituyen otra variación de los hornos de tiro ascendente que sirven para cocer ladrillo común. No tienen cubiertas superiores o sistemas para conducir los humos, sino que cuentan sólo con paredes laterales con espacios arqueados para la combustión.

1.2.2.11.2 Hornos continuos

Se utilizan para los mismos trabajos generales que se citaron anteriormente en los hornos de funcionamiento por lotes. Las unidades se calientan con gas, petróleo o electricidad y utilizan circulación directa de los gases de combustión o muflas para transmitir el calor. Los hornos continuos tienen con frecuencia una extensión adicional para enfriar la carga antes de exponerla al aire atmosférico. Los **hornos de túnel para cerámica** que manejan objetos grandes de forma irregulares deben estar equipados con lo necesario, para tener un control preciso de las condiciones de temperatura y humedad con objeto de evitar cuarteamientos y condensación en el producto.

1.2.2.11.3 Hornos rotatorios de calor directo

Es uno de los hornos de proceso para altas temperaturas de mayor importancia. Sustituye al secador rotatorio ordinario, cuando la temperatura de pared sobrepasa a la que puede tolerar un cubierta metálica no revestida (650 a 700 K para acero al carbono) . Las cubiertas o los cascos de hornos rotatorios de cuba están revestidos en parte o en toda la longitud con ladrillos refractarios para evitar el sobrecalentamiento del acero, que traería como consecuencia su debilitamiento.

1.2.2.11.4 Hornos de hogar

El horno Mannheim representa un diseño especial de los hornos circulares de hogar, en el cual el ácido sulfúrico reacciona con cloruro de sodio para producir un conglomerado salino y ácido clorhídrico. Consta de un hogar refractario, cuenta con un arco de carburo de silicio. En el horno de cocido se hacen circular gases de combustión calientes, y la porción principal del calor se transmite por el arco y se irradia al producto en el hogar. Los materiales de alimentación se mezclan y cargan en forma continua en el centro del hogar, en donde se agitan por medio de brazos agitadores de bajo mando. La carga se mueve en forma gradual hacia la periferia conforme la reacción genera gas de cloruro de hidrógeno. El gas se extrae por un ducto separado hasta el sistema de absorción.

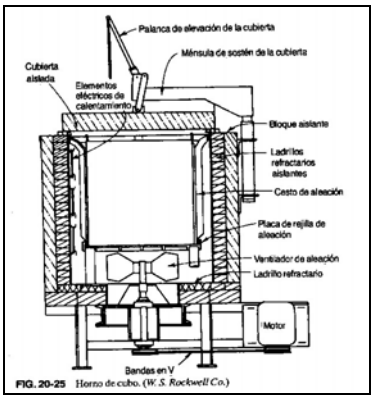
1.2.2.11.5 Hornos de hogares múltiples

Estos equipos constan de una cantidad determinada de hogares de forma anular que van montados uno sobre otro. Estos sirven para calcinar minerales, desecar y calcinar cal, magnesita y lodos de carbonatos, reactivar tierras de decoloración y para la quema de sulfuros para producir dióxido de azufre.

1.2.2.11.6 Hornos de cubilote

La aplicación más antigua e importante del horno de cubilote son los altos hornos, en los cuales se producen lingotes de hierro. Otra de sus aplicaciones frecuentes es la obtención de fósforo a partir de roca fosfórica. También se emplean con mucha frecuencia para productores de gas. Asimismo, para muchos compuestos químicos que se elaboran en hornos de cubilote partiendo de mezclas preconformadas de los componentes de reacción.

Figura 55. Horno de cubo



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 20-27pp – 20-54pp.

Figura 56. Horno de hogar rotatorio

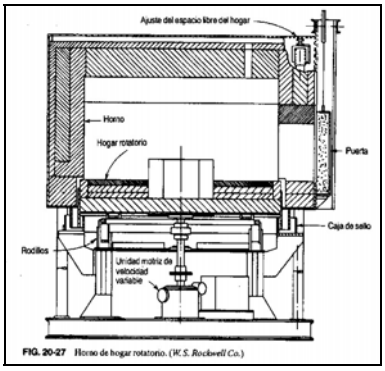


FIG. 20-27 Horno de hogar rotatorio. (*W.S. Rockwell Co.*)

Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 20-27pp – 20-54pp.

Figura 57. Hornos rotatorios

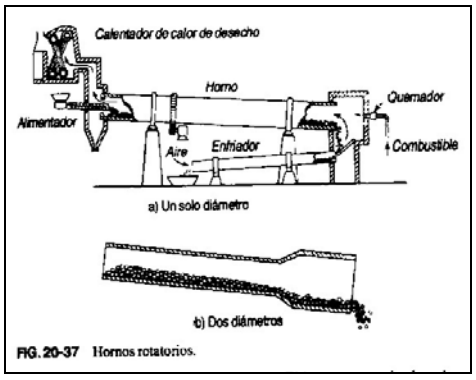


FIG. 20-37 Hornos rotatorios.

Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico**. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 20-27pp – 20-54pp.

1.2.2.12 Calderas[24]

Es un generador de vapor de tipo de intercambiador de calor de concha y tubos para producir vapor que se requiere en el proceso, para procesos con generación de energía eléctrica y, a veces, sólo para generación de energía eléctrica.

Máquinas de vapor alternativas de variada construcción han sido usadas durante muchos años como agente motor, pero han ido perdiendo gradualmente terreno frente a las turbinas. Entre sus desventajas encontramos la baja velocidad y (como consecuencia directa) el mayor peso por KW de potencia, necesidad de un mayor espacio para su instalación e inadaptabilidad para usar vapor a alta temperatura.

Las calderas de vapor, constan básicamente de 2 partes principales:

a) Cámara de agua:

Recibe este nombre el espacio que ocupa el agua en el interior de la caldera, el nivel de agua se fija en su fabricación, de tal manera que sobrepase en unos 15 cms por lo menos a los tubos o conductos de humo superiores. Con esto, a toda caldera le corresponde una cierta capacidad de agua, lo cual forma la cámara de agua. Según la razón que existe entre la capacidad de la cámara de agua y la superficie de calefacción, se distinguen calderas de gran volumen, mediano y pequeño volumen de agua.

[24] McCABE, Warren y otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 2002. 427pp-433 pp.

b) Cámara de vapor:

Es el espacio ocupado por el vapor en el interior de la caldera, el cual debe ser separado del agua en suspensión. Cuanto más variable sea el consumo de vapor, tanto mayor debe ser el volumen de esta cámara, de manera que aumente también la distancia entre el nivel del agua y la toma de vapor.

Adicionalmente las calderas tienen dentro de su configuración gran cantidad de elementos en cuanto a operación y control.

Adicionalmente un sistema de generación de vapor tiene:

- Válvulas de seguridad
- Válvulas reguladoras de flujo
- Bomba de alimentación
- Tanque de condensados
- Trampas de vapor
- Redes de distribución
- Equipos consumidores
- Sistemas de recuperación de calor

Las calderas se pueden dividir por:

- Su configuración: vertical y horizontal ,
- Por el mecanismo de transmisión de calor dominante : Convección, Radiación, Radiación y Convección;
- Por el combustible empleado: Combustibles sólidos, Combustibles líquidos, Combustibles gaseosos, Combustibles especiales (Licor negro, bagazo, etc.):
- Por el tiro: de tiro natural, de hogar presurizado, de hogar equilibrado;
- Por el modo de gobernar la operación: De operación manual, Semiautomáticos y Automáticos; o
- Por la disposición de los fluidos: pirotubulares o acuotubulares.

A continuación se describe la división de calderas más común por la disposición de fluidos:

1.2.2.12.1 Calderas pirotubulares

En este tipo de calderas los gases de combustión circulan por el interior de los tubos y manejan presiones de operación de 0-300 PSIG.

Ventajas:

- Menor costo inicial debido a la simplicidad de su diseño.
- Mayor flexibilidad de operación.
- Menores exigencias de pureza en el agua de alimentación.
- Son pequeñas y eficientes.

Inconvenientes:

- Mayor tiempo para subir presión y entrar en funcionamiento.
- No son empleables para altas presiones.

1.2.2.12.2 Calderas acuotubulares

En este tipo de calderas el agua circula por el interior de los tubos y manejan presiones de operación de 0-2200 PSIG.

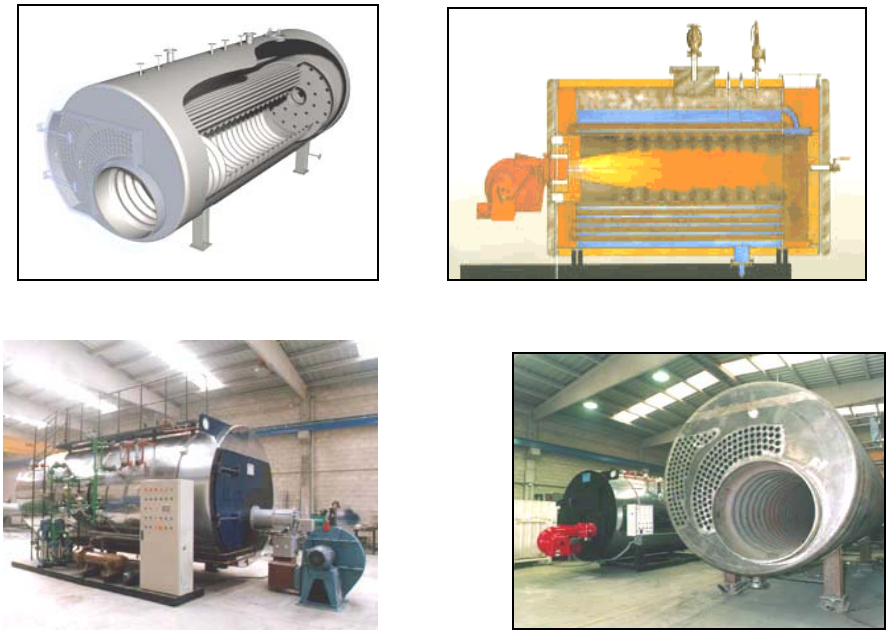
Ventajas:

- Pueden ser puestas en marcha rápidamente y trabajan a 300 o mas psi.

Inconvenientes:

- Mayor tamaño y peso, mayor costo.
- Debe ser alimentada con agua de gran pureza.

Figura 58. Calderas Pirotubulares y acuotubulares



Fuente: McCABE, Warren y otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 2002. 427pp-433 pp.

1.2.3 Evaporación, condensación, sublimación y solidificación, como un intercambio de calor con cambio de fase

1.2.3.1 Evaporadores[25]

Los evaporadores son intercambiadores de calor cuyo objetivo es el de concentrar una disolución obteniéndose vapor del disolvente. Es decir concentrar una solución consistente en un soluto no volátil y un solvente volátil.

[25] PERRY H, Robert. Manual del Ingeniero Químico. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 11-34pp – 11-39pp.

En la mayor parte de las evaporaciones el solvente es agua. La evaporación se realiza vaporizando una parte del solvente para producir una solución concentrada de licor espeso. Normalmente se dispone varios evaporadores combinados, en los que se emplea el vapor generado en un evaporador como medio de calefacción del siguiente, los cuales se denominan evaporadores de múltiple efecto.

1.2.3.1.1 Evaporadores de circulación forzada

Aunque pueden no ser los más económicos para muchos usos, los evaporadores de circulación forzada son apropiados para gran variedad de aplicaciones. El empleo de una bomba para asegurar la circulación sobre la superficie de calentamiento hace posible separar las funciones de transferencia de calor, separación de vapor, líquido y cristalización. La bomba retira líquido de la cámara de evaporación y lo obliga a pasar por el elemento de calentamiento, de regreso a dicha cámara. La circulación se mantiene sea cual sea el índice de evaporación, por lo que ese tipo de evaporador es muy adecuado para operaciones de cristalización en la cual los sólidos se deben mantener en suspensión en todo momento. Este tipo de evaporadores no es muy apropiado para las soluciones salinas.

1.2.3.1.2 Evaporadores verticales de tubo corto

Es uno de los primeros tipos, que todavía se emplea mucho en forma comercial. Su uso principal, en la actualidad, es la evaporación del jugo de la caña de azúcar.

La circulación más allá de la superficie de calentamiento se induce mediante la ebullición en los tubos. El cuerpo es un cilindro vertical, casi siempre de hierro colado y los tubos se dilatan en espejos horizontales que cubren el diámetro del cuerpo. La circulación y la transferencia de calor en este tipo de evaporador se ven afectadas fuertemente por el nivel del líquido.

1.2.3.1.3 Evaporadores verticales de tubo largo

Se logra una mayor evaporación total en este tipo que en todos los demás combinados, porque es normalmente el más barato por unidad de capacidad. El evaporador vertical de tuvo largo consiste en un intercambiador de calor de coraza y tubo vertical de paso simple, que se descarga en un cabezal de vapor relativamente pequeño. Son especialmente efectivos para concentrar líquidos que tienden a formar espuma. La espuma se rompe cuando la mezcla de líquido y vapor de alta velocidad choca contra las paredes deflectoras de la carga de vapor.

1.2.3.1.4 Evaporadores de tubo horizontal

En este tipo de evaporadores, el vapor de agua se encuentra dentro y la solución fuera de los tubos. Existen **evaporadores de tubo horizontal sumergido** el cual es utilizado en raras ocasiones, excepto para la preparación de agua de alimentación a las calderas.

Las *ventajas* de los evaporadores de tubos horizontales son: espacio superior muy bajo, área libre grande para el vapor-líquido en el tipo de tubo sumergido, costo relativamente bajo, buenos coeficiente de transferencia de calor, desescamado semiautomático sencillo; entre las *desventajas* se encuentra que no son adecuados para los líquidos que dejan deposiciones de sales, inapropiados para líquidos que forman escamas.

1.2.3.1.5 Evaporadores agitados de película delgada

Emplean una superficie de calentamiento que consiste en un tubo de diámetro grande, que puede ser recto o cónico, horizontal o vertical. El líquido se rocía sobre la pared del tuvo mediante un ensamblaje giratorio de aspas, que mantiene un franqueo estrecho de la pared o se introduce en realidad en la película de líquido de la pared. La principal ventaja de este tipo de evaporador es su capacidad para conseguir elevadas velocidad de transferencia de calor con líquidos viscosos. Este evaporador es en particular efectivo con materiales viscoso sensibles al calor tales como gelatina, látex de caucho, antibióticos y jugos de frutas. Sus *desventajas* son el costo elevado; las partes internas móviles que requieren un mantenimiento considerable; y la baja capacidad de cada unidad.

1.2.3.1.6 Evaporadores sin superficies de calentamiento

El evaporador de combustión sumergida utiliza el burbujeo de los gases de combustión a través del líquido como medio de transferencia de calor. Consiste simplemente en un tanque para retener el líquido, un quemador y un distribuidor de gas, que se pueden hacer descender al interior del líquido y un sistema de control de la combustión. Puesto que no hay superficies de calentamiento en las que se puedan depositar incrustaciones, este evaporador es muy apropiado para los líquidos muy incrustantes. Una de las dificultades que se encuentran con frecuencia en el empleo de evaporadores de combustión sumergida es una pérdida elevada por arrastre. Asimismo, esos evaporadores no se pueden utilizar cuando sea importante el control del tamaño de los cristales.

Figura 59. Tipos de evaporadores

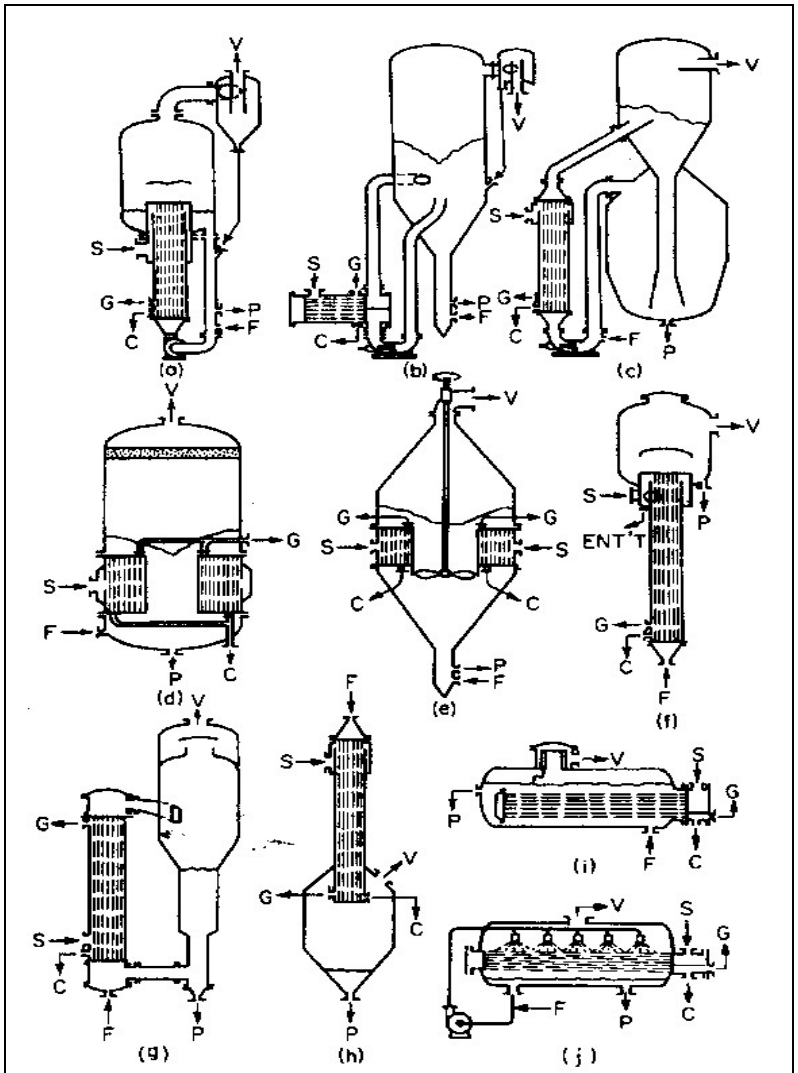


FIG. 11-21 Tipos de evaporadores. *a*) Circulación forzada. *b*) Circulación forzada de tubo sumergido. *c*) Cristalizador del tipo de Oslo. *d*) Vertical de tubo corto. *e*) De calandria y hélice. *f*) Vertical de tubo largo. *g*) Vertical de tubo largo con recirculación. *h*) De película descendente. *i*) Evaporador de tubo horizontal. *C*, condensado, *F*, alimentación, *G*. ventila, *P*, producto, *S*, vapor de agua, *V*, vapor, *ENT ' T*, salida de arrastre separado.

Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 11-34pp – 11-39pp.

1.2.3.2 Condensadores[26]

Los condensadores son intercambiadores de calor que tienen por objetivo la condensación de un vapor mediante un líquido frío. Es decir son equipos de transferencia de calor utilizados para licuar vapores eliminando su calor latente. El calor latente se retira absorbiéndolo por un líquido más frío denominado refrigerante.

Por regla general, los vapores del último efecto de los evaporadores de efecto múltiple salen al vacío, esto es, a presiones inferiores a la atmosférica. Estos vapores deben condensarse y descargarse como líquido a presión atmosférica. Esto se logra al condensar los vapores usando agua de enfriamiento. El condensador puede ser de superficie, donde el vapor por condensar y el líquido de enfriamiento están separados por una pared metálica, o de contacto directo, donde el vapor y el líquido de enfriamiento se mezclan directamente.

1.2.3.2.1 Condensadores de superficie[27]

Los condensadores de superficie se emplean cuando no se desea que se mezclen el condesado y el agua de enfriamiento. En general, son condensadores de tubos y coraza con vapor en la coraza y agua de enfriamiento en los tubos con flujo de pasos múltiples. La corriente de vapor casi siempre contiene gases no condensables.

---

26 McCABE, Warren y otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 2002. 493pp-495 pp

27 GEANKOPLIS, Christie J. **Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias**. 3ª Ed. México: Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V., 2003. 569pp.

Éstos pueden ser aire, CO_2, N_2 y otros gases, incorporados como gases disueltos en la corriente de alimentación, o bien que provienen de descomposiciones en la solución. Estos gases no condensables se desfogan en un tubo de ventilación en cualquier punto bien frío del condensador. Si el vapor que se condensa está por debajo de la presión atmosférica, el líquido condensado que sale del condensador de superficie puede extraerse bombeando y los gases no condensables con una bomba de vacío. Los condensadores de superficie son mucho más costosos y utilizan mayor cantidad de agua de enfriamiento, por lo que no se emplean cuando un condensador de contacto directo resulta adecuado. Las variaciones de estos condensadores consisten en los tubos ya que los hay en tubos horizontales y verticales.

1.2.3.2.2 Condensadores de contacto directo [27]

En los condensadores de contacto directo el agua de enfriamiento se pone en contacto directo con el vapor para condensarlo. Uno de los tipos más comunes de condensadores de contacto directo es el **barométrico a contracorriente.** El vapor entra al condensador y se condensa al elevarse contra una cortina de gotas de agua de enfriamiento. El condensador se sitúa en la parte superior de un tubo largo de descarga. El condensador está a una altura suficiente por encima del punto de descarga del tubo como para que la column de agua en el interior de éste compense de manera sobrada la diferencia de presión entre la presión absoluta baja en el condensador y la atmosférica.

---

[27] GEANKOPLIS, Christie J. **Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias**. 3ª Ed. México: Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V., 2003. 569pp.

De esta manera, el agua se descarga por gravedad a través de un recipiente de sellado en el extremo inferior. Se una altura aproximada de 10.4 m (34 pies).

Otro tipo de condensador de contacto directo es el **barométrico de chorro**. Varios chorros de agua a alta velocidad actúan no sólo como condensadores del vapor, sino también como medio de arrastre de los gases no condensables a través del tubo de descarga. Los condensadores de chorro requieren más agua que los de tipo barométrico común y son más difíciles de regular a velocidades de vapor bajas.

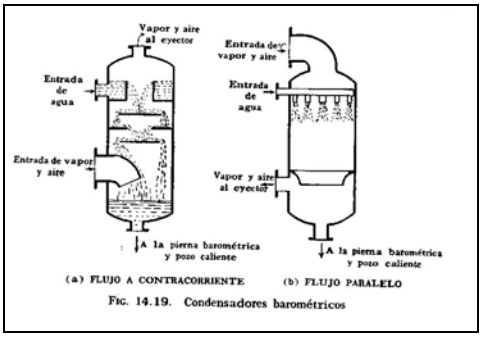
Algunas de las ventajas de los condensadores en general son:

- Recuperación del producto puro (en el caso de condensadores de contacto directo)
- El agua utilizada como medio de enfriamiento en un condensador de contacto indirecto (es decir, un intercambiador de calor de cubierta y tubos) no está en contacto con el gas contaminado y, en consecuencia puede volverse a utilizar después del enfriamiento.

Algunas de las desventajas de los condensadores en general son:

- Eficiencia de eliminación relativamente baja en el caso de contaminantes gaseosos (a las concentraciones características en las aplicaciones para el control de la contaminación)
- Los requerimientos de enfriamiento pueden se extremadamente costosos.

Figura 60. Condensadores barométricos



Fuente: GEANKOPLIS, Christie J. **Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias**. 3ª Ed. México: Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V., 2003. 569pp.

1.3 Operaciones Unitarias físicas controladas por la transferencia de materia

Están basadas en un fenómeno denominado difusión. Las masas se ponen en movimiento o intentan mezclarse como consecuencia de que existen en el fluido gradientes de concentración. Cuando se colocan dos fases que no se encuentran en equilibrio en relación con un determinado componente lo que ocurre es que dicho componente se transfiere de una a otra intentando alcanzar el equilibrio.

Aprovechando este fenómeno de la difusión se ponen en contacto fases distintas y lo que sucede es que los componentes se intentan igualarse y se puede realizar el diseño de aparatos para lograr dicha separación. Esta separación puede tener dos objetivos:

- Separar una sustancia que esté impurificando un fluido.
- Separar un compuesto que tenga un valor intrínseco mayor estando libre.

También es posible la separación basándonos en la diferencia de velocidades de difusión a través de una membrana porosa. Es necesario realizarlo en repetidas ocasiones y no siempre es más corriente la separación por transferencia entre fases.

Este tipo de operaciones unitarias regidas por transferencia de materia se divides en:

1.3.1 Por medio de la existencia de una interfase

1.3.1.1 Contacto interfacial gas- líquido[28]

Los sistemas de contacto gas-líquido se utilizan para la transferencia de masa, calor y cantidad de movimiento entre las fases, con las limitaciones del equilibrio físico y químico. Los equipos de proceso que se utilizan para contacto gas-líquido se basan en una combinación de principios de operaciones de tres categorías:

- Tipos de flujo de las corriente: a contracorriente, a corriente paralela, flujo cruzado,
- Mecanismo bruto de transferencia: diferencial e integral,
- Fase continua: líquido y/o gas.

[28] McCABE, Warren y otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 2002. 693pp-794 pp.

Entre los equipos de proceso más utilizados para contacto gas-líquido se encuentran:

- **Columna de platos:** Las torres de platos son cilindros verticales en los cuales el líquido y el gas se ponen en contacto en forma de pasos sobre platos o charolas. El líquido entra en la parte superior y fluye en forma descendente por gravedad. En el camino, fluye a través de cada plato y a través de un conducto, al plato inferior. El gas pasa hacia arriba, a través de orificios de un tipo u otro en el plato; entonces burbujea a través del líquido para formar una espuma, se separa de la espuma y pasa al plato superior. El efecto global es un contacto múltiple a contracorriente entre el gas y el líquido, aunque cada plato se caracteriza por el flujo transversal de los dos. Cada plato en la torre es una etapa, puesto que sobre el plato se ponen los fluidos en contacto íntimo, ocurre la difusión interfacial y los fluidos se separan. El número de platos teóricos o etapas en el equilibrio en una columna o torre sólo depende de lo complicado de la separación que se va a llevar a cabo y sólo está determinado por el balance de materia y las consideraciones acerca del equilibrio. La eficiencia de la etapa o plato y por lo tanto, el número de platos reales se determina por el diseño mecánico utilizado y las condiciones de operación. Por otra parte, el diámetro de la torre depende de las cantidades de líquido y gas que fluyen a través de la torre por unidad de tiempo. Inicialmente las columnas más utilizadas fueron las de platos de campanas de burbujeo, mientras que en la actualidad la mayor parte de las columnas contiene platos perforados o platos de válvula. Las columnas de platos que se utilizan para el contacto líquido-gas se pueden clasificar según el tipo de flujo en sus dispositivos de contacto: *1) platos de flujo cruzado y 2) platos de flujo a contracorriente*.

Las torres de platos son igualmente útiles en absorción como en rectificación, y los fundamentos de diseño de platos se aplican a ambas operaciones.

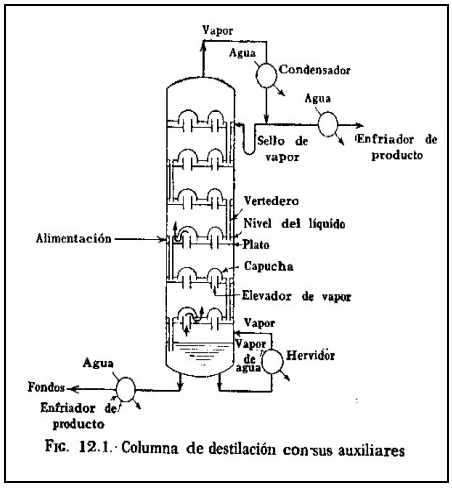
- **Columna empacada:** Consiste en una columna cilíndrica, o torre, equipada con una entrada de líquido y un distribuidor en la parte superior; salidas para el gas y el líquido por la parte superior e inferior, respectivamente; y una masa soportada de cuerpos sólidos inertes que recibe el nombre de torre empacada. El líquido entrante se distribuye sobre la parte superior del empaque mediante un distribuidor y, en la operación ideal, moja de manera uniforme la superficie del empaque. Los empaques de las torres se dividen en tres principales tipos: aquellos que son cargados de forma aleatoria en la torre, los que son colocados a mano, y aquellos que se conocen como empaques ordenados o estructurados. Los empaques aleatorios consisten en unidades de 6 a 75mm en su dimensión mayor. Las unidades de empaques ordenados son de tamaños comprendidos entre unidades de 50 a 200mm. La mayoría de los empaques aleatorios de las torres se construyen con materiales baratos e inertes, tales como arcilla, porcelana o diferentes plásticos. A veces se utilizan anillos metálicos de paredes delgadas, de acero o aluminio. Entre los empaques más comunes de torres están las monturas de cerámicas Berl y los anillos Rasching, monturas Intalox, monturas de Super Intalox, anillos Pall, empques Hy-paf metálicos y Flexirings entre otros.

- **Torres de paredes mojadas:** Una película delgada de líquido que desciende por el interior de un tubo vertical, con el gas que fluye a contracorriente o a corriente paralela, constituye una torre de paredes mojadas.

Industrialmente se han utilizado como absorbedores para ácido clorhídrico, en donde la absorción va acompañada por una gran evolución de calor. En este caso, la torre de paredes mojadas está rodeada por agua fría que fluye rápidamente. La caída de presión del gas en estas torres es probablemente menor que en cualquier otro aparato de contacto gas-líquido, para un conjunto dado de condiciones de operación.

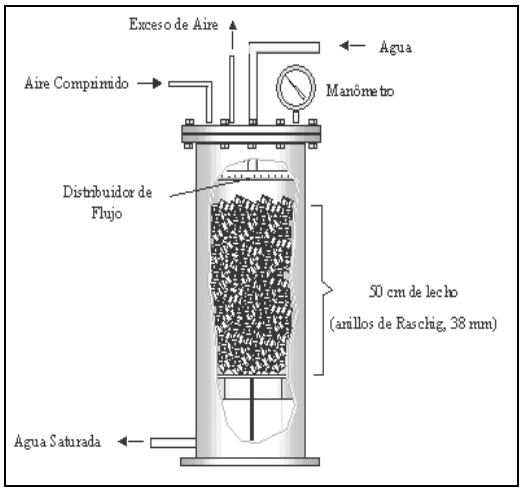
- **Torres atomizadoras:** El líquido puede atomizarse en una corriente gaseosa por medio de una boquilla que dispersa al líquido en una aspersión de gotas. El flujo puede ser a contra-corriente, como en las torres verticales con el líquido atomizado hacia abajo, o paralelo, como en las cámaras horizontales de aspersión. Estos aparatos tienen la ventaja de una baja caída en la presión del gas; pero, por otra parte, tienen ciertas desventajas. El costo de bombeo para el líquido es relativamente elevado, debido a la caída de presión a través de la boquilla atomizadora. La tendencia del líquido a ser arrastrado por el gas saliente es considerable, y los eliminadores de neblina son necesarios casi siempre. A menos que la relación diámetro/longitud sea muy pequeña, el gas se mezclara bastante con el atomizado; además, no se puede obtener completa ventaja del flujo a contracorriente. Sin embargo, la relación diámetro/longitud no puede, generalmente, hacerse demasiado pequeña, puesto que entonces el atomizado alcanzará rápidamente las paredes de la torre y no servirá como atomizado.

Figura 61. Columna de platos



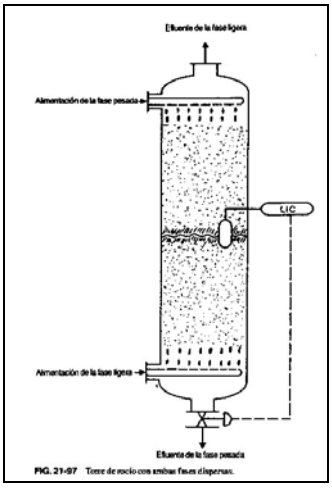
Fuente: McCABE, Warren y otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 2002. 693pp-794 pp.

Figura 62. Columna empacada



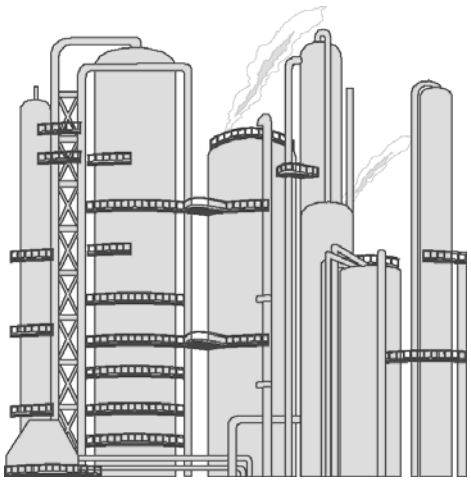
Fuente: McCABE, Warren y otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 2002. 693pp-794 pp.

Figura 63. Columna de rocío



Fuente: McCABE, Warren y otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 2002. 693pp-794 pp.

Figura 64. Torres de destilación



Fuente: McCABE, Warren y otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 2002. 693pp-794 pp.

Figura 65. Torres de absorción

Fuente: McCABE, Warren y otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 2002. 693pp-794 pp.

1.3.1.1.1 Destilación

Es una Operación Unitaria de las más utilizadas en la industria química, consiste en la separación de dos o más componentes de una mezcla líquida aprovechando las diferencias en sus presiones de vapor. La mezcla líquida en su punto de ebullición desprenderá vapores más ricos en componente volátiles que del líquido. Los vapores se condensan aparte constituyendo el destilado. Cuando la mezcla a destilar contiene solo dos componentes se dice que es una *destilación binaria*, y cuando tiene más de dos componentes recibe el nombre de *destilación de multicomponentes.*

1.3.1.1.1.1 Destilación flash o instantánea

Consiste en la vaporización de una fase definida del líquido, en una manera tal que el vapor que se forma está en equilibrio con el líquido residual, separando el vapor del líquido y condensando el vapor. La destilación flash se utiliza a gran escala en la refinación del petróleo.

1.3.1.1.1.2 Destilación continua con rectificación

La rectificación continua, o fraccionamiento, es una operación de destilación a contracorriente en varias etapas. Por lo general, para una solución binaria, con algunas excepciones, es posible separar mediante este método la solución de sus componentes y recuperar cada componente en el estado de pureza que se desee. Probablemente, la rectificación es el método de separación utilizado con mayor frecuencia. La mezcla de alimentación se introduce de modo más o menos centrado en una cascada vertical de etapas. El vapor que se eleva en la sección arriba del alimentador (llamada la sección de ***absorción, enriquecedora o rectificadora)*** se lava con el líquido para eliminar o absorber el componente menos volátil. El líquido de lavado se obtiene condensando el vapor que sale por la parte superior, enriquecido con el componente más volátil. El líquido devuelto a la parte superior de la torre se llama ***reflujo*** y el material que se elimina permanentemente es el ***destilado,*** que puede ser un vapor o un líquido, enriquecido con el componente más volátil.

En la sección debajo del alimentador ***(sección agotamiento),*** el líquido se desorbe del componente volátil mediante vapor que se produce en el fondo por la evaporación parcial del líquido en el fondo en el hervidor. El líquido eliminado, enriquecido con el componente menos volátil, es el ***residuo o fondos.***

1.3.1.1.1.3 Destilación discontinua

En algunas plantas pequeñas, los productos volátiles se recuperan a partir de una solución líquida por destilación discontinua. La mezcla se carga en un destilador o hervidor y se le suministra calor por medio de un serpentín o a través de la pared del recipiente hasta que el líquido alcanza la temperatura de ebullición y se vaporiza entonces una parte de la carga. En el método más sencillo de operación, los vapores pasan directamente desde un destilador hasta el condensador. El vapor que en un determinado momento sale del destilador está en equilibrio con el líquido existente en el mismo, pero como el vapor es más rico en el componente más volátil, las composiciones del líquido y el vapor no son constantes. La destilación discontinua con un destilador sencillo no conduce a una buena separación, salvo que la volatilidad relativa sea muy grande. En muchos casos, se emplea una **columna de rectificación con reflujo** para mejorar la eficiencia de una destilación discontinuo.

1.3.1.1.1.4 Destilación de multicomponentes

En la industria, muchos de los procesos de destilación incluyen la separación de más de dos componentes. Los principios generales del diseño de las torres de destilación de multicomponentes son iguales en muchos aspectos a los descritos en los sistemas binarios.

Se tiene un balance de masa para cada componente de la mezcla de multicomponentes. Los balances de entalpía o calor que se realizan son semejantes a los del caso binario. Los datos de equilibrio se usan para calcular los puntos de ebullición y de rocío, y también se utilizan los conceptos de reflujo mínimo y reflujo total como casos limitantes. Sin embargo en la destilación binaria, una torre se usa para separar dos componentes en componentes relativamente puros, en cambio en una mezcla de multicomponentes de *n* componentes, serán necesarios *n-1* fraccionadores para la separación.

1.3.1.1.1.5 Destilación azeotrópica y extractiva

Se añade un tercer componente que en el caso de la extractiva separa los dos componentes al formar un residuo con uno de los componentes y el otro queda como destilado. En el caso de la destilación azeotrópica, el tercer componente forma un azeótropo con uno de los otros dos, disminuye la presión de vapor de uno de ellos saliendo como residuo o destilado. Estos métodos requieren de una posterior separación.

1.3.1.1.2 Absorción[29]

Consiste en poner un gas en contacto con un disolvente líquido para que éste disuelva determinados componentes del gas, que queda libre de los mismos. Un aparato que se utiliza con frecuencia en la absorción de gases son las torres empacadas.

[29] McCABE, Warren y otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 2002. 589pp-636pp.

El diámetro de una torre empacada de absorción depende de las cantidades de gas y líquido que se vayan a tratar, de sus propiedades, y de la relación de una corriente con otra. La altura de la torre, y por tanto el volumen total del empaque depende de la magnitud de los cambios deseados en la concentración y de la velocidad de transferencia de masa por unidad de volumen empacada.

1.3.1.1.3 Desabsorción

Es la Operación Unitaria contraria a la absorción. En ella un gas disuelto en un líquido es arrastrado por un gas inerte siendo eliminado el líquido. En muchos casos, un soluto que se absorbe a partir de una mezcla gaseosa, se desorbe a partir del líquido para recuperar el soluto en una forma más concentrada y regenerar la solución absorbente. Con el fin de favorecer las condiciones de desorción se aumenta la temperatura o se reduce la presión total, o bien, se realizan ambas modificaciones de manera simultánea.

1.3.1.2 Contacto interfacial liquido-líquido

1.3.1.2.1 Extracción líquido-líquido[30]

Se basa en la disolución de uno o varios de los componentes de una mezcla líquida en un disolvente selectivo, en este caso el disolvente ha de ser inmiscible con la fase líquida que contiene el soluto.

30 McCABE, Warren y otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 2002. 808pp-830pp.

La extracción líquido-líquido se utiliza principalmente cuando la destilación no es práctica o su empleo es demasiado costoso. Por ejemplo la penicilina se recupera del caldo de fermentación por extracción con un solvente, tal como el acetato de butilo. Uno de los principales usos de la extracción es separar los productos del petróleo que tienen diferentes estructuras química pero aproximadamente el mismo punto de ebullición. El equipo de extracción opera ya sea por cargas o de forma continua; entre ellos se encuentran los **Mezcladores-sedimentadores,** y una de sus aplicaciones típicas es el proceso Duo-Sol para aceites lubricantes. Las **Columnas de pulverización (rociado o spray)** utilizado frecuentemente para la extracción de sal con amoniaco a partir de sosa cáustica. Las **columnas empacadas** utilizadas para la recuperación de fenol; las **columnas de platos perforados,** empleadas en el proceso furfural para aceites lubricantes; las **columnas de placas deflectoras,** utilizadas en la recuperación de ácido acético, y las **torres agitadas**, utilizadas en los químicos farmacéuticos y orgánicos.

1.3.1.3 Contacto interfacial líquido-sólido

1.3.1.3.1 Adsorción[31]

Consiste en la eliminación o separación de algunos componentes de una mezcla líquida mediante un sólido adsorbente ajeno a la misma a veces se denomina a esta operación percolación. Los adsorbentes son materiales naturales o sintéticos de estructura amorfa y microcristalina.

---

[31] PERRY H, Robert. Manual del Ingeniero Químico. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 16-5pp – 16-6pp, 19-50pp-19-53pp.

Entre los más utilizados en gran escala se encuentra el **carbón activado, la alúmina activada, el gel de sílice, la tierra de fuller, otras arcillas y las mallas moleculares.** A temperaturas ordinarias, la adsorción es causada por lo general por las fuerzas intermoleculares en vez de por la formación de nuevos enlaces químicos y, en este caso, se conoce como **adsorción física o fisisorción.** A temperaturas más elevadas (arriba, aproximadamente, de 200°C o 400°F) se dispone de la energía de activación necesaria para hacer o romper las uniones químicas y, si dicho mecanismo prevalece, la adsorción se conoce como **quimisorción o adsorción activada.** Los principales usos de la adsorción en fase líquida incluyen:

- La decoloración, el teñido o el desengomado de combustibles y lubricantes, disolventes orgánicos y aceites vegetales y animales,
- La recuperación de productos químicos biológicos (antibióticos, vitaminas, saborizantes) procedentes de caldos fermentados o extractos de plantas,
- La clarificación de los alimentos y los productos farmacéuticos,
- La decoloración de mieles crudas de azúcar,
- La purificación de los efluentes de proceso para control de la contaminación,
- El tratamiento del suministro de agua por lo que respecta a olores, sabor o color,
- La separación de hidrocarburos isoméricos aromáticos o alifáticos.

Se utilizan tres tipos principales de equipos de adsorción de sólido-líquido:

1) Unidades por lotes,
2) Lechos fijos de adsorbentes por los que pasa el fluido de procesamiento, con interrupción periódica para la regeneración y
3) Sistemas que proporcionan el movimiento a contracorriente o en corriente en paralelo de adsorbente y fluido, en una operación continua o casi continua (intermitente).

1.3.1.3.1.1 Unidades por lotes

Los métodos por lotes se adaptan muy bien al empleo en laboratorios y se han aplicado también en mayor escala en algunos casos específicos. ***Método de laboratorio***, al purificar los productos de la síntesis química orgánica, con frecuencia se utilizan arcillas y carbones decolorantes como adsorbentes de contacto y, seguidamente se separan mediante filtración. ***Filtración por contacto de aceites lubricantes,*** este proceso se utiliza para retirar materiales coloreados y de formación de carbono de los materiales lubricante, así como también las trazas de productos formados en el tratamiento con ácido sulfúrico. ***Operaciones de mezcla y sedimentación,*** la mezcla y la filtración se pueden realizar en el mismo recipiente, utilizando materiales adsorbentes de partículas grandes por lo que se puede drenar un líquido con facilidad. ***Contacto de lechada-adsorbente granular,*** cuando el licor de procesamiento es una lechada en vez de un líquido claro, se prefieren en general el contacto con materiales adsorbentes al contacto de tipo de infiltración. Este último incluye menos agitación y tiene menos probabilidad de dar una acumulación progresiva de las partículas de lechada en el cuerpo del adsorbente.

1.3.1.3.1.2 Lechos fijos

El método de contacto de fluido-sólido que se utilizan con mayor frecuencia para las operaciones de adsorción son las unidades de tipo columna con las partículas sólidas empacadas en una disposición relativamente fija.

1.3.1.3.1.3 Operaciones continuas y casi continuas

Se han propuesto, tanto para operaciones de adsorción de gas como de líquido, unidades de flujo continuo que incluyen el transporte de partículas sólidas. El adsorbente típico de carbón activado granular, se incluye en un sistema diseñado para permitir la regeneración térmica del carbón, se puede clasificar como unidad continua a contracorriente. El tanque de adsorbente suele ser un recipiente vertical cilíndrico a presión, con distribuidores de fluido en la parte superior y la inferior, similar a la disposición de un intercambiador iónico. La columna se llena de carbón granular. El flujo de fluido es ascendente y el carbón se desplaza intermitentemente hacia abajo, abriendo una válvula en el fondo e inyectando una carga medida de carbón en la parte superior del recipiente. La porción agotada se transfiere al tanque de retiro, en donde se desplaza el producto residual. Luego se deshidrata y, luego, se alimenta al horno de regeneración, de donde regresa finalmente al adsorbente.

1.3.1.3.2 Desadsorción

Es la operación contraria a la adsorción, se realiza para la regeneración de los lechos sólidos que han servido como adsorbentes para su reutilización.

1.3.1.3.3 Lixiviación[32]

Se utiliza para disolver materia soluble a partir de su mezcla con un sólido insoluble. En la lixiviación la cantidad de material soluble separado es con frecuencia mayor que en el lavado por filtración ordinaria, y las propiedades de los sólidos pueden variar considerablemente durante la operación de lixiviación.

Las dos categorías principales en las que se divide el equipo de lixiviación son:

1) los que realizan la lixiviación por percolación y
2) aquellos en que los sólidos de partículas se dispersan en un líquido y posteriormente se separan de él.

1.3.1.3.3.1 Lixiviación por percolación

Además de aplicarse a los minerales y las rocas in situ y mediante la técnica simple de la lixiviación en montones, la percolación se lleva a acabo en tanques por lotes y en extractores continuos***. Percoladores por lotes*.** El tanque por lotes consiste en un gran tanque circular o granular de fondo falso. Los sólidos que se van a lixiviar se dejan caer al tanque hasta una profundidad uniforme. Se rocían con disolvente hasta que su contenido de solutos reduce a un mínimo económico, luego se excavan. ***Percoladores continuos.*** Los sólidos gruesos se lixivian también mediante la percolación en equipos de lecho móvil, incluyendo clasificadores de rastrillo de plataforma simple y múltiple, contactores de elevadores de cangilones y transportadores horizontales de banda. Entre ellos esta el Extractor de Bollman y el extractor Rotocel.

---

32 PERRY H, Rober. Manual del Ingeniero Químico. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 19-53pp – 19-56pp.

1.3.1.3.3.2 Lixiviación de sólidos dispersos

Los equipos para lixiviar sólidos finos mediante la dispersión y la separación incluyen por lotes agitados por medio de impulsores giratorios o aire y gran variedad de dispositivos continuos. Entre ellos esta el extractor Bonotto.

Figura 66. Extractor Bollman

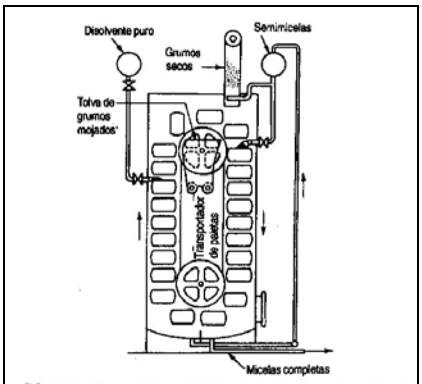


FIG. 19-63 Extractor Bollman (McCabe y Smith, *Unit Operations of Chemical Engineering*, 3a. ed., p. 609. Copyright 1976 por McGraw-Hill, Inc., New York. Con permiso de McGraw-Hill Book Company.)

Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico**. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 19-53pp – 19-56pp.

Figura 67. Extractor Rotocel

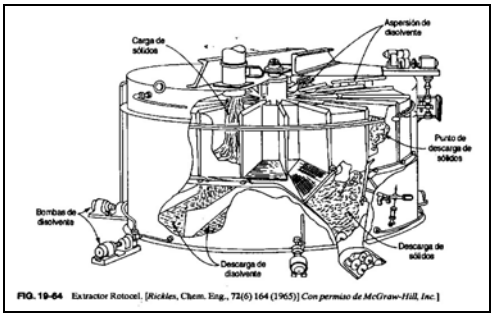


FIG. 19-64 Extractor Rotocel. [Rickles, Chem. Eng., 72(6) 164 (1965)] *Con permiso de McGraw-Hill, Inc.*]

Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 19-53pp – 19-56pp.

1.3.1.3.4 Intercambio iónico[33]

El intercambio de iones es un proceso en el cual las partículas sólidas que contienen cationes o aniones intercambiables se ponen en contacto con una solución electrolítica para cambiar la composición de la solución. Las mayores aplicaciones se ven en el ablandamiento del agua por intercambio de iones de calcio por iones sodio y desmineralización de agua por eliminación de cationes y aniones. Otras aplicaciones incluyen la recuperación de metales a partir de soluciones diluidas y separación de productos a partir de biorreactores.

La capacidad del intercambio de iones existe en algunos materiales naturales tales como arcilla y zeolitas, pero la mayoría de los procesos utilizan resinas sintéticas de intercambio iónico.

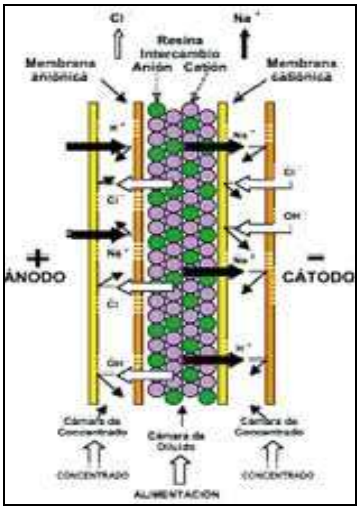
33 McCABE, Warren y otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 2002. 905pp-907pp.

1.3.1.3.4.1 Columnas típicas de intercambio de iones

Un **intercambiador iónico de lecho fijo** consiste en un recipiente cilíndrico y vertical de presión, de acero inoxidable o recubrimiento. En la parte superior y el fondo se instala rociadores y, con frecuencia, se utiliza un distribuidor separado para la solución regenerante. El lecho de resina, que consiste en un metro más de partículas o cuentas de resina de intercambio de iones, lo sostiene la pantalla del distribuidor inferior. Exteriormente, la unidad posee un múltiple de válvula para permitir el funcionamiento de flujo descendente, el retroceso de flujo ascendente, la inyección de regenerante y el enjugado del regenerante en exceso. Una configuración muy común de montaje de intercambiadores iónicos, consiste en dos intercambiadores, que comprenden un lecho catiónico y otro aniónico, colocados en serio y cada uno contenido en su propio recipiente.

El intercambiador iónico usual contiene sólo un tipo iónico de resina, ya sea catiónica o aniónica, y la regeneración se realiza normalmente por una solución química, ya sea de ácido fuerte o base fuerte. No obstante, en un **intercambiador de iones de lecho mixto** hay un la misma columna una resina catiónica y otra aniónica, por lo común es una proporción aproximadamente equimolar. Durante la etapa de servicio (carga) se mezclan íntimamente. Para la regeneración, el retrolavado separa la resina aniónica más densa. La unidad tiene un distribuidor de tamizado en el plano o la interfase entre las dos resinas, de modo que se puede regenerar por separado sin necesidad de retirarlas de la columna.

Figura 68. Columnas de intercambio iónico



Fuente: McCABE, Warren y otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 2002. 905pp-907pp.

1.3.1.4 Contacto interfacial gas-sólido[34]

1.3.1.4.1 Adsorción

Consiste en la separación de algunos componentes de una mezcla gaseosa mediante un sólido adsorbente ajeno a la misma.

Los empleos principales de la adsorción en la fase gaseosa incluyen:

- El secado de gases (la desecación en paquete es un caso especial),
- La purificación del aire de entrada, circulación o salida para la eliminación de gases tóxicos, olores, aerosoles, etc.,

[34] PERRY H, Robert. Manual del Ingeniero Químico. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 16-5pp – 16-6pp.

- La recuperación de disolventes en el aire de salida de una cámara de evaporación (rocío de pintura, lavado en seco de la ropa, procesamiento de un polímero),
- El fraccionamiento de gases: hidrocarburos de bajo peso molécular, gases raros e industriales.

1.3.1.4.2 Desadsorción

Es la operación contraria a la adsorción. Consiste en la separación de las sustancias adsorbidas sobre un sólido mediante un vapor o un gas ajeno.

1.3.2 Por medio de la existencia de una membrana[35]

En general, el empleo de técnicas de separación por medio de membranas permeables a fases o líquidos tiene beneficios especiales para separar 1) mezclas de compuestos de propiedades físicas y químicas similares, 2) mezclas de isómeros estructurales o de posición, y 3) mezclas que contengan compuestos térmicamente inestables. El proceso de por medio de membranas resulta particularmente útil como técnica de separación, siempre que los métodos tradicionales de separación no se puedan utilizar económicamente para obtener separación razonable. También se puede utilizar como Operación Unitaria junto con una unidad tradicional de separación. Por ejemplo, se puede emplear una unidad de infiltración por membrana para separar una mezcla azeotrópica, antes de alimentarla a una columna de destilación.

[35] PERRY H, Robert. Manual del Ingeniero Químico. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 17-19pp – 17-20pp.

1.3.2.1 Diálisis[36]

Es la transferencia de moléculas de soluto a través de una membrana por difusión a partir de una solución concentrada a una solución diluida. Se produce una difusión simultánea de moléculas de disolvente a través de la membrana, en dirección opuesta, en un fenómeno que se conoce como ósmosis. Las membranas utilizadas pueden ser porosas o no porosas. La solución en el lado de la alimentación se llama dializato y la solución del otro lado recibe el nombre de difusato. La separación de solutos en la diálisis se debe a diferencias en sus velocidades de difusión. Una membrana adecuada debe tener una permeabilidad alta, un tamaño adecuado de poros y buena estabilidad mecánica.

Hay tres tipos principales de dializadores comerciales: 1) el tipo tanque, 2) el tipo de filtro prensa, y 3) el tipo de fibra hueca.

La mayor parte de las aplicaciones industriales de la diálisis están ligadas con el tratamiento de corrientes de desecho y la aplicación comercial en gran escala lo constituyó la recuperación de sosa cáustica a partir de hemicelulosa coloidal dentro de la industria de rayón-viscosa. Entre otras aplicaciones figuran la purificación de materiales farmacéuticos de alto costo, la separación de mezclas orgánicas y la concentración de jugos de frutas. Combinado con ultrafiltración, la diálisis puede utilizarse también en la desalinización.

---

36 PERRY H, Robert. Manual del Ingeniero Químico. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 17-21pp – 17-25pp.

1.3.2.2 Ósmosis inversa[37]

La ósmosis inversa separa un soluto de una solución, obligando al disolvente a fluir a través de una membrana mediante la aplicación de una presión mayor que la presión osmótica normal. En la ósmosis inversa las moléculas del soluto son de aproximadamente el mismo tamaño que las del disolvente. Estos procesos de separación basados en diferencias de presión a través de una membrana combinan la adaptabilidad con la simplicidad técnica. Se diferencia de los procesos de destilación y congelación, ya que pueden funcionar a temperaturas ambiente sin cambio de fases.

Una membrana adecuada para los procesos de ósmosis inversa tiene que satisfacer requisitos estrictos. Por ejemplo, algunas propiedades importantes de las membranas en relación con la economía del proceso de desalinización son 1) selectividad de la membrana para el agua sobre los iones, 2) velocidad de infiltración del agua por unidad de gradiente de presión, y 3) durabilidad de la membrana. Existen cuatro diseños comunes de membranas: 1) espiral enrollada, 2) fibra hueca, 3) tubulares, y 4) de placa y marco.

A pesar de que la ósmosis inversa es el procedimiento más utilizado para la desalinización del agua de mar, también se puede utilizar para fraccionar las mezclas de materiales que son difíciles de separar por otros medios.

---

37 PERRY H, Robert. Manual del Ingeniero Químico. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 17-25pp – 17-32pp.

Entre las aplicaciones industriales más importantes están: 1) desalinización de agua de mar, 2) la producción de agua potable, 3) la desmineralización, 4) las operaciones de recirculación en las plantas de galvanoplastia y electrorecubrimientos, 5) el procesamiento de sueros, jugos y efluentes de la industria alimentaria, 6) las aplicaciones en la industria de la pulpa y papel, 7) la purga de los generadores de vapor, 8) separación de la emulsión de agua y aceite.

Figura 69. Equipo de ósmosis inversa

Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico**. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 17-25pp – 17-32pp.

1.3.2.3 Ultrafiltración[38]

Semejante a la ósmosis inversa, la ultrafiltración es un proceso de membrana, impulsado por la presión, para la separación de los componentes de una solución, con base en el tamaño y la forma de la molécula. Bajo una diferencia de presión aplicada a una membrana de ultrafiltración, el disolvente y las especies pequeñas de soluto pasan a través de la membrana y se recogen en el infiltrado, en tanto que las especies más grandes de soluto que quedan en la membrana se recuperan como un concentrado retenido.

Las membranas para la ultrafiltración se pueden clasificar en dos tipos: las anisotrópicas (asimétricas) y las amorfas (homogéneas), de las cuales las primeras son las más utilizadas.

Los tipos de aplicaciones de la ultrafiltración se puede clasificar en: 1) concentración, 2) separación de microsolutos, y 3) fraccionamiento de macrosolutos. Las aplicaciones industriales actuales a gran escala incluyen las siguientes: 1) pinturas, 2) la extracción de la proteína en las industrias alimentarias y de productos lácteos, 3) las aguas de desperdicio que contienen almidones y enzimas, 4) el agua de clasificación por tamaño en la industria textil, 5) la concentración de látex, 6) emulsiones de agua y aceite, 7) emulsiones de la pintura electroforética, 8) efluentes de blanqueado de la lana, 9) efluentes de las fábricas de papel, y 10) limpieza alcalina de partes metálicas sucias o engrasadas.

---

38 PERRY H, Robert. Manual del Ingeniero Químico. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 17-32pp – 17-38pp.

Figura 70. Equipo de ultrafiltración tipo hoja paralela

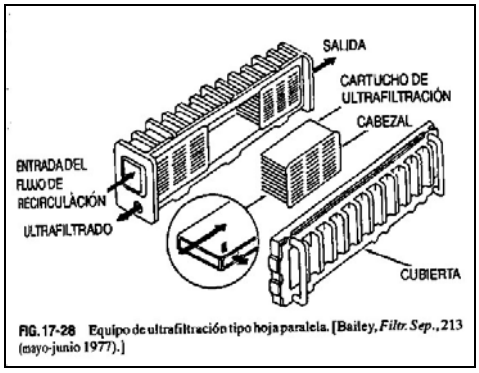


FIG. 17-28 Equipo de ultrafiltración tipo hoja paralela. [Bailey, *Filtr. Sep.*, 213 (mayo-junio 1977).]

Fuente: PERRY H, Robert**. Manual del Ingeniero Químico**. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 17-32pp – 17-38pp.

1.4 Operaciones Unitarias físicas controladas por la transferencia simultánea de materia y energía

Se basan en la existencia simultánea de la transferencia de materia y la transferencia de calor, siendo ambos transportes controlantes del proceso de la operación. Hay simultáneamente dos fuerzas impulsoras separadas que puede ir en el mismo sentido o incluso en sentidos opuesto. Estas son operaciones generalmente de separación en las que hay siempre dos fases en íntimo contacto, se clasifican de la siguiente manera:

1.4.1 Contacto interfacial gas-líquido

1.4.1.1 Acondicionamiento de aire

El acondicionamiento de aire es la Operación Unitaria que tiene como objetivo modificar las condiciones de humedad y temperatura de una corriente de aire, por interacción con una corriente de agua. Se transfiere agua y energía calorífica de una a otra corriente. Esta Operación Unitaria puede tener varios objetivos, el primer caso es humidificar aire, en el segundo deshumidificar aire y en tercero enfriar agua.

1.4.1.1.1 Humidificación de aire[39]

Se consigue al poner en contacto el aire no saturado con agua, a unas temperaturas tales que el aire aumenta su contenido de humedad.

1.4.1.1.2 Deshumidificación del aire

Este se consigue siempre que se pone en contacto aire húmedo con un líquido más frío, de modo que la temperatura del gas disminuya por debajo de la temperatura de rocío y condense agua, disminuyendo la humedad absoluta del aire hasta el valor deseado.

[39] PERRY H, Robert. Manual del Ingeniero Químico. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 12-13pp – 12-24pp.

1.4.1.1.3 Enfriamiento de agua[40]

Es quizá la forma industrialmente más importante de esta Operación Unitaria. El agua caliente procedente de la unidades de las plantas pueden enfriarse si se pone en contacto con un gas más frío no saturado.

1.4.1.1.3.1 Torres de tiro mecánico

En la actualidad se emplean dos tipos de torres de tiro mecánico; el de tiro forzado y el de tiro inducido. En la **torre de tiro forzado,** el ventilador se monta en la base y se hace entrar el aire en la base de la misma y se descarga con baja velocidad por la parte superior. Esta disposición tiene la ventaja de ubicar el ventilador y el motor propulsor fuera de la torre, muy conveniente para la inspección, el mantenimiento y la reparación de los mismos. La **torre de tiro inducido** es el tipo que se emplea con mayor frecuencia. A su vez, esta se subdivide en diseños de ***contraflujo o flujo transversal***, dependiendo de las direcciones relativas de flujo del agua y el aire. En las ***torres de flujo transversal***, el aire circula en forma horizontal a través de lechos inclinados de empaques o rellenos, mientras que el agua fluye de manera descendente. En las ***torres a contraflujo*** (contracorriente), el aire entra por debajo de la capa de relleno y circula en contracorriente ascendente hacia el flujo de agua descendente.

[40] PERRY H, Robert, Manual del Ingeniero Químico. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 12-13pp – 12-24pp.

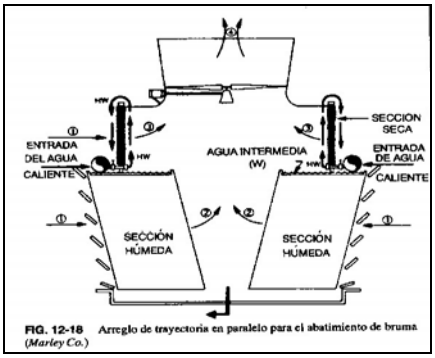
1.4.1.1.3.2 Torres de tiro natural

La conveniencia de diseño obtenida gracias al flujo constante del aire de las torres de tiro mecánico no se logra en un diseño de torre de tiro natural. El flujo de aire a través de la torres de tiro natural se debe en su mayor parte a la diferencia de densidad entre el aire fresco de la entrada y el aire tibio de la salida. El aire expuesto por la columna es más ligero que el del ambiente, y el tiro se crea por el efecto de chimenea, eliminando con ello la necesidad de ventiladores mecánicos.

1.4.1.1.3.3 Tanques de rocío

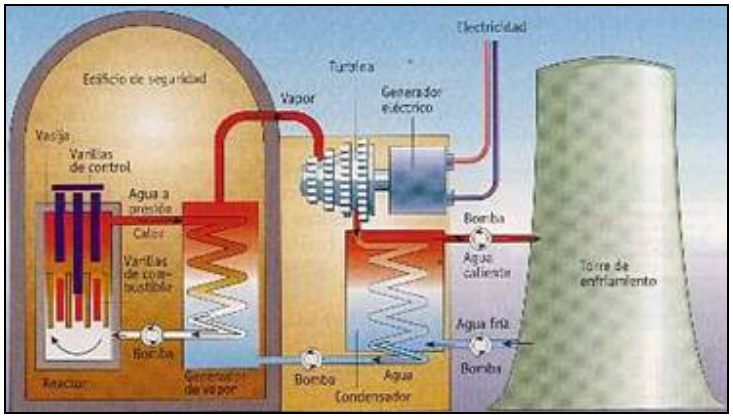
Los tanques de rocío constituyen un medio para reducir la temperatura del agua mediante el enfriamiento por evaporación y, al hacerlo, reducen enormemente la superficie de enfriamiento necesaria en comparación con un estanque de enfriamiento. El tanque de rocío emplea varias boquillas para rociar el agua y establecer contacto entre ésta y el aire del ambiente. Una boquilla de rocío bien diseñada debe suministrar gotas finas de agua, pero sin producir un rocío que el viento arrastre con facilidad, ya que esto equivale a una pérdida excesiva de flujo.

Figura 71. Arreglo de trayectoria en una torre de enfriamiento



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 12-13pp – 12-24pp.

Figura 72. Torre de enfriamiento



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico**. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 12-13pp – 12-24pp.

1.4.2 Contacto interfacial líquido-sólido

1.4.2.1 Cristalización[41]

Consiste en la formación de partículas sólidas cristalinas en el seno de una fase homogénea. La purificación de un producto químico por solidificación a partir de una mezcla líquida se conoce **como cristalización de la solución o cristalización a partir de la fusión.** La distinción entre estas dos operaciones es hasta cierto punto sutil.

1.4.2.1.1 Cristalización a partir de la fusión

El término **cristalización a partir de la fusión** se ha definido como la separación de los componentes de una mezcla binaria sin la adición de disolvente, pero esta definición es en cierta manera restrictiva.

En la cristalización a partir de la fusión no se agrega disolvente a la mezcla reactiva y la fase sólida se forma por enfriamiento directo o indirecto de la fusión. A menudo, el producto se mantiene cerca o por encima de la temperatura de congelación del componente puro, en la sección de refinación del equipo. Hay muchas técnicas para efectuar la **cristalización a partir de la fusión.** Una lista abreviada incluye la congelación parcial y la recuperación de sólidos en sistemas de enfriamiento de cristalizador y centrífuga; la fusión parcial, o sea, la exudación; la congelación escalonada, la congelación normal, la fusión por zonas y la cristalización en columnas.

---

41 PERRY H, Robert. Manual del Ingeniero Químico. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 17-4pp- 17-13pp, 19-28pp– 19-45pp.

1.4.2.1.1.1 Cristalización en columna

La realización de la cristalización dentro de una columna con flujo a contracorriente de los cristales y el líquido, puede dar lugar a un producto con mayor pureza que la cristalización o destilación convencionales. El concepto de trabajo consiste en formar una fase sólida a través de un flujo a contracorriente de líquido enriquecido con reflujo. El problema para la práctica de esta tecnología es la dificultad para controlar el movimiento de la fase sólida. Los cristalizadores en columna se han sistematizado en los dispositivos con alimentación por el extremo o por el centro, dependiendo de si la ubicación de la alimentación es agua arriba o debajo de la sección de formación de los cristales. Estos dispositivos se componen de tres secciones distintas: una sección de congelación o recuperación, en donde se congela el soluto a partir de licor impuro; la zona de purificación, donde se ponen en contacto a contracorriente las fases sólidas y líquidas, y la sección de fusión y reflujo de los cristales.

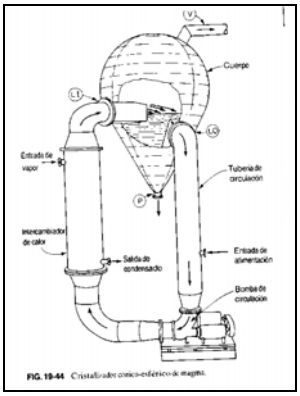
1.4.2.1.2 Cristalización a partir de solución

En la **cristalización de la solución** se agrega un disolvente a la mezcla y después, la solución se enfría en forma directa o indirecta, y/o se evapora el disolvente, para realizar la cristalización. Por lo general, la fase sólida se forma, y se mantiene por debajo de la temperatura de congelación del compuesto puro. Los equipos para cristalización se pueden clasificar de acuerdo al medio de suspensión del producto en crecimiento:

1.4.2.1.2.1 Cristalizadores de suspensión mezclada y de retiro de productos combinados

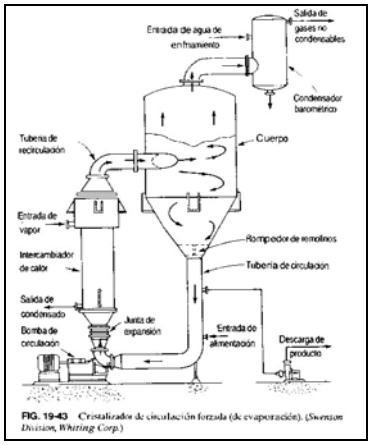
Este tipo de equipo, llamado a veces cristalizador de magma circulante, es el más importante de los que se utilizan en la actualidad. La mayoría de los usuarios prefiere los cristalizadores que emplean la vaporización de disolventes o de refrigerantes. La razón primordial para esta preferencia es que el calor transferido durante la etapa crítica de sobresaturación pasa por una superficie de líquido en ebullición-gas, evitando la sedimentación molesta de sólidos que se pueden formar en una superficie metálica de transferencia de calor.

Figura 73. Cristalizador cónico-esférico



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico**. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 17- 4pp- 17-13pp, 19- 28pp– 19-45pp.

Figura 74. Cristalizador de circulación forzada



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico**. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 17- 4pp- 17-13pp, 19- 28pp– 19-45pp.

1.4.3 Contacto interfacial gas-sólido

1.4.3.1 Secado[42]

El secado de sólidos consiste en separar pequeñas cantidades de agua y otro líquido de un material sólido con el fin de reducir el contenido de líquido residual hasta un valor aceptablemente bajo. El secado es por lo común la etapa final de una serie de operaciones y, con frecuencia el producto que se extrae de un secador está listo para ser empaquetado.

42 PERRY H, Robert. Manual del Ingeniero Químico. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 20-4pp- 20-67pp.

Hay varias maneras de clasificar los equipos de secado. Las tres clasificaciones más útiles son: 1) secado en los que el sólido se encuentra directamente expuesto a un gas caliente (por lo general aire) estos secadores se llaman ***secadores directos o adiabáticos,*** 2) secadores en los que el calor es transferido al sólido desde un medio externo tal como vapor de agua condensante, generalmente a través de una superficie metálica con la que el sólido esta en contacto, estos secadores se llaman ***indirecto o no adiabáticos,*** y 3) secadores que son calentados por energía dieléctrica, radiante o de microondas.

A continuación se describe un número de secadores de los muchos tipos comerciales. El primer y gran grupo comprende secadores para sólidos granulares o rígidos y pastas semisólidas; el segundo grupo se refiere a secadores que aceptan alimentaciones líquidas o suspensiones.

1.4.3.1.1 Secadores para sólidos y pastas

Los secadores típicos de sólidos y pastas comprenden secadores de platos perforados y de tamices transportadores, para materiales que no se pueden agitar, así como torres de secado, rotatorios transportadores de tornillo sinfín, de lecho fluidizado y flash para materiales que se pueden agitar.

1.4.3.1.1.1 Secadores de platos perforados

Los secadores de platos resultan convenientes cuando la velocidad de producción es pequeña. Prácticamente pueden secar cualquier producto, pero la mano de obra necesaria para la carga y descarga da lugar a costos de operación elevados. Con frecuencia, se utilizan en el secado de materiales valiosos tales como colorantes y productos farmacéuticos. El secado por circulación de aire sobre capas estacionarias de sólidos es lento y, por consiguiente, los ciclos de secado son largos: de 3 a 48 horas por carga.

1.4.3.1.1.2 Secadores de tamices transportadores

Una capa de 25 a 150 mm de espesor del material que se va a secar se transporta lentamente sobre un tamiz metálico que se mueve a través de una larga cámara o túnel de secado. La cámara consiste de una serie de secciones separadas, cada una con su propio ventilador y calentador de aire por lo general pasa hacia arriba a través del tamiz y de los sólidos, mientras que cerca del extremo de descarga donde el material está seco puede desprender polvo, el aire circula hacia abajo a través del tamiz.

La temperatura y la humedad del aire son diferentes en distintas secciones con el fin de alcanzar las condiciones óptimas de secado en cada punto.

Los secadores de tamiz transportador operan de forma continua y suave con una gran variedad de sólidos; su costo es razonable, y el consumo de vapor de agua es bajo, siendo típico el valor de 2 kg de vapor de agua por kg de agua evaporada.

1.4.3.1.1.3 Torres de secado

Una torre de secado contiene una serie de bandejas circulares dispuestas una sobre otras sobre un eje central rotatorio. La alimentación de sólidos se introduce sobre la bandeja superior y está expuesta a una corriente de aire o gas caliente que pasa sobre la bandeja. Después el sólido se descarga por medio de una rasqueta y pasa a la bandeja inferior. De esta forma va circulando a través del secador, descargando el producto seco por el fondo de la torre. Los flujos de gas y del sólido pueden ser en corrientes paralelas o en contracorriente.

1.4.3.1.1.4 Secadores rotatorios

Un secador rotatorio consiste en una carcasa cilíndrica giratoria, dispuesta en forma horizontal o ligeramente inclinada hacia la salida. La alimentación húmeda entra por un extremo del cilindro; el producto seco descarga por el otro. Al girar la carcasa, unas pestañas internas levantan los sólidos para caer después en forma de lluvia a través del interior de la carcasa.

Los secadores rotatorios se calientan por un contacto directo del gas con los sólidos, por gas caliente que pasa a través de un encamisado externo, o por medio de vapor de agua que condensa en un conjunto de tubos instalados sobre la superficie interior de la carcasa. Los secadores rotatorios por lo general se utilizan para sal, azúcar y todo tipo de materiales granulares y cristalinos que deben mantenerse limpios y que no se pueden exponer directamente a gases de combustión muy calientes.

1.4.3.1.1.5 Secadores de tornillo transportador

Un secador de tornillo transportador es un secador continuo de calentamiento directo que consiste esencialmente en un transportador horizontal de tornillo (o un transportador de palas) confinado dentro de una carcasa cilíndrica encamisada. La alimentación de sólidos entra por un extremo. El vapor que se desprende se retira a través de una serie de tuberías situadas en la arte superior de la carcasa. Los secadores de tornillo transportador tratan sólidos que son demasiado finos y demasiado espesos para operar con un secador rotatorio. Están completamente cerrados y permiten recuperar los vapores del solvente con poca o ninguna dilución de aire.

1.4.3.1.1.6 Secadores de lecho fluidizado

Los secadores en los que los sólidos están fluidizados por el gas de secado se utilizan en diversos problemas de secado. Las partículas se fluidizan con aireo gas en una unidad de lecho hirviente.

La mezcla y la transferencia de calor son muy rápidas. La alimentación húmeda se introduce por la parte superior del lecho; el producto seco se retira lateralmente ceca del fondo.

1.4.3.1.1.7 Secadores flash

En un secador flash se transporta un sólido húmedo pulverizado durante pocos segundos en una corriente de gas caliente. El secado tiene lugar durante la transportación. La velocidad de transferencia de calor desde el gas hacia las partículas de sólido suspendido es elevada y el secado es rápido, de forma que no se requiere más de 3 o 4 segundos para evaporar toda la humedad del sólido.

1.4.3.1.2 Secadores para soluciones y pastas

Sólo pocos tipos de secadores evaporan soluciones y suspensiones enteramente por métodos térmicos. Algunos ejemplos típicos son los secadores de pulverización, secadores de película delgada y secadores de tambor.

1.4.3.1.2.1 Secadores de pulverización

En un secador de pulverización se dispersa una solución o suspensión en una corriente de gas caliente formando una niebla de gotas muy finas. La humedad se evapora muy rápido de las gotitas para formar partículas residuales de sólido seco, que después se separan de la corriente gaseosa.

Los flujos de gas y líquido pueden ser en corrientes paralelas, en contracorriente o una combinación de ambos en una misma unidad.

1.4.3.1.2.2 Secadores de película delgada

En algunos, los secadores de pulverización resultan competitivos con los secadores de película delgada, los que puedan aceptar una alimentación líquida o una suspensión para dar lugar a un producto sólido seco que fluye libremente. La eficiencia térmica de los secadores de película delgada es elevada y se produce una escasa pérdida de sólidos, ya que poco o nada de gas se retira de la unidad. Son útiles para separar solventes de productos sólidos. Son relativamente caros y están limitados en cuanto al área de transferencia de calor.

1.4.3.1.2.3 Secadores de tambor

Un secador de tambor consiste en uno o más rodillos metálicos calentados, en cuya superficie exterior una delgada capa de líquido se evapora hasta secar. El sólido seco es retirado de los rodillos a medad que éstos giran muy lento.
Los secadores de doble tambor son efectivos con soluciones diluidas, soluciones concentradas de materiales altamente solubles, así como con suspensiones de partículas poco pesadas. Son inadecuados para soluciones de sales de solubilidad baja o para suspensiones de sólidos abrasivos que sedimentan y crean una presión excesiva entre los tambores.

Figura 75. Secador rotatorio

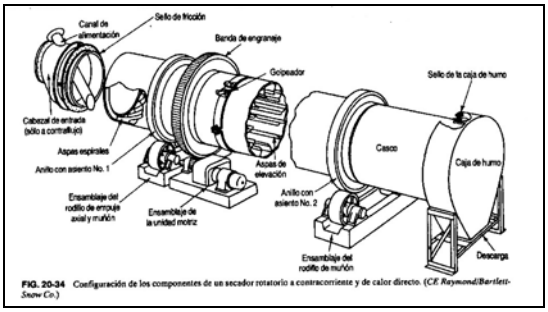


FIG. 20-34 Configuración de los componentes de un secador rotatorio a contracorriente y de calor directo. (*CE Raymond/Bartlett-Snow Co.*)

Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992.. 20-4pp- 20-67pp.

Figura 76. Secador de platos perforados

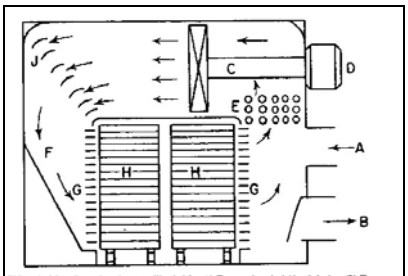
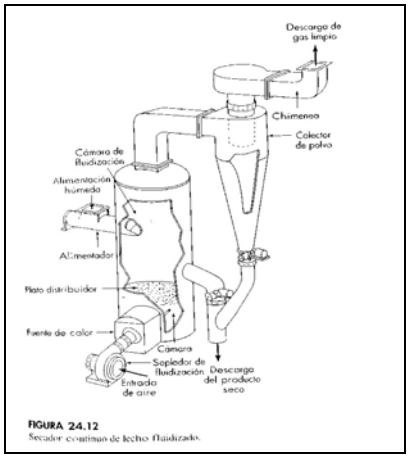


FIG. 20-23 Secador de carretilla doble. *A*) Ducto de admisión del aire, *B*) Ducto de salida del aire con amortiguador. *C*) Ventilador de espaciamiento ajustable de 1 a 15 hp. *D*) Motor del ventilador. *E*) Calentadores de aletas. *F*) Cámara plena. *G*) Boquillas ajustables de chorro de aire. *H*) Carretillas y bandejas. *J*) Paletas giratorias. (*National Drying Machinery Co.*)

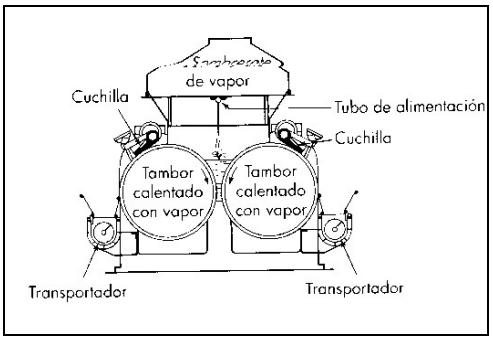
Fuente: PERRY H, Robert. Manual del Ingeniero Químico. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 20-4pp- 20-67pp.

Figura 77. Secador continuo de lecho fluidizado



Fuente: McCABE, Warren y otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 2002. 856-871pp.

Figura 78. Secador de doble tambor



Fuente: McCABE, Warren y otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 2002. 856-871pp.

1.4.3.2 Liofilización[43]

Consiste en la eliminación del agua de un sólido por sublimación de la misma. Debe trabajarse, por lo tanto, por debajo del punto triple del agua, pasando el agua previamente congelada del sólido directamente a vapor. El material que va a ser secado se congela rápidamente y se coloca en capas delgadas sobre platos perforados en cámaras especiales de vacío, o se congela en lugares por refrigeración circulante dentro de platos perforados. El vacío completo es aplicado y el fluido pasa a través de los platos para suplir el calor de sublimación. A medida que procede el secado, el frente de hielo se retira desde la superficie, dejando atrás una zona de sólido poroso casi seco. Es un proceso para secado de alimentos, vitaminas y otros productos sensibles al calor a temperaturas por debajo de 0°C.

1.5 Operaciones Unitarias físicas complementarias

Son todas aquellas operaciones auxiliares cuyo objetivo es el acondicionamiento de las materias primas y productos sólidos, para que tengan el tamaño y la presentación adecuada para posteriores tratamientos. Las principales operaciones son las siguientes:

43 McCABE, Warren y otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 2002. 856pp.

1.5.1 Trituración y molienda[44]

Tienen el objetivo de reducir el tamaño de los elementos en que se presenta un sólido. La reducción de tamaño se basa en someter los trozos de material a esfuerzos de compresión, impacto, cortado, cizalladura y fricción.

Los **trituradores** son máquinas de baja velocidad que se utilizan para las reducciones más ordinarias (o gruesas) de grandes cantidades de sólidos. Los principales tipos son los a) trituradores de mandíbulas, b) trituradores giratorios, c) trituradores de rodillo liso y d) trituradores de rodillos dentados. Los tres primeros operan por compresión y pueden romper grandes pedazos de materiales muy duros, como es el caso de la reducción primaria y secundaria de rocas y minerales. Los trituradores de rodillos dentados trocean y separan la alimentación a medida que la trituran; manejan alimentaciones suaves como carbón, huesos y esquisto suave.

Los **molinos** son aparatos que reducen el tamaño de los trozos de material por fricción e impacto con elementos móviles del interior del molino. Consiguen tamaños de partícula del orden de 1 milímetro, los principales tipos son: a) molinos de bolas, b) molinos de barras, c) molinos de martillo y d) molinos de chorro.

---

44 McCABE, Warren y otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 2002. 1047pp.

1.5.1.1 Trituradores de mandíbulas

En un triturador de mandíbulas la alimentación se introduce entre dos mandíbulas, colocadas para formar una V abierta en la parte superior. Una de las mandíbulas, que recibe el nombre de yunque, es fija, está situada en posición casi vertical y no se mueve; la otra, la mandíbula oscilante lo hace de manera reciprocante en un plano horizontal, y forma un ángulo de 20º a 30º con la mandíbula fija. Está accionada por una excéntrica, de forma que aplica una fuerza de compresión a los pedazos capturados entre las mandíbulas. Los pedazos grandes capturados entre las partes superiores de las mandíbulas se rompen, descienden hacia el espacio más estrecho inferior y son trituradas en el siguiente movimiento de cierre de las mandíbulas. Después de una reducción suficiente, descienden al fondo de la máquina. Las mandíbulas abren y cierran a razón de 250 a 400 veces por minuto. Algunas máquinas con una abertura de alimentación de 1.8 por 2.4 m pueden aceptar rocas con un diámetro de 1.8 m y triturar 1200 toneladas/h a un tamaño de producto máximo de 250 mm.

1.5.1.2 Trituradores giratorias

El desarrollo de mecanismo de soporte y propulsión perfeccionados ha hecho que las trituradoras giratorias predominen en casi todas las aplicaciones a gran escala en la trituración de metales y minerales duros. La erogación más importante de estas unidades se asocia con su recubrimiento. La operación es intermitente, de manera que la demanda de energía es elevada; pero el costo total de la misma no es excesivamente grande. La trituración ocurre a través de un ciclo completo en una trituradora giratoria y esto produce una capacidad mayor de trituración de quijada de similar tamaño, que tritura sólo en la mitad de ese ciclo.

Las trituradoras giratorias tienden también a ser más baratas, más fáciles de operar y operan más eficientemente cuando están cargadas por completo.

1.5.1.3 Trituradoras de rodillo

Estas máquinas fueron en un tiempo las preferidas para efectuar trabajos de trituración de material grueso, pero desde hace tiempo han sido desplazadas por las trituradoras giratorias y de quijadas debido al gran desgaste que sufren con rocas duras. Las trituradoras de rodillos son muy utilizadas aún para la trituración primaria y secundaria de carbón y otros materiales desmenuzables, como aceite de esquistos y fosfatos. La superficie de rodillo es lisa, corrugada o dentada, dependiendo de la aplicación.

1.5.1.4 Molinos de martillos e impactos

Todos estos molinos contienen un rotor que gira a gran velocidad en el interior de una coraza cilíndrica por lo general el eje es horizontal. La alimentación entra por la parte superior de la coraza, se trocea y cae a través de una abertura situada en el fondo. En un **molino de martillos**, las partículas se rompen por una serie de martillos giratorios acoplados a un disco rotor. Una partícula de alimentación que entra en la zona de molienda no puede salir sin ser golpeada por los martillos. Se rompe en pedazos, que se proyectan contra la placa yunque estacionaria situada dentro de la coraza, rompiéndose todavía en fragmentos más pequeños. Éstos a su vez son pulverizados por los martillos y son impulsados a través de una rejilla o un tamiz que cubre la abertura de descarga.

Los molinos de martillo pulverizan casi cualquier producto: sólidos fibrosos duros como corteza de un árbol o piel, virutas de acero, pastas húmedas blandas, arcilla viscosa y roca dura.

Un **impactor** se parece a un molino de martillos para servicio pesado pero no contiene rejilla o tamiz. Las partículas se rompen exclusivamente por impacto, sin la acción de pulverización característica de un molino de martillo. Los impactadores son con frecuencia máquinas de reducción primaria para rocas y minerales, tratando hasta 600 tons/h.

1.5.1.5 Molinos de rodillo

En los molinos de rodillo los sólidos son captados y triturados entre rodillos cilíndricos verticales y un anillo de yunque estacionario. Los rodillos giran a velocidades moderadas en una trayectoria circular. Los trozos de sólidos son desplazados desde la solera del molino y llevados entre el anillo y los rodillos, donde tiene lugar la molienda. El producto es barrido fuera del molino por una corriente de aire hasta un separador - clarificador, desde el cual las partículas grandes retornan al molino para su reducción posterior. Los molinos de este tipo encuentran su principal aplicación en la molienda de piedra caliza, pegamento de cemento y carbón. Pulverizan hasta 50 toneladas/h.

1.5.1.6 Molinos de atrición (desgaste)

En un molino de atrición, las partículas de sólidos blandos son frotadas entre las caras planas estriadas de unos discos circulares rotatorios. Los molinos de una sola carga contienen discos de piedra esmeril o roca de esmeril para la reducción de sólidos tales como yeso y talco, o bien discos metálicos para sólidos tales como madera, almidón, polvo de insecticidas y cera de carnauba.

Los discos metálicos por lo general son de acero ordinario, aunque en ocasiones es necesario utilizar discos de acero inoxidable para materiales corrosivos. En general, se utilizan molinos de doble rotación, para productos molidos o más finos en lugar de los molinos de una sola carga, peo en el proceso la alimentación es más blanda. El aire se retira con frecuencia a través del molino para separar el producto y prevenir obstrucciones. Los discos pueden enfriarse con agua o salmuera refrigerante.

1.5.1.7 Molinos de volteo

Una carcasa cilíndrica que gira muy lento alrededor de un eje horizontal y está llena aproximadamente hasta la mitad de su volumen con un medio sólido de molienda, constituye un molino de volteo. Los molinos de volteo resultan inadecuados para la reducción intermedia y fina de materiales abrasivos.
A diferencia de los molinos descritos anteriormente, que requieren alimentación de forma continua, los molinos de volteo pueden ser tanto de forma continua o discontinua. En una máquina discontinua una cantidad medida del sólido que será molido se deposita dentro del molino a través de una abertura en la carcasa. Después la abertura se cierra y el molino se mantiene girando durante varias horas; se detiene, y el producto se descarga. En un molino continuo el sólido circula estacionariamente a través de la coraza giratoria.

1.5.1.8 Molinos con clasificación de martillos

Estos molinos pertenecen a los molinos de ultrafinos, ya que reducen sólidos hasta partículas muy finas; estos molinos sirven para pulverizar y desintegrar, funcionan a altas velocidades. El eje del rotor puede ser vertical u horizontal, aunque predomina esa última modalidad.

Los molinos de este tipo reducen desde 1 ó 2 tons/h hasta un tamaño promedio de partículas de 1 a 20 µm, con un requerimiento de energía de alrededor de 40kWh/t.

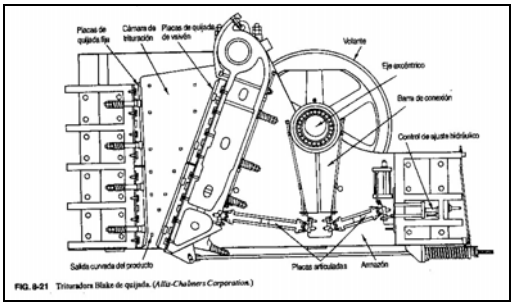
1.5.1.9 Molinos agitados

Para algunas operaciones de molienda de ultrafinos, se dispone de pequeños molinos discontinuos o rotatorios que contienen un sólido como medio de molienda. Dicho medio consiste en elementos sólidos duros tales como bola, gránulos o granos de arena. Estos molinos son recipientes verticales con capacidad de 4 a 1200 L (1 a 300 gal), que están llenos con un líquido en el que se encuentra suspendido el medio de molienda. En algunos diseños esta carga se agita con un impulsor de múltiples palas; en otros, utilizados en especial para la molienda de materiales duros (tales como sílice o dióxido de titanio), una columna central alternativa hace "vibrar" el contenido del recipiente con una frecuencia de 20 Hz. Una suspensión concentrada de alimentación es admitida en la parte superior y el producto (con algo de líquido) se retira a través de un tamiz situado en el fondo.

1.5.1.10 Molinos de coloides

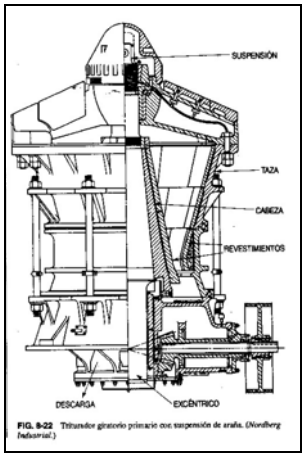
En un molino de coloides, se utiliza el corte del fluido intenso en una corriente a alta velocidad para dispensar las partículas o gotitas de líquido a fin de formar una suspensión estable o emulsión. El tamaño final de las partículas o gotitas es por lo general menos de 5 µm. Con frecuencia hay una pequeña reducción del tamaño real en el molino; la acción principal es la disrupción de los racimos unidos o aglomerados. Jarabes, leche, purés, ungüentos, pinturas y grasas son productos típicos procesados de esta manera.

Figura 79. Triturador de quijada



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992..
8-22pp- 8-55pp.

Figura 80. Triturador giratorio primario



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992.
8-22pp- 8-55pp.

Figura 81. Trituradora de martillos

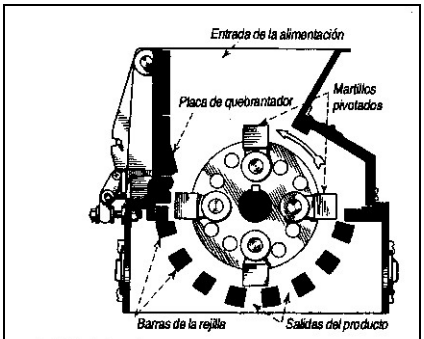


Fig. 8-25 Trituradora de martillos. (*Jeffrey Mfg. Co.*)

Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992.. 8-22pp- 8-55pp.

Figura 82. Trituradora de impacto

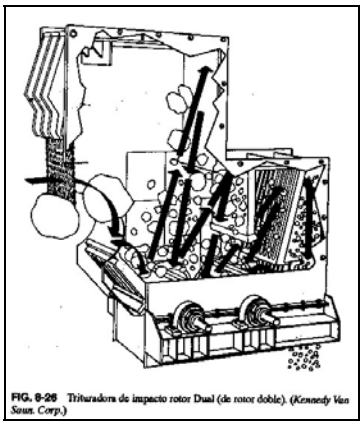


FIG. 8-26 Trituradora de impacto rotor Dual (de rotor doble). (*Kennedy Van Saun. Corp.*)

Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992.. 8-22pp- 8-55pp.

Figura 83. Desintegradora de doble jaula

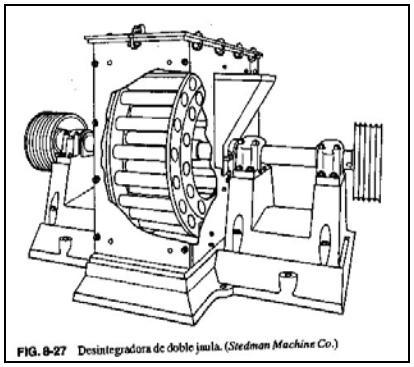


FIG. 8-27 Desintegradora de doble jaula. (*Stedman Machine Co.*)

Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992.. 8-22pp- 8-55pp.

Figura 84. Molino de bolas continuo

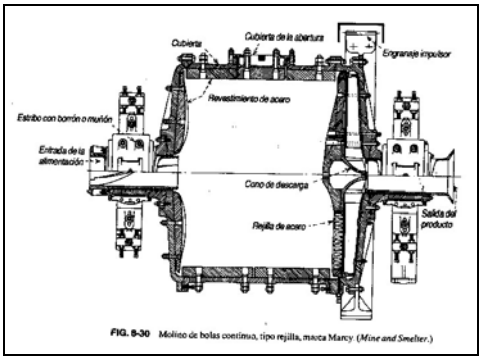


FIG. 8-30 Molino de bolas continuo, tipo rejilla, marca Marcy. (*Mine and Smelter.*)

Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992.. 8-22pp- 8-55pp.

1.5.2 Tamizado[45]

Es una operación destinada a la separación por tamaños de las partículas de una mezcla sólida. Se basa en hacer pasar las partículas de menor tamaño a través de una malla de paso definido que se conoce como luz de la malla. Las partículas se clasifican en *cernido* o partículas que atraviesan la malla y *rechazo* o partículas que quedan retenidas. Es el separador sólido-sólido más clásico.
Hay de muchos tipos, fijos o vibrantes, horizontales o inclinados, secos o húmedos, de trama cuadrada, redonda o de otras formas usuales. **Un tamiz redondo se le dice criba**. Las máquinas cribadoras se pueden dividir en cinco clases principales: rejillas, cribas giratorias, cribas o tamices con agitación, tamices vibratorios y tamices oscilantes.

1.5.2.1 Cribas de rejillas

Las rejillas se emplean primordialmente para las separaciones de partículas de 0.05m (2 in) y mayores. Consiste en un conjunto de barras paralelas, mantenidas alejadas unas de otras mediante espaciadores, con aberturas predeterminadas. Las barras se producen con frecuencia de acero, con el fin de reducir el desgaste. Las rejillas se utilizan ampliamente antes de las trituradoras primarias en las plantas de trituración de rocas o minerales para eliminar las partículas finas, antes que el mineral o las rocas entren a la trituradora.

---

45 PERRY H, Robert. Manual del Ingeniero Químico. 6ª Ed. México: McGraw-**Hill,** 1992. 21-14pp–21-18pp.

1.5.2.1.1 Rejilla estacionaria

Este es el más sencillo de todos los dispositivos de separación y el menos costoso, en lo que se refiere a la instalación y el mantenimiento. Normalmente se limita a la separación de materiales secos de 0.05m y más gruesos y no resulta satisfactoria para los materiales húmedos y pegajosos. La pendiente o el ángulo con respecto al plano horizontal varían entre 20 y 50°. Las rejillas estacionarias no requieren energía y muy poco mantenimiento.

1.5.2.1.2 Rejilla planas

Estas, en las cuales las barras paralelas se encuentran en el plano horizontal, se utilizan en las partes superiores de las tolvas de minerales y carbón y los caballetes de descarga. Este tipo de rejilla se emplea para retener los trozos demasiado grandes para los equipos subsecuentes de la plata. Esos terrenos se deben romper o retirar a continuación en forma manual.

1.5.2.1.3 Rejillas vibratorias

Estas son simplemente rejillas de barras montadas en excéntricas para que todo el conjunto reciba un movimiento hacia delante y hacia atrás o un impulso circular positivo.

1.5.2.2 Cribas giratorias

Las cribas giratorias o de zaranda, que se utilizaban mucho, se están reemplazando en gran parte por los tamices vibratorios. Consiste en un marco cilíndrico rodeado de tela de alambre o una placa perforada, abierto en los dos extremos e inclinado en un ángulo ligero.

El material que se debe seleccionar entran en el extremo superior y las partículas de tamaños demasiado grandes descargan en la parte inferior. El producto deseado cae por las aberturas de malla. Las cribas giran con velocidades relativamente bajas de 15 o 20 rpm. Su capacidad no es muy grande y su eficiencia relativamente baja.

1.5.2.3 Cribas con agitación mecánica

Estas cribas o tamices consisten en un marco rectangular que sostiene una tela de alambre o una placa perforada; tiene una inclinación ligera y se suspende mediante varillas o cables sueltos o se apoya en un marco de base, mediante resortes planos y flexibles. El marco recibe un movimiento de vaivén. El material que se debe seleccionar se alimenta al extremo superior y avanza debido al movimiento hacia delante de la criba, mientras que las partículas más finas pasan por las aberturas.

Las ventajas de este tipo de máquina son los bajos requisitos de potencia y espacio superior. Las desventajas son el costo elevado de mantenimiento del tamiz y la estructura de soporte, debido a la vibración.

1.5.2.4 Tamices vibratorios

Estos tamices se utilizan generalmente cuando se desea gran capacidad y eficiencia elevada. La capacidad, sobre todo en los tamaños más finos, es mucho mayor que en cualquiera de las otras cribas, por lo que han reemplazado prácticamente todos los otros tipos, en los casos en que la eficiencia de la criba es un factor importante.

Entre las ventajas se incluye la exactitud de la selección de tamaños, el aumento de la capacidad por unidad de área, el bajo costo de mantenimiento por tonelada de material manejado.

1.5.2.5 Tamices oscilantes o de movimiento alternativo

Estos tamices tienen muchas aplicaciones en trabajos químicos. Una excéntrica baja la criba proporciona la oscilación, que va de giratoria en el extremo de alimentación, hasta un movimiento de vaivén en el extremo de descarga. Son equipos estándar en muchas plantas químicas y de proceso para el manejo de separaciones finas hasta de malla 300. Se emplean para manejar gran cantidad de productos químicos, por lo común materiales voluminosos, ligeros y secos, polvos metálicos ligeros, alimentos en polvo y materiales granulares.

1.5.3 Mezclado de sólidos y pastas[46] [47]

En el comercio se encuentran dispositivos muy diversos para conseguir el mezclado de sólidos y de pastas. Todos ellos se basan en algunos de los dos modelos siguientes: a) para el mezclado de pastas y b)para el mezclado de partículas sólidas. Los principales son unos agitadores o paletas que a modo de batidora, remueven la mezcla contenida en un tanque, mientras que para los segundos son unos dispositivos mezcladores que agitan el recipiente en su conjunto, o mecanismo de vaivén en el interior de la masa sólida.

---

46 PERRY H, Robert. Manual del Ingeniero Químico. 6ª Ed. México: McGraw-**Hill,** 1992. 21-3pp–21-8pp.

47 Ing. Q. De León de Paz, Otto Raúl. Manejo de Sólidos en Ingeniería Química. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 2001. 75pp-84pp.

1.5.3.1 Mezcladores convectivos o estacionarios

1.5.3.1.1 Mezclador de banda (cinta)

Dentro de este subgrupo hay diversos tipos. Algunas de las características que se pueden variar para ajustarlas a materiales que van de los finamente divididos y de baja densidad, que se airean con rapidez, hasta los fibrosos o pegajosos que requieren una ayuda positiva de descarga, son la inclinación y la sección transversal de la banda, los franqueos entre la cinta exterior y el caso y el número de espiras sobre la banda. Otras variaciones de la construcción son la descarga central o en el extremo y el montaje de paletas o aspas de corte sobre el eje central. Se puede utilizar una banda amplia para elevar y transportar, mientras que una estrecha cortará el material mientras lo transporta. La banda es adaptable al mezclado por lote o continuo.

1.5.3.1.2 Mezclador de tornillo vertical (gusano vertical)

Este subgrupo tiene también diversas variaciones. En este grupo, el gusano gira sobre su propio eje, mientras que describe también una órbita en torno al eje central del tanque cónico. En otra variación, el gusano no describe una órbita y permanece en el centro del tanque cónico, inclinado de modo que el área de barrido aumenta constantemente conforme se incrementa la altura. En otro tipo, el tonillo central está contenido en un alojamiento cilíndrico interno. Este tipo de mezclador es apropiado, primordialmente, para los sólidos secos que fluyen libremente. Entre las ventajas: consume poca energía, tiene tiempo de mezclado cortos, ocupa poco espacio horizontal, genera poco calor.

Y las desventajas: quebrantan los sólidos (los muy finos), es poco homogéneo pues tiene a sedimentar por segregación.

1.5.3.1.3 Mezclador de rotores gemelos (tornillo sin fin)

Consiste en dos ejes con paletas o gusanos alojados en un casco cilíndrico. Existen varios tipos con velocidades del eje que van desde moderadamente baja hasta relativamente elevada. El rotor gemelo es útil para el mezclado continuo de sólidos que no fluyen con libertad; se pueden agregar líquidos, hay un desgaste menor del producto y se pueden añadir materiales más allá de la entrada. Es de fácil adaptación para el calentamiento o el enfriamiento. Algunas máquinas están diseñadas específicamente para la transferencia de calor durante el mezclado.

1.5.3.1.4 Mezclador de rotores simples (tornillo sin fin)

Consiste en un eje simple con paletas alojado en un casco cilíndrico. Este tipo existe con velocidades relativamente elevadas; aunque, en algunos casos, se emplean velocidades más bajas. Un rotor simple de alta velocidad proporciona el máximo impacto corto de un molino triturador. El rotor simple se utiliza para la desintegración y la dispersión intensa; existe con alojamiento divididos y es apropiado para el calentamiento o el enfriamiento y para la adición de pequeñas cantidades de líquido.

1.5.3.2 Mezcladores difusivo o volteadores

Es adecuado para el mezclado suave; puede manejar grandes volúmenes; se limpia con facilidad y es adecuado para materiales abrasivos y polvos densos. No sirve para romper aglomerados.

1.5.3.2.1 Tambor con paletas deflectoras (tambor horizontal)

Tiene forma de un cilindro horizontal rotatorio en cuyo interior se fijan paletas pro y contra. Estas paletas están pegadas al cilindro, moviéndose con el. Tienen también paletas longitudinales soldadas a la pared del cilindro. Se rotan a velocidades de 20 a 70 rpm. Se llenan un 40% de su volumen vació. En ellas el sólido se revuelve de arriba abajo, pero también se eleva y cae por el aire, donde se encuentra las paletas que actúan como repartidores que hace que el sólido caiga hacia una punta o hacia la otra. Mezclan en forma bastante precisa. Es difícil de descargar y limpiar.

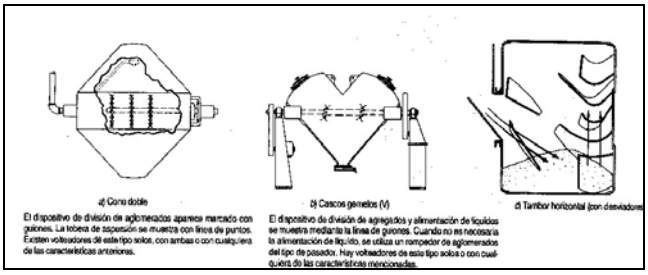
1.5.3.2.2 Mezclador de doble cono

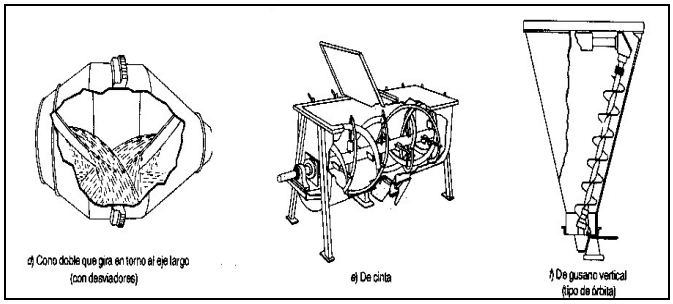
Es una especie de tipo tolva de sección redonda, rota sobre un eje de rotación. Adentro tiene paletas repartidoras que suministra un ligero movimiento horizontal. Es del tipo difusivo, se llena al 50% de su volumen vacio y se orbita a rpm bajo. Trabaja preferiblemente polvos finos y de gran flotabilidad (que hacen polvaredas), poco cohesivos. Son fáciles de descargar, son precisos y trabajan en batch.

1.5.3.2.3 Mezclador en “V” (de pantalón)

Es quizá el mejor y más adaptable mezclador. Cosiste en dos cilindros que se sueldan en forma de codo, con un eje de rotación horizontal y secciones de carga en las “patas del pantalón” y descarga en la “cintura”. Los sólidos se ponen en los extremos y se descarga por el centro. Tiene paletas internas de reparto. Este mezclador es predominantemente difusivo, pero tiene también fuertes componentes de tipo convectivo y por cortes, es muy completo y muy preciso, es el más rápido en cuanto a tiempo. Se llena a 60% de su volumen vacío. Sin embargo no puede trabajar en continuo y es caro.

Figura 85. Tipos de máquina mezcladoras de sólidos





Continuación

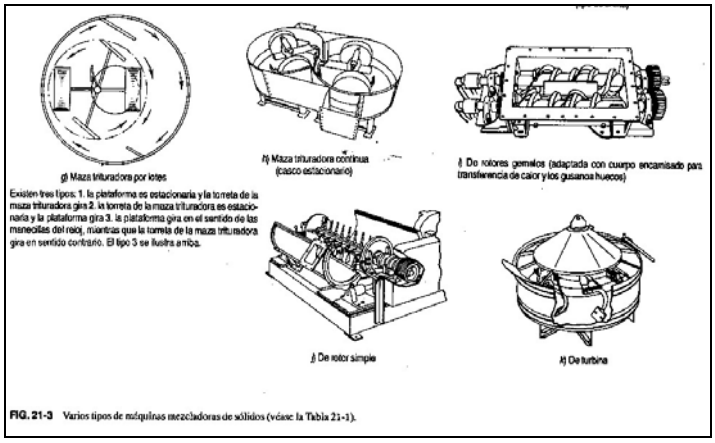


FIG. 21-3 Varios tipos de máquinas mezcladoras de sólidos (véase la Tabla 21-1).

Fuente: PERRY H, Robert. Manual del Ingeniero Químico. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 21-6pp.

1.5.3.3 Mezcladores de pastas y materiales viscosos[48]

1.5.3.3.1 Mezclador de tanques cambiables

Son verticales y para operaciones por lotes, el recipiente es una unidad separada que se coloca o retira con facilidad del marco de la máquina. Existen en capacidades de 4 a 1200 l. El tipo más común es la mezcladora de rieles. Los recipientes separados permiten que los lotes se pesen o midan cuidadosamente antes de introducirse a la mezcladora propiamente dicha.

48 PERRY H, Robert. Manual del Ingeniero Químico. 6ª Ed. México: McGraw-**Hill,** 1992. 19-16pp–19-27pp.

1.5.3.3.2 Mezclador de tanques estacionario

Se recomiendan las mezcladoras de tanque estacionario cuando no se obtiene ninguna ventaja al poder cambiar el recipiente, para el transporte o el almacenamiento, cuando el tamaño de los lotes es demás de 600 l y cuando la alimentación y el producto se pueden manejar de manera conveniente por medio de canalones o tuberías.

1.5.3.3.2.1 Mezcladores de compuerta

Una de las mezcladoras de tanque estacionario más antiguas es la de compuerta. Una estructura giratoria plana de barras horizontales y verticales corta la pasta a diferentes niveles y en la pared del tanque, donde hay barras estacionarias que se pueden sujetar, para dar puntos de corte intensivos. La mezcla lenta de la masa se produce por la acción centrífuga ligera de las aspas giratorias. Las mezcladoras de compuerta procesan adecuadamente pinturas, pastas de almidón, recubrimiento y aprestos.

1.5.3.3.2.2 Mezcladores de aspas helicoidales

El elemento de mezclado puede ser una hélice cónica o cilíndrica, con un listón espaciado radialmente del eje, por medio de rayos o un tornillo, que tiene una superficie helicoidal continua, desde el eje hasta la periferia de la hélice.

Estos mezcladores se utilizan en las reacciones de polimerización, en las que se requiere un mezclado uniforme pero la dispersión con efecto cortante elevado no es necesaria. La adición de la paleta interna contribuye un poco más al movimiento en el mezclado de fluidos newtonianos, pero reduce en forma significativa el tiempo de mezclado en los sistemas no newtonianos con una cantidad adicional despreciable de potencia en el impulsor.

1.5.3.3.3 Extrusores de tornillo simple (Mezcladoras continuas)

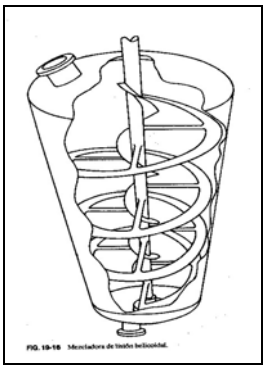
El extrusor de gusano simple se utiliza con frecuencia como dispositivo mezclador en la industria de los plásticos. Los estabilizadores, los concentrados de colores, etc., se pueden mezclar con polímeros brutos granulares, fundirse y extruirse en fibras, láminas o varillas.

1.5.3.3.4 Mezcladoras continuas de tornillos gemelos

Las mezcladoras continuas de tornillos o gusanos gemelos pueden ser tangenciales o entrelazadas. Los diseños tangenciales permiten diámetros mayores del eje u entradas más altas de energía. Las aspas pueden funcionar con diferentes velocidades para provocar el desplazamiento del material de una sección del cuerpo a otra. Los tornillos que se entrelazan proporcionan una superficie adicional de corte de aspas contra aspa. Esta característica les permite autoenjugarse. Las máquinas de tonillos gemelos se utilizan para fusiones, mezclas, coloreado y homogenización de diferentes polímeros.

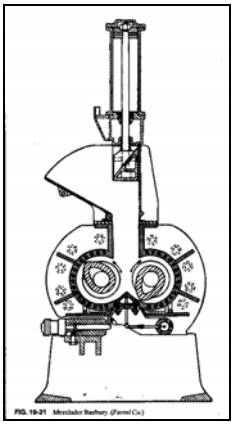
Las operaciones de mezclado que requieren la incorporación de rellenos, agentes de refuerzo, fibra de vidrio, etc., se pueden efectuar continuamente en esas mezcladoras.

Figura 86. Mezcladora de pastas y materiales viscosos de listón helicoidal



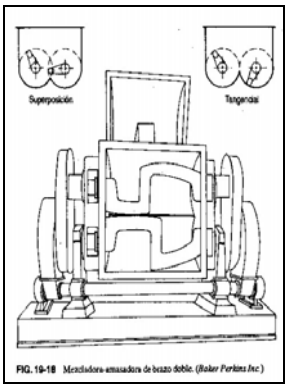
Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico**. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 19-17pp – 19-114pp.

Figura 87. Mezcladora intensivas de pastas y materiales viscosos *Banbury*



Fuente: PERRY H, Robert. Manual del Ingeniero Químico. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 19-17pp – 19-114pp.

Figura 88. Mezcladora de pastas y materiales viscosos amasadora de brazo doble



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico**. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 19-17pp – 19-114pp.

1.5.4 Almacenaje de materiales

Es una etapa importante en la fabricación de un producto industrial, tanto para la etapa de manejo de las materias primas, como las etapas de productos intermedios o finales, antes de su procesado o venta. Se dividen en:

1.5.4.1 Almacenaje de sólidos[49][50]

Los sólidos que son inalterables a la acción de los agentes atmosféricos locales, se suelen almacenar en grandes pilas a la intemperie o en hangares sin mucha protección, por ejemplo, la arena, la sal común, etc. Mientras que los sólidos que si son alterables a la acción de los agentes atmosféricos locales, se almacenan en **grande hangares cerrados o en silos**. Estos son recipientes cilíndricos con descarga por transporte neumático o cuchara mecánica. La carga de materiales sólidos a otras Operaciones Unitarias del proceso, se suele hacer mediante **tolvas**, que son recipientes contenedores con descarga por gravedad en su parte inferior. Cuando el transporte de sólidos es continuo, éste se realiza mediante **cintas transportadoras y elevadores de cangilones o elevadores de cadena.**

1.5.4.1.1 Almacenaje al aire libre

Los sólidos no lábiles a la atmósfera, se pueden apilar ya sea en el piso nivelado o bien en un enlozado de concreto, para no perder material. Típico de almacenaje de arena, piedrin, mineral de mina. Debe vigilarse que:

---

49 PERRY H, Robert. Manual del Ingeniero Químico. 6ª Ed. México: McGraw-**Hill,** 1992. 7-22pp–7-42pp.

50 Ing. Q. De León de Paz, Otto Raúl. Manejo de Sólidos en Ingeniería Química. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 2001. 12pp-23pp.

- El fondo del apilado quede de manera que no se formen estanques pues esto puede ser malo.
- De preferencia el sector de almacenaje debe tener un declive hacia un centro longitudinal o bien hacia un punto central.
- Que el apilado se ubique donde no haya viendo excesivo.

Puede utilizarse apilado de cono o en camellones. Hay que conocer el ángulo de reposo interno del material para no arriesgar desborde y para poder calcular el volumen del sólido a llenar.

1.5.4.1.2 Bajo techo y protegido

Cuando el material es lábil al ambiente, pero no se desea gastar mucho en almacenarlo, se puede emplear la misma estructura de almacenaje al aire, pero esta vez sobre el suelo se pone tiras o lienzos de plástico grueso que impermeabilicen el suelo, y luego sobre el material otros lienzos. Otra forma se hace un galerón techado sencillo y su piso declinado de loza concreto, con canal de sacado.

1.5.4.1.3 Silos y Tolvas

Dos de las definiciones más importantes de las características de flujo en un recipiente de almacenamiento son el *flujo de masa*, que significa que todos los materiales en el recipiente se desplazan cundo se retira una parte y el *flujo de embudo*, que se produce cuando fluye sólo una porción del material

Un **silo** es un cilindro metálico o de cemento cuyo techo es cónico hacia arriba y cuyo fondo es plano. Se carga por arriba y al centro se descarga por el centro del mismo con un transportador de sólido o tornillo sin fin u otro. Una **tolva** es una especie de embudo que se pone en la parte baja de los conteiner

de sólidos y que permite sacar en un punto mas estrecho el material donde se puede poner un saco o un dosificador automático. Las tolvas como tales acumulan poco material, y por lo tanto a menudo van unidas a un silo cilíndrico ubicado encima de ellas. La pareja casi siempre va unida y se les confunde, siendo prudente tener los silos con fondo tolvado.

La sección pede ser semicuadrada pero lo mejor es que sea circular. Las **silo-tolvas** pueden tener agitación metálica interna o externa. Se puede hacer de madera, cemento metal o plástico reforzado y conviene que sean de un material liso y pulido.

1.5.4.1.4 Almacenaje en forma segmental

Los contenedores para sólidos incluyen bolsas, cajones de gran tamaño, cajas de cartón y tambores. Aunque el contenedor a granel flexible intermedio, IBC ha llegado a ser un embalaje importante en el comercio mundial, la mayor parte de los embalajes usados son las bolsas de papel de capas múltiples, complementadas con bolsas de diseño similar que tienen una película plástica o un entramado plástico. Las **bolsas** no ocupan mucho espacio, son paquetes más comunes para casi todos los materiales granulados o en polvo, así como también para briquetas o bloques de sólidos, pero la desventaja es que se pueden romper y desperdicia volumen al estibarse juntas. Los **tambos,** se pueden rodar y son más consistentes que las bolsas, las desventajas son que hay más desperdicio de volumen y son difíciles de paletizar que las bolsas, no son para carga humana sino mecánica. Las **cajas** la ventaja es que desperdician poco volumen, son resistentes y se pueden paletizar, las cajas grandes se utilizan mucho para el envío de resinas y las pequeñas para algunos materiales de tamaño regular tales como sosa caústica y para productos de baja densidad a granel.

Figura 89. Disposiciones de descarga de transportadores de bandeja

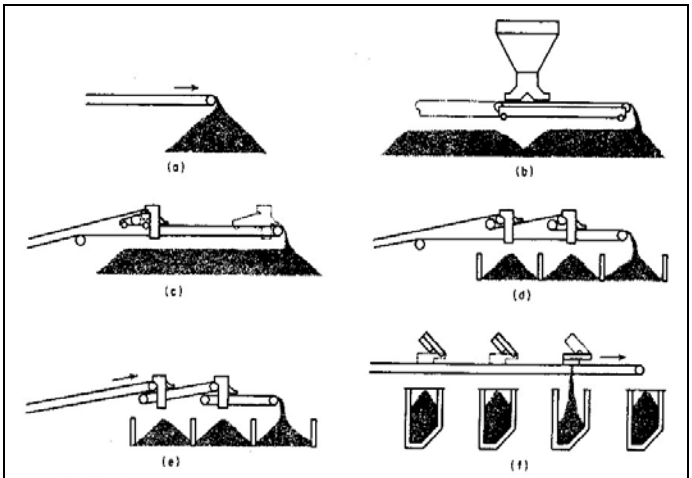


FIG. 7-14 Disposiciones de descarga de transportadores de banda. a) La descarga sobre la polea final forma un montón cónico al extremo de la banda. b) Descarga sobre polea final para la distribución longitudinal mediante un transportador corto reversible. c) Descarga por medio de un basculador deslizante, con o sin transportador transversal, para distribuir materiales a uno o los dos lados del transportador a todo lo largo del recorrido del basculador. Los basculadores se pueden impulsar mediante una banda de transportador o un motor separado. Los basculadores impulsados a motor se pueden invertir también en forma automática, para distribuir materiales uniformemente o se pueden controlar manualmente para efectuar la descarga en cualquier punto que se desee. d) Descarga mediante basculadores fijos, con o sin transportador transversal a uno o los dos lados de la banda, a aberturas fijas de tolvas o montones en lugares escogidos. También se puede hacer con transportadores múltiples, como se muestran en e) o mediante la detención de basculadores deslizantes en las posiciones deseadas. e) Descarga de transportadores múltiples por vertederos fijos de descarga, con o sin transportador transversal a uno o los dos lados de la banda, a aberturas fijas de tolvas o ubicaciones de montones. f) Descarga mediante rejas con bisagras a uno o más lugares fijos a lo largo de uno o los dos lados del transportador. Las rejas se pueden ajustar para dividir la descarga entre varios lugares, en forma simultánea, en las proporciones deseadas. (*FMC Corporation, Material Handling Systems Division.*)

Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico**. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 7- 22pp–7-42pp.

Figura 90. Tolva de flujo de masa

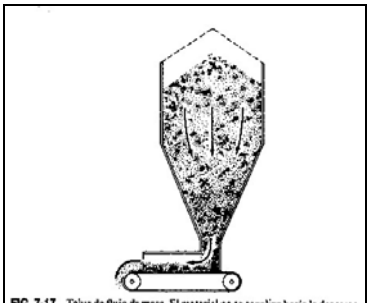


FIG. 7-17 Tolva de flujo de masa. El material no se canaliza hacia la descarga. (*Con autorización de Chemical Engineering.*)

Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico**. 6ª Ed. México: McGraw-Hill**,** 1992. 7- 22pp–7-42pp.

Figura 91. Tolva de flujo de embudo

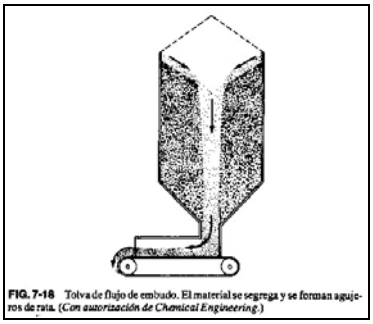


FIG. 7-18 Tolva de flujo de embudo. El material se segrega y se forman agujeros de rata. (*Con autorización de Chemical Engineering.*)

Fuente: PERRY H, Robert**. Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill**,** 1992. 7- 22pp–7-42pp.

1.5.4.2 Almacenaje de líquidos[51]

Los líquidos en grandes cantidades se almacenan **en tanques cilíndricos de base ancha** y no mucha altura. Los productos volátiles o inflamables se suelen almacenar en **tanques de techo flotante**. En ellos el techo metálico descansa directamente sobre el líquido a través de un acoplamiento flexible, logrando así, reducir al máximo la cámara de vapor, y el riesgo de explosión e incendio. Los líquidos en pequeña cantidad pueden almacenarse en **depósitos cilíndricos horizontales.**

1.5.4.2.1 Tanques atmosféricos

Se emplea aquí el término de “tanque atmosférico” para cualquier depósito diseñado para su utilización dentro de más o menos varios centenares de pascales (unas cuantas libras por ft cuadrado) de presión atmosférica.

[51] PERRY H, Robert. Manual del Ingeniero Químico. 6ª Ed. México: McGraw-**Hill,** 1992. 6-111pp–6-115pp.

Puede estar abiertos a la atmósfera o cerrados. Por lo común, se obtiene el costo mínimo en una forma cilíndrica vertical y un fondo relativamente plano al nivel del terreno.

1.5.4.2.1.1 Tanques elevados

Éstos pueden proporcionar un flujo grande cuando se requiere, pero las capacidades de bombeo no tienen que ser de más del flujo promedio. En esa forma, es posible ahorrar en inversiones de bombas y tuberías. También proporcionan flujo después que faltan las bombas, lo que constituye una consideración importante en los sistemas contra incendios.

1.5.4.2.1.2 Tanques abiertos

Éstos se pueden utilizar para almacenar materiales que no se vean dañados por el agua, el clima o la contaminación atmosférica. De otro modo, se necesitará un tejado, ya sea fijo o flotante.

1.5.4.2.2 Tanques a presión

Se pueden construir tanques cilíndricos verticales con tejados escalonados o de cúpula, que funcionan a presiones por encima de varios cientos de pascales; pero que se acercan todavía bastante a la presión atmosférica. La fuerza de la presión que actúa contra el tejado se transmite al cuerpo del tanque, que puede tener un peso suficiente para resistirla. Si no es así, la fuerza ascendente actuará sobre el fondo del tanque. Sin embargo, la resistencia del fondo es limitada y si no es suficiente, se recomienda que se utilice un anillo de anclaje o una cimentación fuerte.

1.5.4.2.3 Estanques y almacenamiento subterráneo

Los materiales líquidos de bajo costo, si no se dañan debido a las lluvias o la contaminación atmosférica, se pueden almacenar en estanques. Se puede formar uno de estos últimos mediante la excavación o la construcción de presas en una barranca. Para evitar las pérdidas por filtración, el suelo que estará sumergido puede requerir un tratamiento para hacerlo suficientemente impermeable. Esto también se puede lograr recubriendo al estanque con concreto, películas de plástico o alguna otra barrera. La inversión tanto en instalaciones de almacenamiento como en terrenos se puede reducir con frecuencia mediante el almacenamiento subterráneo.

Figura 92. Tanques de almacenamiento de líquidos de tipo atmosférico

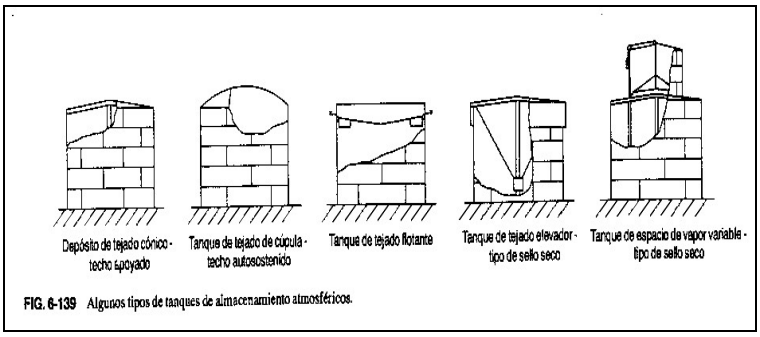


FIG. 6-139 Algunos tipos de tanques de almacenamiento atmosféricos.

Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico.** 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 6- 111pp–6-115pp.

1.5.4.3 Almacenaje de gases[52]

Los gases se almacenan de muy distintas maneras, según las condiciones en las que se encuentren. Los **gasómetros** son grandes recipientes metálicos de techo móvil, cuya finalidad es almacenar gas a baja presión para su suministro, por ejemplo el gas de ciudad, el hidrógeno y otros. Los gases fácilmente licuables se almacenan como líquidos a temperatura ambiente en **tanques esféricos**, ya que presentan mejor resistencia a la presión por su forma simétrica.

1.5.5 Transporte de materiales

Todo transporte va a menudo asociado a un mecanismo de alimentación, llamado *dosificador*, que controla el flujo de entrada, y otro de descarga llamado *descargador*, que obliga al sólido a bajar del transportador.

1.5.5.1 Transportadores de cinta o banda

Básicamente consiste en una cinta que corre sobre rodillos móviles tensados, y que, cuenta con un alimentador (o varios). La cita se puede ser de lona, rayón, nylon, hule y puede ir reforzada con tensores de acero. Su longitud puede ir de algunos metros a 1 o 2 kilómetros. Su ancho es variable. Se puede fabricar con diferentes poderes de resistir tensión longitudinal: asó a lona de 140 a 500 lb/pulg lineal a lo ancho (de acuerdo al espesor), de 1500 el rayón y de hasta 6000 el hule reforzado con acero. Generalmente son horizontales pero pueden subir en ángulo máximo de 30°.

---

52 PERRY H, Robert. Manual del Ingeniero Químico. 6ª Ed. México: McGraw-**Hill,** 1992. 6-115pp–6-116pp.

Corren con velocidad hasta de 300m/min, su capacidad puede llegar a ser de 5000 tn/h. Puede llevar sólidos abrasivos y corrosivos, pero no es buena para los pegajosos.

1.5.5.2 Elevador de cangilones

Este es el clásico elevador de sólidos para subidas verticales o muy inclinadas, ya que llévale sólido en canastillas o cubetas (cangilones). De preferencia con materiales no muy pegajosos y no polvosos. Mueve materiales de distinto tamaño, pero no los muy finos, pero si puede llevar terrones grandes (5”).

1.5.5.3 Tornillo sin fin o gusano (Auger)

Este consiste en un tornillo metido en un ducto, con un cargador dosificador y un descargador. Pueden ser verticales, horizontales y oblicuos. Son versátiles, pues pueden servir de mezcladores, de calentadores (friccionadotes), secadores. Los hay de paso uniforme o no uniforme, de diámetro constante o no constante. Se les puede fabricar de muchos materiales y son excelentes para tener un flujo definido y constante. Pueden trabajar materiales pegajosos, polvosos y abrasivos, pero son caros y consumen mucha energía al operar.

1.5.5.4 Transportador de cadena

Estos están cayendo en desuso. Es un híbrido entre el cangilón y la banda o cinta. Consiste en una cadena o conjunto de marcos que se deslizan sobre una cinta fija o bien móvil, pero en general fija, arrastrando el material. Va metida entre unos bordes fijos que le permiten que retenga mejor el material, pero este puede dar problemas si es abrasivo, pues se come la banda del fondo y los laterales. Entre más abrasivo sea el material, más lenta corre la cadena, de 15 pies/min. Si el ángulo se empina. El arrastre decrece.

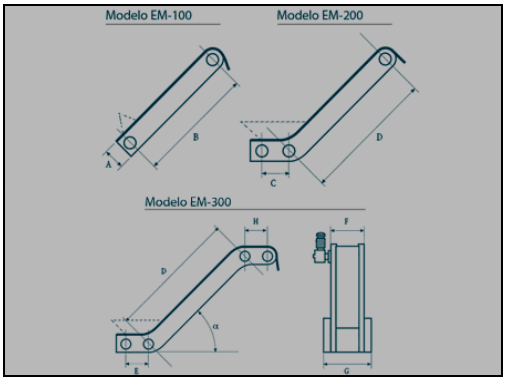
1.5.5.5 Transporte vibratorio

Una especie de artesa que vibra salta de arriba abajo y de adelante atrás, manera que la partícula cae delante de donde estaba. Se usa con sólidos no pegajosos no flotables, no friables. Puede ser usado en ángulo máximo de 5°. Vibra de 150 a 900 veces por/ minuto y su largo no excede a 200 pies. Puede combinarse con tamices.

1.5.5.6 Transporte con lecho fluidizado

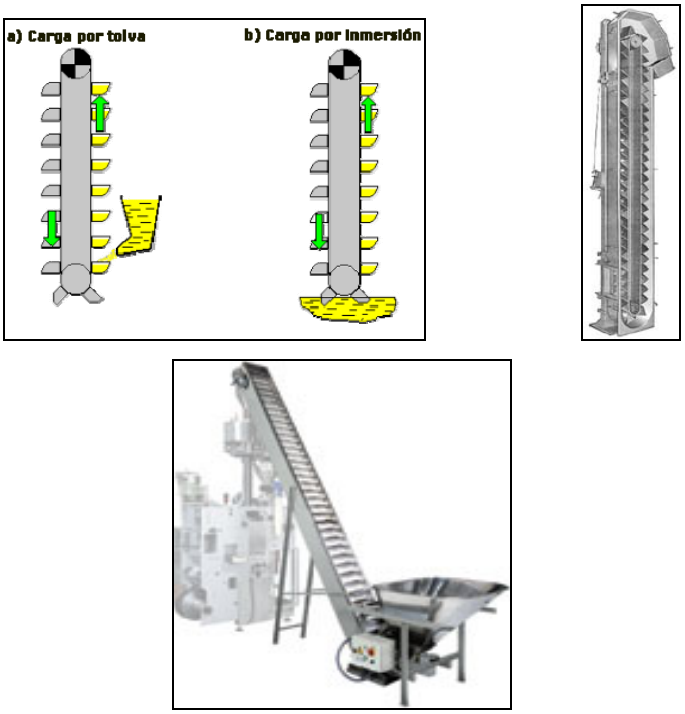
Este es un transportador que esta poniéndose muy de moda, pues aprovecha arrastre de un gas o un líquido, para llevar en si seno a un sólido, el cual es separado después por medio de arrastre. Puede llevar grandes cantidades de sólidos agrandes distancias, horizontales, oblicuo o verticales. Sirve para sólidos de densidad real de 1 a 200 lb/pie^3 y el tamaño de fino de ¼”, capacidad de 1000 a 100,000 lb/h.

Figura 93. Transportadores de cinta o banda



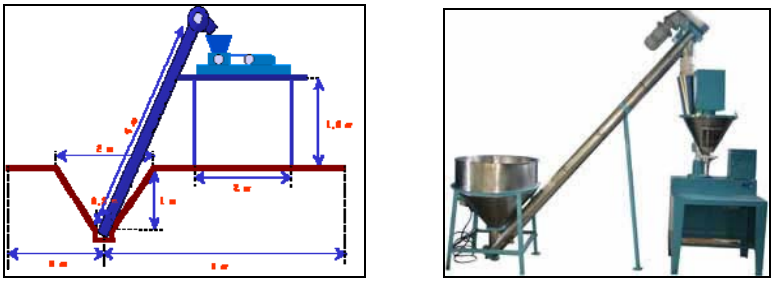
Fuente: PERRY H, Robert**. Manual del Ingeniero Químico**. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 6- 115pp–6-116pp.

Figura 94. Elevadoradores de cangilones



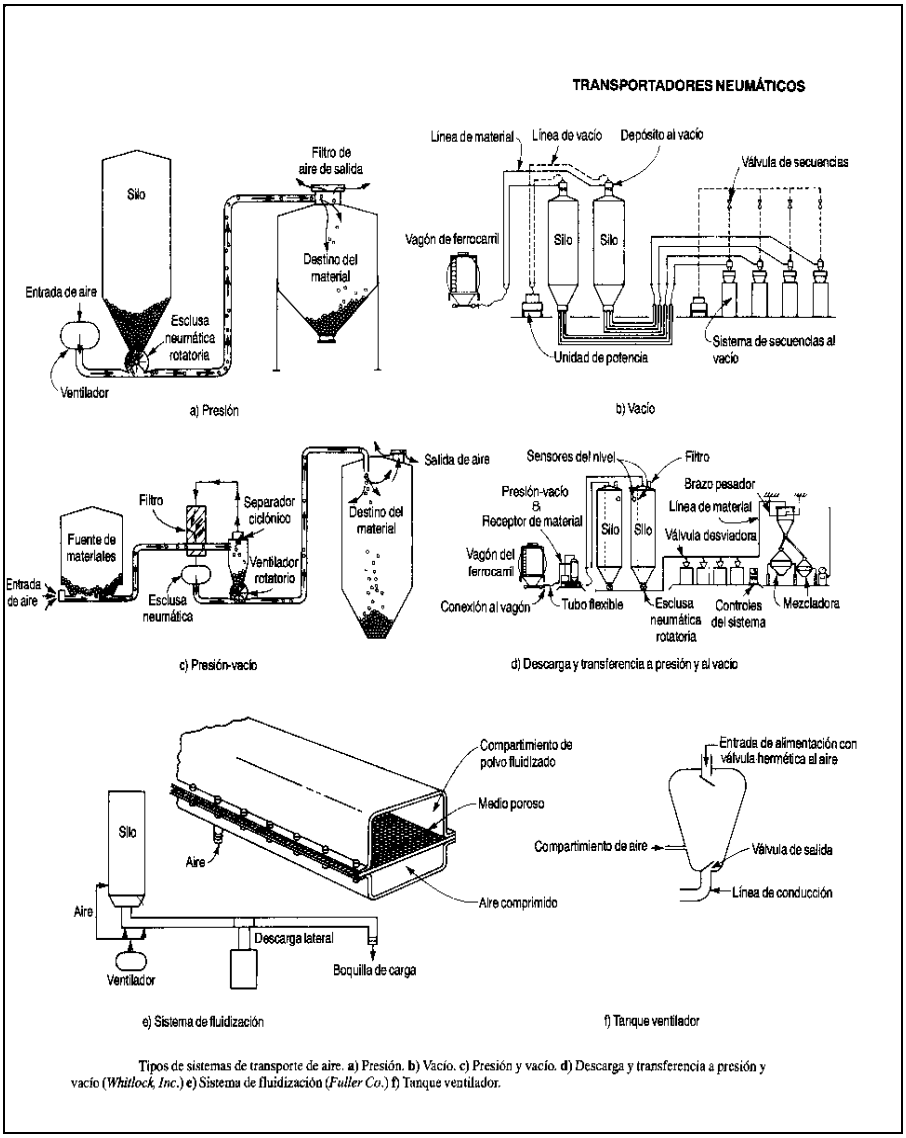
Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico**. 6ª Ed. México: McGraw-Hill**,** 1992. 6- 115pp–6-116pp.

Figura 95. Tornillo como elevador



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico**. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 6- 115pp–6-116pp.

Figura 96. Tipos de sistemas de transporte de aire



Tipos de sistemas de transporte de aire. **a)** Presión. **b)** Vacío. **c)** Presión y vacío. **d)** Descarga y transferencia a presión y vacío (*Whitlock, Inc.*) **e)** Sistema de fluidización (*Fuller Co.*) **f)** Tanque ventilador.

Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico**. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 6- 115pp–6-116pp.

1.6 Operaciones Unitarias químicas

Puesto que todos los procesos químicos giran en torno al reactor químico, uno de los factores más importante para determinar la economía general del proceso es el diseño del reactor. Contrariamente a lo que sucede con el equipo para procesos de transferencia de masa o de calor, no existe ningún método directo para diseñar equipos en los que se pueda desarrollar una reacción química. Esto implica que los reactores deben diseñarse para cubrir los diferentes requerimientos de los sistemas reaccionantes específicos.

1.6.1 Reactores químicos

Los reactores químicos tienen por objetivo distribuir de una forma distinta los átomos de una molécula para dar otra, es decir, el paso de los reactivos a los productos. Se da en los reactores químicos; para el diseño de estos se deben estudiar estas características:

- Asegurar de que el modo de fluir de los reactivos sea total, para conseguir la mezcla deseada,
- Proporcionar el tiempo de contacto necesario entre las sustancias y el catalizador (si lo hay) hasta lograr la extensión deseada de la reacción,
- Permitir que se adquieran las condiciones de presión, temperatura y composición de modo que la reacción tenga lugar en el modo y la velocidad deseada, para lo cual hay que atender a los aspectos termodinámicos y cinéticos de la reacción.

Los **modeles de flujo**: son las formas en que se ponen en contacto los fluidos en el reactor químico. Existen dos grandes tipos de modelos de flujos que son ideales, en la realidad nunca se dan pero sirven de referencia:

- **Modelo de mezcla perfecta**: lo que se consigue es que exista una homogeneidad perfecta en la reacción, todos los puntos han de tener la misma temperatura y presión, consiguiendo que toda la mezcla que se extraiga tendrá idénticas condiciones a la que está en el interior del reactor.

- **Modelo de flujo en pistón (de flujo tapón):** se basa en que el fluido entra sin haber cambios de concentración a lo largo del eje en que se mueven los reactivos. El tiempo de permanencia en el reactor es el mismo para todos los componentes. En cada uno de los cambios los reactivos tienen la misma temperatura y composición en cada punto a lo largo del reactor.

Todos los modelos que se diseñan de reactores químicos están basados en uno de estos dos modelos de flujo.

El modelo de mezcla perfecta da lugar a un reactor de tanque agitado.

El modelo de pistón o tapón da lugar a un reactor tubular.

En el reactor de tanque agitado es muy difícil obtener la homogeneidad en el interior ya que aparecen caminos preferentes. En el reactor tubular las interacciones con todas las zonas son muy difíciles ya que hay reacciones radiales.

1.6.1.1 Reactores de tanque agitados

Dentro de los reactores de tanque agitado en los que se puede trabajar de forma continua o discontinua obteniendo producciones pequeñas y medianas ya que la velocidad no es muy grande, se puede trabajar en un amplio rango de temperatura y presión, y permiten trabajar con o sin reflujo.

Son un recipiente donde se encuentra un fluido (reaccionante) y se eliminan del sistema, se puede controlar la presión y la temperatura del sistema. Para regular la temperatura:

- Colocación de camisas de vapor.
- Colocando un serpentín.
- Método de la recirculación exterior del líquido. Colocando un calentador que hace circular un líquido que recircula una vez que se ha enfriado.

Estos reactores se emplean para reacciones homogéneas de líquido, también cuando los reactivos son líquidos y dan lugar a un sólido. También se emplean cuando los reactivos son líquidos menos uno que es un gas que se hace borbotear en el líquido.

1.6.1.1.1 Reactores biológicos

Intervienen organismos vivos. Base de la biotecnología. Dentro de ellos se tienen los autoclaves o fermentadores (reactores tanque agitado).

1.6.1.2 Reactores tubulares

Los reactores tubulares se emplean cuando se trabaja con reactivos en fase gaseosa. En ellos es frecuente la presencia de catalizadores que normalmente se encuentran en fase sólida. Se tiene una catálisis heterogénea. El diseño de estos reactores depende de la exotermicidad del proceso y también del tiempo de residencia necesario en el interior del reactor.

1.6.1.2.1 Reactores tubulares calentados a fuego directo

Consiste en tubos colocados en un horno, la reacción tiene lugar en el interior de los tubos y va catalizada.

1.6.1.2.2 Reactores tubulares de carcasa y tubos

Son similares a los intercambiadores de calor de carcasa y tubos, la reacción tiene lugar en el interior de los tubos y circulando por el intermedio un refrigerante o un calefactor para conseguir la temperatura adecuada, también pueden usar catalizadores.

1.6.1.2.3 Reactores tubulares de lecho: (fijo, móvil, fluilizado)

a. El *catalizador es fijo* ya que ocupa una posición dada en el espacio. Lo normal es colocar varias capas de catalizadores a diferentes alturas y entre ellas existen intercambiadores de calor.
b. En los de *lecho móvil* las partículas se mueven continuamente del reactor a un recipiente anexo donde se limpia y regenera el catalizador. Se emplea cuando hay reacciones muy exotérmicas también se emplean cuando la reacción da productos no deseados que contaminan el catalizador e inhiben su acción.
c. En los de *lecho fluilizado* las partículas del catalizador tienen un movimiento mucho más libre, son menos compactas. Se emplean en la industria petroquímica. Suele haber varias capas y en medio existe refrigeración o calefacción.

1.6.1.2.4 Reactores tubulares de hornos rotatorios

Se emplean en la industria del cemento. Son una variante de los tubulares. El sólido avanza por el tubo gracias a una cierta inclinación. Todos los componentes son sólidos. La inclinación va acompañada de una rotación. Se emplean altas temperaturas.

1.6.1.2.5 Reactores electroquímicos

La energía se da en forma de corriente eléctrica continua, en los electrodos se obtienen los productos de reacción.

Figura 97. Reactores de tanque agitado

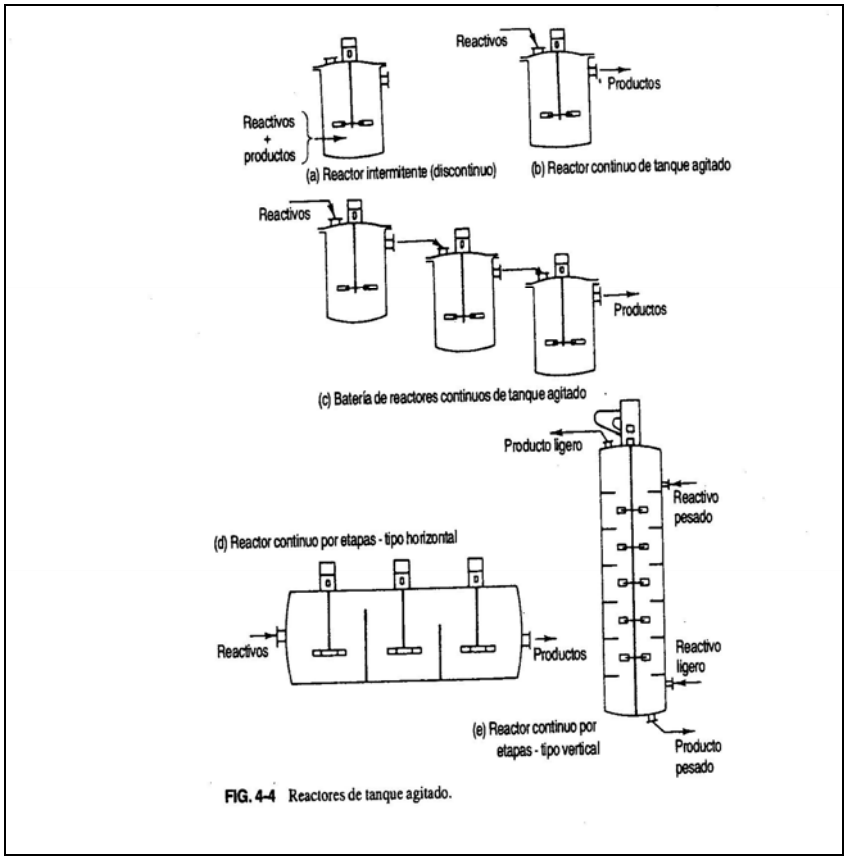
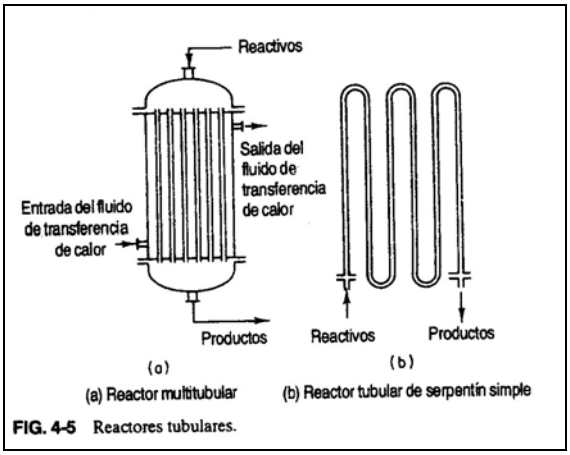


FIG. 4-4 Reactores de tanque agitado.

Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico**. 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 1992. 6- 115pp–6-116pp

Figura 98. Reactores tubulares



Fuente: PERRY H, Robert. **Manual del Ingeniero Químico**. 6ª Ed. México: McGraw-Hill**,** 1992. 6- 115pp–6-116pp

A continuación se describen dos procesos de manufactura para la obtención de azúcar de dos ingenios azucareros, cada uno de estos ingenios en su proceso tienen muchos factores en común pero a la vez tienen algunas variantes durante el proceso, pero ambos con un mismo fin como se menciono la obtención del producto final azúcar, a través de estos procesos de se trata de ejemplificar en que consisten las Operaciones Unitarias que se describieron con anterioridad como se emplean en un proceso real.

PROCESO 1: PRODUCCIÓN DE AZUCAR (Ingenio Azucarero 1)

El cultivo de la caña de azúcar, ha sido una de las actividades agroindustriales más importantes del país, teniendo en cuenta el área sembrada, la generación de empleo y la importancia de todos los productos derivados del proceso.

1. El Proceso se inicia con la adecuación del campo y el estudio del suelo, teniendo en cuenta la topografía del terreno, y de acuerdo a ella se localizan canales de riego, drenaje y vías de acceso.
El suelo se rotura haciendo uso de maquinaria y equipos especializados, dejándolo en adecuadas condiciones para la siembra. El cultivo de la caña requiere agua en la cantidad y forma oportuna para alcanzar una buena producción.

2. El corte se realiza manual o mecánicamente, utilizando parámetros de calidad que disminuyen los porcentajes de materia extraña.

3. Una vez cortada la caña, es alzada mecánicamente del campo y transportada a fábrica en tractores con los menores tiempos de permanencia.

4. Seguidamente la caña es descargada en las mesas transportadoras para pasar a las **picadoras y desfibradoras**, que la convierten en pequeños trozos facilitando la extracción del jugo en los molinos.
Es aquí cuando comienza la fase de **molienda**, a través de un tándem de molinos que extraen el jugo de caña.

5. En esta etapa se agrega agua caliente para obtener la máxima cantidad de sacarosa en un proceso llamado **maceración**.

El jugo obtenido es colado iniciando la primera etapa de calentamiento facilitando la sedimentación de sólidos insolubles y separándolos del jugo claro

que queda en la parte superior del clarificador, los cuales son llevados a los **filtros rotatorios** al vacío para la recuperación de su contenido de sacarosa.

6. El jugo claro es enviado al tándem de evaporación para ser concentrado hasta obtener la meladura, la cual es purificada en los **clarificadores** antes de ser llevada a los tachos.

7. Es en los **tachos** donde se produce la masa cocida conformada por cristales de azúcar y miel.

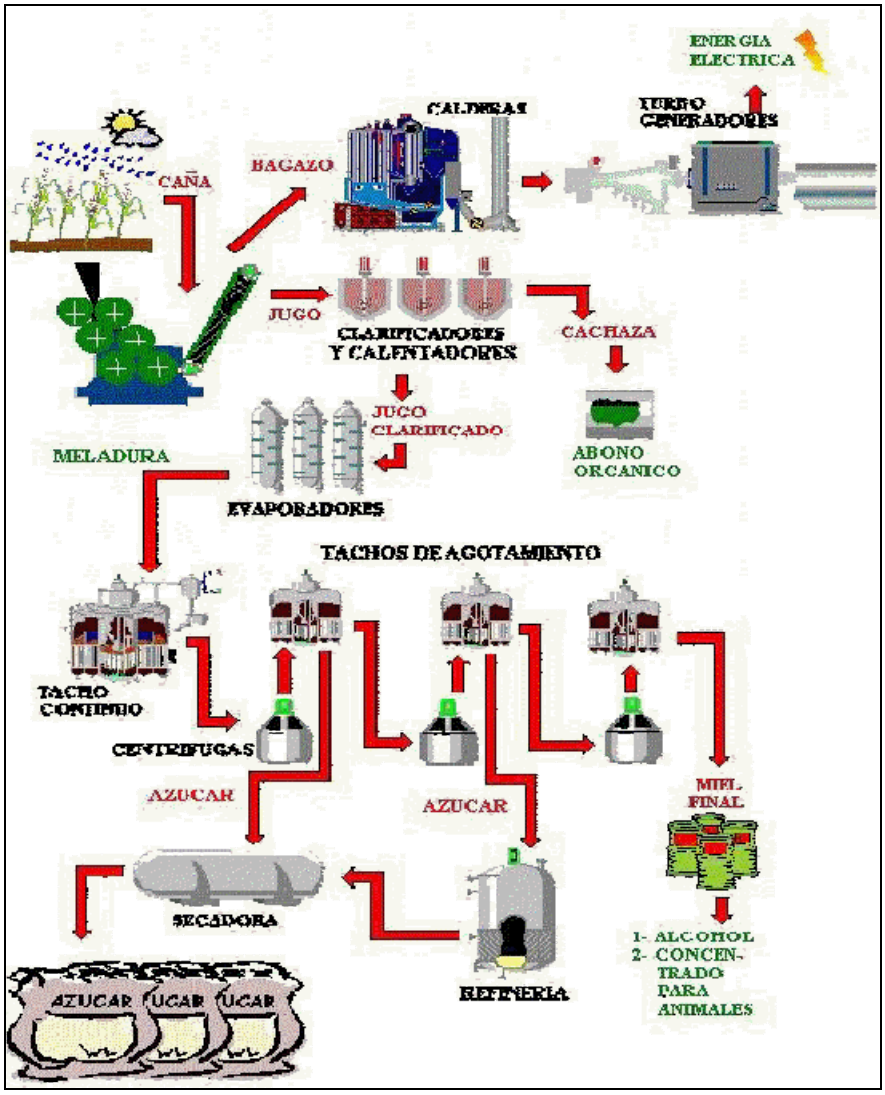
8. La masa cocida pasa a **centrífugas** de alta velocidad que separaran los cristales de azúcar del licor madre.

Durante este proceso, el azúcar es lavado para retirar los residuos de miel y posteriormente ser **secado y enfriado**.

9. Una vez el azúcar esté seco y frío, es **empacado** en sacos de diferentes presentaciones según las necesidades de los clientes.

Figura 99. Diagrama del proceso de elaboración de Azúcar

(Ingenio Azucarero 1)



PROCESO 2: PRODUCCIÓN DE AZUCAR (Ingenio Azucarero 2)

La caña de azúcar ha sido sin lugar a dudas uno de los productos de mayor importancia para el desarrollo comercial en el continente americano y europeo. El azúcar se consume en todo el mundo, puesto que es una de las principales fuentes de calorías en las dietas de todos los países.

El azúcar puede obtenerse principalmente a partir de la caña de azúcar y la remolacha azucarera. Para su obtención se requiere de un largo proceso, desde que la semilla de caña germina hasta que el azúcar se comercializa nacional e internacionalmente. A continuación se detalla el proceso en la fábrica.

1. Labores de campo y cosecha. El proceso productivo se inicia con la preparación del terreno, etapa previa de siembra de la caña. Una vez la planta madura entre los 12 y 14 meses, las personas encargadas de la tarea de cosecha se disponen a cortarla y recogerla a través de alce mecánico y llevarla hacia los patios de caña de los ingenios.

2. Patios de caña. La caña que llega del campo se muestra para determinar las características de calidad y el contenido de sacarosa, fibra y nivel de impurezas. Luego se pesa en básculas y se conduce a los patios donde se almacena temporalmente o se dispone directamente en las mesas de lavado de caña para dirigirla a una banda conductora que alimenta las picadoras.

3. Picado de caña. Las picadoras son unos ejes colocados sobre los conductores accionados por turbinas, provistos de cuchillas giradoras que cortan los tallos y los convierten en astillas, dándoles un tamaño uniforme para facilitar así la extracción del jugo en los molinos.

4. Molienda. La caña preparada por las picadoras llega a un tándem de molinos, constituido cada uno de ellos por tres o cuatro mazas metálicas y mediante presión extrae el jugo de la caña. Cada molino esta equipado con una turbina de alta presión. En el recorrido de la caña por el molino se agrega agua, generalmente caliente, para extraer al máximo la sacarosa que contiene el material fibroso. Este proceso de extracción es llamado **maceración.** El bagazo que sale de la última unidad de molienda se conduce a una bagacera para que seque y luego se va a las calderas como combustible, produciendo el vapor de alta presión que se emplea en las turbinas de los molinos.

5. Pesado de Jugos. El jugo diluido que se extrae de la molienda se pesa en básculas con celdas de carga para saber la cantidad de jugo sacaroso que entra en la fábrica.

6. Clarificación.

Sulfitación: Este proceso se efectúa con el fin de dar brillo al azúcar, disminuir color y eliminar microorganismos y disminuir viscosidad. El pH ideal en la entrada de este proceso debe de estar entre 5.2 y 5.5; y al final debe de estar entre 4.2 y 4.5

Alcalización. Este proceso consiste en agregar cal al jugo que ha sido sulfatado, con el fin de defecar el jugo, neutralizar el pH y disminuir las pérdidas por inversión. Esto se logra a que la cal reacciona con las impurezas y con ayuda de los fosfatos propios del jugo se forman unos coágulos. La variable que se mide en este proceso es la cantidad de fosfatos.

Calentamiento. Una vez agregado la cal es necesario calentarlo con el fin de que ésta reaccione. En el primer calentamiento se lleva el jugo hasta más o menos 75°C y luego en el segundo calentamiento se lleva hasta 105°C aproximadamente.

Floculación. Para lograr que la formación de los coágulos de impurezas sea más efectiva y los coágulos sean más grandes es necesario aplicar floculante, que permite que haya una mejor limpieza del jugo, lo que implica que se tenga un mejor color.

Clarificación o decantación. Después de haber calentado y adicionado cal y floculante al jugo es necesario dejarlo en los tanques clarificadores por un determinado tiempo denominado tiempo de residencia.

7. Filtración. De los clarificadores se obtiene, por la parte superior, jugo clarificado o limpio, y por la parte inferior del tanque sale el lodo que se le extrajo al jugo. Estos lodos se envían a un tanque en el que se mezclan con bagacillo y luego esta mezcla es sometida al proceso de filtración en el cual se le agrega agua caliente para que la sacarosa presente en el lodo se disuelva y pueda ser recuperada Finalmente del filtro se retira un material semisólido denominado cachaza que contiene el bagacillo, las impurezas precipitadas y la sacarosa en mínima cantidad.

8. Talofiltración. Este es un proceso de clarificación por flotación, en el que se le agrega al jugo filtrado, cal, floculante y aire, todo con el fin de formar coágulos y limpiar el jugo.

9. Precalentamiento del jugo clarificado. El jugo limpio resultante llega a unos preevaporadores con una temperatura menor a la del punto de ebullición. Antes de entrar a la parte de evaporación se debe calentar, para que cuando llegue a los evaporadores tenga una temperatura ideal y empiece el proceso. En este calentamiento se debe medir la temperatura y mantenerla controlada y es realizado en el primero de los *evaporadores* de múltiple efecto.

10. Evaporación. El sistema de evaporación esta compuesto por tres *evaporadores.* En el primer evaporador por cada libra de vapor que se inyecte se logra evaporar una libra del agua del jugo y se condensa una libra de agua.

La cual es reutilizada. El vapor de escape que se inyecta en el primer evaporador es el excedente del trabajo en las turbinas de los molinos y turbogeneradores. El vapor que resulta de esta evaporación es llevado al siguiente evaporador para que repita el ciclo del primer evaporador. De este proceso sale la meladura, que es el mismo jugo clarificado pero con 75% menos de agua.

11. Calentamiento. La meladura pasa por un calentamiento que tiene como objetivo subir la temperatura hasta el punto en el que no haya destrucción de azúcares reductores y que además, en el proceso de cristalización, no se pierda ni tiempo ni energía calentando la meladura, sino que se empiece a cristalizar rápidamente.

12. Sulfitación. La meladura caliente es llevada a un proceso de sulfitación igual que el de la primera etapa, en el cual se miden las mismas variables independientes que son los sulfitos y las pérdidas por inversión cuyas variaciones van a afectar directamente el pH y el color del jugo. Este proceso es realizado en los tanques de meladura.

13. Talodura. La meladura después de la sulfitación se clarifica mediante un proceso igual al talofiltrado. Este proceso pretende eliminar por flotación las últimas impurezas generadoras de color a la meladura. En este proceso se adiciona ácido fosfórico a la meladura sólo para la elaboración de azúcares blancos, sustancia que permite blanquear el azúcar. Pero también se adiciona aire, cal y floculante para todas las azúcares en general.

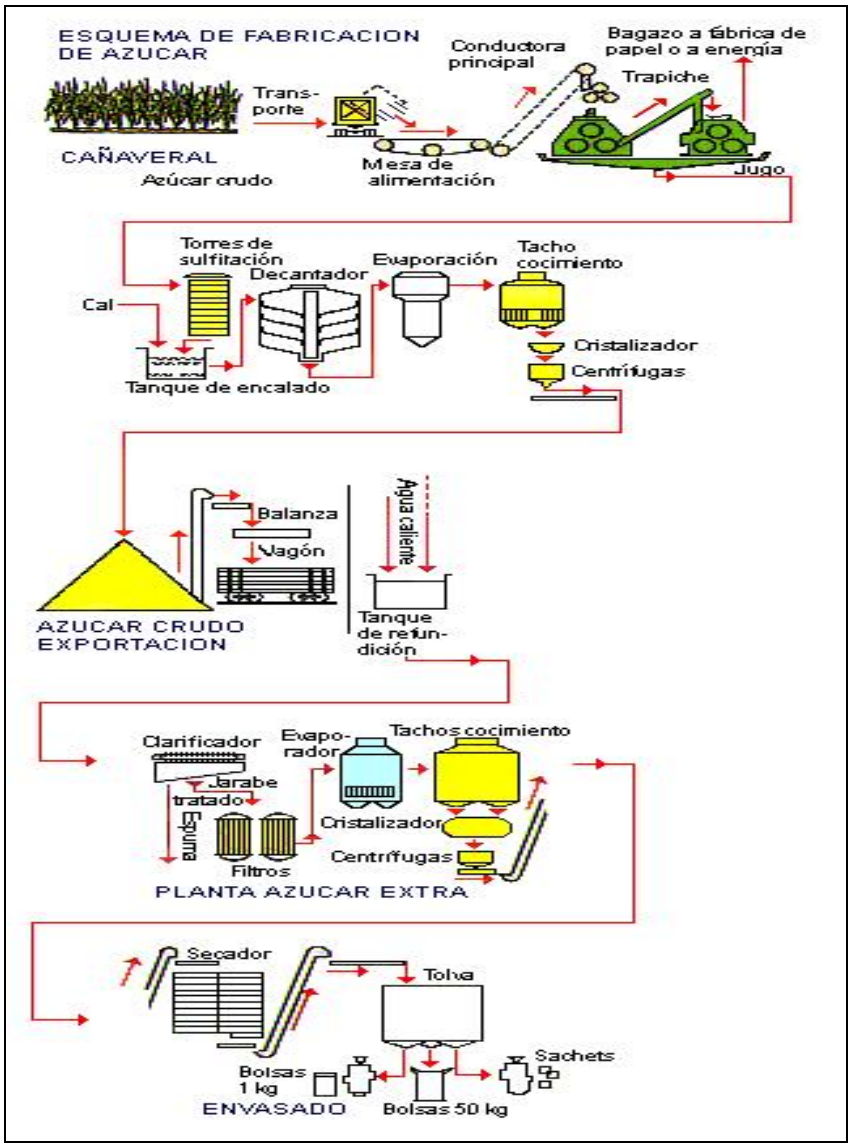
14. Cristalización. La meladura clarificada va a los *tachos*, los cuales son tanques donde se lleva a cabo la cristalización. Esta se dirige inicialmente al primer tacho (Tacho A) en donde se deposita un 70% de meladura y un 30% de semilla (la semilla es un cristal de azúcar muy fino que se alimenta de sacarosa presente en la meladura enriqueciendo el tamaño del grano.

Del tacho A sale una masa compuesta de miel y cristales, la cual es llevada a un proceso de ***centrifugación*** en donde se le agrega agua para diluir la miel impregnada en el grano, obteniéndose al final azúcar cristalizada y miel (miel A). Esta última posee aún un alto contenido de sacarosa. La azúcar cristalizada después de la centrifugación pasa por un proceso de **secado,** en el que se elimina el agua y se extrae el azúcar con el tamaño ideal.

15. Envase. El azúcar seca y fría se empaca en sacos de diferentes pesos y presentaciones dependiendo del mercado y se despacha a la bodega de producto terminado para su posterior venta y comercio.

Figura 100. Diagrama del proceso de elaboración de Azúcar

(Ingenio Azucarero 2)



2. METODOLOGÍA

2.1. Unidad de análisis

Las Operaciones Unitarias son la base de los Ingenieros Químicos es por ello que es importante conocer cuales son las más utilizadas por las industrias de procesamiento de materiales instaladas en Guatemala.

Este análisis se llevó a cabo a través de una encuesta de opinión dirigida a los Ingenieros Químicos, que han laborado en diferentes empresas instaladas en Guatemala. El tema a considerar en la encuesta fue básicamente las Operaciones Unitarias mediante un sistema de clasificación que permitió razonarlas con mayor facilidad.

2.2. Recursos materiales

Los recursos básicos con los que se contó para facilitar el avance del trabajo de graduación fueron:

- Equipo de Computación,
- Libros de texto de Operaciones Unitarias, y de Ingeniería Química en general,
- Documentación para encuestas y entrevistas,
- Internet.

2.3. Recursos humanos

- Ingenieros Químicos de diferentes industrias de procesamiento de materiales instaladas en Guatemala.
- Asesor de trabajo de Graduación
- Director de Escuela de Ingeniería Química
- Revisora de trabajo de Graduación

2.4. Metodología de la encuesta

La investigación fue un estudio descriptivo de las Operaciones Unitarias, realizado a través de encuesta de opinión con ayuda de un cuestionario el cual fue accesado por medio de: correo electrónico, de una página web y/o entrevista personal; a Ingenieros Químicos que estaban laborado en industrias instaladas en Guatemala. A través de la información obtenida se presentaron los resultados mediante tablas y gráficas que describen cuales son las operaciones unitarias más utilizadas en Guatemala. (Sección de resultados)

El universo de trabajo fue un diseño muestral tomando en cuenta los siguientes aspectos:

a) población: la población investigada fue tomada de los establecimientos industriales del país que se encuentran en el directorio nacional industrial 2000 del Instituto Nacional de Estadística (INE); además se colocó la encuesta en una página web (www.Iqgua.org) del Congreso de Ingenieros Químicos 2006.

b) cobertura: para la recolección de los datos, la encuesta cubrió establecimientos de las diferentes clasificaciones de actividades económicas, según el Código Industrial Internacional Uniforme –CIIU versión 2-; y personas que ingresaron a la página web de Ingenieros Químicos 2006.

c) marco muestral: en el marco muestral se consideraron todos los establecimientos industriales, de la gran empresa (por contar con más de cien empleados) y actividad industrial de acuerdo al CIIU versión dos; además se tomaron también como marco muestral a los Ingenieros Químicos que ingresen a la pagina web del Congreso de Ingenieros Químicos 2006.

Tabla I. Número de personas encuestadas en las industrias clasificadas por establecimientos según la cantidad de personal ocupado para el año 2000 Código Industrial Internacional Uniforme –CIIU versión 2 que cuentan con más de 100 empleados

CIIU	Establecimientos	Industrias encuestadas
3112	Fabricación de productos lácteos	2
3115	Fabricación de aceites y grasas vegetales y animales	3
3116	Fabricación de productos de molineria	1
3118	Fabricación y refinado de azúcar	6
3121	Elaboración de productos alimenticios diversos	12
3131	Destilación, rectificación y mezcla de bebidas espirituosas	1
3133	Fabricación de cerveza	2
3134	Fabricación de aguas gaseosas y bebidas no alcohólicas	4
3140	Fabricación de productos del tabaco	1
3220	Fabricación de prendas de vestir, excepto calzado	2
3412	Fabricación de envases y cajas de papel y catón	1
3522	Fabricación de medicamentos y productos farmacéuticos	2
3523	Fabricación de productos de tocador, limpieza, etc.	10
3529	Fabricación de productos químicos N.E.P.	2
3530	Elaboración de productos derivados del petróleo	2

Continuación…

3540	Fabricación de productos derivados del carbón y asfalto	1
3559	Fabricación de productos de caucho, excepto llantas	1
3560	Fabricación de productos de plástico N.E.P.	2
3692	Cemento, cal y yeso	2
3710	Productos primarios de hierro y acero	1
3831	Construcción de máquinas y aparatos industriales eléctricos	2
Total de industrias		60

Fuente: Código Industrial Internacional Uniforme –CIIU versión 2.

d) diseño de la muestra: para la selección de las unidades muestrales se utilizó un diseño de Muestreo Estratificado con asignación proporcional; el tamaño de la muestra se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$n = \frac{p * q * N * Z^2}{p*q*Z^2 + N*e^2}$$

donde:

p : Probabilidad de éxito

q : 1- q

N : Universo a muestrear

Z : Área bajo la curva normal

e : Error máximo de la muestra

Para la encuesta el universo es de 626 empresas registradas en el directorio nacional industrial 2000 del Instituto Nacional de Estadística (INE), en el Código Industrial Internacional Uniforme –CIIU versión 2; con más de 100 empleados permanentes. La probabilidad de éxito (p) es de 0.9961 y el área bajo la curva normal es de 2.37 para el 98% de confiabilidad y 1.80% de error máximo. La muestra de la encuesta se calculó en 60 empresas.

La selección de la muestra se hizo de forma aleatoria, a partir de los listados publicados en el INE y se asignó un 10% de la muestra (6 empresas), como empresas de repuesto en caso de que una empresa seleccionada se abstuviera de dar información.

e) diseño del instrumento de medición: la encuesta, fue el instrumento diseñado para la recolección de los datos sobre las Operaciones Unitarias más utilizadas por las industrias instaladas en Guatemala. (Ver Sección Apéndice); la cual se dividió básicamente en cinco secciones en las cuales se clasificaron las Operaciones Unitarias para poder así captar con mayor facilidad cuales son las Operaciones Unitarias más utilizadas y así también las menos empleadas en las industrias instaladas en Guatemala.

f) recolección de los datos: los datos de la encuesta fueron recogidos mediante visita personal por medio de una sita previa, y/o por medio electrónico a las industriales seleccionados en la muestra. Además se hizo una recolección de datos de todas las personas que ingresaron a la página web (www.Iqgua.org) del Congreso de Ingenieros Químicos 2006.

3. RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN

Con el fin de proporcionar a todas las personas en general interesadas en el estudio de las Operaciones Unitarias así también como a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Química, se realizo un estudio sobre las Operaciones Unitarias más utilizadas por las industrias de procesamiento de materiales a través de una clasificación de las Operaciones Unitarias basadas en el "Folleto de las Operaciones Unitarias Físicas controladas por la transferencia de materia y transferencia simultanea de materia y energía elaborado por Ing. Q. Álvarez Williams"; se propuso una clasificación de las Operaciones Unitarias en seis grande grupos de acuerdo con las propiedades (materia, energía, cantidad de movimiento) que se transfiera en la operación las cuales son:

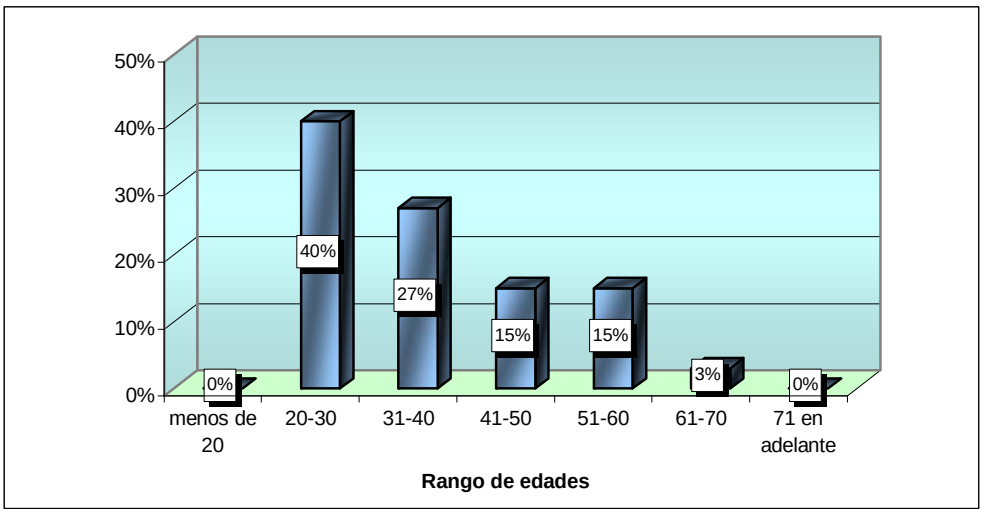
1. Operaciones Unitarias físicas controladas por la transferencia de cantidad de movimiento,
2. Operaciones Unitarias físicas controladas por la transferencia de energía,
3. Operaciones Unitarias físicas controladas por la transferencia de materia,
4. Operaciones Unitarias físicas controladas por la transferencia simultánea de materia y energía,
5. Operaciones Unitarias físicas complementarias y
6. Operaciones Unitarias químicas.

A partir de esta clasificación se generó una más detallada de cada uno de estos seis grupos (Ver sección 1. Marco Teórico) proporcionando así una idea más clara para su estudio. A través de esta clasificación se realizó una encuesta (Ver Apéndice.) la cual fue proporcionada una muestra de 60 personas que contaran con estudios de la carrera de ingeniería química ya sea

que estuvieran graduados o aun no, que laboraran en diferentes empresas instaladas en Guatemala, registradas en el directorio nacional industrial 2000 del Instituto Nacional de Estadística (INE) en el Código Industrial Internacional Uniforme –CIIU versión 2; con más de 100 empleados permanentes; esto con el fin de conocer cuales son la Operaciones Unitarias más utilizadas por las industrias en Guatemala.

3.1. Edades de las personas encuestadas

Figura 101. Rango de edades

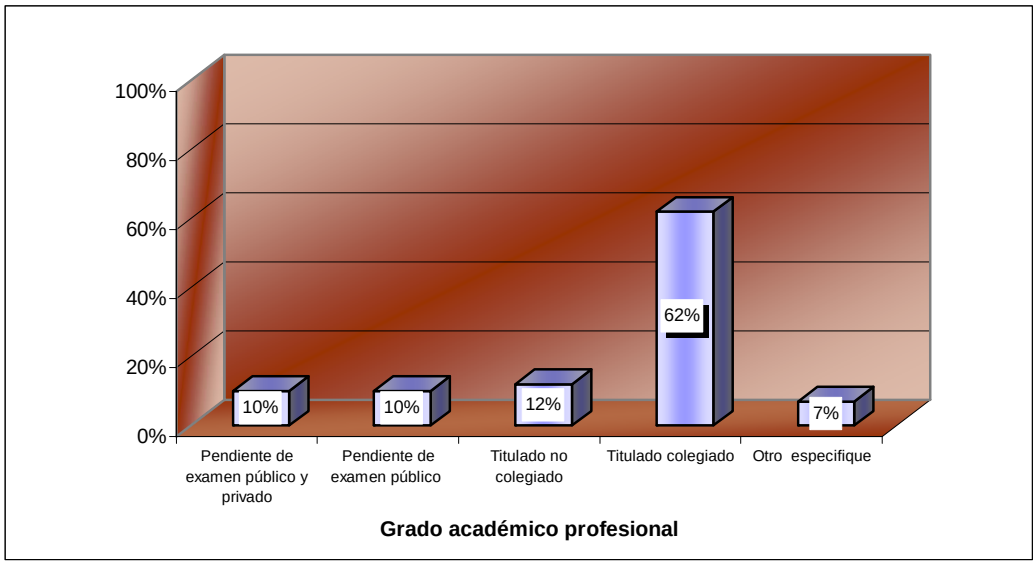


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

Como se observa en la figura 101, de los 60 personas encuestadas el 40% estaban comprendidas en un rango de edad de 20 a 30 años, el 27% en un rango de 31 a 40; el 15% entre 41-50 al igual que entre 51-60, y en menor porcentaje de 3% en un rango de edad de 61-70.

3.2. Grado académico profesional

Figura 102. Grado académico profesional

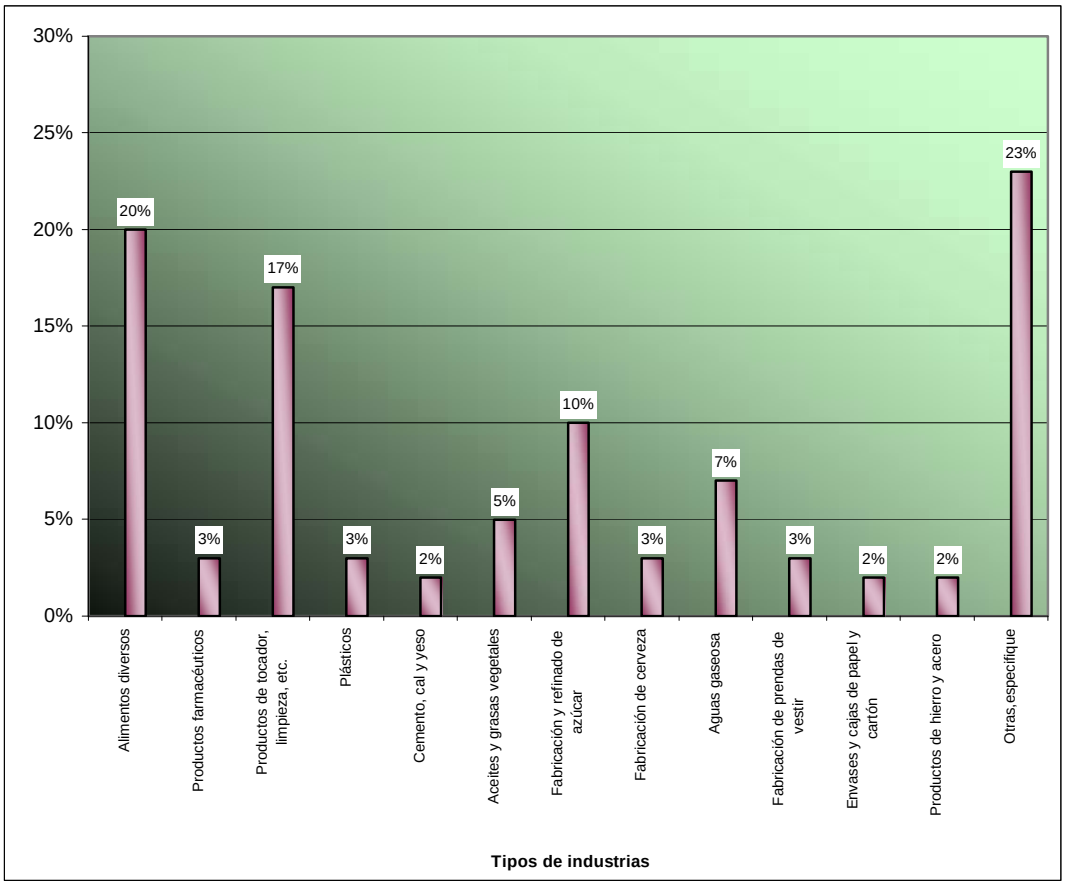


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

En la encuesta también se les pregunto a las personas su grado académico profesional con el fin de conocer el grado de preparación con el que cuentan actualmente los ingenieros químicos, el 10% se encontraba aún pendiente de examen público y privado, al igual que otro 10% tenían pendiente únicamente el examen público, otro 12% eran titulados no colegiados; en su mayoría con un 62% eran ingenieros químicos titulados colegiados, y otro 7% contaban con maestrías, doctorados y otras especialidades.

3.3. Tipo de industria en la cual trabajan actualmente

Figura 103. Tipo de industria en la cual trabajan actualmente



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

De las 60 personas encuestadas la mayoría con un 23% trabajaban en diversas entidades como lo son telecomunicaciones, entidades del gobierno, empresas dedicadas al ambiente, petroleras; otro 20% laboran en empresas que se dedican a la fabricación de alimentos diversos, otro 17% trabajan en empresas donde manufacturan productos de tocador, limpieza, etc.; otro 10%

trabajan en la fabricación y refinado de azúcar, el 7% de los encuestados laboran en empresas dedicadas a la fabricación de aguas gaseosas, el 5% de los encuestados trabajan en empresas donde manufacturan aceites y grasas vegetales; y en las plantas donde fabrican productos farmacéuticos, plásticos, fabricación de cerveza y de prendas de vestir, laboran un 3% en cada una, y en un menor porcentaje con un 2% las personas encuestadas laboran en empresas donde fabrican cemento, cal y yeso, así como envases y cajas de papel y cartón y productos de hierro y acero.

3.4. Puesto que ocupan en la industria actualmente

Tabla II. Puesto que ocupa actualmente el entrevistado en la industria en la cual trabajan

Puesto que ocupa actualmente	Total	Porcentaje (%)
Asesor pedagógico	1	2
Asesor técnico	1	2
Asistente de gerente de Investigación y desarrollo	1	2
BPM	1	2
Catedrático	4	7
Consultoría	2	3
Gerente administrativo	2	3
Gerente de control de calidad	2	3
Gerente de operaciones	5	8
Gerente de operaciones telecom	1	2
Gerente de planta	5	8
Gerente de producción	2	3
Gerente general	2	3
Gerente técnico	1	2
Ingeniero de campo	1	2
Ingeniero de Control de calidad	3	5
Ingeniero de empaques	1	2
Ingeniero de proyectos	2	3
Ingeniero de transferencia de tecnología	1	2
Jefe de auditores	1	2
Jefe de automatización de proyectos	1	2
Jefe de laboratorio	1	2

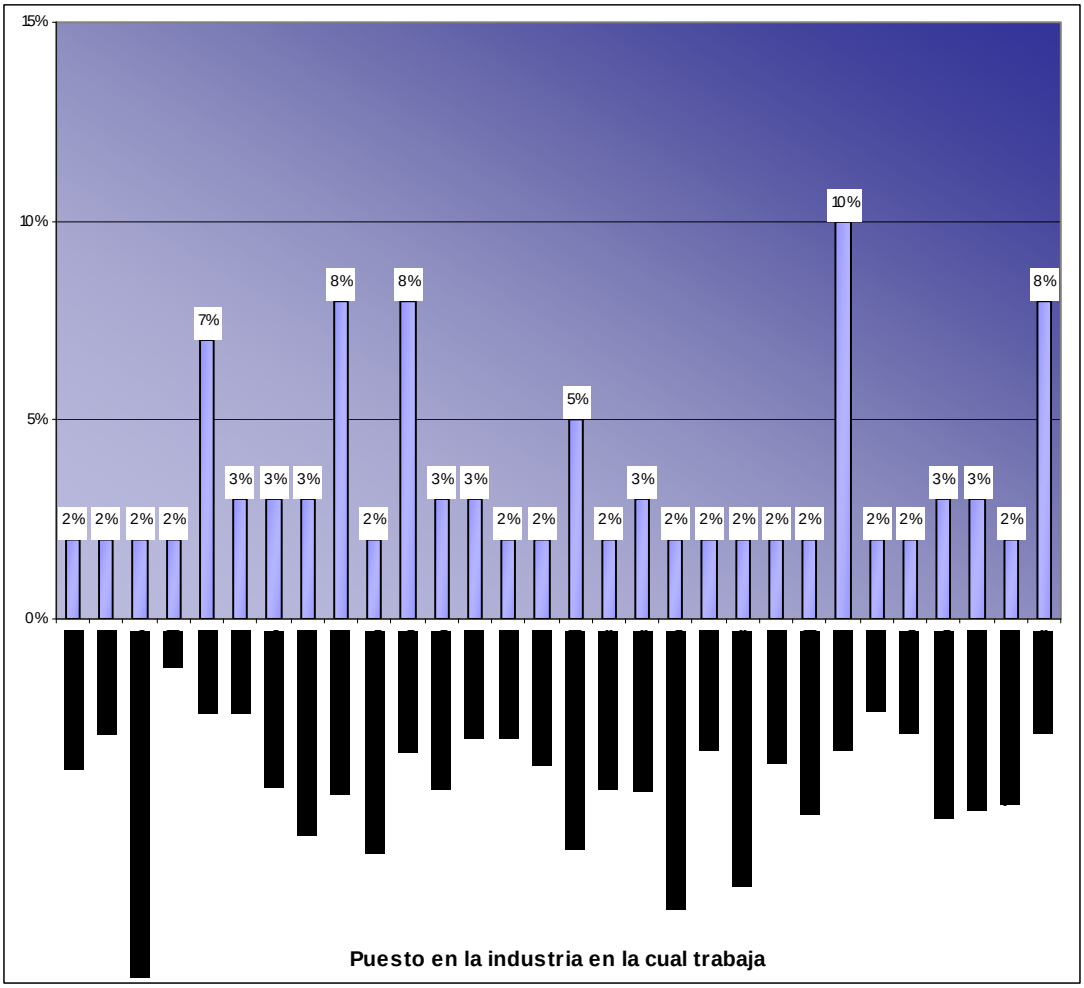
Continuación….

Jefe de logística industrial	1	2
Jefe de procesos	6	10
Metrología	1	2
Microbiología	1	2
Planificador de producción	2	3
Supervisor de producción	2	3
Técnico de normalización	1	2
Área de ventas	5	8
Total	60	100

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

Los puestos que ocupan lo Ingenieros químicos en las distintas empresas es muy variado no existe una mayoría que ocupe un puesto determinado como se observa en la Tabla II y en la gráfica 104, esto demuestra que el campo en el cual puede laborar el Ingeniero Químico como profesional es muy amplio, pero a la vez muy competitivo por lo que el ingeniero químico debe prepararse para estar actualizado con las nuevas tecnologías y estar al nivel para desenvolverse en cualquier campo en la industria.

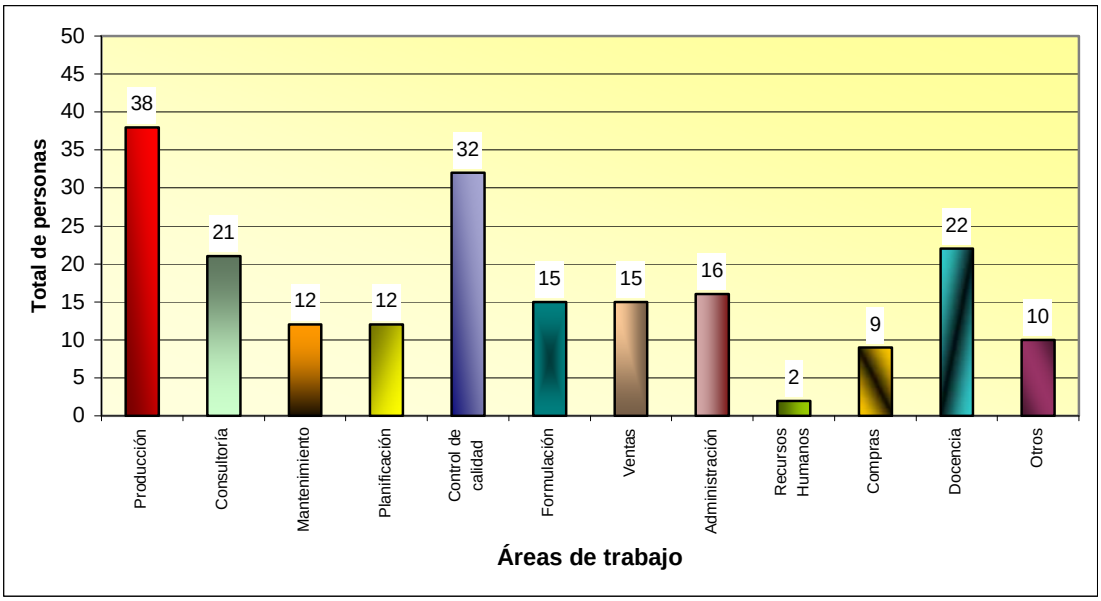
Figura 104. Puesto que ocupa actualmente el entrevistado en la industria en la cual trabajan



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la tabla II.

3.5. Áreas en las cuales han laborado durante su carrera profesional

Figura 105. Áreas en las cuales han laborado las personas encuestadas durante su carrera profesional



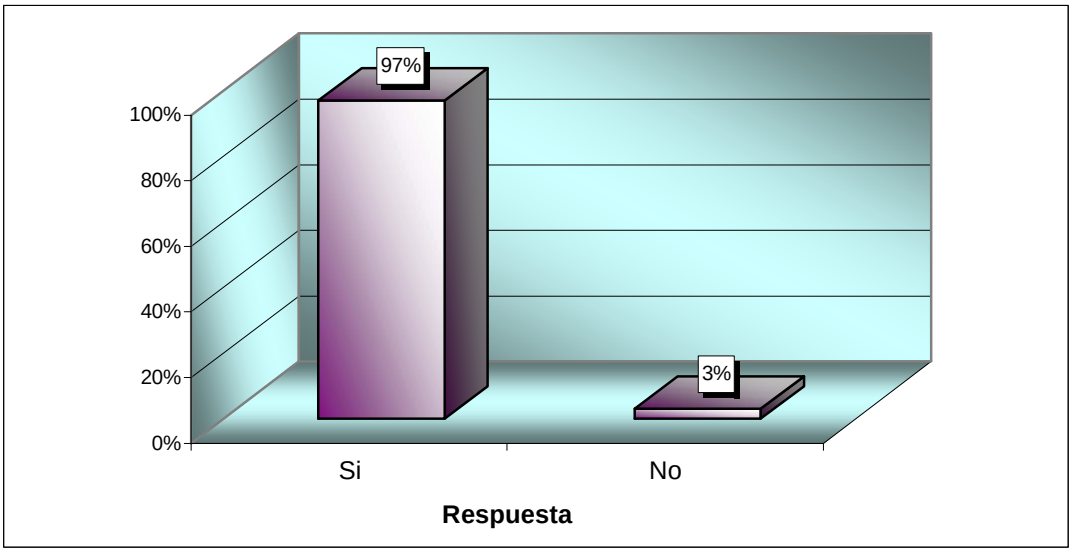
Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

Esta gráfica se expreso en número de personas y no en porcentajes debido a que fue extraída de una pregunta de la encuesta en la cual se dio la opción de multirrespuesta, es decir que podían haber laborado no solo en un área durante su carrera profesional si no en varias, como se observa en la gráfica 105, 38 personas han laborado en el área de producción, 32 en el área de control de calidad, 22 personas han laborado o laboran actualmente en el área de docencia, así también 21 personas laboran en el área de consultoría, 16 personas han trabajado en el área de administración, 15 personas en

formulación al igual que en el área de ventas; también en el área de mantenimiento y planificación han laborado 12 personas en cada área, 10 personas han laborado en otras áreas como I+D, gestión ambiental, mercadeo entre otras, 9 personas han laborado en el área de compras y tan solo 2 personas en el área de recursos humanos. Esto al igual que se observo que los ingenieros químicos han trabajado en distintos tipos de industrias ocupando diversos puestos de trabajo, también se observa que pueden laborar en cualquier área en una empresa aun no siendo su especialidad, pero esto demuestra nuevamente que el ingeniero químico se debe de preparar no solo con su carrera si no adquirir nuevos conocimientos como lo son administrativos, de ventas, mercadeo, investigación etc.

3.6. En las áreas trabajo en las cuales ha laborado ha tenido contacto directo con las Operaciones Unitarias

Figura 106. En las áreas trabajo en las cuales ha laborado ha tenido contacto directo con las Operaciones Unitarias



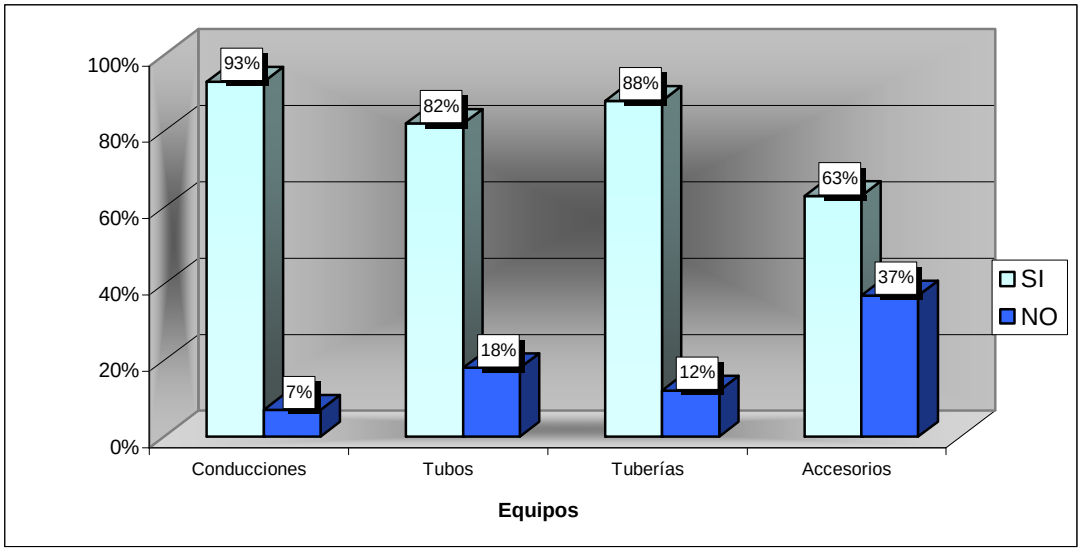
Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

De las 60 personas encuestadas que laboran en industrias de procesamiento de materiales instaladas en Guatemala el 97% han tenido contacto directo con las Operaciones Unitarias en las áreas en las cuales han trabajado.

3.7. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de fluidos

3.7.1 Conducciones

Figura 107. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de fluidos (a. conducciones)

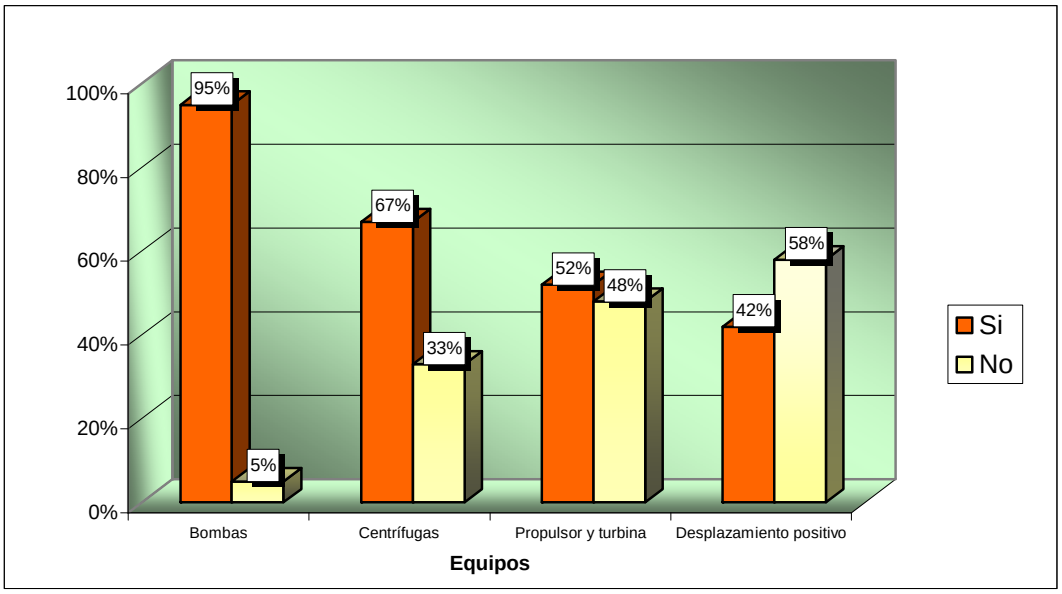


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

A través de la figura 107 se puede observar en términos generales que las conducciones si son utilizadas en las industrias de procesamiento instaladas en Guatemala en un 93%, y a su vez las más utilizadas en cuanto al tipo de conducciones son las tuberías con un 88%, pero también son utilizados lo tubos en un 82% y los diversos accesorios que se utilizan en las conducciones son empleados en las industrias en un 63%.

3.7.2 Bombas

Figura 108. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de fluidos (b. bombas)

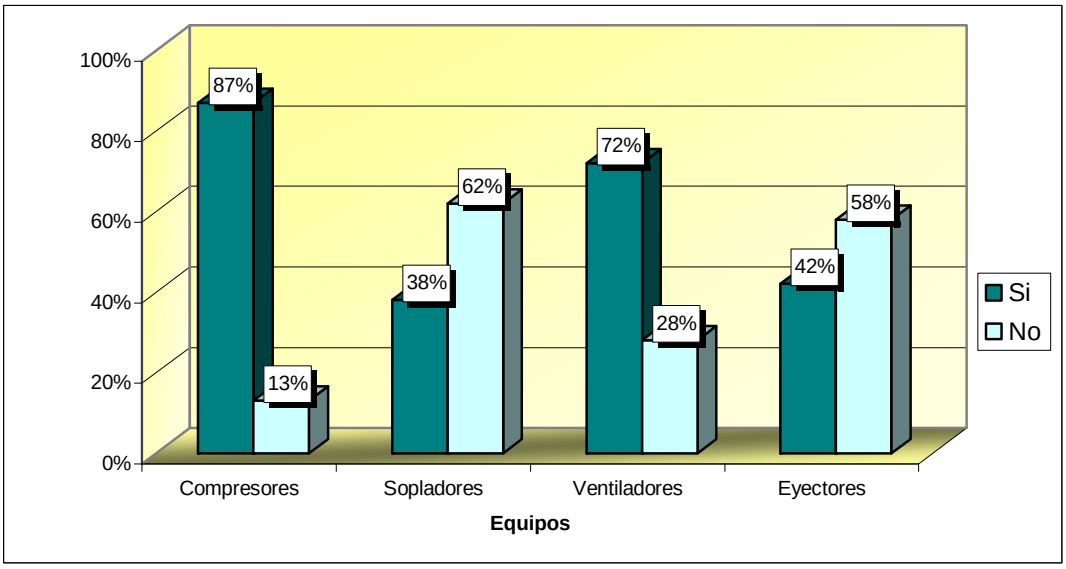


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

El 95% de las personas encuestadas han tenido contacto con las bombas en el manejo de fluidos, y a su vez las bombas más utilizadas en las industrias han sido las bombas centrífugas con un 67%. Las bombas de tipo propulsor y turbina son usadas por un menor porcentaje del 52% al igual que las de desplazamiento positivo en un 42%.

3.7.3 Compresores, sopladores, ventiladores y eyectores

Figura 109. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de fluidos (c. compresores, d. sopladores, e. ventiladores y f. eyectores)

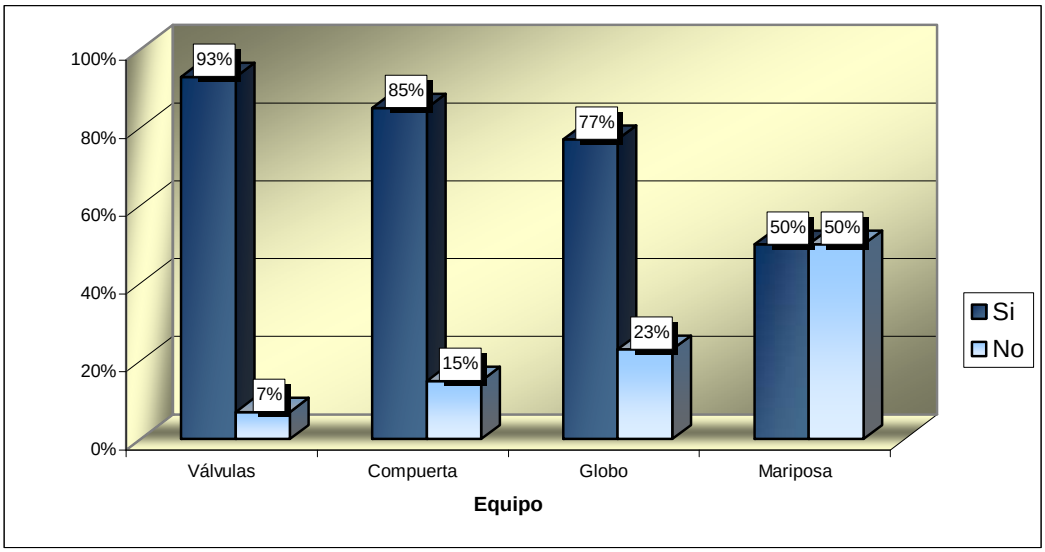


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

Como se observa en la figura 109, estos cuatro equipos son utilizados en el manejo de fluidos en distintas etapas del los procesos en las diversas industrias, los más utilizados en las industrias o con los cuales las personas encuestadas han tenido más contacto en el manejo de fluidos son los compresores con un 87%, seguido de los ventiladores con un 72%, y con los cuales han tenido menos contacto son los eyectores en un 42% y los sopladores con un 38%.

3.7.4 Válvulas

Figura 110. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de fluidos (g. válvulas)

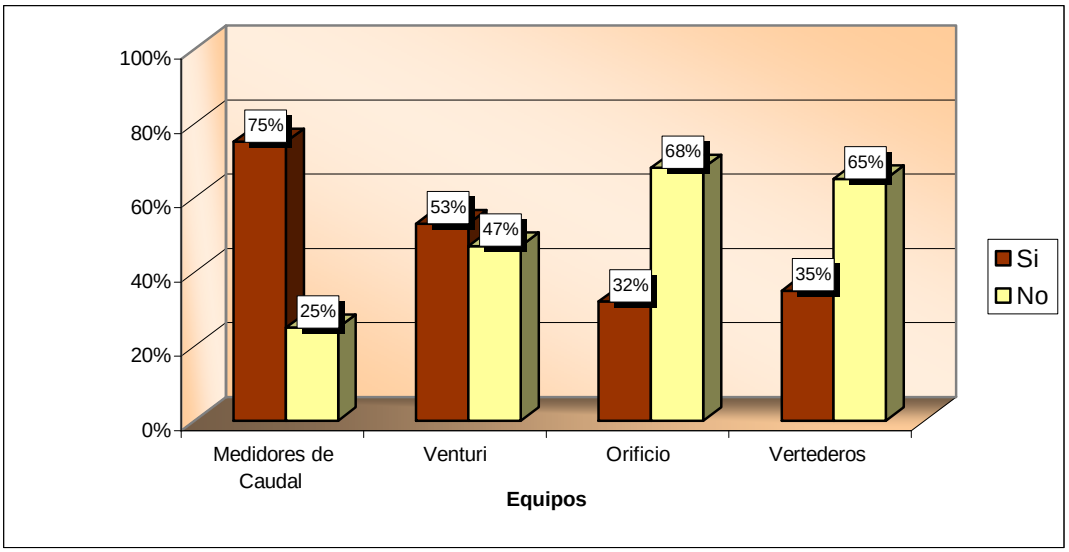


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

Las válvulas son de los equipos también más utilizados en el manejo de fluidos en un 93%, se les dio a las personas encuestadas tres opciones de diferentes tipos de válvulas (ver sección de apéndice) como los son las de tipo compuerta, globo y mariposa, y entre estos tres tipos de válvulas las más empleadas son las de tipo compuerta en un 85%; este tipo de válvulas se utilizan para minimizar la caída de presión en la posición abierta y para detener el flujo de fluidos más que para regularlo cuando la válvula se encuentra cerrada.

3.7.5 Medidores de caudal

Figura 111. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de fluidos (h. medidores de caudal)

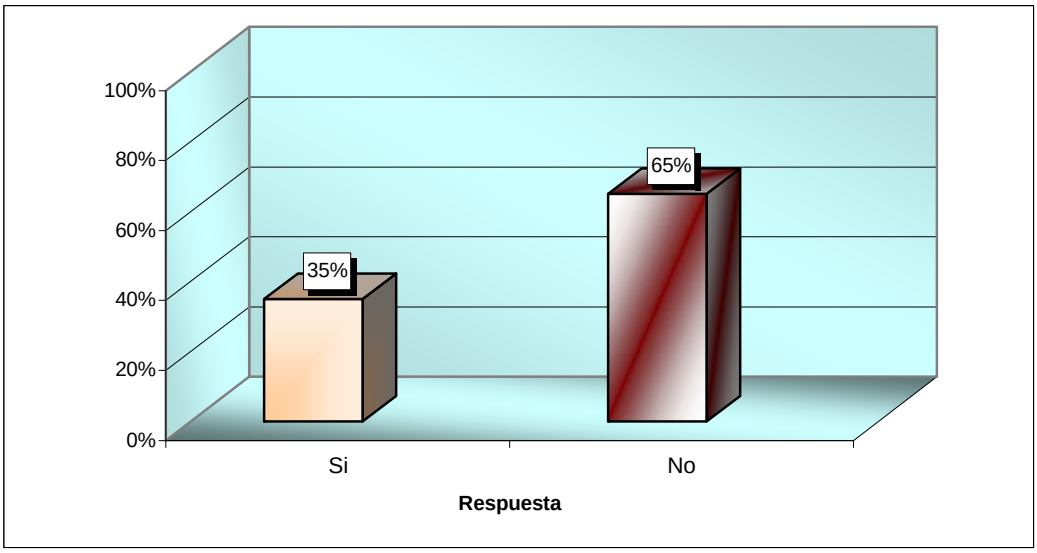


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

Los medidores de caudal son utilizados en un 75% en los procesos de manufactura por las industrias de procesamiento de materiales instaladas en Guatemala, y entre este tipo de medidores de caudal los más empleados son los de tipo venturi en un 53% ; este tipo de medidor se puede utilizar para la medición de las velocidades de flujo del gas, pero éstos son más comúnmente empleados para líquidos, en especial cuando se trata de flujos grandes de agua, donde debido a las grandes presiones recuperadas, el medidor venturi requiere menos potencia que otros tipos de medidores.

3.7.6 Equipos de fluidización y transporte neumático

Figura 112. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de fluidos (i. equipos de fluidización y transporte neumático)

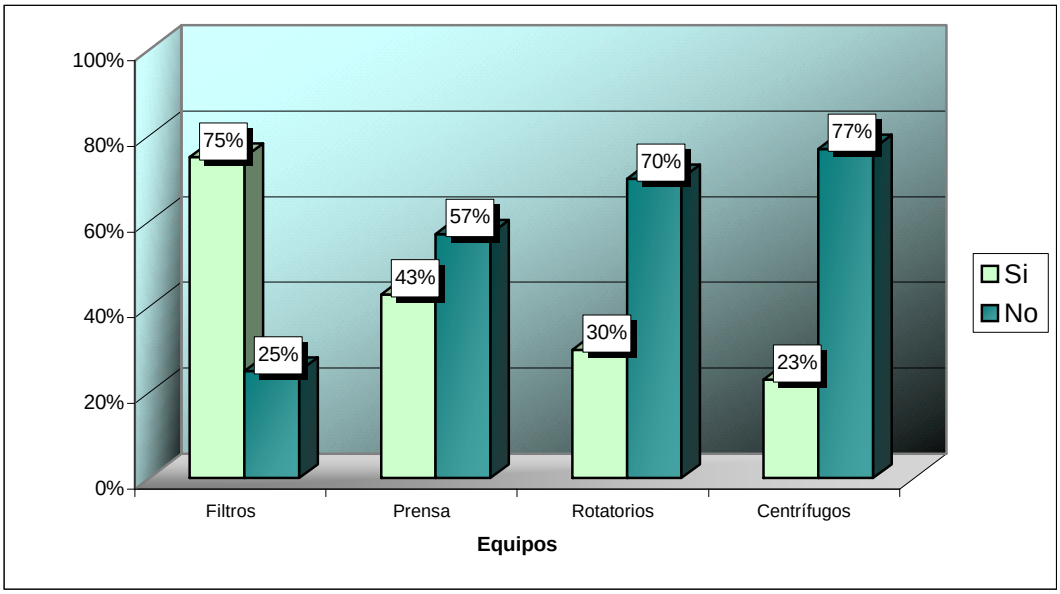


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

El 65% de las 60 personas encuestadas no han tenido contacto con los equipos de fluidización y transporte neumático, esto se debe a que este tipo de equipos no son muy empleados en Guatemala debido a los procesos en los cuales son utilizados que en su mayoría no se llevan a cabo en Guatemala como en las industrias del petróleo con el desarrollo del cracking catalítico en el lecho fluidizado. La fluidización se emplea en otros procesos catalíticos, tales como la síntesis acrilonitrilo, y para llevar a cabo reacciones gas-sólido. Los lechos fluidizados se utilizan también para el curtido de minerales, secado de sólidos finos y absorción de gases.

3.7.7 Filtros

Figura 113. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de fluidos (j. filtros)

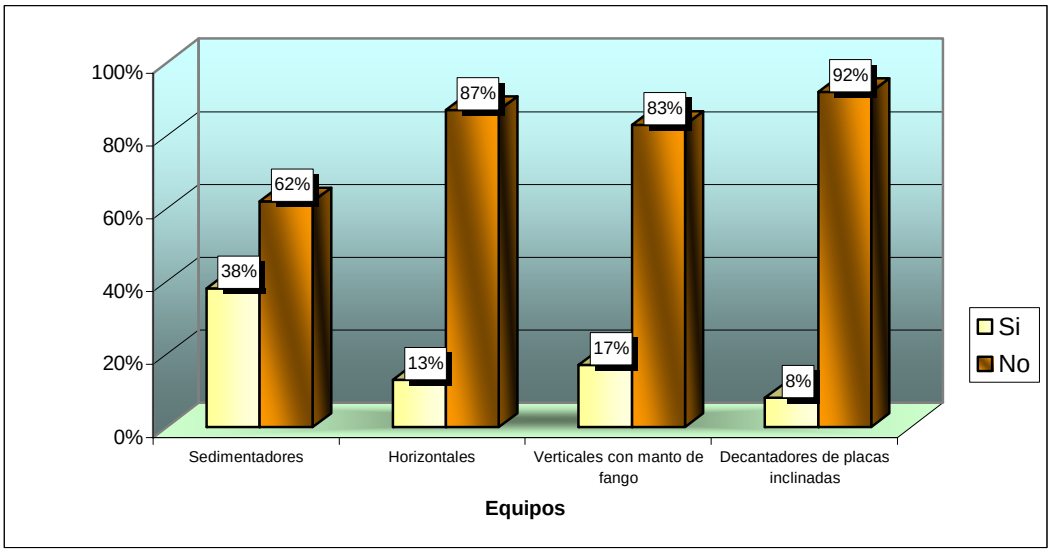


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

Los filtros son equipos muy importantes en el manejo de fluidos en los procesos de filtración ya que se utilizan para aprovechar el sólido presente en la suspensión a filtrar para disminuir la turbidez de un líquido o eliminar las partículas suspendidas de un gas. Estos son empleados actualmente por las industrias en un 75% y el más empleado a su vez es el de tipo prensa en un 43% debido a su gran versatilidad, tanto en relación a la amplia gama de materiales y como las diversas condiciones de operación que se pueden aplicar, además de su bajo coste de mantenimiento.

3.7.8 Sedimentadores

Figura 114. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de fluidos (k. sedimentadores)

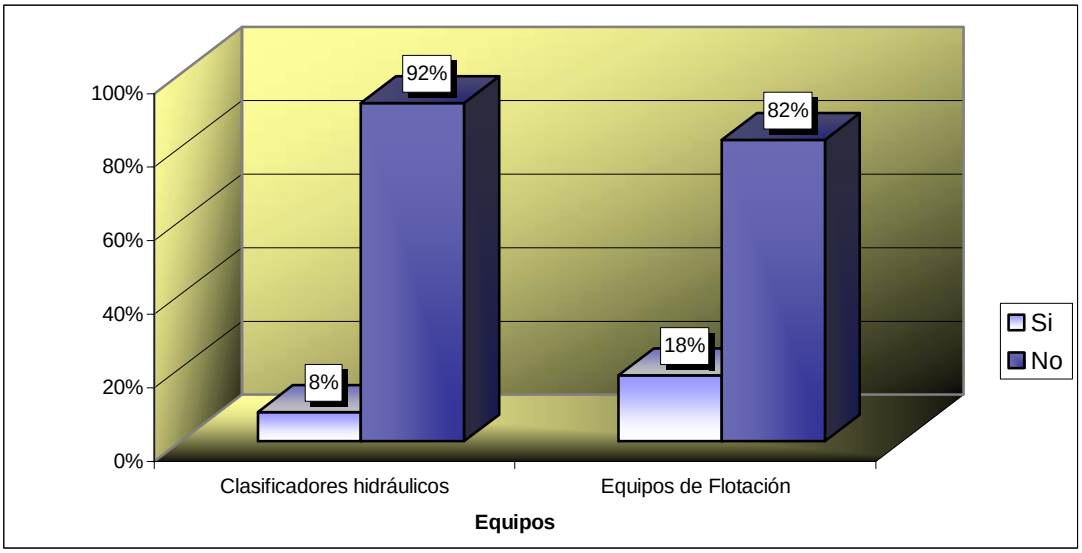


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

Estos equipos son menos utilizados en las industrias de procesamiento de Guatemala debido a que son empleados con mayor frecuencia únicamente en las plantas de tratamiento de aguas residuales, lo cual demuestra que únicamente las personas que hayan laborado en empresas de tratamiento de agua han tenido contacto con estos equipos y de las 60 personas encuestadas únicamente el 38% han tenido contacto.

3.7.9 Clarificadores hidráulicos y equipos de flotación

Figura 115. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de fluidos (l. clarificadores hidráulicos, m. equipos de flotación)

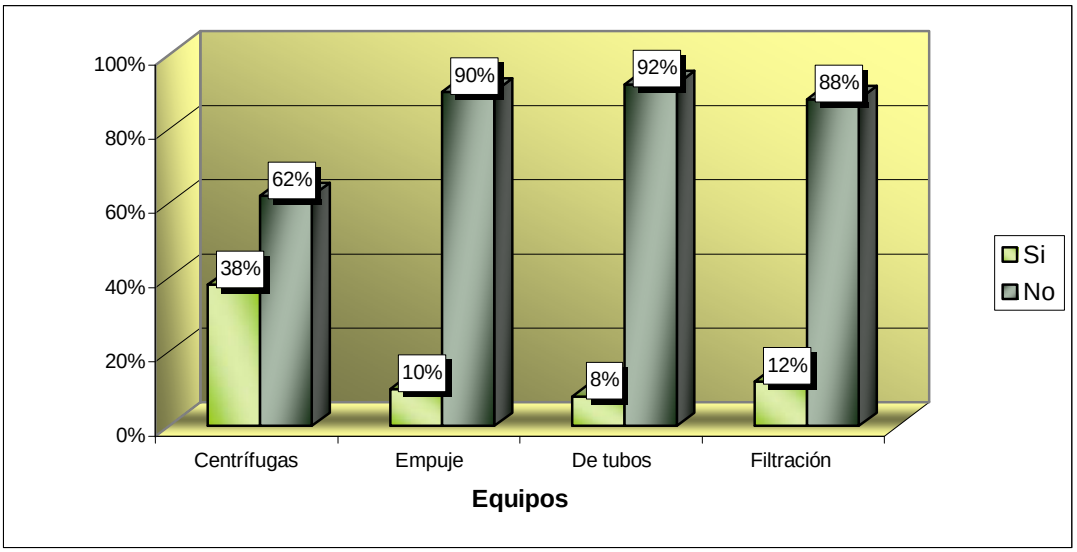


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

Actualmente los clarificadores hidráulicos no son muy utilizados por las industrias en el manejo de fluidos ya que solo el 8% de las 60 personas encuestadas han tenido contacto con este. Los equipos de flotación al igual que los equipos de sedimentación también son utilizados en el tratamiento de aguas residuales, para eliminación de la materia suspendida y para la concentración de los fangos biológicos, debido al igual que los equipos de sedimentación si las personas encuestadas no han laborado en empresas de tratamiento de agua no han tenido contacto con este tipo de equipo y es por ello que solo el 18% respondió a la pregunta realizada en la encuesta que si han tenido contacto con este tipo de equipo.

3.7.10 Centrífugas

Figura 116. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de fluidos (n. centrífugas)

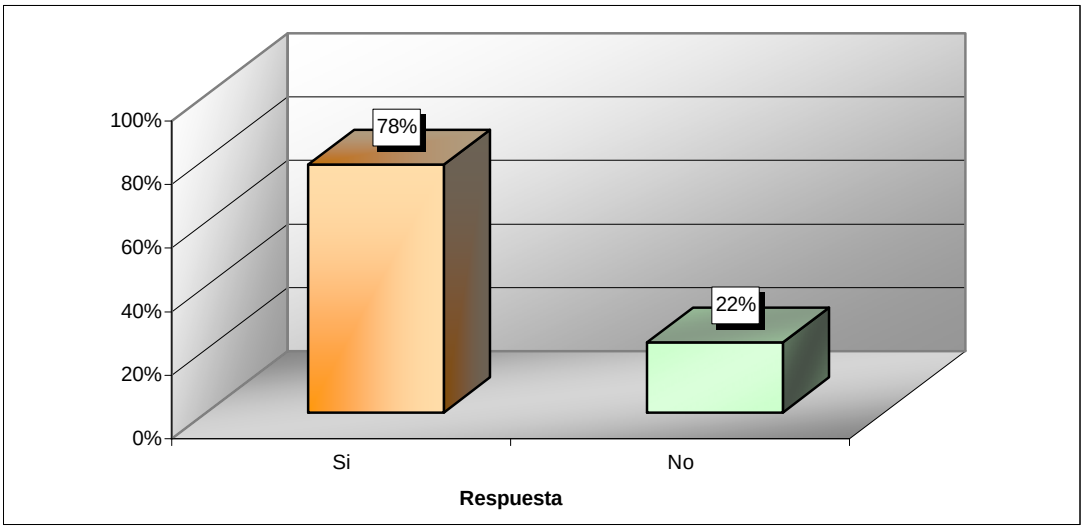


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

En la figura 116 se observa que solo el 38% de las personas encuestadas si han tenido contacto en el manejo de fluidos con las centrífugas en general y el 62% no lo han tenido, el 90% no ha tenido contacto con las centrífugas de empuje, el 92% tampoco ha tenido contacto con las centrífugas de tubos y el 88% no ha tenido contacto con las centrífugas de filtración.

3.7.11 Agitadores y mezcladores de líquidos

Figura 117. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de fluidos (o. agitadores y mezcladores de líquidos)

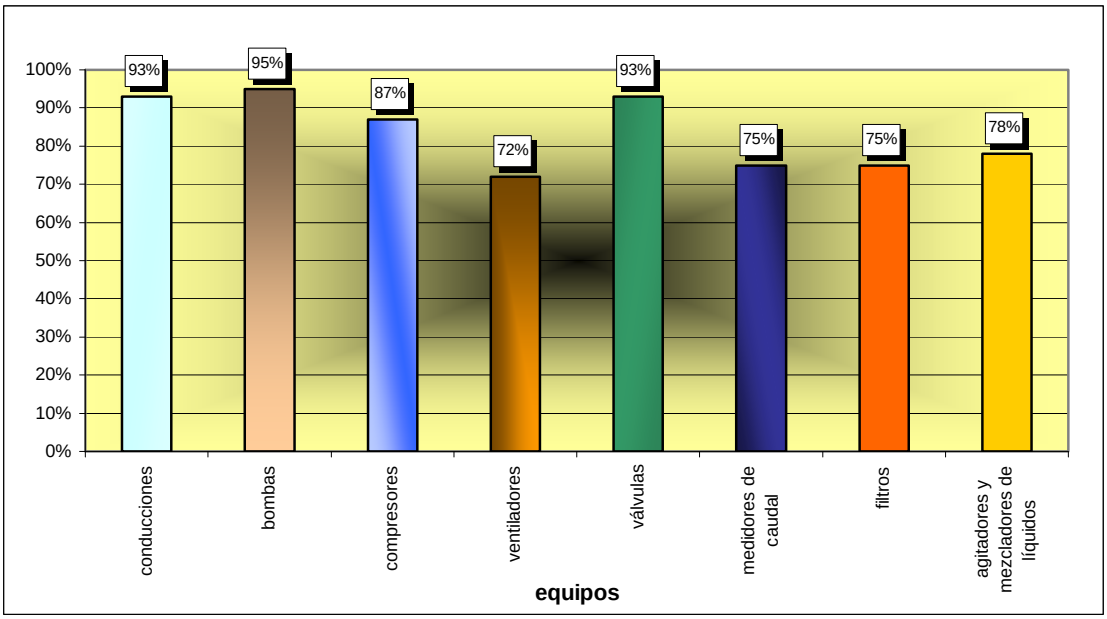


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

El adecuado rendimiento de un proceso depende en muchos casos del grado de mezcla de los materiales, ya que los líquidos son agitados para mover partículas sólidas suspendidas, así también para mezclar líquidos miscibles , dispersar un líquido inmiscible en otro para formar una emulsión o suspensión; este proceso es muy empleado en empresas en las cuales fabrican productos farmacéuticos, alimentos diversos, aceites y grasas vegetales, aguas gaseosas, fabricación de cerveza, productos de tocador y limpieza, etc; es por el ello que el 78% de las personas encuestadas han tenido contacto con estos equipos ya que en casi todas las plantas se requieres este proceso para homogenizar o mezclar un líquido o una suspensión.

3.7.12 Equipos más utilizados en el manejo de fluidos

Figura 118. Equipos más utilizados en el manejo de fluidos



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las figuras 107 a la 117.

En la figura 118 se muestran los equipos más utilizados en los procesos de manufactura por las industrias de procesamiento de materiales instaladas en Guatemala en cuanto al manejo de fluidos, en orden de utilización se tiene que de las 60 personas encuestadas el 95 % ha tenido mayor contacto con las bombas, el 93% con las conducciones al igual que con las válvulas, el 87% con los compresores, el 78% con los agitadores y mezcladores de líquidos; el 75% con los medidores de caudal así también con los filtros y un 72% con los ventiladores.

Este orden de utilización dentro de las industrias en cuanto al manejo de fluidos se debe primordialmente al tipo de proceso que realice la planta, al producto que fabrica y a la capacidad de la misma.

Al extraer los equipos más utilizados en el manejo de fluidos a partir de los datos recopilados de la encuesta como se observa en la figura 118, se hizo un análisis de comparación a partir de las temáticas que aparecen en los programas de cada curso de la carrera de Ingeniería Química de la USAC para corroborar que estos equipos fueran estudiados durante el transcurso de la carrera como se muestra a continuación en la Tabla III.

Tabla III. Equipos más utilizados en el manejo de fluidos por las industrias de procesamiento de materiales instaladas en Guatemala y cursos de la carrera de Ingeniería Química de la USAC en los cuales son estudiados dichos equipos

Equipos más utilizados en el manejo de fluidos por las industrias de procesamiento de materiales en Guatemala	Cursos de la carrera de Ingeniería Química de la USAC en los cuales son estudiados los equipos empleados en el manejo de fluidos
Conducciones	I.Q.-2 y Lab. Ing.Química 1
Bombas	I.Q.- 1, I.Q.-2, Lab. Ing. Química 1 y Diseño de Equipos
Compresores	Termodinámica 4 e I.Q.-2
Ventiladores	Termodinámica 4 e I.Q.-2
Válvulas	I.Q.-2 y Lab. Ing.Química 1
Medidores de Caudal	I.Q.-2 y Lab. Ing.Química 1
Filtros	I.Q.-2 y Lab. Ing.Química 2
Agitadores y mezcladores de líquido	I.Q.-2

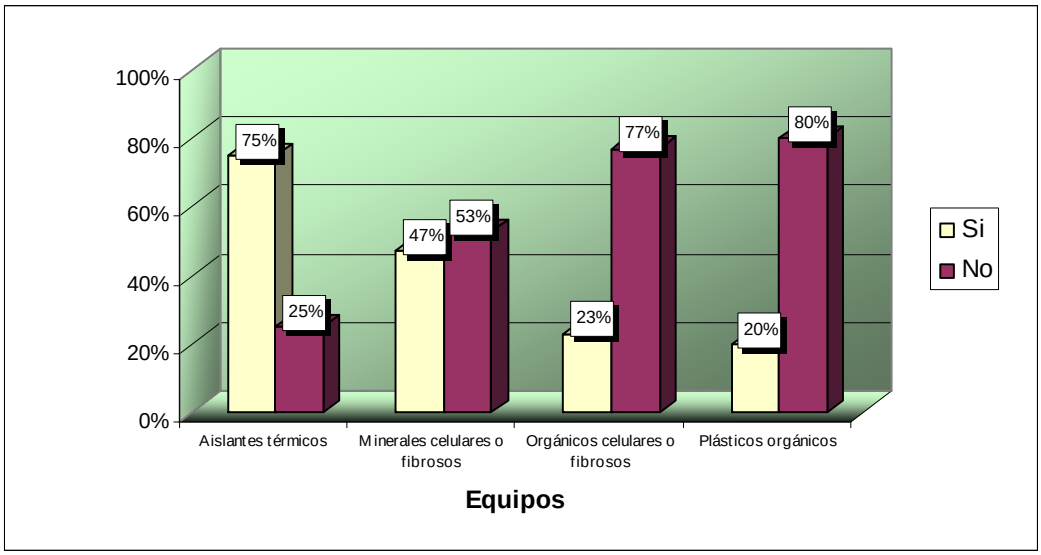
Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la figura 118 y de los programas de los cursos de la carrera de Ingeniería Química de la USAC.

El curso principal donde se estudian todos estos equipos utilizados en el manejo de fluidos es Ingeniería Química 2 (I.Q.-2) que es un curso de Flujo de fluidos específicamente, es por ello que se estudia a profundidad cada uno de los equipos porque es de suma importancia que el estudiante de Ingeniería Química sepa trasegar líquidos y gases, llevándolos de un punto a otro, en una tubería o ducto. Para ello debe emplear, tubos, válvulas, medidores de flujo y propulsores de flujo, de manera que la energía necesaria para vencer la inercia natural al cambio, y las dificultades de elevar presión o nivel, se suministre al sistema de flujo. A su vez, a menudo se necesita mezclar líquidos con sólidos, o líquidos con líquidos o gases, los cuales son base de las industrias de preparación de alimentos, cosméticos, farmacéuticos, etc. Por ello es elemental que el estudiante como futuro técnico sepa los principios básicos de los equipos así como su funcionamiento y parámetros básicos para su utilización.

3.8. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de transferencia de calor

3.8.1 Aislantes térmicos

Figura 119. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de transferencia de calor (a. aislantes térmicos)

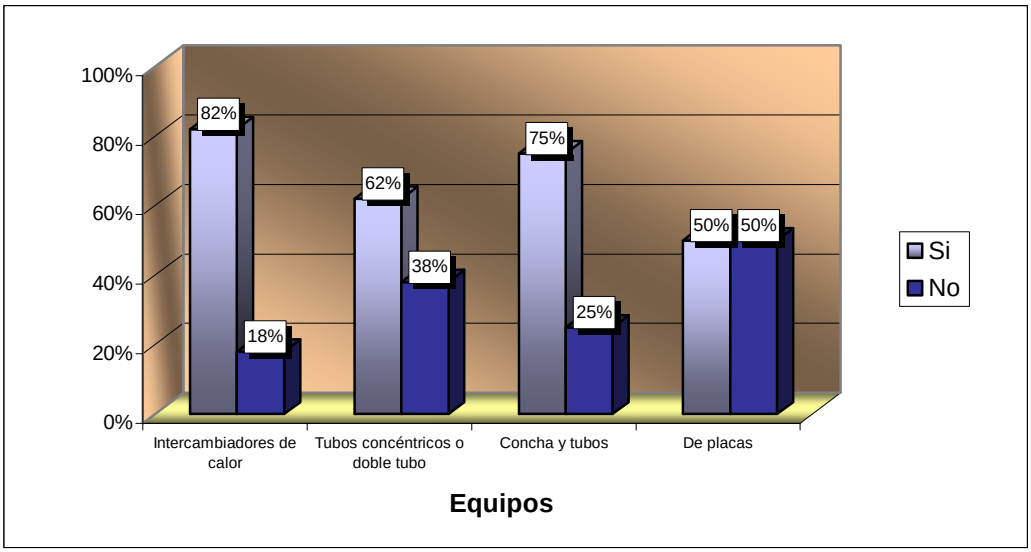


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

También se analizó el contacto que han tenido las personas encuestadas en cuanto al manejo de transferencia de calor en las industrias, primero se les pregunto si han tenido contacto con los aislantes térmicos en general y el 75% respondió que si han tenido, y dentro de los aislantes térmicos más usados se encuentran los minerales celulares o fibrosos con un 47%.

3.8.2 Intercambiadores de calor

Figura 120. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de transferencia de calor (b. intercambiadores de calor)

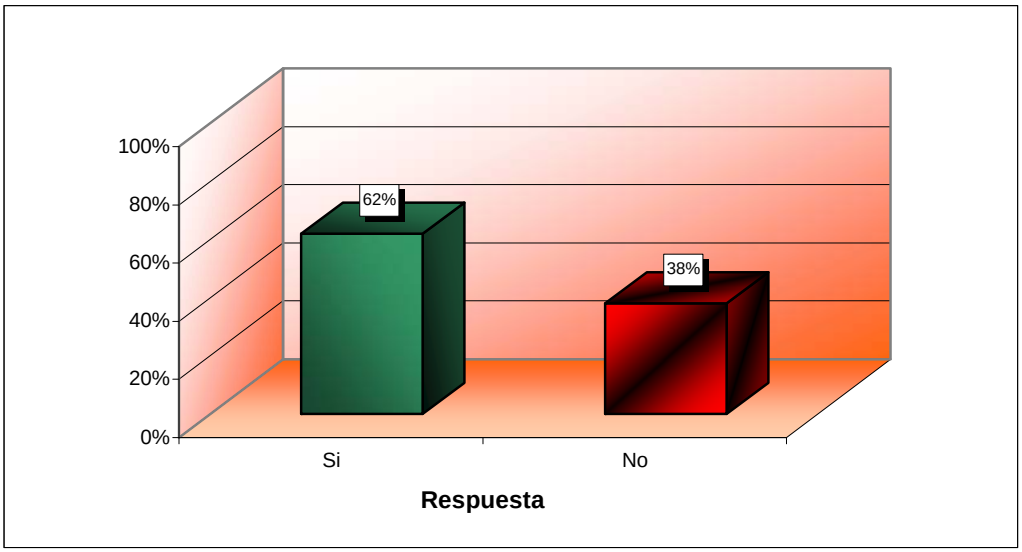


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

En la figura 120 se puede observar que de 60 encuestados el 82% han tenido contacto con los intercambiadores de calor y dentro de los intercambiadores de calor los más usados son los de tipo concha y tubo en un 75%, estos equipos son requeridos en casi todas las industrias de procesamiento de materiales, ya que el objetivo principal de los intercambiadores de calor es el de llevar una corriente de flujo a una temperatura determinada, calentándola o refrigerándola mediante otra corriente de fluido calentador o refrigerante.

3.8.3 Hornos

Figura 121. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de transferencia de calor (c. hornos)

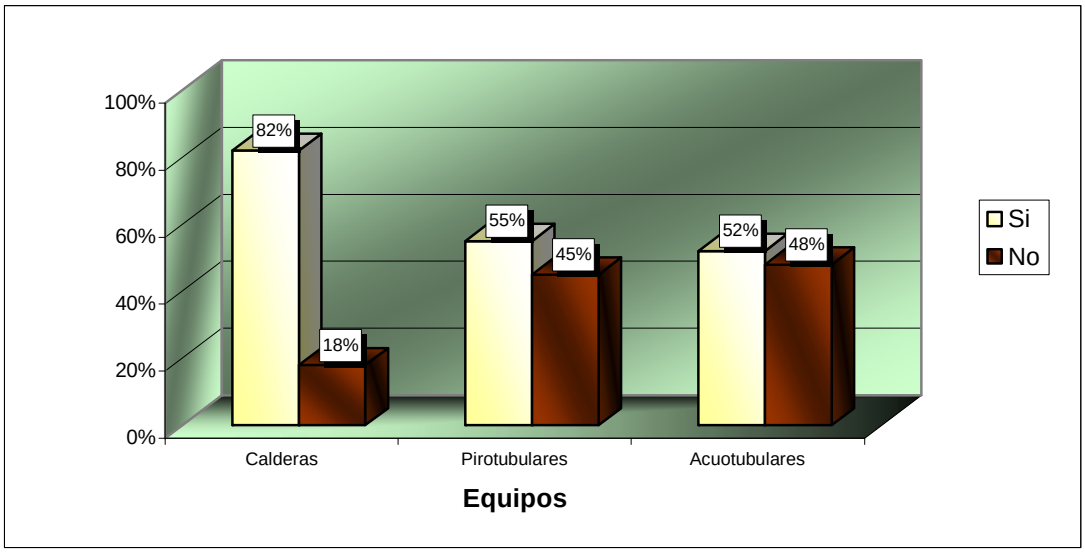


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

El 62% de los encuestados si han tenido contacto con los hornos en el manejo de transferencia de calor en las industrias que han laborado durante su carrera profesional y el 38% no han tenido contacto.

3.8.4 Calderas

Figura 122. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de transferencia de calor (d. calderas)

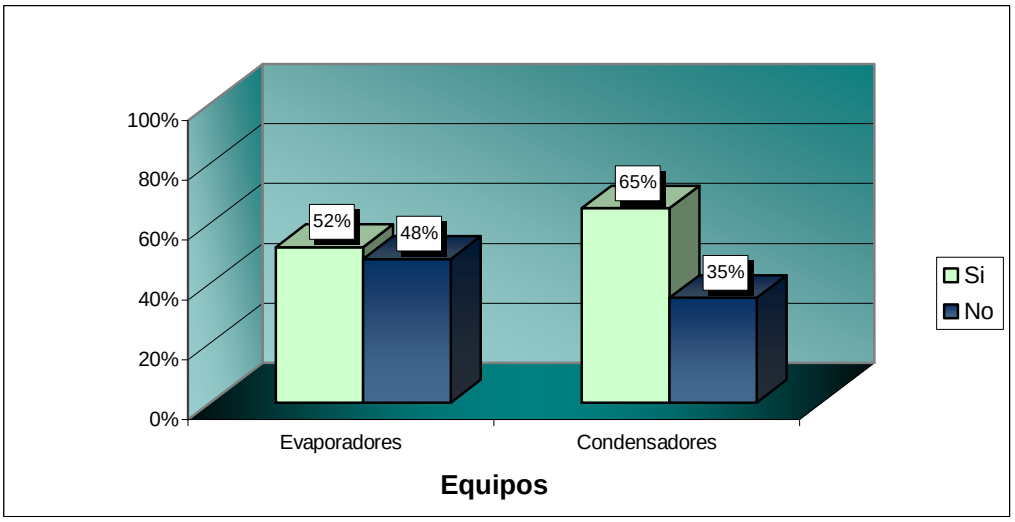


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

Las calderas son generadores de vapor de tipo intercambiador de calor de concha y tubo que se utilizan para producir vapor que se requiere en el proceso, son uno de los equipos más importantes con los que cuentan casi todas las industrias, esto se comprueba ya que el 82% de los encuestados han tenido contacto directo con las calderas en las industrias en las cuales han laborado y las más utilizadas entre las calderas pirotubulares y acuotubulares son, las pirotubulares con un 55%, esto se debe a que requieren un menor costo inicial debido a la simplicidad de su diseño, cuentan con mayor flexibilidad de operación, requieren menos exigencias de pureza en el agua de alimentación y son pequeñas y eficientes.

3.8.5 Evaporadores y condensadores

Figura 123. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de transferencia de calor (e. evaporadores, f. condensadores)

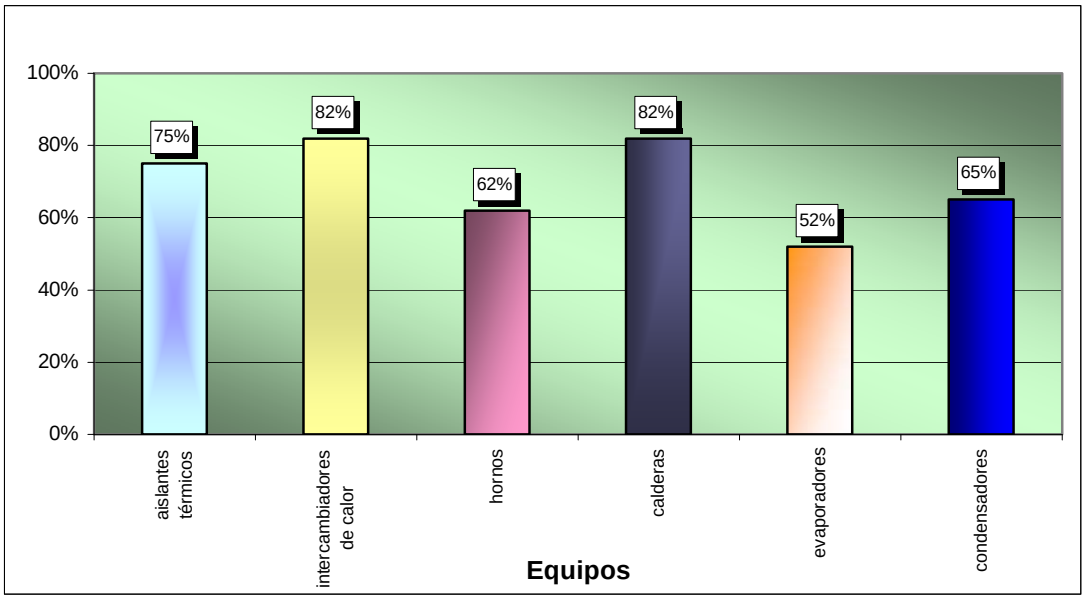


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

El 52% de las personas que laboran en las industrias de procesamiento de materiales han tenido contacto con los evaporadores y otro 48% no lo han tenidos; uno de los usos principales de los evaporadores es en la industria azucarera en los ingenios, en la evaporación del jugo de la caña de azúcar; en cuanto a los condensadores hay un mayor porcentaje de 65% que han tenido contacto con estos equipos y un menor porcentaje de 35% no lo han tenido ; este contacto se debe al tipo de industria en la que hayan laborado o laboren actualmente las personas encuestadas, ya que no todos los procesos de manufactura requieren de dichos equipos.

3.8.6 Equipos más utilizados en el manejo de transferencia de calor

Figura 124. Equipos más utilizados en el manejo de transferencia de calor



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las figuras 119 a la 123.

Al extraer los equipos más utilizados a partir de las figuras 119 a la 123 se observa que todos los equipos que se dieron a conocer en el manejo de transferencia de calor son los más utilizados por las industrias de procesamiento de materiales, solo que en un mayor porcentaje como se observa en la figura 124, dominan los intercambiadores de calor y las calderas con un 82%.

A partir de esta figura se realizó un análisis de comparación al igual como se realizó con el manejo de transferencia de fluidos, solo que ahora con el manejo de transferencia de calor; con las temáticas que aparecen en los programas de la carrera de ingeniería química, como se observa en la siguiente tabla, en el curso de Laboratorio de ingeniería química 1 y 2, en su mayoría estos equipos se estudian en este curso el cual es un curso teórico- práctico en el cual se adquieren conocimientos del funcionamiento de estos equipos, este es un curso de suma importancia ya que así el estudiante adquiere no solo conocimientos teóricos sino también prácticos que le ayudaran a enfrentarse a situaciones reales cuando labore en una empresa, para solucionar problemas de una manera rápida y concisa.

Tabla IV. Equipos más utilizados en el manejo de transferencia de calor por las industrias de procesamiento de materiales instaladas en Guatemala y cursos de la carrera de Ingeniería Química de la USAC en los cuales son estudiados dichos equipos

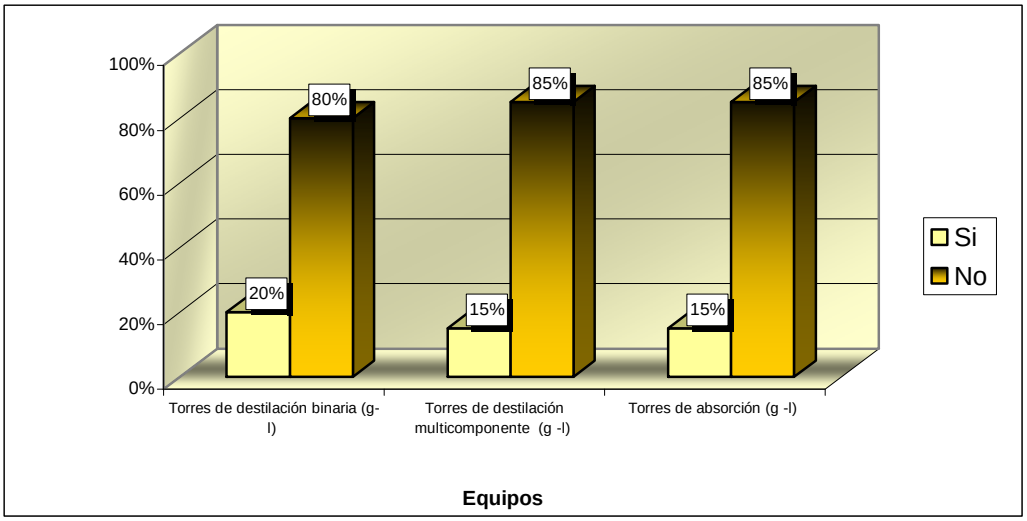
Equipos más utilizados en el manejo de transferencia de calor por las industrias de procesamiento de materiales en Guatemala	Cursos de la carrera de Ingeniería Química de la USAC en los cuales son estudiados los equipos empleados en el manejo de transferencia de calor
Aislantes térmicos	I.Q.- 3
Intercambiadores de calor	Termodinámica 3, I.Q.- 3, Lab. Ing. Química 1 y Diseño de Equipos
Hornos	I.Q.- 3, Lab. Ing. Química 2
Calderas	I.Q.- 3, Lab. Ing. Química 2, Diseño de Equipo
Evaporadores	I.Q.- 3, Diseño de Equipo
Condensadores	I.Q.- 3, Diseño de Equipo

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la figura 124 y de los programas de los cursos de la carrera de Ingeniería Química de la USAC.

3.9. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de transferencia de materia

3.9.1 Torres de destilación binaria (g-l), torres de destilación multicomponente (g-l) y torres de absorción (g-l)

Figura 125. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de transferencia de materia (a. torres de destilación binaria (g-l), b. torres de destilación multicomponente (g-l) y c. torres de absorción (g-l))

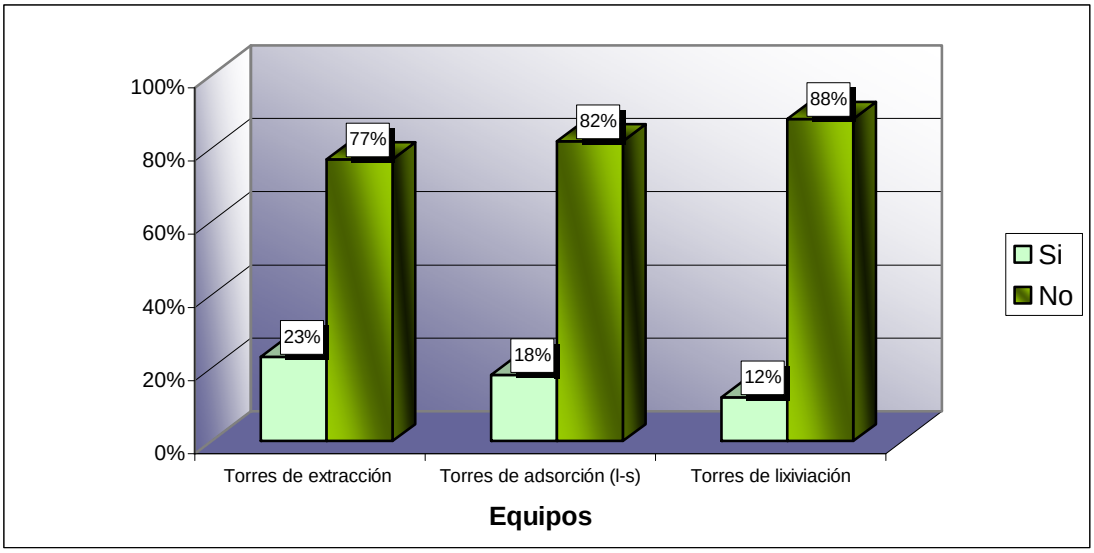


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

Otro de los aspectos a examinar en la encuesta fue el contacto con el cual han tenido las personas en las industrias guatemaltecas en cuanto al manejo de transferencia de calor y de las 60 personas encuestadas el 20% si había tenido contacto con las torres de destilación binaria (g-l), una situación similar con las torres de destilación multicomponente (g-l) y las torres de absorción (g-l), el 15% si habían tenido contacto con este tipo de torres y el 85% no.

3.9.2 Torres de extracción, torres de adsorción (l-s) y torres de lixiviación

Figura 126. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de transferencia de materia (d. torres de extracción, e. torres de adsorción (l-s) y f. torres de lixiviación)

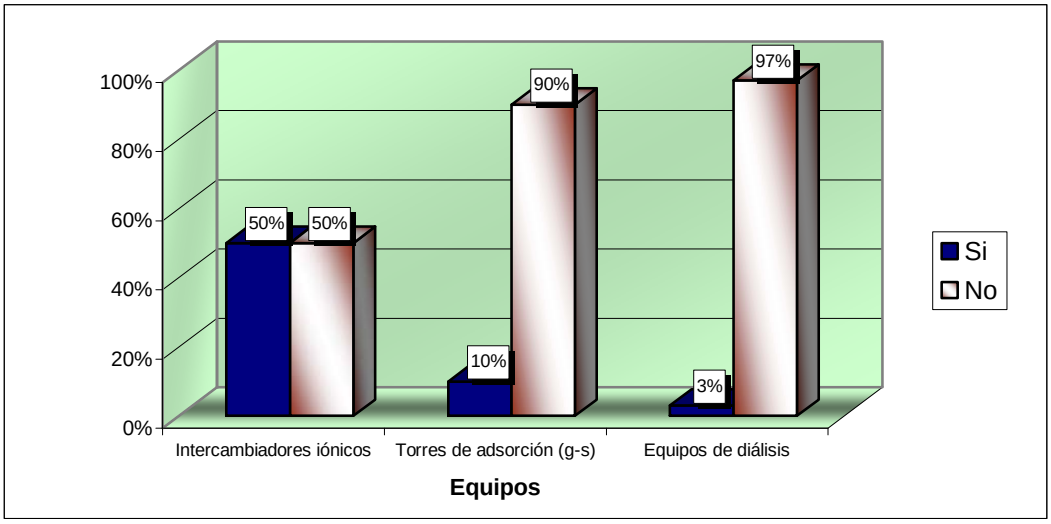


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

En su mayoría, de los ingenieros que contestaron esta encuesta que laboran en diferentes industrias de procesamiento de materiales, el 77% no había tenido contacto con las torres de extracción, al igual que un 82% no han tenido contacto durante toda su carrera profesional con las torres de adsorción (l-s); y un 88% de las 60 personas encuestadas no han manejado ni tenido contacto con las torres de lixiviación en las industrias en las cuales han laborado.

3.9.3 Intercambiadores iónicos, torres de adsorción (g-s) y equipos de diálisis

Figura 127. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de transferencia de materia (g. Intercambiadores iónicos, h. torres de adsorción (g-s) y i. equipos de diálisis)



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

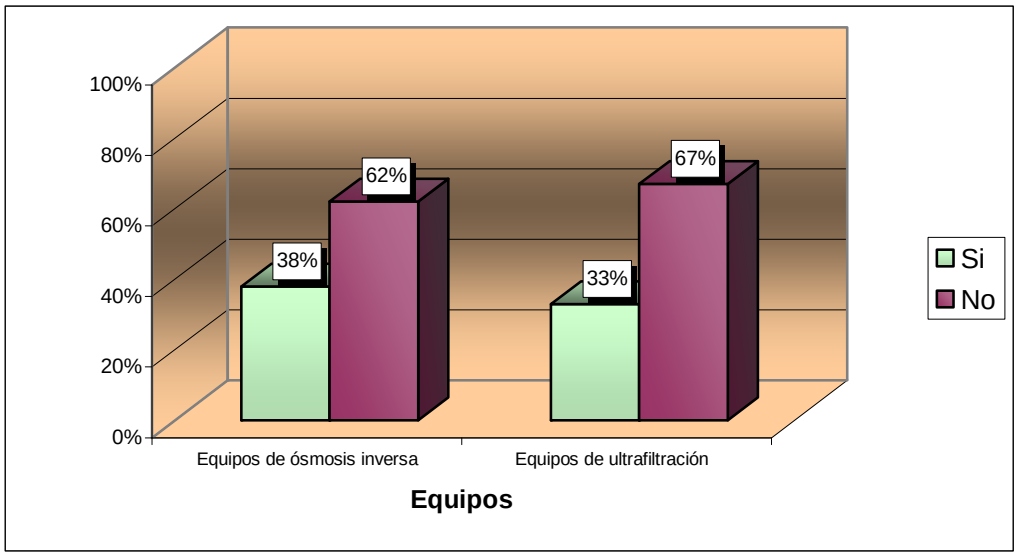
El 50% de los ingenieros químicos entrevistados han tenido contacto con los intercambiadores iónicos, este es uno de los equipos más utilizados por las industrias de procesamiento de materiales en Guatemala, se debe primordialmente a su aplicación en la industria en el ablandamiento del agua por intercambio de iones de calcio por iones de sodio y desmineralización de agua por eliminación de cationes y aniones; este equipos al realizar el análisis de comparación con los cursos que aparecen en los programas de estudio de la carrera de ingeniería química de la USAC, es estudiado en el curso de I.Q.-5,

en el cual el estudiante adquiere conocimientos prácticos, en cuanto a su funcionamientos, aplicaciones y fundamentos del mismo.

Unicamente un 10% de los encuestados ha tenido contacto con las torres de adsorción (g-l), y en un menor porcentaje tan solo un 3% de 60 encuestados a tenido contacto con el manejo de equipos de diálisis.

3.9.4 Equipos de ósmosis inversa y equipos de ultrafiltración

Figura 128. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de transferencia de materia (j. equipos de ósmosis inversa y k. equipos de ultrafiltración)



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

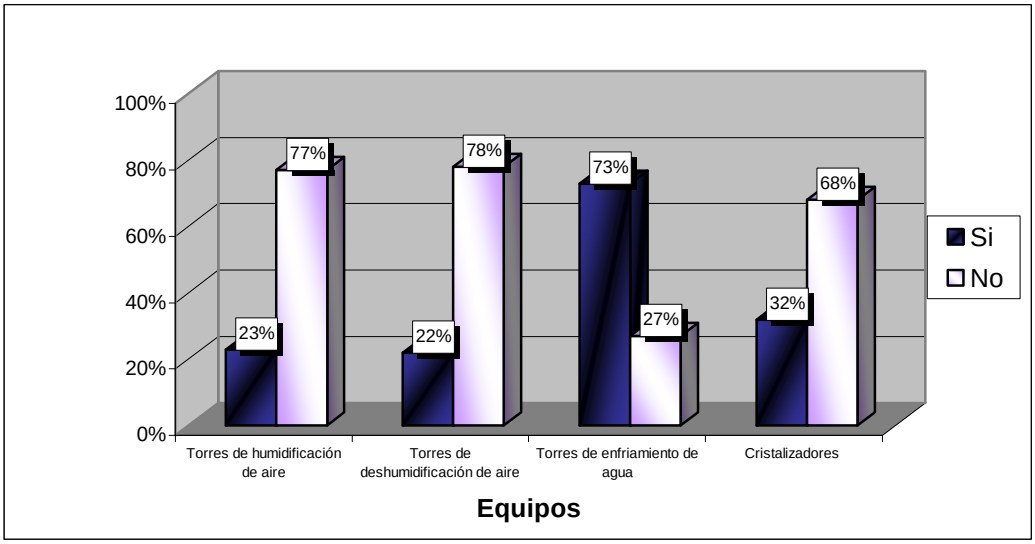
Los equipos de utilizados para la ósmosis inversa son utilizados por las industrias en un 38% generalmente para procesos de desalinización del agua de mar, para la producción de agua potable, en la desmineralización; en el

procesamiento de sueros, jugos y efluentes de la industria alimentaria, entre otras. Y un 33% de los encuestados han tenido contacto con los equipos de ultrafiltración, en las industrias donde fabrican pinturas, en las industrias alimentarias para la extracción de la proteína, entre otras.

3.10. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de transferencia simultanea de materia y energía

3.10.1 Torres de humidificación de aire, torres de deshumidificación de aire, torres de agua y cristalizadores

Figura 129. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de Transferencia simultanea de materia y energía (a. torres de humidificación de aire, b. torres de deshumidificación de aire, c. torres de enfriamiento de agua, d. cristalizadores)

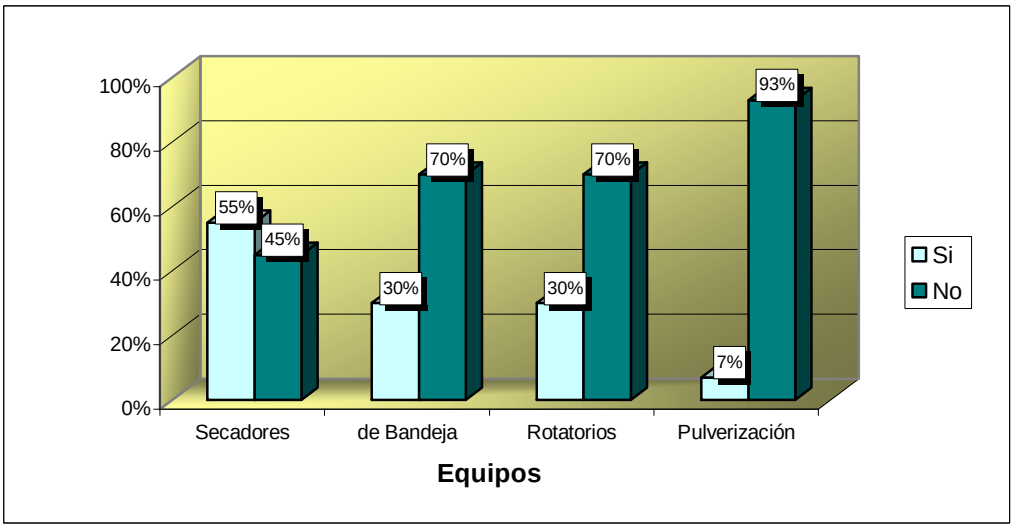


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

El 23% si ha tenido contacto con las torres de humificación de aire, así como un 22% ha tenido contacto en las empresas manufactureras instaladas en Guatemala con las torres de deshumidificación de aire; un mayor porcentaje de los encuestados ha tenido contacto con las torres de enfriamiento de agua en un 73%, y únicamente un 32% de las 60 personas encuestadas si ha tenido contacto con los cristralizadores y un 68% no lo ha tenido.

3.10.2 Secadores

Figura 130. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de transferencia simultanea de materia y energía (e. secadores)



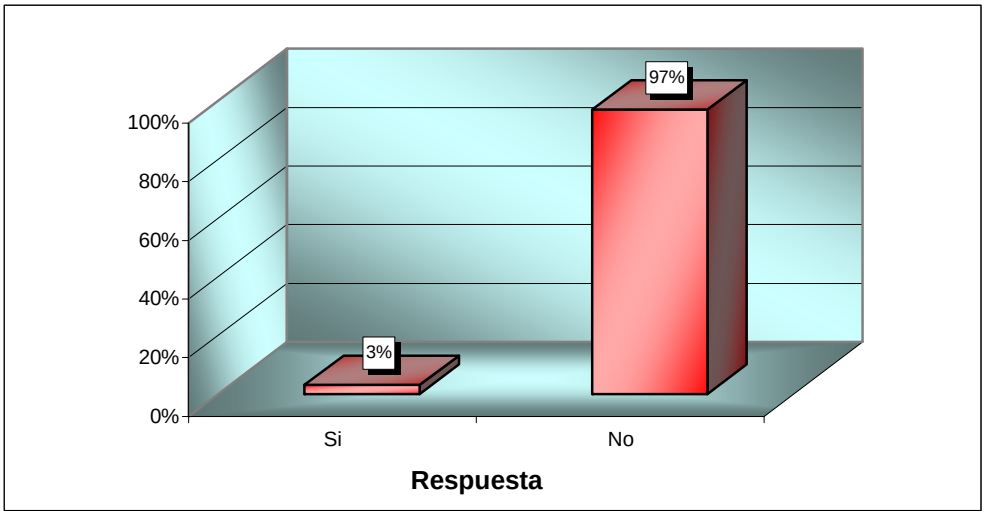
Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

A través de esta encuesta de opinión se les pregunto a los ingeneros químicos si habían tenido contacto con los secadores y el 55% si ha tenido

contacto durante su carrera profesional, y entre los secadores más utilizados se encuentran los de tipo bandeja y los rotatorios utilizados por un 30 % de las personas en las diferentes industrias; en cambio los secadores de tipo pulverizado son usados en un menor porcentaje de 7%.

3.10.3 Liofilizadores

Figura 131. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de transferencia simultanea de materia y energía (f. liofilizadores)



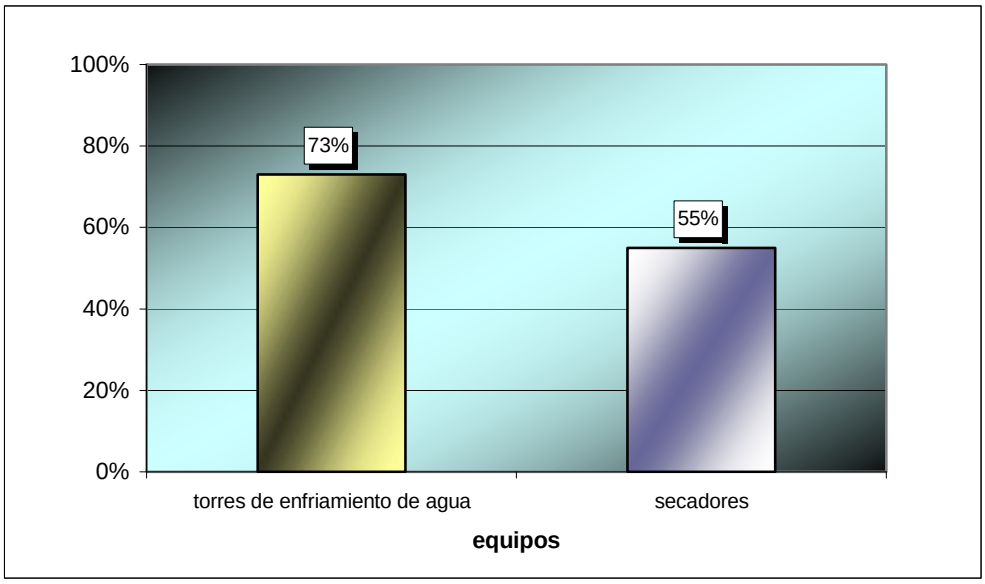
Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

El proceso de liofilización consiste básicamente en la eliminación de agua de un sólido por sublimación de las mismas, es utilizado en procesos de secado de alimentos, vitaminas y otros productos sensibles al calor. Actualmente en las industrias en de procesamiento de materiales en las cuales han laborado las

personas encuestadas, únicamente un 3% si han tenido contacto con este tipo de equipos y 97% nunca han tenido contacto.

3.10.4 Equipos más utilizados en el manejo de transferencia simultanea de materia y energía

Figura 132. Equipos más utilizados en el manejo de transferencia simultanea de materia y energía



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las figuras 129 a la 131.

A partir de las figuras 129 a la 131 obtenidas de la encuesta realizada a ingenieros químicos que laboran en distintas empresas de procesamiento de materiales instaladas en Guatemala, se obtuvo que los equipos más utilizados en el manejo de transferencia simultanea de materia y energía son las torres de enfriamiento de agua en un 73% y los secadores en general en un 55%. Estos equipos son de suma importancia en cualquier tipo de proceso ya que por

ejemplo las torres de enfriamiento son utilizadas en las industrias para aprovechar el agua caliente y enfriarla si se pone en contacto con un gas frío o no saturado y así poder reutilizar esa agua a la temperatura deseada. Y los secadores son equipos donde se lleva a cabo el proceso de secado de sólidos el cual consiste en separar pequeñas cantidades de agua y otro líquido de un material sólido con el fin de reducir el contenido de líquido residual hasta un valor aceptablemente bajo; por lo común son empleados en la etapa final de una serie de operaciones y, con frecuencia el producto que se extrae de un secador está listo para ser empaquetado.

Tabla V. Equipos más utilizados en el manejo de transferencia simultanea de materia y energía por las industrias de procesamiento de materiales instaladas en Guatemala y cursos de la carrera de Ingeniería Química de la USAC en los cuales son estudiados dichos equipos

Equipos más utilizados en el manejo de transferencia simultanea de materia y energía por las industrias de procesamiento de materiales en Guatemala	Cursos de la carrera de Ingeniería Química de la USAC en los cuales son estudiados los equipos empleados en el manejo de transferencia simultanea de materia y energía
Torres de enfriamiento de agua	Lab. Ing. Química 2 e I.Q.-5
Secadores	I.Q.-5, Lab. Ing. Química 2 y Diseño de equipo

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la figura 132 y de los programas de los cursos de la carrera de Ingeniería Química de la USAC.

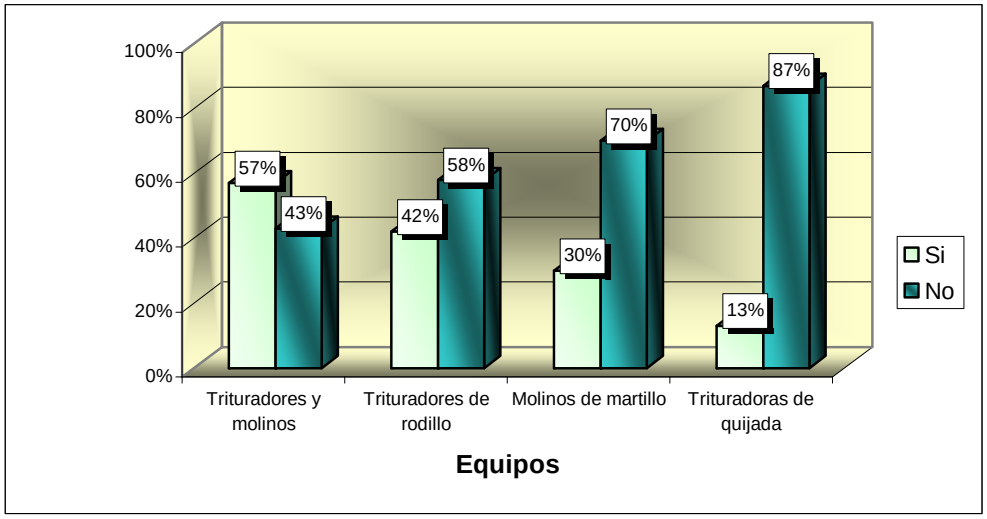
En la pregunta 4 de la encuesta realizada a los ingenieros químicos (sección Apéndice), se les pregunto a los ingenieros con cuales equipos habían tenido contacto en cuento al manejo de transferencia simultanea de materia y energía, y se les proporciono una lista como se observa en la encuesta, de los cuales solo 2 equipos son los más utilizados como se observó en la figura 132, que

son las torres de enfriamiento de agua y los secadores; al realizar un análisis de comparación con las temáticas de los cursos de la carrera de ingeniería química para constatar si los estudiantes en toda la carrera estudian estos equipos y como se observa en la tabla V, por ejemplo las torres de enfriadito de agua y los secadores son estudiadas en el Lab, Ing. Química 2 en el cual se aprende en el funcionamiento y parámetros que se deben de conocer a la hora de estarlos operando, también son estudiadas en el curso de I.Q.-5, en cuanto a los secadores también son vistos en el curso de diseño de equipo, como su nombre lo indica se aprender a diseñar estos equipos, a elaborar ecuaciones de diseño, análisis de diseño y funcionamiento y costos de fabricación.

3.11. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de materiales

3.11.1 Trituradores y molinos

Figura 133. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de materiales (a. trituradores y molinos)



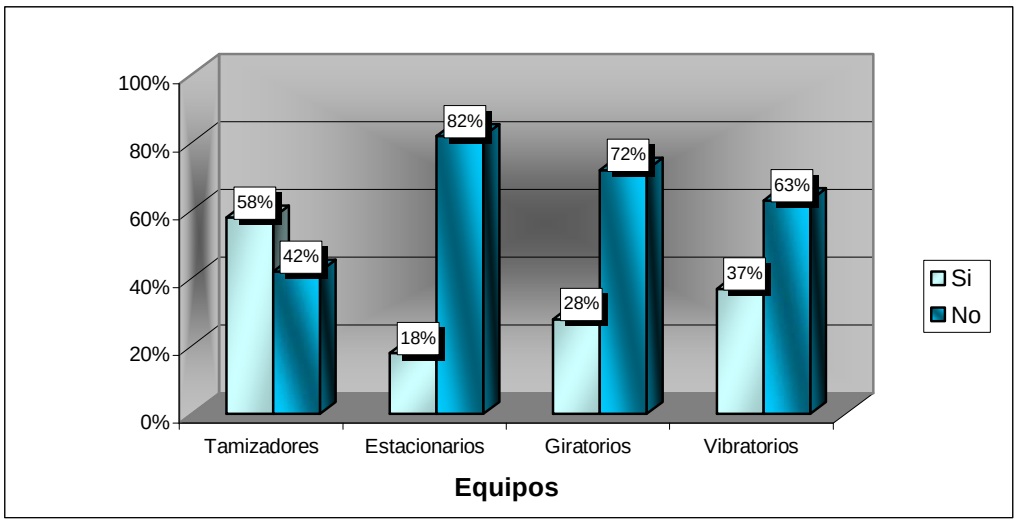
Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

Los trituradores y molinos tienen por objetivo el reducir el tamaño de los elementos en que se presenta un sólido, la reducción de tamaño se basa en someter los trozos de material a esfuerzos de compresión, impacto, cortado, cizalladura y fricción. Estos equipos son empleados actualmente por las industrias instaladas en Guatemala en un 57%, entre la clasificación que se les proporciono de estos equipos, se pudo determinar que un 42% de las personas encuestadas han tenido contacto con trituradores de tipo rodillo, así también un

58% no lo han tenido; se les pregunto además si habían tenido contacto en las áreas en las cuales han laborado o laboran actualmente con los molinos de martillo solo un 30% habían tenido contacto, y en cuanto a las trituradoras tipo quijada únicamente un 13% de las 60 personas encuestadas habían trabajado con este tipo de equipos en el manejo de materiales.

3.11.2 Tamizadores

Figura 134. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de materiales (b. tamizadores)



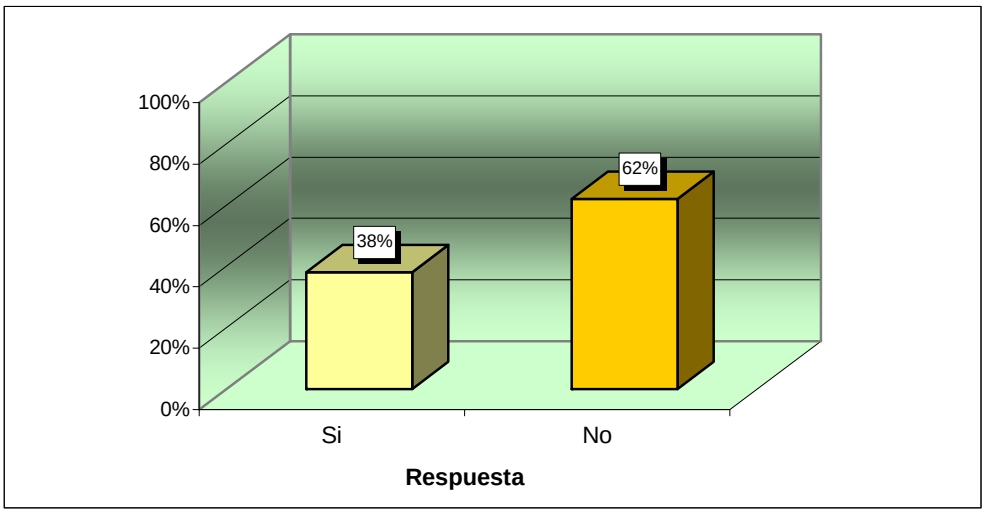
Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

El tamizado es una operación destinada a la separación por tamaños de las partículas de una mezcla sólida. Se basa en hacer pasar las partículas de menor tamaño a través de una malla de paso; las partículas se clasifican en cernido o partículas que atraviesan la malla y rechazo partículas que quedan

retenidas, los equipos utilizados para este proceso se conocen como tamizadores, estos son uno de los separadores sólido-sólido más clásicos.
De las 60 personas encuestadas el 58% han tenido contacto en las diferentes industrias en las cuales han laborado, y entre los tipos de tamizadores más comunes o los más utilizados por las industrias según las personas encuestadas están los de tipo vibratorio en un 37%.

3.11.3 Mezcladores de sólidos y pastas

Figura 135. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de materiales (c. mezcladores de sólidos y pastas)

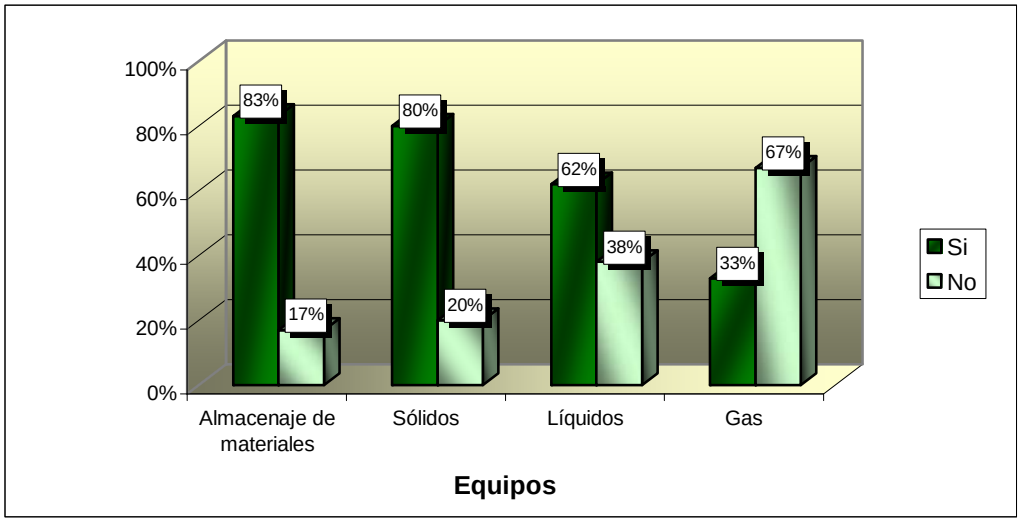


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

Únicamente un 38% de los 60 ingenieros encuestados si han tenido contacto con los mezcladores de sólidos y pastas para el manejo de materiales en las industrias en las cuales han laborado.

3.11.4 Almacenaje de materiales

Figura 136. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de materiales (d. almacenaje de materiales)

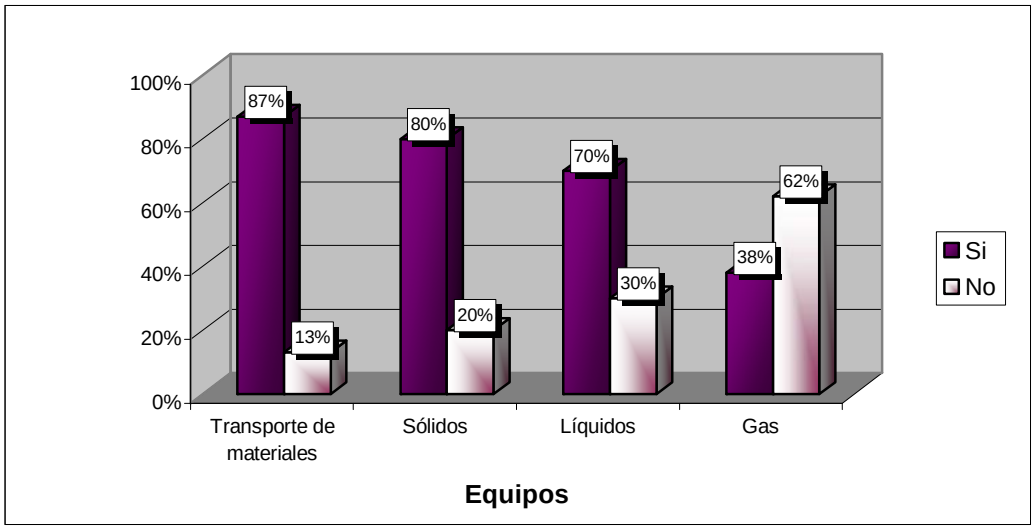


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

El almacenaje de materiales es una etapa importante en la fabricación de un producto industrial, tanto para la etapa de manejo de las materias primas, como las etapas de productos intermedios o finales, esto se demuestra a través de la figura 136, en el cual el 83% de los ingenieros químicos encuestados han tenido contacto con este tipo de almacenaje, este a su vez se clasifico en almacenaje de materiales sólidos, líquidos y gases y el 80% ha tenido mayor contacto con el almacenaje de sólidos que con otro tipo.

3.11.5 Transporte de materiales

Figura 137. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de materiales (e. transporte de materiales)

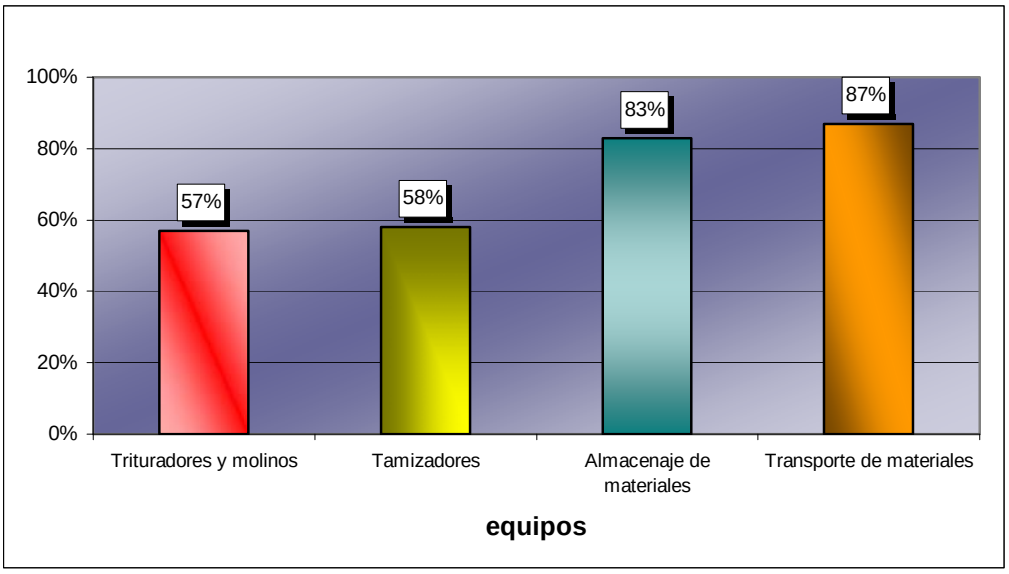


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

Otra de las operaciones importantes que se realizan en la fabricación de un producto por las industrias es el transporte de materiales de un punto a otro, como se observa en la figura 137, de las 60 personas encuestadas el 87% han tenido contacto con los diferentes tipos de equipos que se utilizan en el transporte de materiales. También se quería conocer que tipo de material es más común de transportar en las industrias y los más comunes son los materiales de tipo sólido, ya que un 80% de los ingenieros químicos encuestados han transportado este tipo de material, el 70% los materiales de tipo líquido y un 38% las materiales gaseosos.

3.11.6 Equipos más utilizados en el manejo de materiales

Figura 138. Equipos más utilizados en el manejo de materiales



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las figuras 133 a la 137.

Para determinar cuáles son los equipos más utilizados en el manejo de materiales se extrajeron de las figuras 133 a la figura 137, los equipos con un porcentaje arriba del 50% de los cuales las personas encuestadas habían respondido que si habían tenido contacto con dichos equipos obteniendo así la figura 138, en la cual se puede observar que los trituradores y molinos son utilizados en las industrias de procesamiento de Guatemala en un 57%, los tamizadores en un 58%, y además en las industrias el proceso de almacenaje de materiales en general es empleado en un 83% y el transporte de materiales en un 87%.

Tabla VI. Equipos más utilizados en el manejo de materiales por las industrias de procesamiento de materiales instaladas en Guatemala y cursos de la carrera de Ingeniería Química de la USAC, en los cuales son estudiados dichos equipos

Equipos más utilizados en el manejo de materiales por las industrias de procesamiento de materiales en Guatemala	Cursos de la carrera de Ingeniería Química de la USAC, en los cuales son estudiados los equipos empleados en el manejo de materiales
Trituradores y molinos	I.Q.- 6
Tamizadores	I.Q.- 6
Almacenaje de materiales	I.Q.- 6
Transporte de materiales	I.Q.- 6

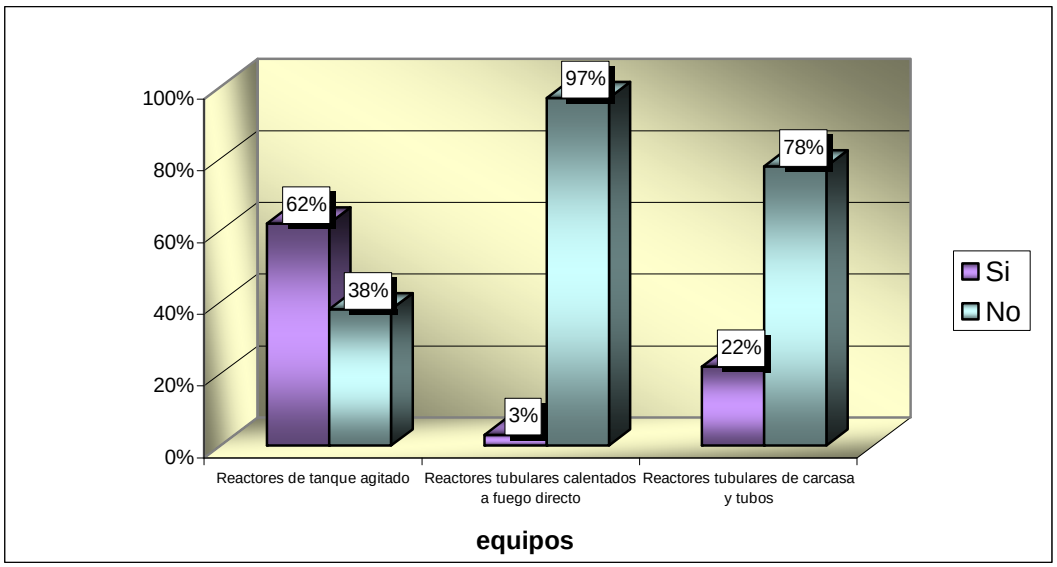
Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la figura 138 y de los programas de los cursos de la carrera de Ingeniería Química de la USAC.

A partir de la figura 138 se generó la tabla VI, en la cual se da a conocer los equipos más utilizados en el manejo de materiales por las industrias instaladas en Guatemala y se generó un cuadro de comparación en el que se muestra el curso de la carrera de Ingeniería Química de la USAC, en la cual son estudiados dichos equipos, el cual es I.Q-6, siendo propiamente este curso en el cual se estudian como su nombre lo indica las Operaciones Unitarias Complementarias, en este curso entre los temas que se estudian son el almacenaje, transporte, separación, molienda, mezclado y agrandamiento de sólidos; así como los equipos para llevar a cabo estas operaciones, es por ello que el estudiante de la carrera de Ingeniería Química estudia a profundidad dichos equipos y conoce que equipo poder usar en los diferentes procesos que se lleven a cabo para la elaboración de diferentes productos, ya sean alimenticios, productos farmacéuticos, de tocador y limpieza, etc.

3.12. Equipos con los cuales han tenido contacto en el manejo de procesos químicos

3.12.1 Reactores de tanque agitado, tubulares calentados a fuego directo y tubulares de carcasa y tubos

Figura 139. Reactores con los cuales han tenido contacto en el manejo de procesos químicos (a. tanque agitado, b. tubulares calentados a fuego directo, c. tubulares de carcasa y tubos)



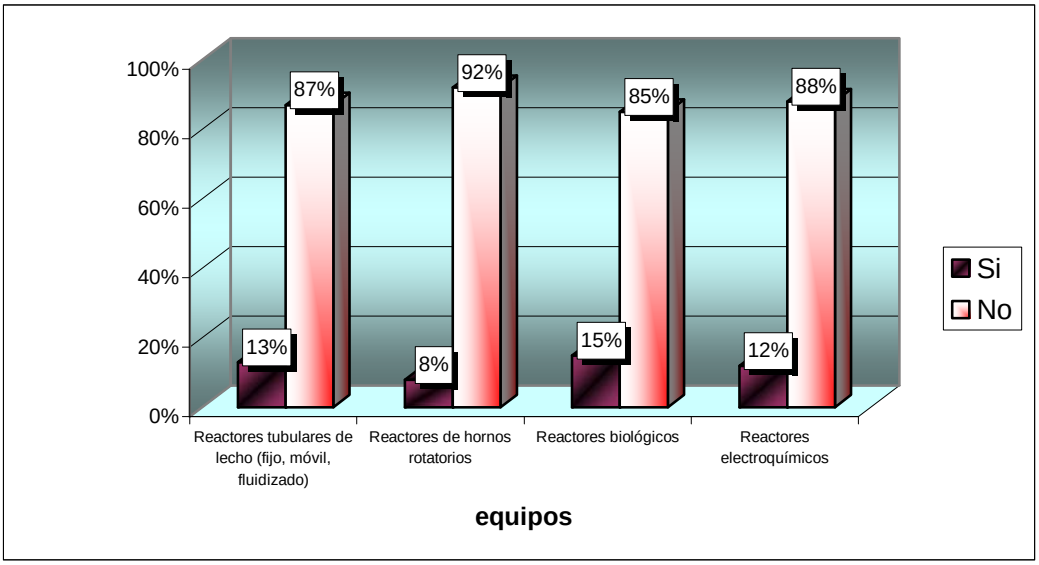
Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

Los reactores químicos tienen por objetivo distribuir de una forma distinta los átomos de una molécula para dar otra, es decir el paso de los reactivos a los productos se da en los reactores químicos; puesto que todos los procesos químicos giran en torno al reactor químico se quiso conocer de que manera los

ingenieros químicos han tenido contacto con los mismos y es por ello que se generó también esta pregunta en la encuesta (ver sección de apéndice), se obtuvo que de las 60 personas encuestadas que laboran en diversas industrias el 62% si ha tenido contacto con los reactores de tanque agitado y un 38% no lo han tenido, únicamente un 3% han tenido contacto con los reactores calentados a fuego directo y un 97% no; un 22% si han tenido contacto con los reactores tubulares de carcasa y tubos.

3.12.2 Reactores de tanque agitado, tubulares calentados a fuego directo y tubulares de carcasa y tubos

Figura 140. Reactores con los cuales han tenido contacto en el manejo de procesos químicos (d. tubulares de lecho (fijo, móvil, fluidizado), e. de hornos rotatorios, f. biológicos, g. electroquímicos)



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de las encuestadas realizadas en las distintas empresas.

Otros de los reactores que se analizaron a partir de esta encuesta si eran empleados actualmente por las industrias fueron los reactores tubulares de lecho (fijo, móvil, fluidizado), y únicamente un 13% de las 60 personas encuestadas habían tenido contacto con este en todo el transcurso de su vida profesional, un 8% si había tenido contacto con los reactores de hornos rotatorios y en su mayoría un 92% no habían tenido contacto o manejado dicho equipo. El 15% como se observa en la figura 140 han tenido contacto con los reactores de tipo biológicos, y un 12% si han tenido contacto con los reactores tipo electroquímicos.

Como se observa en la figuras 139 y 140 el reactor más utilizado son los de tipo de tanque agitado en un 62% por las industrias de procesamiento de materiales instaladas en Guatemala al comparar este equipo con las temáticas que aparecen en los cursos de la carrera de ingeniería química de la misma manera que se realizó con los demás equipos que se demostró con anterioridad se determino que este tipo de reactor es estudiado en el curso de cinética de procesos químicos, en este curso se aprenden cálculos de conversión y avance de reacción, ecuaciones de diseño de reactores ideales por lotes, totalmente agitados y de flujo tipo pistón , además se aprende como diseñar un reactor isotérmico esto son algunos de los temas básicos que se abarcan en el curso, con el objetivo de desarrollar en el estudiante habilidades de razonamiento creativo, y pueda resolver problemas de una manera crítica y vaya adquiriendo habilidades para resolver problemas reales a la hora de estar laborando en una industria.

CONCLUSIONES

1. De las 60 personas encuestadas el 40% estaban comprendidas en un rango de edad de 20 a 30 años, el 27% tenían entre 31 a 40 años, el 15% tenían entre 41 a 50 y el otro 15% tenían entre 51 a 60 años, y únicamente en 3% se encontraban en un rango de edad de 61 a 70.

2. El 10% de los encuestados se encuentra aún pendiente de examen público, otro 12% son titulados no colegiados, en su mayoría con un 62% son ingenieros químicos titulados colegiados y otro 7% cuentan con maestrías, doctorados y otras especialidades.

3. Las industrias con un mayor porcentaje, en la cual laboran los ingenieros químicos son en un 23% en diversas entidades como lo son telecomunicaciones, entidades del gobierno, empresas dedicadas al ambiente, petroleras; otro 20% laboran en empresas que se dedican a la fabricación de alimentos diversos, otro 17% trabajan en empresas donde manufacturan productos de tocador, limpieza, etc.; otro 10% trabajan en la fabricación y refinado de azúcar.

4. Los puestos que ocupan los ingenieros químicos en las distintas empresas donde laboran es muy variado no existe una mayoría que ocupe un puesto determinado, demostrando así que el campo en el cual puede laborar el ingeniero químico como profesional es muy amplio, pero a la vez muy competitivo.

5. El 97% de los ingenieros químicos que laboran en industrias de procesamiento de materiales instaladas en Guatemala sí han tenido contacto directo con las Operaciones Unitarias en las áreas en las cuales han trabajado.

6. Los equipos más utilizados por las industrias de procesamiento de materiales instadas en Guatemala para el manejo de fluidos son, las conducciones con un 93%, las bombas en un 95%, los compresores con el 87%, los ventiladores en un 72%, las válvulas en un 93%; los medidores de caudal en general con un 75%, los filtros son utilizados en un 75% y los agitadores y mezcladores de líquidos en un 78%.

7. Los equipos más utilizados por las industrias de procesamiento de materiales instaladas en Guatemala en cuanto al manejo de transferencia de calor son: los aislantes térmicos con el 75%, los intercambiadores de calor con un 82%, los hornos son empleados en un 62%, las calderas con el 82%; los evaporadores en un 52% y los condensadores con el 65%.

8. Los intercambiadores iónicos son los equipos más utilizados con un 50%, por las industrias de procesamiento de materiales en el manejo de transferencia de materia.

9. Las torres de enfriamiento de agua con el 73% y los secadores con el 55%,ya que son los equipos más utilizados en el manejo de transferencia simultánea de materia y energía por las industrias de procesamiento de materiales que se encuentran instaladas en Guatemala.

10. Los equipos más empleados por las industrias de procesamiento de materiales en Guatemala para el manejo de materiales son los trituradores y molinos con un 57%, los tamizadores con el 58%, también son empleados los proceso de almacenaje de materiales en un 83% por las empresas manufactureras y el transporte de materiales en un 87%.

11. Los reactores de tanque agitado con un 62% son los más empleados en el manejo de procesos químicos por las industrias de procesamiento de materiales instaladas en Guatemala.

12. Al realizar un análisis de comparación con las temáticas de los cursos de la carrera de ingeniería química de la USAC y con los equipos más utilizados por las industrias de procesamiento de materiales ya sea en el manejo de fluidos, de transferencia de calor, de materia; transferencia simultanea de materia y energía, en cuanto al manejo de materiales y en los procesos químicos, se determinó que estos equipos si son estudiados en el transcurso de la carrera.

RECOMENDACIONES

1. Debido a los adelantos en cuanto a los procesos para la elaboración de productos en las industrias, en cuanto a la tecnología e innovación de equipos, es importante que los estudiantes de la carrera de ingeniería química desarrollen habilidades de razonamiento, tanto crítico como creativo, para manejar y diseñar equipos que se utilizan en la actualidad en las industrias, a través de visitas técnicas a diferentes industrias y además generar temas prácticos, en los cuales el estudiante resuelva problemas reales en los cursos del área profesional de la carrera de ingeniería química, para desarrollar así estas habilidades.

2. Dar mayor énfasis en cada uno de los cursos de la carrera de Ingeniería Química, temas donde el estudiante aprenda procesos reales y situaciones críticas que se dan en las industrias, con el objetivo de generar en el estudiante habilidades para solucionar problemas de una manera más efectiva.

3. Dar a conocer a los estudiantes de la carrera de ingeniería, la clasificación propuesta en este informe final con respecto a las operaciones unitarias, al inicio de la carrera para darles una perspectiva de lo que abarcaran durante el transcurso de la misma.

BIBLIOGRAFÍA

1. FOGLER, H. Scott. **Elementos de ingeniería de las reacciones químicas.** 3ª ed. México: Editorial Pearson Educación, S.A. de C.V., 2001.

2. GEANKOPLIS, Christie J. **Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias**. 3ª ed. México: Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V., 2003.

3. HINES, Anthony L. **Transferencia de Masa, fundamentos y aplicaciones.** México: Editorial Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A., 1987.

4. Ing. Q. DE LEÓN de Paz, Otto Raúl. **Manejo de Sólidos en Ingeniería Química**. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 2001.

5. Ing. Q. ALVAREZ, M. Williams G**. Folleto de las Operaciones Unitarias Físicas Controladas por la Transferencia de Materia y Transferencia simultánea de Materia y Energía**. Guatemala: USAC, 2005.

6. KERN, Donal Q. **Procesos de Transferencia de Calor.** México: Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V., 1987.

7. McCABE, Warren y otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** 6ª ed. México: Editorial McGraw-Hill, 2002.

8. PERRY, Robert H. **Manual del Ingeniero Químico**. 6ª ed. (Tomos 1y 2) México: Editorial McGraw-Hill, 1992.

9. WALPOLE, Ronal y MYERS, Raymond. **Probabilidad y estadística.** 4ª ed. México: Editorial McGraw-Hill, 1992.

APÉNDICE

ENCUESTA DE OPINIÓN SOBRE LAS OPERACIONES UNITARIAS MÁS UTILIZADAS EN LOS PROCESOS DE MANUFACTURA POR LAS INDUSTRIAS DE PROCESAMIENTO DE MATERIALES INSTALADAS EN GUATEMALA

INSTRUCCIONES GENERALES

Para responder esta encuesta, el cual se compone de 6 preguntas; es necesario lo realice un Ingeniero Químico. Basando su respuesta en la experiencia que ha adquirido durante su vida profesional y no sólo en la empresa que labora actualmente.

Edad

menos de 20	☐	41-50	☐
20-30	☐	51-60	☐
31-40	☐	61-70	☐
		71 en adelante	☐

Grado académico profesional

Pendiente de examen público y privado	☐	Titulado no colegiado	☐
Pendiente de examen público	☐	Titulado colegiado	☐
		Otro, especifique	_____

¿En que tipo de industria trabaja actualmente?

Alimentos diversos	☐	Fabricación y refinado de azúcar	☐
Productos farmacéuticos	☐	Fabricación de cerveza	☐
Productos de tocador, limpieza, etc.	☐	Aguas gaseosa	☐
Plásticos	☐	Fabricación de prendas de vestir	☐
Cemento, cal y yeso	☐	Envases y cajas de papel y cartón	☐
Aceites y grasas vegetales	☐	Productos de hierro y acero	☐
		Otras,especifique	_____

¿Qué puesto ocupa en esa industria actualmente? _____

¿En cuáles de estas áreas a laborado durante su carrera profesional?
(MULTIRRESPUESTA: Marque tantas opciones como considere necesario)

Producción	☐	Ventas	☐
Consultoría	☐	Administración	☐
Mantenimiento	☐	Recursos Humanos	☐
Planificación	☐	Compras	☐
Control de calidad	☐	Docencia	☐
Formulación	☐	Otras,especifique	_____

En esas áreas de trabajo a tenido contacto directo con las Operaciones Unitarias

Si ☐ No ☐

1) ¿Con cuáles de estos equipos ha tenido contacto en el manejo de fluidos?

a.	Conducciones		Si		No	
		Tubos	Si		No	
		Tuberías	Si		No	
		Accesorios	Si		No	
		Otras, especifique				
b.	Bombas		Si		No	
		Centrífugas	Si		No	
		Propulsor y turbina	Si		No	
		Desplazamiento positivo	Si		No	
		Otras, especifique				
c.	Compresores		Si		No	
d.	Sopladores		Si		No	
e.	Ventiladores		Si		No	
f.	Eyectores		Si		No	
g.	Válvulas		Si		No	
		Compuerta	Si		No	
		Globo	Si		No	
		Mariposa	Si		No	
		Otras, especifique				
h.	Medidores de Caudal		Si		No	
		Venturi	Si		No	
		Orificio	Si		No	
		Vertederos	Si		No	
		Otros, especifique				
i.	Equipos de Fluidización y transporte neumático		Si		No	
j.	Filtros		Si		No	
		Prensa	Si		No	
		Rotatorios	Si		No	
		Centrífugos	Si		No	
		Otros, especifique				
k.	Sedimentadores		Si		No	
		Horizontales	Si		No	
		Verticales con manto de fango	Si		No	
		Decantadores de placas inclinadas	Si		No	
		Otros, especifique				
l.	Clasificadores hidráulicos		Si		No	
m.	Equipos de Flotación		Si		No	
n.	Centrífugas		Si		No	
		Empuje	Si		No	
		De tubos	Si		No	
		Filtración	Si		No	
		Otras, especifique				
o.	Agitadores y mezcladores de líquido		Si		No	

2) ¿Con cuáles de estos equipos ha tenido contacto en el manejo de transferencia de calor?

a. Aislantes térmicos		Si	☐	No ☐
	Minerales celulares o fibrosos	Si	☐	No ☐
	Orgánicos celulares o fibrosos	Si	☐	No ☐
	Plásticos orgánicos	Si	☐	No ☐
	Otras, especifique			
b. Intercambiadores de calor		Si	☐	No ☐
	Tubos concéntricos o doble tubo	Si	☐	No ☐
	Concha y tubos	Si	☐	No ☐
	De placas	Si	☐	No ☐
	Otros, especifique			
c. Hornos		Si	☐	No ☐
d. Calderas		Si	☐	No ☐
	Pirotubulares	Si	☐	No ☐
	Acuotubulares	Si	☐	No ☐
	Otras, especifique			
e. Evaporadores		Si	☐	No ☐
f. Condensadores		Si	☐	No ☐

3) ¿Con cuáles de estos equipos ha tenido contacto en el manejo de transferencia de materia?

a. Torres de destilación binaria (gas-líquido)	Si	☐	No ☐
b. Torres de destilación multicomponente (gas-líquido)	Si	☐	No ☐
c. Torres de absorción (gas-líquido)	Si	☐	No ☐
d. Torres de Extracción	Si	☐	No ☐
e. Torres de adsorción (líquido-sólido)	Si	☐	No ☐
f. Torres de lixiviación	Si	☐	No ☐
g. Intercambiadores iónicos	Si	☐	No ☐

Continuación

h. Torres de adsorción (gas-sólido)	Si ☐	No ☐
i. Equipos de diálisis	Si ☐	No ☐
j. Equipos de ósmosis inversa	Si ☐	No ☐
k. Equipos de ultrafiltración	Si ☐	No ☐

4) ¿Con cuáles de estos equipos ha tenido contacto en el manejo de transferencia simultanea de materia y energía?

a. Torre de humidificación de aire	Si ☐	No ☐
b. Torres de deshumidificación de aire	Si ☐	No ☐
c. Torres de enfriamiento de agua	Si ☐	No ☐
d. Cristalizadores	Si ☐	No ☐
e. Secadores	Si ☐	No ☐
De bandeja	Si ☐	No ☐
Rotatorios	Si ☐	No ☐
Pulverización	Si ☐	No ☐
Otros, especifique	_____	
f. Liofilizadores	Si ☐	No ☐

5) ¿Con cuáles de estos equipos ha tenido contacto en el manejo de materiales?

a. Trituradores y molinos	Si ☐	No ☐
Trituradores de rodillo	Si ☐	No ☐
Molinos de martillo	Si ☐	No ☐
Trituradoras de quijada	Si ☐	No ☐
Otras, especifique	_____	
b. Tamizadores	Si ☐	No ☐
Estacionarios	Si ☐	No ☐
Giratorios	Si ☐	No ☐
Vibratorios	Si ☐	No ☐
Otras, especifique	_____	

c. Mezcladores de sólidos y pastas	Si	☐	No	☐
Continuación				
d. Almacenaje de materiales	Si	☐	No	☐
Sólido	Si	☐	No	☐
Líquido	Si	☐	No	☐
Gas	Si	☐	No	☐
Otros, especifique	_____			
e. Transporte de materiales	Si	☐	No	☐
Sólido	Si	☐	No	☐
Líquido	Si	☐	No	☐
Gas	Si	☐	No	☐
Otros, especifique	_____			

6) ¿Con cuáles de estos reactores ha tenido contacto en el manejo de procesos químicos?

a. Tanque agitado	Si	☐	No	☐
b. Tubulares calentados a fuego directo	Si	☐	No	☐
c. Tubulares de carcasa y tubos	Si	☐	No	☐
d. Tubulares de lecho (fijo, móvil, fluidizado)	Si	☐	No	☐
e. De hornos rotatorios	Si	☐	No	☐
f. Biológicos	Si	☐	No	☐
g. Electroquímicos	Si	☐	No	☐
h. Otros, especifique	_____			

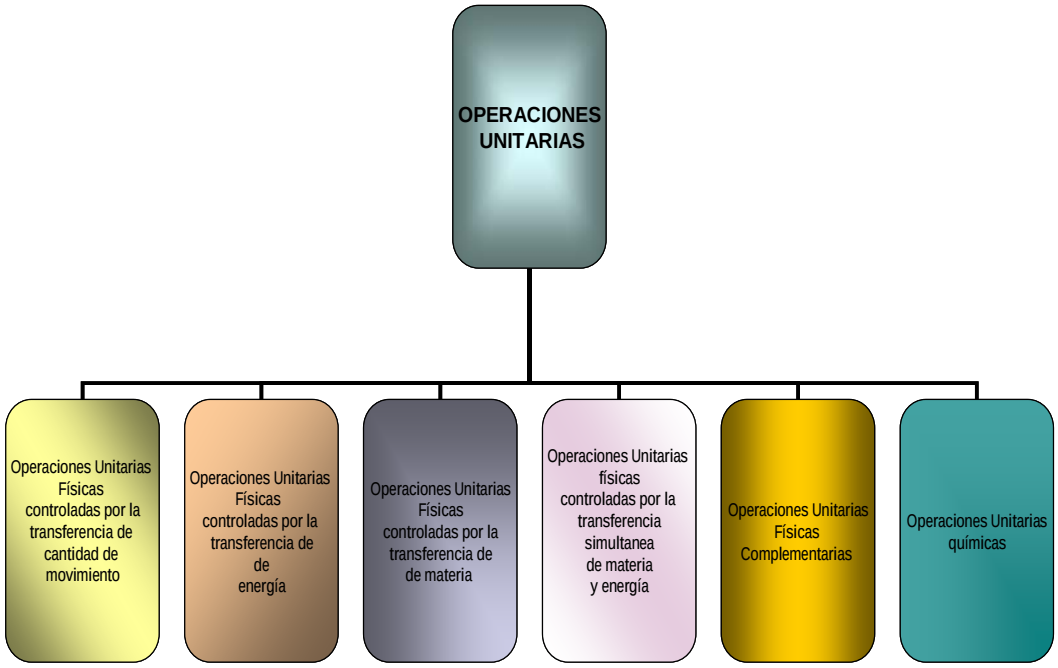
Si ha tenido contacto con otro equipo que no aparezca en esta clasificación y considere importante, escribirlo en el espacio siguiente

_____

Gracias, por su colaboración

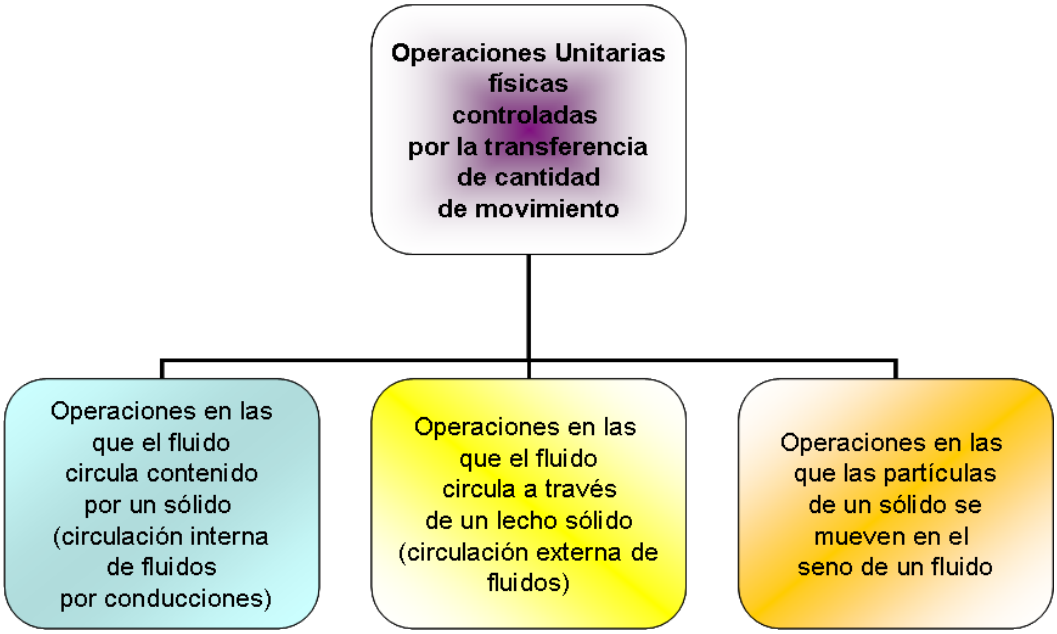
ANEXOS

Diagrama de las Operaciones Unitarias



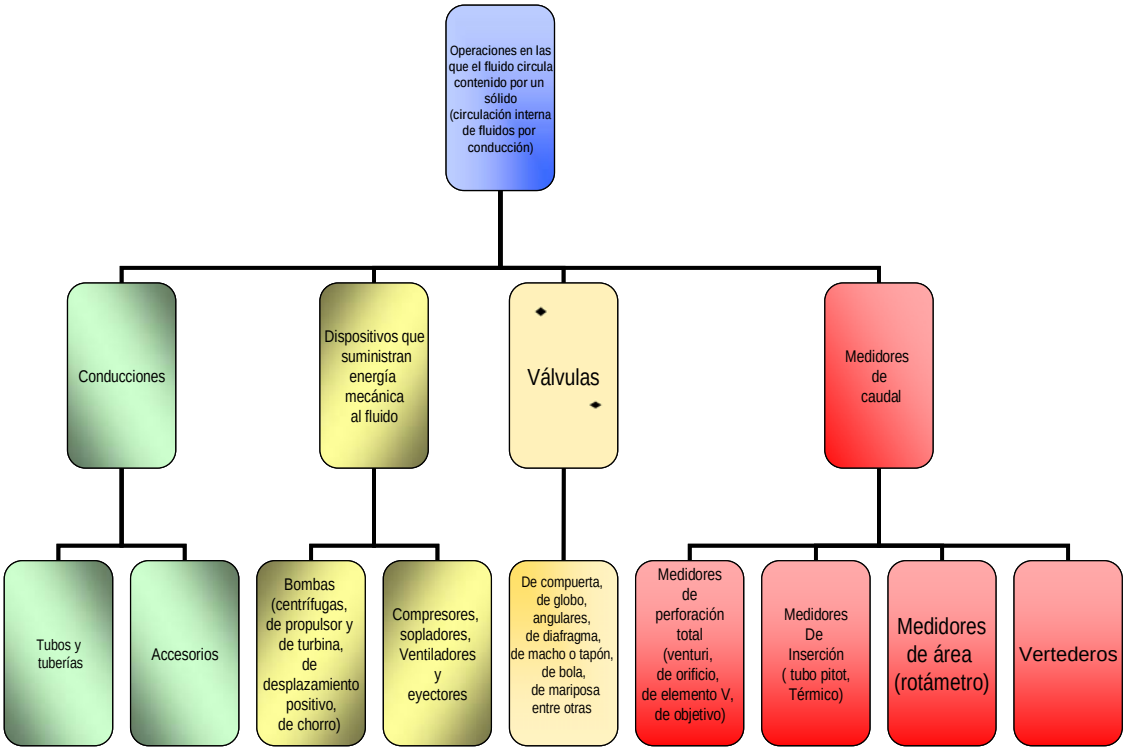
Fuente: ALVAREZ M, Williams G. **Folleto de las Operaciones Unitarias Físicas Controladas por la Transferencia de Materia y Transferencia simultánea de Materia y Energía.** Guatemala: USAC, 2005.

Diagrama de las Operaciones Unitarias físicas controladas por la transferencia de cantidad de movimiento



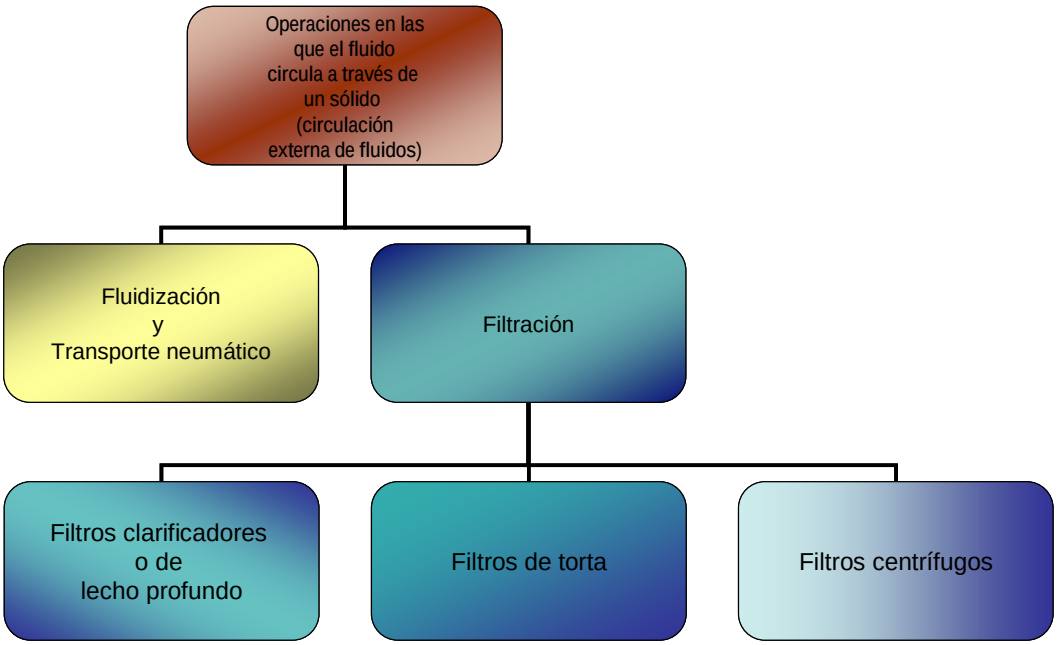
Fuente: ALVAREZ M, Williams G. **Folleto de las Operaciones Unitarias Físicas Controladas por la Transferencia de Materia y Transferencia simultánea de Materia y Energía.** Guatemala: USAC, 2005.

Diagrama de las Operaciones en las que el fluido circula contenido por un sólido (circulación interna de fluidos por conducciones)



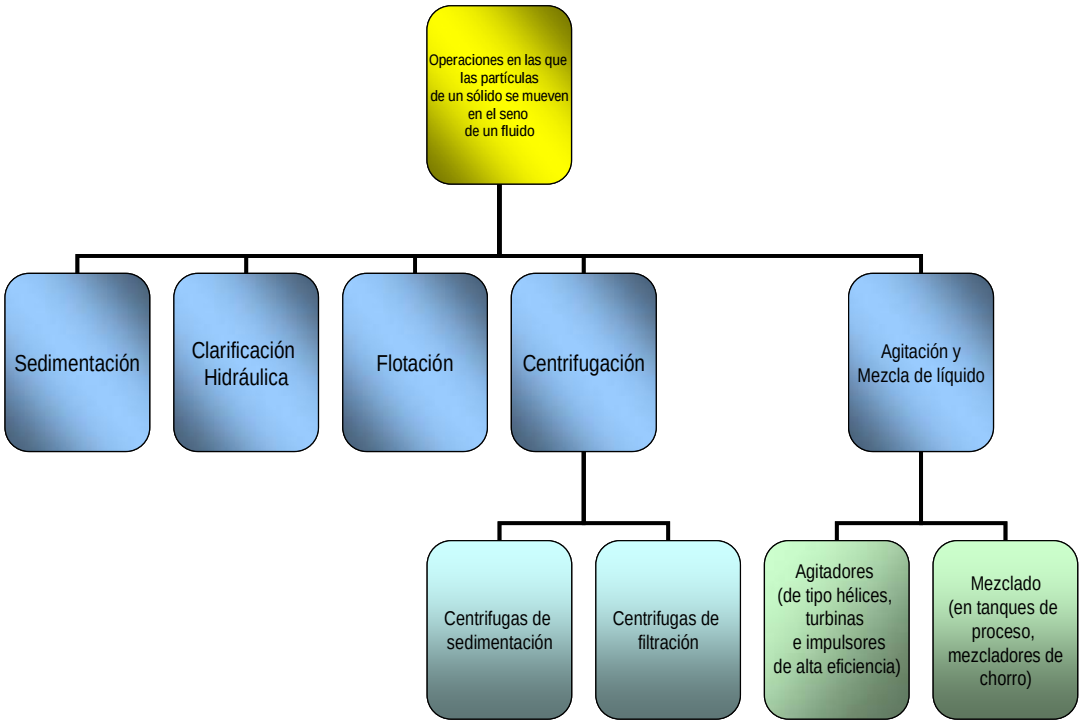
Fuente: ALVAREZ M, Williams G. **Folleto de las Operaciones Unitarias Físicas Controladas por la Transferencia de Materia y Transferencia simultánea de Materia y Energía.** Guatemala: USAC, 2005.

Diagrama de las Operaciones en las que el fluido circula a través de un sólido (circulación externa de fluidos)



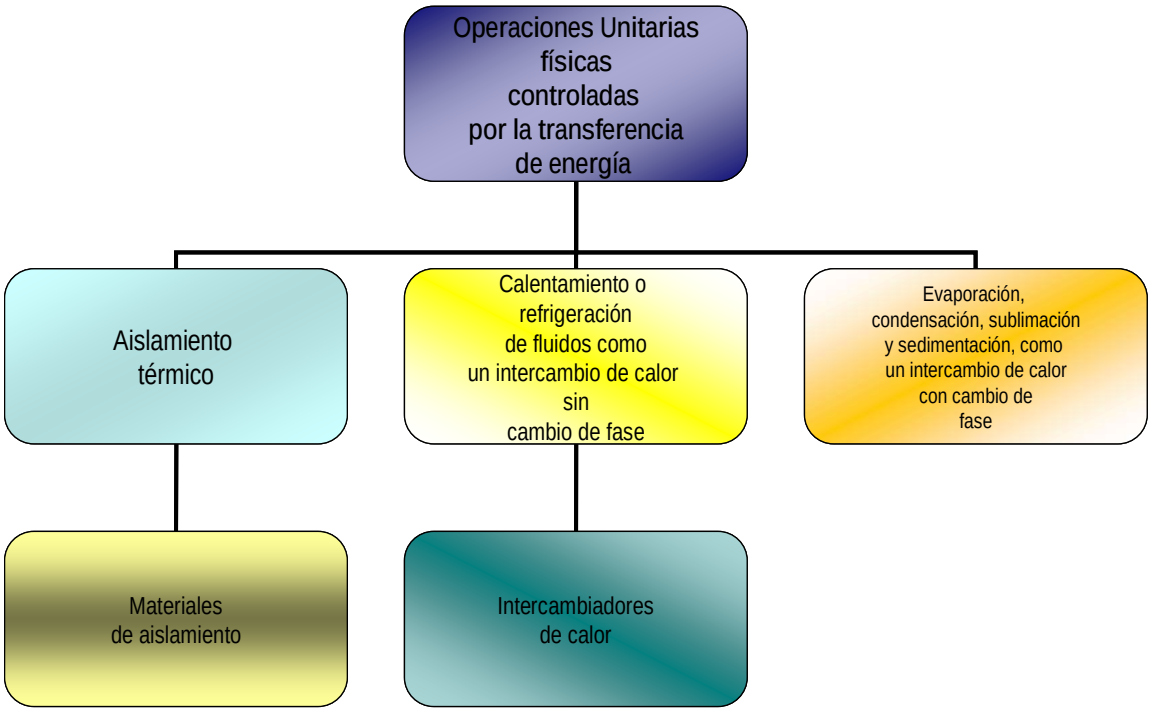
Fuente: ALVAREZ M, Williams G. **Folleto de las Operaciones Unitarias Físicas Controladas por la Transferencia de Materia y Transferencia simultánea de Materia y Energía.** Guatemala: USAC, 2005.

Diagrama de las Operaciones en las que las partículas de un sólido se mueven en el seno de un fluido



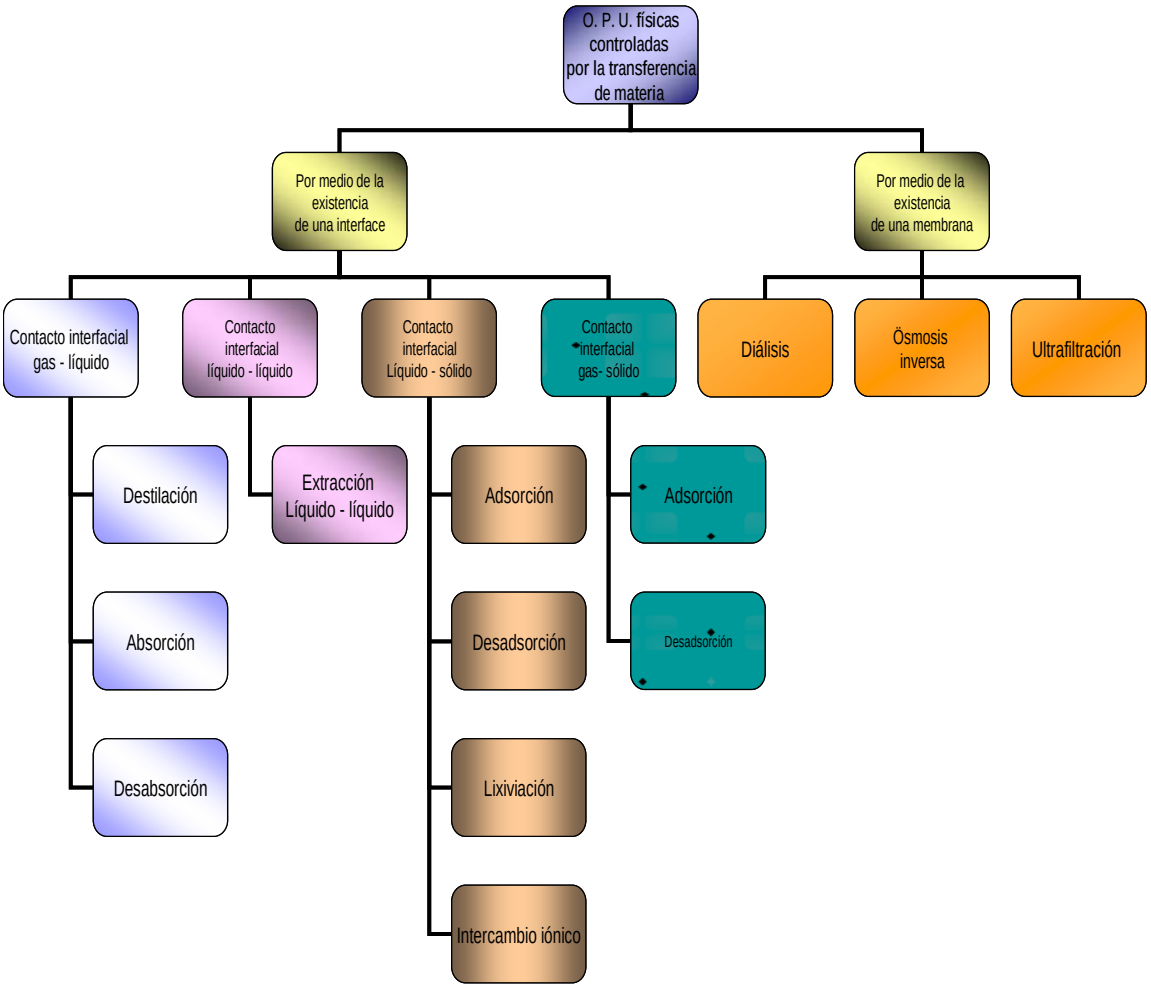
Fuente: ALVAREZ M, Williams G. **Folleto de las Operaciones Unitarias Físicas Controladas por la Transferencia de Materia y Transferencia simultánea de Materia y Energía.** Guatemala: USAC, 2005.

Diagrama de las Operaciones Unitarias físicas controladas por la transferencia de energía



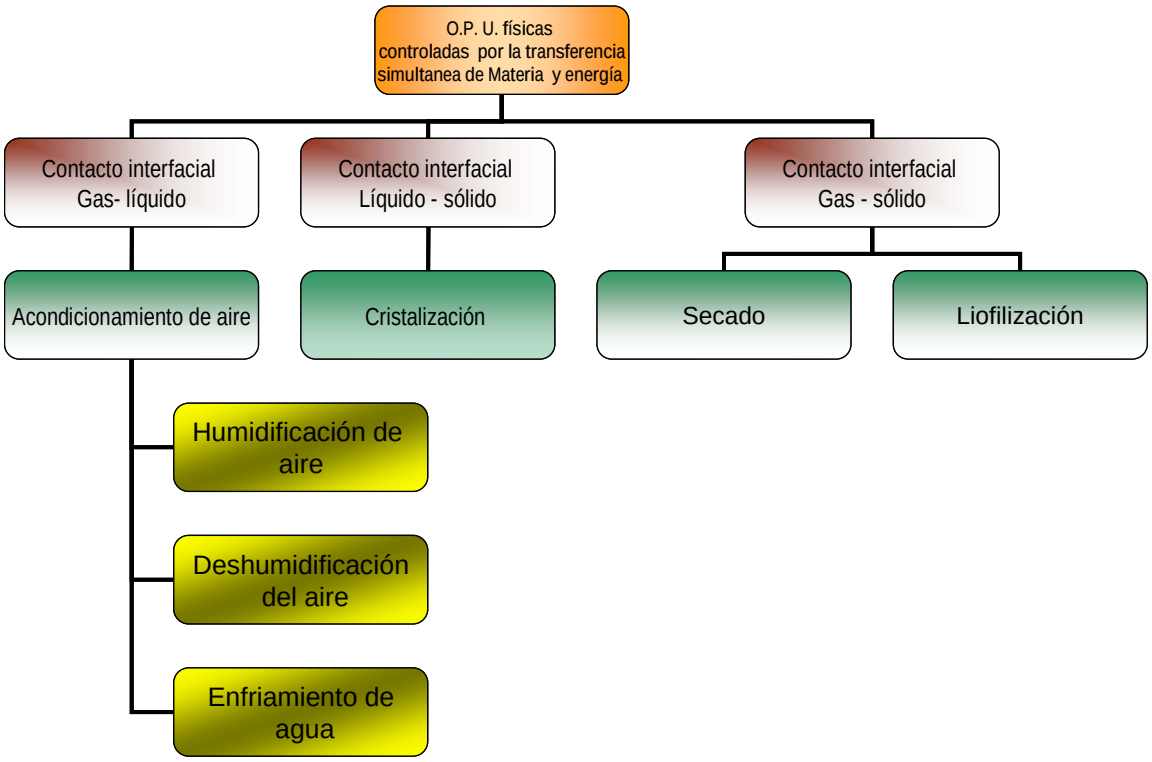
Fuente: ALVAREZ M, Williams G. **Folleto de las Operaciones Unitarias Físicas Controladas por la Transferencia de Materia y Transferencia simultánea de Materia y Energía.** Guatemala: USAC, 2005.

Diagrama de las Operaciones Unitarias físicas controladas por la transferencia de materia



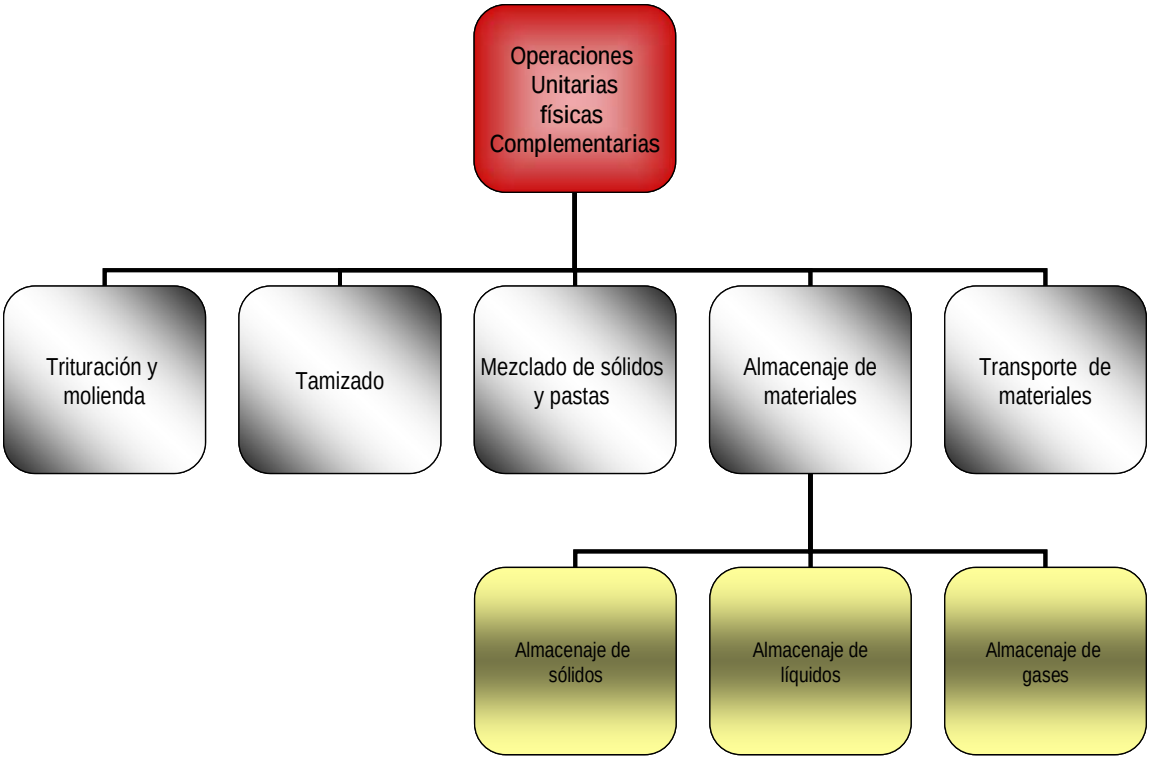
Fuente: ALVAREZ M, Williams G. **Folleto de las Operaciones Unitarias Físicas Controladas por la Transferencia de Materia y Transferencia simultánea de Materia y Energía.** Guatemala: USAC, 2005.

Diagrama de las Operaciones Unitarias físicas controladas por la transferencia simultanea de materia y energía



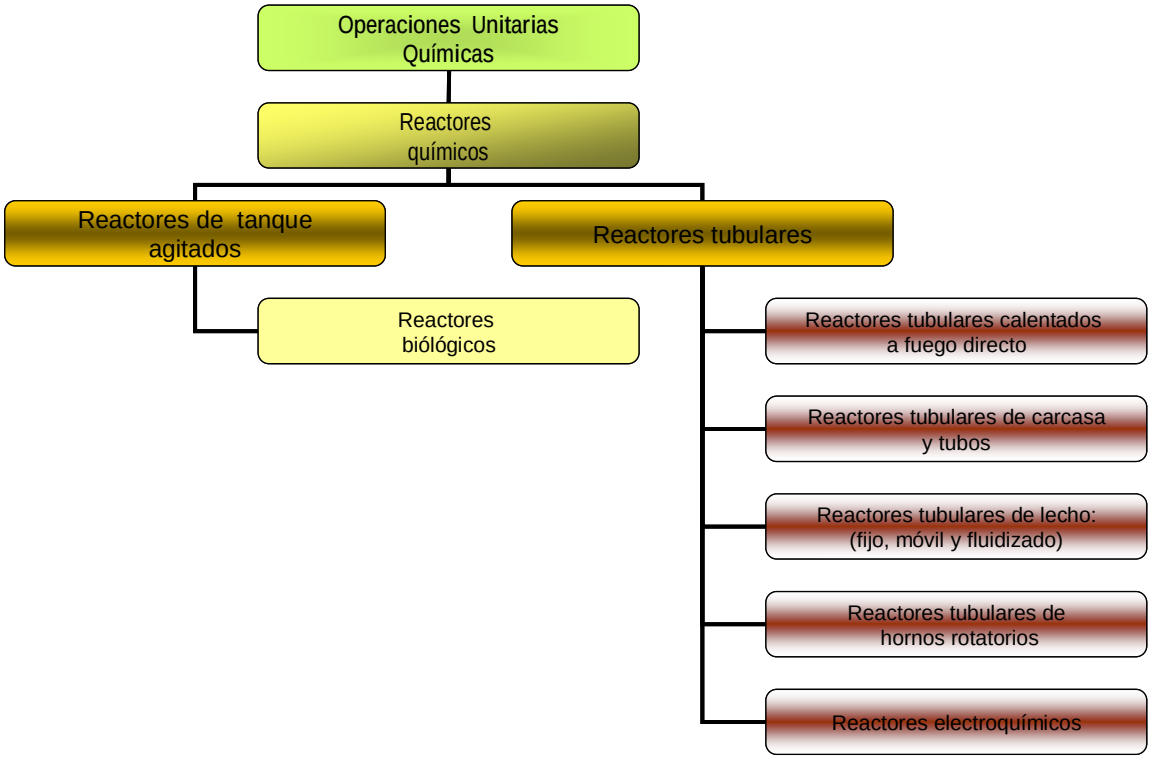
Fuente: ALVAREZ M, Williams G. **Folleto de las Operaciones Unitarias Físicas Controladas por la Transferencia de Materia y Transferencia simultánea de Materia y Energía.** Guatemala: USAC, 2005.

Diagrama de las Operaciones Unitarias físicas complementarias



Fuente: Ing. Q. DE LEÓN de Paz, Otto Raúl. **Manejo de Sólidos en Ingeniería Química**. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 2001.

Diagrama de las Operaciones Unitaria Químicas



Fuente: FOGLER, H. Scott. **Elementos de ingeniería de las reacciones químicas.** 3ª ed. México: Editorial Pearson Educación, S.A. de C.V., 2001.