



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Propuesta de unidades  
temáticas de Procesos  
Industriales**

**MATERIAL DIDÁCTICO**

Que para obtener el título de

**Ingeniera Industrial**

**P R E S E N T A**

Tania Bustamante Granados

**ASESORA DE MATERIAL DIDÁCTICO**

Dra. Flor Hernández Padilla



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

# Agradecimientos

A Cedric, mi amado hijo, quien me brindó toda su paciencia, apoyo y comprensión para completar con éxito esta etapa de mi vida académica.

A mis padres y hermanos, quienes me brindaron todo el apoyo y los medios necesarios que me impulsaron a seguir adelante.

A la Dra. Flor Hernández Padilla, mi profesora de Procesos Industriales, jefa de Prácticas Profesionales y asesora en este trabajo escrito, por permitirme ser partícipe de este proyecto y ser una guía constante en mi formación como ingeniera.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y mis profesores de la Facultad de Ingeniería, de quienes obtuve todas las bases y conocimientos que contribuyeron a mi desarrollo profesional.

Agradezco al Programa de Apoyo a Proyectos para Innovar y Mejorar la Educación (PE102722), por la beca y apoyo recibidos.

## Contenido

|   |     |
|---|-----|
| Agradecimientos .....   | 2   |
| Resumen capitular .....   | 5   |
| I. Introducción.....  | 6   |
| II. Unidades temáticas propuestas.....                                | 9   |
| 1. Introducción a la industria de procesos.....                       | 9   |
| 1.1 Introducción a las operaciones y procesos unitarios .....         | 12  |
| 1.2 Proceso industrial: componentes generales .....                   | 14  |
| 2. Procesos y operaciones unitarias de la industria de procesos ..... | 24  |
| 2.1 Filtración .....  | 24  |
| 2.2 Transporte.....   | 38  |
| 2.2.1 Transporte de fluidos .....                                     | 38  |
| 2.2.2 Transporte hidráulico en medios líquidos.....                   | 40  |
| 2.2.3 Transporte de sólidos fluidificados (neumático).....            | 42  |
| 2.2.4 Transporte de productos y materiales.....                       | 43  |
| 2.3 Mezclado y agitación.....   | 46  |
| 2.4 Adsorción .....   | 54  |
| 2.5 Centrifugación.....   | 62  |
| 2.6 Evaporación, condensación y transferencia de calor.....           | 67  |
| 2.7 Secado.....   | 76  |
| 2.8 Liofilización.....  | 82  |
| 2.9 Transesterificación .....   | 87  |
| 2.10 Aglomeración .....   | 92  |
| 2.11 Ósmosis.....   | 98  |
| 2.12 Sedimentación y floculación.....                                 | 106 |
| 2.13 Extracción líquido-líquido.....                                  | 110 |
| 2.14 Destilación .....  | 113 |
| 2.15 Transferencia de calor e intercambiadores .....                  | 121 |
| 2.16 Reducción de tamaño y tamizado .....                             | 129 |
| 2.16.1 Tamizado.....  | 135 |
| 2.17 Fermentación .....   | 139 |
| 2.18 Lixiviación.....   | 146 |
| 2.19 Absorción de gases .....   | 152 |
| 2.19.1 Columnas de separación.....                                    | 154 |
| 2.20 Oxidación .....  | 162 |
| 2.21 Hidrogenación.....   | 167 |
| 2.22 Deshidrogenación.....  | 171 |

|   |     |
|---|-----|
| 2.23 Polimerización.....  | 173 |
| 2.24 Hidrólisis.....  | 179 |
| 3. Diferentes tipos de procesos, diagramas y equipos más comunes en la industria de procesos.....                                     | 183 |
| 3.1 Clasificación de los diferentes tipos de diagramas.....   | 183 |
| 3.2 Simbología para diagramas de proceso.....   | 187 |
| Conclusiones.....   | 190 |
| Anexos.....   | 191 |
| Anexo A. Panorama nacional e internacional de la asignatura de procesos industriales en la licenciatura de Ingeniería industrial..... | 191 |
| Anexo B. Otros símbolos de proceso.....   | 193 |
| Referencias.....  | 205 |
| Material audiovisual.....   | 226 |

# Resumen capitular

El presente material didáctico, dentro de las unidades temáticas propuestas, comprende tres capítulos principales:

## *Capítulo 1: Introducción a la industria de procesos*

En este capítulo se describe brevemente la importancia del sector secundario en la economía del país y se mencionan los componentes generales de un proceso industrial, la diferencia entre operación y proceso unitario, así como algunos ejemplos de materiales o sustancias que conforman las entradas, salidas, productos, subproductos, etc. de un proceso.

## *Capítulo 2: Procesos y operaciones unitarias de la industria de procesos*

Se describen a detalle los principales procesos y operaciones unitarios en la industria de proceso: su definición, principios de funcionamiento de los equipos utilizados y ejemplos de industrias en donde se llevan a cabo.

## *Capítulo 3: Diferentes tipos de procesos y diagramas más comunes en la industria de procesos*

Se describen los principales diagramas utilizados en la industria de proceso y el objetivo de cada uno, así como los símbolos utilizados para representar maquinaria y equipos utilizados.

# I. Introducción

El programa de la asignatura Procesos Industriales aborda la relación que existe entre la ingeniería industrial con los diferentes procesos de transformación; así mismo, analiza dichos procesos usados en industrias representativas, desarrollando en los estudiantes la habilidad de interpretar los diferentes tipos de diagramas de proceso.

A partir de lo anterior, podemos inferir que el contenido del programa de estudio permite que el estudiante esté en condiciones de reconocer dentro de una empresa de transformación industrial, las etapas de transformación física y química que integran un proceso expresándose adecuadamente con la terminología de la ingeniería química, así mismo puede interpretar simbología propia de los diagramas de procesos industriales de acuerdo a estándares internacionales (Hernández, 2022).

La asignatura de **Procesos Industriales**, con **clave 1918**, se encuentra en el octavo semestre del Plan de Estudios 2016 de la carrera de Ingeniería Industrial aprobado por el Consejo Técnico el 20 de Junio de 2014 y por el Consejo Académico del Área de las Ciencias Físico-Matemáticas y de las Ingenierías el 27 de Mayo de 2015.

|   |   |  |   |  |  |  |
|---|---|--|---|--|--|--|
| 7 | ELECTRÓNICA BÁSICA (I)<br>33<br>14.0 p 2.0 T=0.0    | INGENIERÍA ECONÓMICA<br>8<br>14.0 p 0.0 T=0.0  | INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES I<br>8<br>14.0 p 0.0 T=0.0     | PLANIFICACIÓN Y CONTROL DE LA PRODUCCIÓN (I)<br>10<br>14.0 p 2.0 T=0.0 | RELACIONES LABORALES Y ORGANIZACIONALES<br>8<br>14.0 p 0.0 T=0.0 | OPTATIVA<br>4<br>13.0 p 2.0 T=0.0          |
| 8 | INSTALACIONES INDUSTRIALES<br>8<br>14.0 p 0.0 T=0.0 | INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES II<br>8<br>14.0 p 0.0 T=0.0                             | DESGÑO DE LA CADENA DE SUMINISTROS<br>8<br>14.0 p 0.0 T=0.0 | EVALUACIÓN DE PROYECTOS DE INVERSIÓN<br>8<br>14.0 p 0.0 T=0.0          | <b>PROCESOS INDUSTRIALES</b><br>8<br>14.0 p 0.0 T=0.0            | ÉTICA PROFESIONAL<br>6<br>12.0 p 2.0 T=0.0 |
| 9 | CALIDAD<br>8<br>14.0 p 0.0 T=0.0                    | PRÁCTICAS PROFESIONALES PARA INGENIERÍA INDUSTRIAL (P +)<br>12<br>10.0 p 12.0 T=12.0 | AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL (I)<br>8<br>13.0 p 4.0 T=6.0      | SISTEMAS DE MEJORAMIENTO AMBIENTAL<br>8<br>14.0 p 0.0 T=0.0            | OPTATIVA<br>6<br>13.0 p 2.0 T=0.0                                |  |

Figura 1. Ubicación de la asignatura de Procesos Industriales en el Plan de Estudios 2016 de Ingeniería Industrial.

Dicha asignatura pertenece al área de Ingeniería Aplicada y es de carácter obligatorio. Cuenta con un total de 8 créditos y se imparte 4 horas teóricas a la semana durante 16 semanas, con un total de 64 horas al semestre. En el Anexo A se encuentra un panorama internacional de la asignatura de procesos industriales de la licenciatura de Ingeniería industrial.

## Justificación del material didáctico

El temario de la asignatura de Procesos Industriales abarca tres unidades temáticas principales, las cuales se mencionan en la siguiente tabla, así como sus objetivos específicos y las horas destinadas a cada uno:

*Tabla 1. Contenido temático y objetivos específicos de la asignatura de Procesos Industriales. (Facultad de Ingeniería, UNAM, 2015).*

| <b>Contenido temático y objetivos específicos de la asignatura de Procesos Industriales</b>  |   |                       |
|--|---|-----------------------|
| <b>Unidades temáticas</b>  | <b>Objetivos específicos</b>  | <b>Horas/semestre</b> |
| 1. Introducción a la industria de procesos   | El alumno analizará la relación de la ingeniería industrial con la industria de procesos  | 4.0                   |
| 2. Diferentes tipos de procesos, diagramas y equipos más comunes en la industria de procesos | El alumno distinguirá los diferentes tipos de diagramas y equipos empleados dentro de las industrias de procesos  | 10.00                 |
| 3. Industrias y procesos más representativos   | El alumno analizará el proceso de fabricación de las industrias más representativas, así como sus diagramas de producción, equipos necesarios y materiales más adecuados. | 50.00                 |
| <b>Total</b>   |   | <b>64.00</b>          |

Dado lo anterior, se considera adecuado colocar antes de la unidad 3, una unidad llamada: Procesos y operaciones unitarias de la industria de procesos, debido a la importancia de la comprensión de cada una de las etapas de los procesos industriales para posteriormente construir el conocimiento de los diagramas de proceso y sus aplicaciones en industrias representativas.

Cabe destacar que la estructura de la bibliografía dedicada a los procesos industriales siempre tiene en sus primeros temas las explicaciones de estas etapas, llamadas: operaciones y procesos industriales.

En este sentido, (McCabe, 2007) y (Prievé, 2018) enuncian en sus apartados introductorios que, para estudiar los procesos industriales se recurre a su fragmentación en etapas indivisibles llamadas operaciones y procesos unitarios, los cuales tienen técnicas comunes y son basados en los mismos principios científicos para su correcto análisis.

También, (Geankoplis, 1993) menciona que, en el procesamiento industrial, existen muchas similitudes en la forma en que los materiales se procesan en productos, entonces podemos tomar estos procesos químicos, físicos o biológicos aparentemente diferentes y dividirlos en una serie de pasos separados y distintos llamados operaciones y procesos unitarios. Estas operaciones unitarias son comunes a los diversos tipos de industrias de procesos.

## **Objetivo general**

El objetivo del presente trabajo es enriquecer el programa de la asignatura de Procesos Industriales e incluir la unidad temática que abarquen las principales operaciones y procesos unitarios que se llevan a cabo en las diferentes industrias del país. De esta forma, se buscará mejorar la comprensión de los temas de la unidad 3 de dicho programa (Industrias y procesos más representativos), pues el alumno no solo analizará los procesos de fabricación de forma general, sino que identificará las operaciones y procesos unitarios involucrados en cada una de sus etapas, así como el principio de funcionamiento de los equipos y maquinaria utilizados, elementos que son de vital importancia en la formación de un ingeniero industrial.

## **Objetivos específicos**

- Desarrollar material y propuestas didácticas para los temas de la asignatura de Procesos Industriales.
- Analizar los retos actuales que enfrenta la industria para generar propuestas de intervención educativa que permita a los estudiantes formular soluciones.
- Divulgar el material didáctico por medio de un taller para docentes.

A continuación, se desarrollan las unidades temáticas propuestas al programa de estudio de la asignatura Procesos Industriales.

## II. Unidades temáticas propuestas

### 1. Introducción a la industria de procesos

El sector secundario es de gran importancia México para la generación de nuevos empleos y creación de negocios, así como en el mejoramiento de la calidad de vida de la población. Las actividades económicas del sector secundario implican la transformación de materia prima en productos terminados e involucran dentro de sus actividades diversos procesos industriales.

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) publica la información de este sector de la economía de acuerdo con el tipo de actividad y el número de unidades económicas que hay en el país, la **Tabla 2** muestra aquellas actividades que involucran procesos industriales. Dichas actividades serán explicadas en la asignatura a través del conocimiento de las operaciones y procesos unitarios que son las unidades mínimas que conforman un proceso industrial.

*Tabla 2. Actividades del sector secundario que involucran procesos industriales y sus unidades económicas. Adaptado de: (INEGI, 2020).*

| Actividad   | Unidades económicas |
|---|---------------------|
| 1.Acabado de productos textiles   | 23677               |
| 2.Beneficio del arroz   | 23                  |
| 3.Beneficio del café  | 189                 |
| 4.Beneficio del tabaco  | 9                   |
| 5.Congelación de frutas y verduras  | 138                 |
| 3.Conservación de frutas y verduras por procesos distintos a la congelación y deshidratación  | 792                 |
| 4.Conservación de guisos y otros alimentos preparados por procesos distintos a la congelación | 1319                |
| 5.Energía Eléctrica   | 1090                |
| 6.Corte y empacado de carne de ganado, aves y otros animales comestibles                      | 255                 |
| 7.Curtido y acabado de cuero de piel  | 1000                |
| 8.Deshidratación de frutas y verduras   | 222                 |
| 9.Elaboración de aceites y grasas vegetales comestibles                                       | 135                 |
| 10.Elaboración de alimentos frescos para consumo inmediato                                    | 549                 |
| 11.Elaboración de alimentos para animales   | 708                 |
| 12.Elaboración de azúcar de caña  | 136                 |
| 13.Elaboración de bebidas alcohólicas a base de uva   | 84                  |
| 14.Elaboración de bebidas destiladas de agave   | 807                 |
| 15.Elaboración de botanas   | 5 250               |
| 16.Elaboración de café instantáneo  | 56                  |
| 17.Elaboración de café tostado y molido   | 711                 |
| 18.Elaboración de cereales para el desayuno   | 79                  |
| 19.Elaboración de cerveza   | 139                 |
| 20.Elaboración de chocolate y productos de chocolate  | 568                 |
| 21.Elaboración de cigarrillos   | 14                  |
| 22.Elaboración de condimentos y aderezos  | 237                 |
| 23.Elaboración de derivados y fermentos lácteos   | 4 379               |
| 24.Elaboración de dulces, chicles y productos de confitería que no sean de chocolate          | 3 076               |
| 25.Elaboración de galletas y pastas para sopa   | 793                 |

|  |         |
|--|---------|
| 26.Elaboración de harina de maíz   | 183     |
| 27. Elaboración de harina de otros productos agrícolas   | 885     |
| 28. Elaboración de harina de trigo   | 186     |
| 29. Elaboración de helados y paletas   | 12 004  |
| 30. Elaboración de hielo   | 881     |
| 31. Elaboración de leche en polvo, condensada y evaporada  | 36      |
| 32. Elaboración de leche líquida   | 143     |
| 33. Elaboración de levadura  | 12      |
| 34. Elaboración de malta   | 6       |
| 35. Elaboración de manteca y otras grasas animales comestibles                                     | 237     |
| 36. Elaboración de otras bebidas destiladas  | 173     |
| 37. Elaboración de otros azúcares  | 84      |
| 38. Elaboración de pulque  | 173     |
| 39. Elaboración de puros y otros productos de tabaco   | 34      |
| 40. Elaboración de refrescos y otras bebidas no alcohólicas  | 341     |
| 41. Elaboración de ron y otras bebidas destiladas de caña  | 55      |
| 42. Elaboración de sidra y otras bebidas fermentadas   | 55      |
| 43. Elaboración de tortillas de harina de trigo de forma tradicional                               | 9230    |
| 44. Elaboración de tortillas de maíz y molienda de nixtamal  | 109 656 |
| 45. Fabricación de aceites y grasas lubricantes  | 127     |
| 46. Fabricación de acumuladores y pilas  | 39      |
| 47. Fabricación de adhesivos   | 153     |
| 48. Fabricación de artículos y accesorios para escritura, pintura, dibujo y actividades de oficina | 331     |
| 49. Fabricación de bolsas de papel y productos celulósicos recubiertos y tratados                  | 258     |
| 50. Fabricación de cal   | 52      |
| 51. Fabricación de cartón y cartoncillo a partir de pulpa  | 45      |
| 52. Fabricación de cemento y productos a base de cemento en plantas integradas                     | 142     |
| 53. Fabricación de cerillos  | 13      |
| 54. Fabricación de concreto  | 910     |
| 55. Fabricación de cosméticos, perfumes y otras preparaciones de tocador                           | 483     |
| 56. Fabricación de envases de cartón   | 1 335   |
| 57. Fabricación de explosivos  | 23      |
| 58. Fabricación de fertilizantes   | 227     |
| 59. Fabricación de fibra de vidrio   | 86      |
| 60. Fabricación de fibras químicas   | 24      |
| 61. Fabricación de gases industriales  | 57      |
| 62. Fabricación de hilos para coser y bordar   | 233     |
| 63. Fabricación de hules sintéticos  | 39      |
| 64. Fabricación de jabones, limpiadores y dentífricos  | 1 269   |
| 65. Fabricación de ladrillos no refractarios   | 9 995   |
| 66. Fabricación de llantas y cámaras   | 38      |
| 67. Fabricación de materias primas para la industria farmacéutica                                  | 24      |
| 68. Fabricación de otros productos de cartón y papel   | 4 231   |
| 69. Fabricación de otros productos de cemento y concreto   | 1 040   |

|  |        |
|--|--------|
| 70. Fabricación de otros productos de cuero, piel y materiales sucedáneos        | 1 209  |
| 71. Fabricación de otros productos de plástico con reforzamiento                 | 214    |
| 72. Fabricación de otros productos químicos                                      | 711    |
| 73. Fabricación de otros productos químicos básicos inorgánicos                  | 196    |
| Fabricación de otros productos químicos básicos orgánicos                        | 188    |
| 74. Fabricación de pañales desechables y otros productos sanitarios              | 44     |
| 75. Fabricación de papel a partir de pulpa                                       | 243    |
| 76. Fabricación de papel en plantas integradas                                   | 13     |
| 77. Fabricación de películas, placas y papel fotosensible para fotografía        | 12     |
| 78. Fabricación de pesticidas y otros agroquímicos, excepto fertilizantes        | 123    |
| 89. Fabricación de petroquímicos básicos del gas natural y del petróleo refinado | 14     |
| 90. Fabricación de pigmentos y colorantes sintéticos                             | 84     |
| 91. Fabricación de pinturas y recubrimientos                                     | 608    |
| 92. Fabricación de preparaciones farmacéuticas                                   | 838    |
| 93. Fabricación de productos abrasivos   | 45     |
| 94. Fabricación de productos de asfalto  | 121    |
| 95. Fabricación de productos textiles reciclados                                 | 150    |
| 96. Fabricación de pulpa   | 16     |
| 97. Fabricación de resinas de plásticos reciclados                               | 352    |
| 98. Fabricación de resinas sintéticas  | 253    |
| 99. Fabricación de telas anchas de tejido de trama                               | 813    |
| 100. Fabricación de telas angostas de tejido de trama y pasamanería              | 529    |
| 101. Fabricación de telas de tejido de punto                                     | 385    |
| 102. Fabricación de telas no tejidas (comprimidas)                               | 47     |
| 103. Fabricación de telas recubiertas  | 276    |
| 104. Fabricación de tintas para impresión  | 56     |
| 105. Fabricación de velas y veladoras  | 542    |
| 106. Fabricación de vidrio   | 125    |
| 107. Fabricación de yeso y productos de yeso                                     | 2 034  |
| 108. Fundición y refinación de cobre   | 10     |
| 109. Fundición y refinación de metales preciosos                                 | 13     |
| 110. Fundición y refinación de otros materiales no ferrosos                      | 36     |
| 111. Matanza de ganado, aves y otros animales comestibles                        | 2 054  |
| 112. Preparación e hilado de fibras blandas naturales                            | 142    |
| 113. Preparación e hilado de fibras duras naturales                              | 16 026 |
| 114. Preparación y envasado de pescados y mariscos                               | 223    |
| 115. Preparación y envasado de té  | 20     |
| 116. Purificación y embotellado de agua  | 23 862 |
| 117. Refinación de petróleo  | 7      |
| 118. Revitalización de llantas   | 74     |
| 119. Tratamiento de madera y fabricación de postes y durmientes                  | 30     |

## 1.1 Introducción a las operaciones y procesos unitarios

Un **proceso industrial** es el conjunto de operaciones diseñadas para la obtención, transformación, o transporte de los recursos naturales de forma tal que estos se conviertan en materiales, herramientas y sustancias capaces de satisfacer las necesidades de los seres humanos y a su vez, mejorar su calidad de vida (Rase, 2000).

Los objetivos de un proceso industrial son muy variados, pues además de la elaboración de nuevos productos, en muchos casos se busca la reutilización de productos de desecho o subproductos, mejorar el desempeño de un material natural mediante métodos químicos o biotecnológicos e incluso convertir materia en energía (Rase, 2000).

En este sentido, la **ingeniería química** es la rama de la ingeniería encargada del desarrollo y aplicación de procesos de fabricación en los que están involucrados cambios físicos y químicos (Universidad de Almería, 2009). Las **operaciones y procesos unitarios** son las unidades básicas indivisibles cuya integración constituye las etapas fundamentales de dicho proceso, el cual transformará la materia en productos o la energía en un ambiente controlado (McCabe, 2007). Las **operaciones unitarias** son etapas que modifican las condiciones de la materia en cuanto al nivel de energía que posee, sus condiciones de movimiento o su composición. Estas etapas se llevan a cabo por **medios físicos** (Silla, 2003). Los **procesos unitarios** son etapas de **transformación química** que son inducidas en la materia prima y van acopladas generalmente a equipos llamados reactores en condiciones controladas (Silla, 2003).

A continuación, se muestra la clasificación de las operaciones básicas de proceso en la industria en nueve grupos, incluyendo algunos ejemplos (Silla, 2003):

### 1. Separación

- a) Separación de fases
  - I. Gas-sólido.
  - II. Líquido-sólido.
  - III. Gas-líquido.
  - IV. Líquido-líquido.
- b) Separación de componentes.

### 2. Mezclado

- a) Mezclado de fases
  - I. Gas-líquido.
  - II. Gas-sólido.
  - III. Líquido-líquido.
  - IV. Líquido-sólido.
  - V. Sólido-sólido.
- b) Mezclado de componentes.

### 3. Transporte de material

- a) Transporte de fluidos
- b) Transporte de sólidos fluidificados
- c) Transporte de productos y materiales

### 4. Transferencia de energía

- a) Conversión de energía.
- b) Intercambio de calor:

- I. Por convección.
- II. Por conducción.
- III. Por radiación.

#### **5.Almacenamiento**

- a) De líquidos.
- b) De sólidos.
- c) De gases.

#### **6.Reducción de tamaño**

#### **7.Aglomeración**

#### **8.Tamizado**

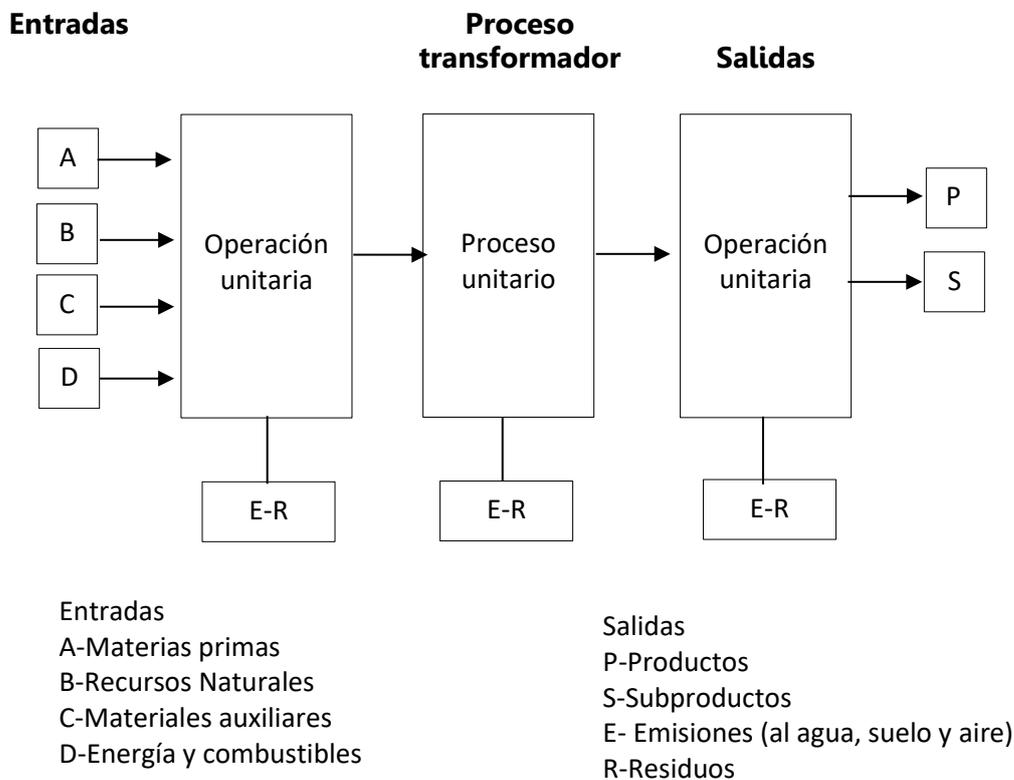
#### **9.Conversión**

- a) Fermentación.
- b) Hidrólisis.
- c) Oxidación.
- d) Polimerización.
- e) Hidrogenación.
- f) Deshidrogenación.
- g) Transesterificación.
- h) Termoquímica.
- i) Bioquímica.
- j) Electroquímica.
- k) Fotoquímica.
- l) Plasma.
- m) Sonoquímica.

De acuerdo con la clasificación anterior, las operaciones de **separación** ocurren por transferencia de masa, a través de fuerzas que actúan sobre las fases involucradas, generalmente fuerzas gravitacionales, mientras que el **mezclado** es la operación contraria a la separación (Silla, 2003). El **transporte de material** se refiere a los distintos métodos de traslado de sólidos y fluidos dentro de un proceso industrial. Las operaciones de **transferencia de energía** implican un cambio en el nivel de energía que posee la materia (Marcilla, 1998). El **almacenamiento** se refiere a los equipos usados para reunir los distintos tipos de materiales o sustancias involucrados en un proceso industrial. Las operaciones de **reducción de tamaño** involucran métodos para cortar en piezas más pequeñas sólidos de distintos materiales (McCabe, 2007). La operación de **aglomeración** involucra la compresión de polvos para formar sólidos de mayor tamaño, como en la fabricación de tabletas y comprimidos (Silla, 2003). La operación de **tamizado** se refiere a métodos de separación de material granulado basado en la diferencia de tamaño (Granger, 1950).

## 1.2 Proceso industrial: componentes generales

Dentro de un proceso industrial, en cada etapa se tienen entradas, que pueden ser materias primas, recursos naturales, materiales auxiliares y/o energía y combustible; y salidas, como son emisiones, residuos, subproductos y el producto final, tal como se muestra en el diagrama de la **Figura 2**.



*Figura 2. Diagrama general de un proceso industrial con de entradas y salidas.  
Adaptado de (Kühtz, Zhou, Albino, & Yazan, 2010).*

### Entradas de un proceso industrial

Las entradas de un proceso industrial consisten en aquellos materiales que van a ser transformados a través de alguna operación o proceso unitario y que son necesarios para las etapas siguientes del proceso.

La principal entrada de un proceso industrial es la **materia prima**; a partir de ella comienza la transformación de diversos materiales hacia un producto terminado o la conversión de materia en energía. La materia prima puede o no provenir de otro proceso industrial. Ejemplo de ello es el agua proveniente de una operación de ósmosis inversa para ser usada en una planta nucleoelectrónica en un reactor.

Los **combustibles y energía** también se consideran entradas en un proceso industrial, ya que son los encargados del funcionamiento de los diferentes equipos y maquinaria utilizados en el proceso, por ejemplo: electricidad, diésel, gasolina, gas natural, vapor, materiales para incineración como basura o restos orgánicos, energía potencial de agua en una planta hidroeléctrica.

Otro tipo de entradas son los **recursos naturales** existentes, los cuales son aprovechados de diversas formas. Están los recursos inagotables como el aire, agua y sales marinas, los

cuales, por ejemplo, son la entrada de un proceso de enfriamiento en el condensador de una central nucleoelectrica.

Los **recursos agotables, percederos y no renovables** como los combustibles fósiles y yacimientos minerales también son entradas de procesos industriales, así como los **recursos renovables** que, tras el cultivo y cosecha se vuelven a obtener. Tal es el caso de la agricultura y actividades como la pesca.

Finalmente, los **materiales auxiliares** son aquellas entradas necesarias para el óptimo funcionamiento de determinados trabajos que no aparecen en el producto final, pero que sin ellos las operaciones se harían con dificultad o de forma ineficiente.

A continuación, se mencionan algunos ejemplos de materiales auxiliares en diferentes procesos industriales:

a) *Proceso: Cianuración. Material auxiliar: Cianuro de sodio (NaCN).*

La cianuración es un proceso ampliamente utilizado en la extracción de oro y plata a partir de sus minerales. El proceso convencional utiliza el oxígeno en el aire como oxidante y el ion  $CN^-$  como agente complejante, y se basa en que el oro y la plata se disuelven fácilmente en una solución acuosa diluida en cianuro de sodio o de potasio, manteniendo condiciones oxidantes favorables (Salinas, et al., 2004). En la **Figura 3** se muestra el proceso de extracción de oro por medio de cianuración:

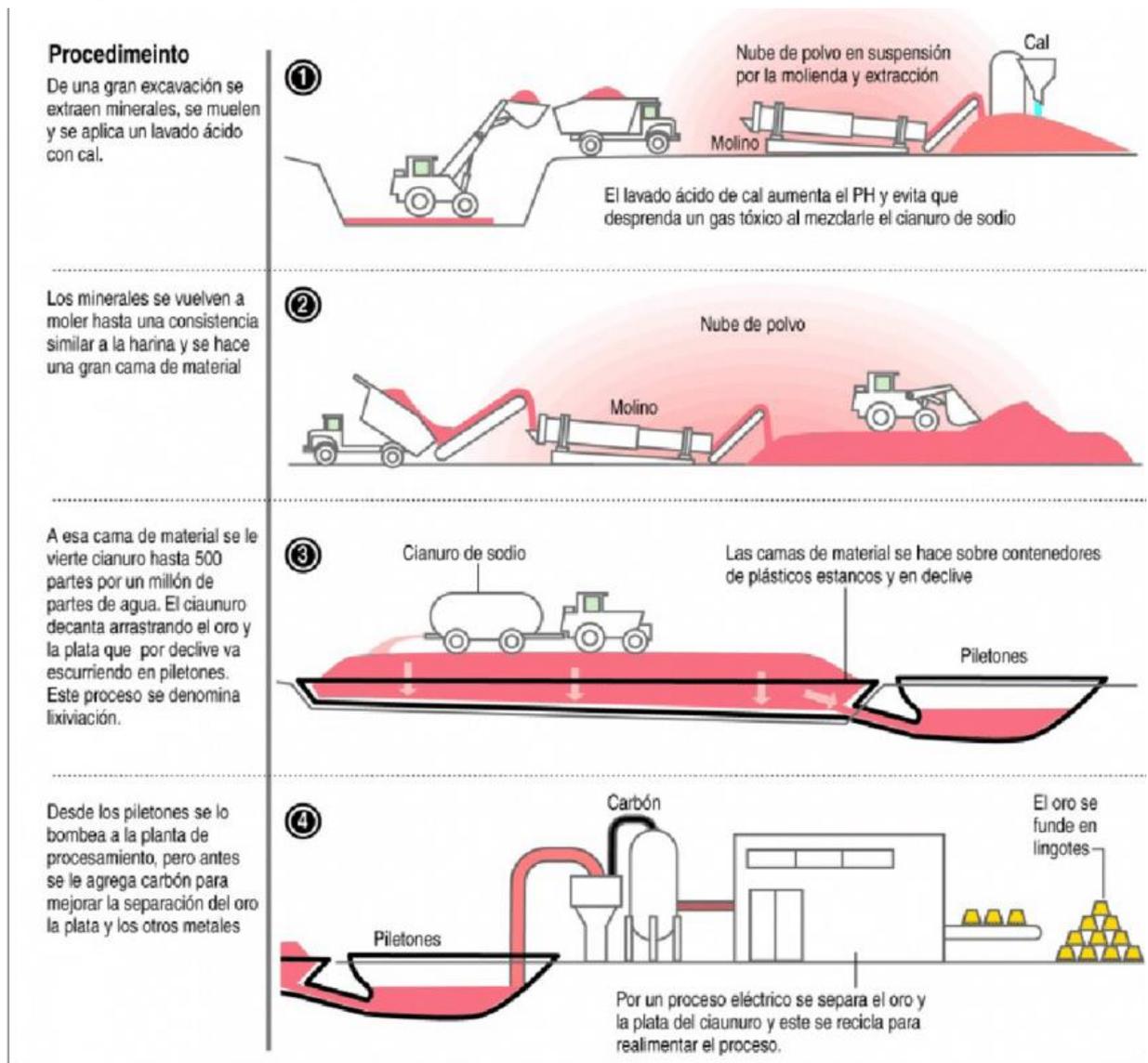


Figura 3. Proceso de extracción de oro por medio de cianuración (Martínez J. A., 2018)



d) *Proceso: Elaboración de aceites vegetales mediante extracción líquido-sólido. Material auxiliar: Hexano*

Para extraer solventes a partir de semillas oleaginosas, estas alimentan a un extractor donde se coloca una cinta filtrante que se desplaza de un lado a otro y carga la torta de aceite procedente de una tolva de alimentación, sometiendo la torta de semillas a una ducha de disolvente (hexano) y descargando la torta deshidratada en la tolva de descarga del extractor (Anreotti Impianti, 2021).

El hexano entra en el extractor del lado opuesto a la semilla, se pulveriza sobre la cinta y fluye a través de esta. Se puede recuperar en una tolva para usarlo en otra etapa de pulverización mientras que el disolvente con aceite extraído se bombea al siguiente paso del proceso (Anreotti Impianti, 2021). En la **Figura 6** se muestra un diagrama del proceso de elaboración de aceites vegetales utilizando hexano como disolvente:

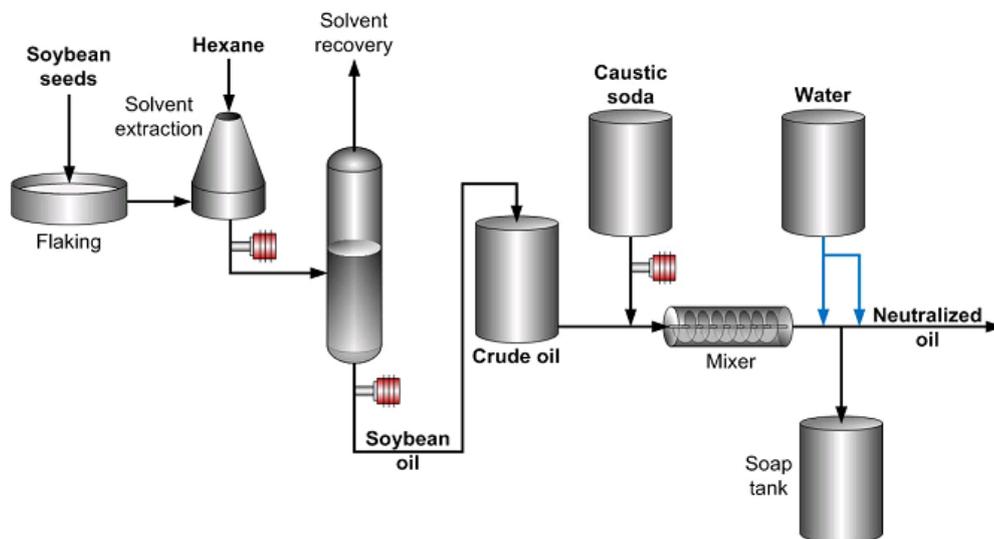


Figura 6. Diagrama del proceso de elaboración de aceites vegetales mediante extracción líquido-sólido (Ingeniería Química, 2021).

e) *Proceso: Producción de cloro gas ( $Cl_2$ ) y compuestos alcalinos mediante electrólisis. Material auxiliar: Mercurio.*

La producción industrial de cloro gas y compuestos alcalinos como hidróxido de sodio (NaOH) e hidróxido de potasio (KOH), se lleva a cabo mediante la electrólisis de una solución de sales (cloruro de sodio y cloruro de potasio), siendo una de las principales tecnologías utilizadas la electrólisis de celda de mercurio (European Commission, 2014).

En el proceso de celda de mercurio se utilizan dos celdas: en la primera, el mineral de sal purificado llega con un contenido aproximado de 25% de cloruro de sodio (NaCl) y fluye a través de un paso elongado ligeramente inclinado. En la parte inferior de la celda hay una película de mercurio que fluye, la cual constituye el cátodo de la celda, mientras que el ánodo está suspendido en la parte superior (European Commission, 2014).

La corriente eléctrica en la celda descompone la sal, liberando el cloro gas ( $Cl_2$ ) en el ánodo y el sodio metálico en el cátodo. El cloro se acumula en la parte superior y es descargado a un tren de purificación posterior. Conforme el sodio se genera en la superficie del mercurio, se forma una amalgama, mientras que el mercurio libre de sodio, se recircula a la primera celda para repetir el proceso, el cual se muestra en la **Figura 7** (European Commission, 2014).

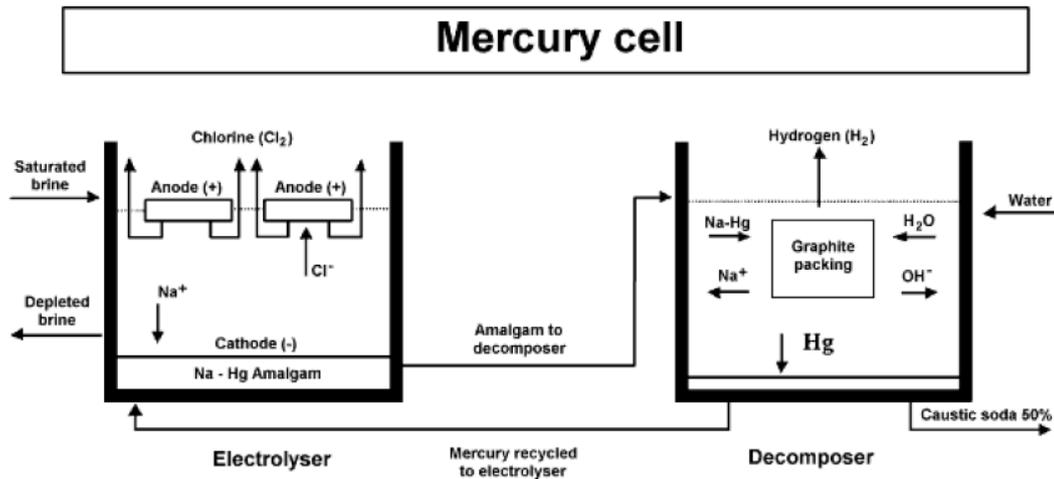


Figura 7. Celdas electrolíticas de mercurio utilizadas en la producción de cloro gas. (European Commission, 2014).

- f) *Proceso: Concentración y destrucción de Componentes Orgánicos Volátiles (COVs) mediante adsorción. Material auxiliar: Zeolita*

Los Componentes Orgánicos Volátiles son compuestos químicos orgánicos cuya composición les permite evaporarse en condiciones atmosféricas normales de temperatura y presión en interiores, por lo que constituyen uno de los mayores contaminantes del aire (EPA, 2021)

Para concentrar los COVs antes de destruirlos, se utiliza el adsorbente zeolita hidrofóbica. Por ejemplo, los motores que usan gasolina emiten COVs en sus gases de escape cuando están fríos. La zeolita hidrofóbica es utilizada en los convertidores catalíticos para adsorber dichos COVs. Cuando el motor se calienta y los gases calientes desorben los COVs de la zeolita, esta hace entonces el papel de catalizador para su oxidación (Environmental Protection Agency, 1999). En la **Figura 8** se observa el funcionamiento de un concentrador de COVs utilizando zeolita como material auxiliar:

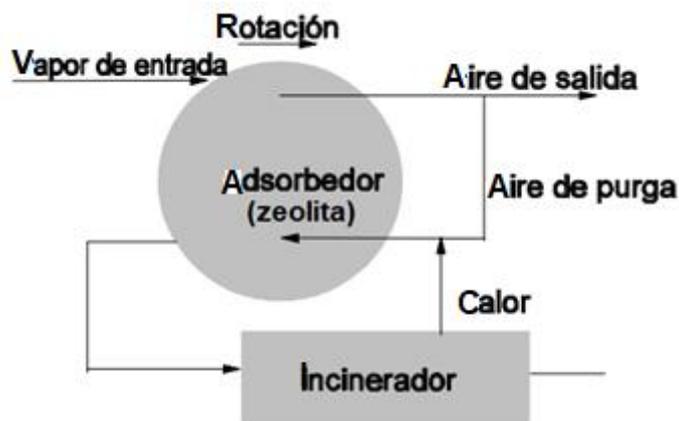


Figura 8. Concentrador de COVs utilizando zeolita como adsorbente. Adaptado de: (Environmental Protection Agency, 1999).

- g) *Proceso: Producción de hidrógeno (H<sub>2</sub>) mediante la oxidación parcial de metano. Material auxiliar: Catalizadores de níquel.*

El hidrógeno es considerado como una energía atractiva para el futuro próximo debido a que su combustión no resulta contaminante pues genera solamente vapor de agua como producto de su combustión (Fierro, 2011).

El hidrógeno se produce a partir de distintos precursores mediante procesos químicos o bioquímicos. El reformado de metano con vapor es un proceso utilizado para producir hidrógeno. En este proceso, el gas natural reacciona con vapor de agua sobre un catalizador de níquel en un reformador primario a una temperatura de 1 200 K (Fierro, 2011).

Debido a que el gas natural contiene impurezas de azufre, se elimina primero este contaminante para evitar el deterioro de la actividad catalítica, y después la corriente limpia de metano pasa a un reactor donde se adiciona el catalizador de níquel y se lleva a cabo una reacción, produciendo un gas de salida rico en hidrógeno (Fierro, 2011).

*h) Proceso: Purificación de Cloruro de nitrógeno ( $NCl_3$ ) mediante absorción. Material auxiliar: Tetracloruro de carbono ( $CCl_4$ ).*

El cloro gas se licúa en varios procesos de compresión y enfriamiento. Gases como hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y dióxido de carbono presentes tienden a concentrarse y es necesario purgarlos. El contenido de cloro en la purga varía del 1% al 8% respecto al cloro gas bruto o total producido, y los gases no condensables se conducen a un sistema capaz de manejar dicha cantidad de cloro mediante una unidad de absorción para evitar las emisiones de este gas (European Commission, 2014).

Actualmente se utiliza tetracloruro de carbono ( $CCl_4$ ) para la purificación (absorción de cloruro de nitrógeno en el gas de cola) y/o licuefacción del cloro gas en circuitos cerrados de uso y reciclado de  $CCl_4$  (European Commission, 2014).

## Salidas de un proceso industrial

Las salidas de un proceso industrial son productos finales, subproductos, emisiones y residuos. Los **productos finales** son los productos objetivo que cumplen con la calidad y estándares del proceso, por ejemplo: jabón, chocolate, tequila, biodiesel, etc.

Un **subproducto o producto secundario** es el producto no objetivo de un proceso industrial que resulta de forma inherente de un proceso u operación unitarios y que contribuye a los costos del proceso general. Lograr su aprovechamiento constituye un aumento en la eficiencia del proceso, aunque no siempre es posible lograrlo. Ejemplo de ello es la salmuera en el proceso de desalación de agua de mar o la glicerina, en el proceso de saponificación.

A continuación, se mencionan algunos ejemplos de subproductos y en diferentes procesos industriales:

*a) Producto objetivo: Gas natural. Subproducto: Ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ).*

En el proceso de endulzamiento del gas natural, las cantidades presentes de ácido sulfhídrico deben removerse para que el gas sea seguro de utilizar como combustible. El almacenamiento y transporte del ácido sulfhídrico que es obtenido como subproducto resulta demasiado complejo, por lo que se lleva a cabo el proceso Claus para convertirlo en azufre y así facilitar su transporte (Stea, 2019).

El proceso Claus es un sistema de control de emisiones de azufre basado en la recuperación de sus compuestos, contenidos en los gases ácidos de las corrientes de desecho provenientes de las refinerías y los centros de procesamiento de gas. Dicho proceso permite recuperar hasta 96% del azufre contenido en los gases ácidos de las corrientes de desecho, los cuales, en caso de no ser recuperados, se incineran y son emitidos a la atmósfera (Instituto Mexicano del Petróleo, 2013).

En la **Figura 9** se muestra un diagrama del proceso de recuperación de azufre a partir de ácido sulfhídrico.

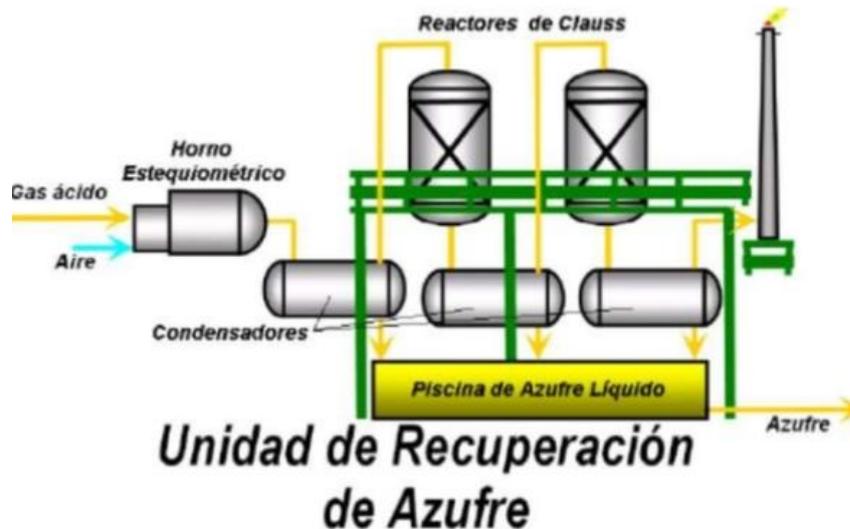


Figura 9. Proceso Claus de recuperación de azufre a partir de ácido sulfhídrico

b) *Producto objetivo: Jabón. Subproducto: Hipoclorito de sodio.*

En el proceso de elaboración de jabón la saponificación es un proceso químico donde se lleva a cabo una reacción en la que se produce un jabón sólido a través de la separación de cuerpos grasos en una solución alcalina, para obtener ácidos grasos y glicerina. Después de la primera saponificación en la mezcla del jabón se forman un par de capas, una es el jabón sólido o pasta neutra que se encuentra en la parte superior, y debajo de ella se encuentran el hipoclorito de sodio ( $\text{NaClO}$ ) y glicerina. El hipoclorito de sodio se mezcla con agua para crear lejía, la cual se utiliza como desinfectante y como base para los blanqueadores más comunes (Ingeniería Química, 2019).

c) *Producto objetivo: Cloro gas ( $\text{Cl}_2$ ). Subproducto: Hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ).*

La producción industrial de cloro gas y compuestos alcalinos como hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) e hidróxido de potasio ( $\text{KOH}$ ) se lleva a cabo mediante la electrólisis de una solución de sales (cloruro de sodio o de potasio) (European Commission, 2006).

Dentro de los usos que tiene el cloro gas en la industria química está la síntesis de pesticidas y productos farmacéuticos, del hipoclorito de sodio, ácido clorhídrico, entre otros. El cloro gas también se utiliza en plantas de tratamiento de agua y de elaboración de pulpa de celulosa y papel (Lindley, 1997).

En el proceso de producción de cloro gas, por cada tonelada obtenida, se generan 1,128 toneladas de hidróxido de sodio, el cual se vende en solución acuosa al 50%. Además, este subproducto tiene la capacidad de ser transportado a grandes distancias y almacenado por largos periodos de tiempo (European Commission, 2006).

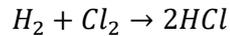
Los principales usos que tiene el  $\text{NaOH}$  son la síntesis de compuestos químicos orgánicos e inorgánicos, la elaboración de textiles, jabones, detergentes, entre otros (European Commission, 2006).

d) *Producto objetivo: Cloro gas ( $\text{Cl}_2$ ). Subproducto: Hidrógeno gaseoso ( $\text{H}_2$ ).*

El hidrógeno gaseoso es otro subproducto del proceso de producción del cloro gas, y se utiliza principalmente como combustible en el sitio o se vende. En plantas químicas integradas se usa en la producción de amoníaco, metanol, ácido clorhídrico, peróxido de hidrógeno, entre otros productos (European Commission, 2006).

e) *Producto objetivo: Cloro gas (Cl<sub>2</sub>). Subproducto: Ácido clorhídrico (HCl).*

El ácido clorhídrico se obtiene como subproducto de reacciones de cloración, como las que se llevan a cabo en la producción de diclorometano, tricloroetileno, y cloruro de vinilo. En el caso de la producción de cloro gas, la síntesis de HCl se realiza mediante la siguiente reacción básica (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2020):



El ácido clorhídrico juega un papel importante en diferentes industrias, pues es utilizado en procesos hidrometalúrgicos como la producción de alúmina, en la activación de pozos de petróleo, ajustes de pH, tratamientos superficiales de limpieza, entre otros (U.S. Environmental Protection Agency, 1993). En la **Figura 10** se muestra un esquema de la obtención de HCl a través de reacciones de cloración:

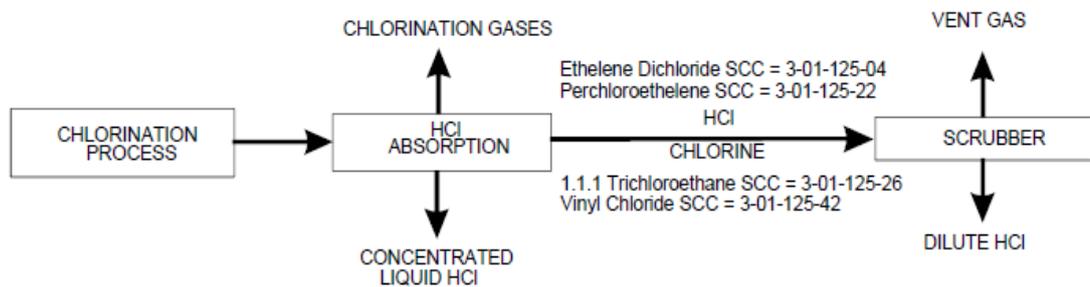


Figura 10. Obtención de HCl a través de procesos de cloración (U.S. Environmental Protection Agency, 1993).

f) *Producto objetivo: Caprolactama (C<sub>6</sub>H<sub>11</sub>NO). Subproducto: Carbonato de sodio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>).*

El carbonato de sodio es una materia prima fundamental en la industria del vidrio y detergentes. En el mundo se producen más de 40 millones de toneladas al año, sin embargo, la disponibilidad de materia prima, el costo de la energía que se usa durante su producción y el impacto ambiental que tiene son variables que hacen de este un proceso complejo (European Commission, 2006).

El carbonato de sodio se obtiene como subproducto de la producción de caprolactama (materia prima utilizada para producir nylon) mediante el tratamiento de los efluentes de varias partes del proceso, los cuales están cargados de sales orgánicas y ácidos carboxílicos. Estos se convierten en Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> en forma de sal fundida o ceniza y posteriormente se disuelve, purifica, cristaliza y deshidrata para obtener un producto rentable (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2020).

g) *Producto objetivo: Metanol (CH<sub>3</sub>OH). Subproducto: Dimetil éter (DME).*

El método tradicional en dos etapas para producir metanol se lleva a cabo por medio de una reacción reversible exotérmica en fase gaseosa que ocurre en reactores a temperaturas entre 210 y 280°C, lo cual constituye la primera etapa. Posteriormente, se hace una separación y purificación del metanol por rectificación, de donde se obtiene el DME. La segunda etapa se puede llevar a cabo en fase gaseosa o líquida y consiste en la deshidratación del metanol en reactores a temperaturas entre 200°C y 400°C (Peláez, 2016).

La **Figura 11** muestra el diagrama de proceso de obtención de dimetiléter a partir de la producción de metanol en dos etapas:

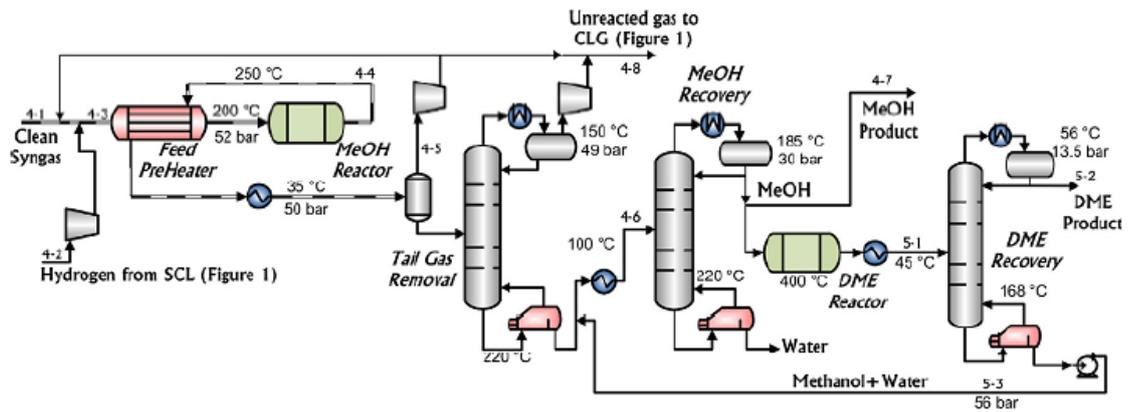


Figura 11. Diagrama de flujo de proceso de la obtención de dimetiléter a partir de la producción de metanol (Peláez, 2016).

h) *Producto objetivo:* Coque. *Subproducto:* Sulfato de amonio  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ .

El sulfato de amonio es una sal que se usa principalmente como fertilizante, y se sintetiza principalmente a partir de amoníaco y ácido sulfúrico, sin embargo, también puede obtenerse como subproducto de la coquización (EPA, 1996).

En las plantas de coque se utilizan filtros rotatorios donde se deposita la capa de sulfato de amonio y es recuperada. Posteriormente se almacena y no es necesario someterla a una operación de tamizado (EPA, 1996). En la **Figura 12** se muestra un diagrama del proceso de obtención de sulfato de amonio durante la coquización.

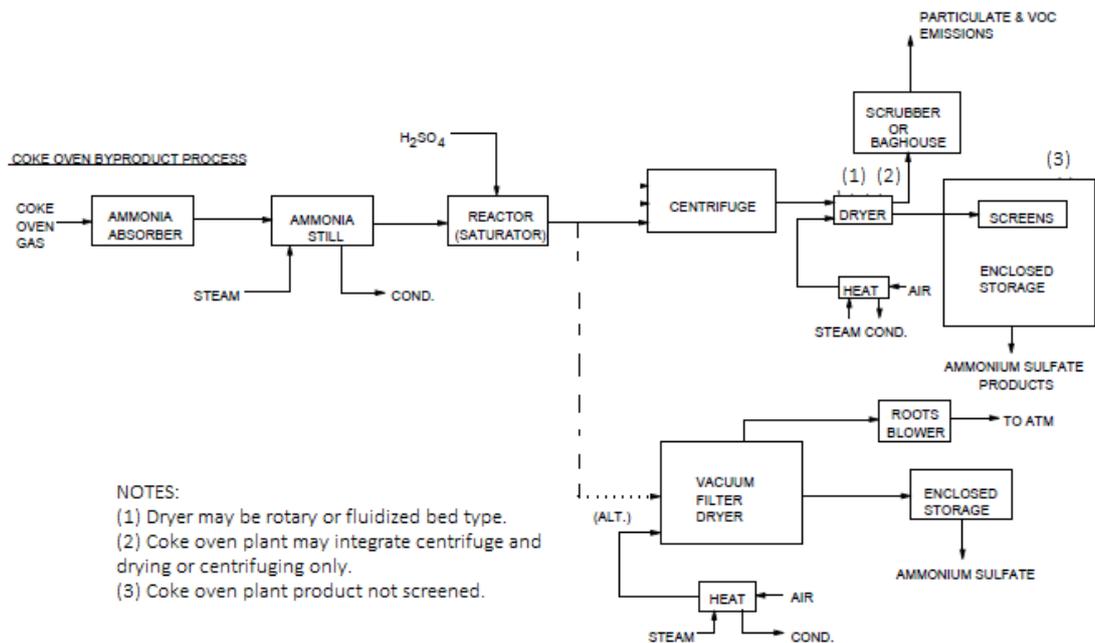


Figura 12. Diagrama de flujo de la obtención de sulfato de amonio a partir de la coquización. Adaptado de (EPA, 1996).

i) *Producto objetivo:* Fluoruro de hidrógeno anhidro (HF). *Subproducto:* Sulfato de calcio  $(\text{CaSO}_4)$ .

El fluoruro de hidrógeno es un compuesto químico utilizado en procesos como la producción de aluminio, procesamiento de uranio, recubrimiento superficial de acero, producción de fluorocarbonos y clorofluorocarbonos usados en aerosoles y refrigerantes, en la manufactura de resinas y solventes, productos farmacéuticos, entre otros (European Commission, 2003).

El proceso de producción de fluoruro de hidrógeno genera como subproducto sulfato de calcio que puede ser vendido a la industria cementera (European Commission, 2003). En la **Figura 13** se muestra un esquema general de la producción de fluoruro de hidrógeno anhidro.

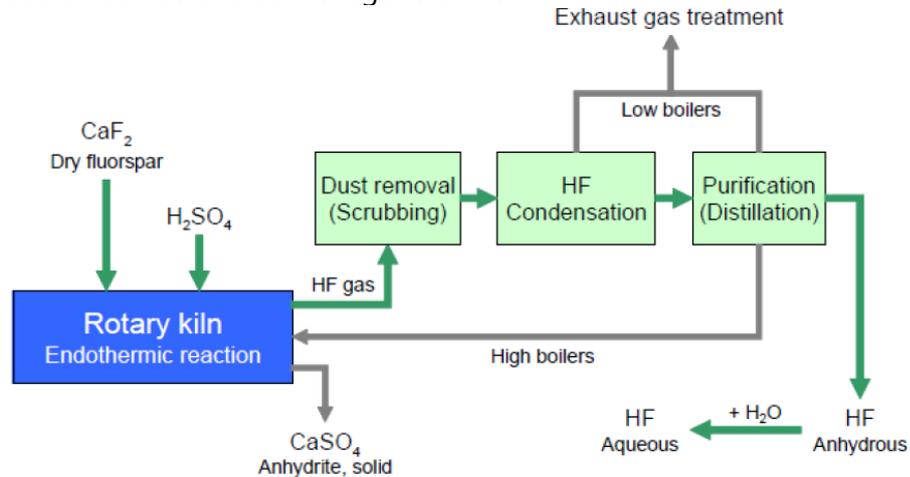


Figura 13. Obtención de sulfato de calcio a partir de la producción de fluoruro de hidrógeno anhidro.

- j) *Producto objetivo: Acetileno ( $C_2H_2$ ). Subproducto: Hidróxido de calcio ( $Ca(OH)_2$ ).*  
 El acetileno es un gas incoloro, muy inflamable y más ligero que el aire, utilizado principalmente para operaciones de soldadura y como gas de alta pureza en equipos de espectrometría de masas (European Commission, 2003).

Uno de los métodos de producción del acetileno es mediante la hidrólisis de carburo de calcio en base seca, en donde se produce una corriente de gases (acetileno y vapor de agua) y una torta sólida de hidróxido de calcio, el cual se utiliza en el tratamiento de aguas y en la producción de cemento (SEMARNAT, 2007).

Otra de las salidas que podemos encontrar en un proceso industrial es basura, que es todo aquello que ya no tiene utilidad ni puede reutilizarse o reciclarse. Además, en todas las etapas de un proceso industrial encontramos emisiones y residuos. Los **residuos** son restos de la fabricación que no pueden ser usados como materia prima del producto objetivo, pero sí de productos diferentes. Estos residuos pueden presentar riesgos a la salud humana y al medio ambiente, ya que pueden ser corrosivos, como ácidos y bases fuertes, fenol, bromo e hidracina; reactivos, como nitratos, metales alcalinos, magnesio e hidruros metálicos; explosivos, como peróxidos, cloratos, percloratos o permanganato de potasio, y finalmente pueden ser residuos tóxicos, como el cianuro, arsénico, plomo y plaguicidas (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2007).

Las **emisiones** son aquellas sustancias residuales de los procesos de transformación que son emitidas al ambiente natural ya sea en forma de gases a la atmósfera, fluidos a los cuerpos de agua y sólidos cuya presencia implica un riesgo a los seres humanos y/o al ambiente. Como ejemplo de emisión se puede mencionar la liberación de  $CO_2$  a la atmósfera en procesos de fermentación. Otra de las salidas de un proceso industrial son los **rechazos**, es decir, aquellos productos objetivos que no cumplen con la calidad y estándares del proceso por algún error en la etiqueta, en el envase, etc. También existe **merma** en los procesos industriales, y puede deberse a factores como cuestiones administrativas que ocasionan una disminución en el inventario, por ejemplo, fallos en el registro o robos. También puede deberse a cuestiones naturales, pues los productos perecederos caducan; o a cuestiones operativas, por ejemplo, cuando la mercancía se daña a causa de las actividades habituales de la empresa.

## 2. Procesos y operaciones unitarias de la industria de procesos

### 2.1 Filtración

Es la operación en la cual una mezcla heterogénea de un fluido y partículas son separadas por un medio filtrante que permite el paso del fluido, pero retiene las partículas del sólido o líquido en virtud de una diferencia de presión (McCabe, 2007).

La diferencia de presión o fuerza impulsora tiene como objetivo que el fluido pase a través de pequeños orificios de una malla o tela, la cual bloquea el paso de partículas sólidas grandes, que se van acumulando en la malla en forma de una torta porosa (Geankoplis, 1993). Esta diferencia de presión puede ser provocada por: gravedad, vacío, presión o fuerza centrífuga.

Las operaciones de filtración se usan para **recuperar líquidos, gases, sólidos o ambos**, además de ser usada en procesos de tratamiento de residuos (Silla, 2003).

La corriente valiosa procedente de un filtro es **el fluido, los sólidos o ambos**. En algunas ocasiones, ambas corrientes carecen de valor, como en la separación de sólidos de lodos de aguas residuales. En cuyo caso, el objetivo de realizar una operación de filtración es mejorar el comportamiento de los materiales para su transporte o disposición final (McCabe, 2007).

La filtración industrial va desde el simple colado hasta separaciones más complejas. El fluido es un líquido o un gas; las partículas sólidas son gruesas o finas, rígidas o flexibles, redondas o alargadas, separadas o agregados. La suspensión de alimentación lleva fracciones elevadas o muy bajas en volumen de sólidos (5% a 40%) (Facultad de Química UNAM, 2011).

Las principales variables que afectan al proceso de filtración y que deben tomarse en cuenta para seleccionar, diseñar u operar un equipo son:

- *Variables de proceso:* concentración de sólidos, el tamaño de partícula, la temperatura, el pH, la viscosidad y densidad.
- *Variables de diseño:* área de filtración, caída de presión a través del filtro, resistencia del medio filtrante, flujo de filtrado, cantidad de sólidos retenidos, humedad de la torta y tiempo de lavado.

En la filtración se identifican los siguientes factores:

- **Naturaleza de los sólidos.** La filtración involucra la separación de sólidos compresibles e incompresibles, partículas deformables o rígidas de diferentes concentraciones y tamaños, que, al depositarse en el medio filtrante, formaran capas de sólidos.
- **El medio filtrante.** Las características del medio filtrante dependen de su material y de las técnicas empleadas en su elaboración, su selección se realiza tomando en cuenta el tamaño mínimo de partícula retenida, su permeabilidad, su estabilidad dimensional, la facilidad de limpieza, así como su resistencia al flujo, al calor, a la acción de productos químicos, a la abrasión, flexión y rotura.

Los tipos de medios filtrantes, como se muestra en la **Figura 14** son: telas metálicas, telas naturales o sintéticas, placas de asbesto o celulosa, hojas de papel o fibra de vidrio y sólidos sueltos.



Figura 14. Tipos de medios filtrantes

Con frecuencia la alimentación al filtro se modifica de alguna forma, es decir, pueden existir pretratamientos con el fin de aumentar la velocidad de filtración, tales como calentamiento, cristalización (apartado 2.2) o adición de un coadyuvante de filtración (McCabe, 2007).

- **Coadyuvantes.** Un coadyuvante es un material finamente dividido que no se comprime por la presión que ejerce el líquido al pasar por este tipo de materiales. Se agrega a suspensiones que presentan problemas a la filtración por presentar un tamaño muy pequeño de partícula y formar una torta densa e impermeable que obstruye con rapidez cualquier medio filtrante. Un coadyuvante forma una torta porosa, debe ser inerte, ligero; son ejemplo el carbón activado, pulpa de papel, tierra de diatomeas (**Figura 15**), perlita y celulosa de madera.

El coadyuvante se separa después de la torta, disolviendo los sólidos o quemando el coadyuvante, y si los sólidos no se consideran corriente valiosa, se desechan junto con este (McCabe, 2007).

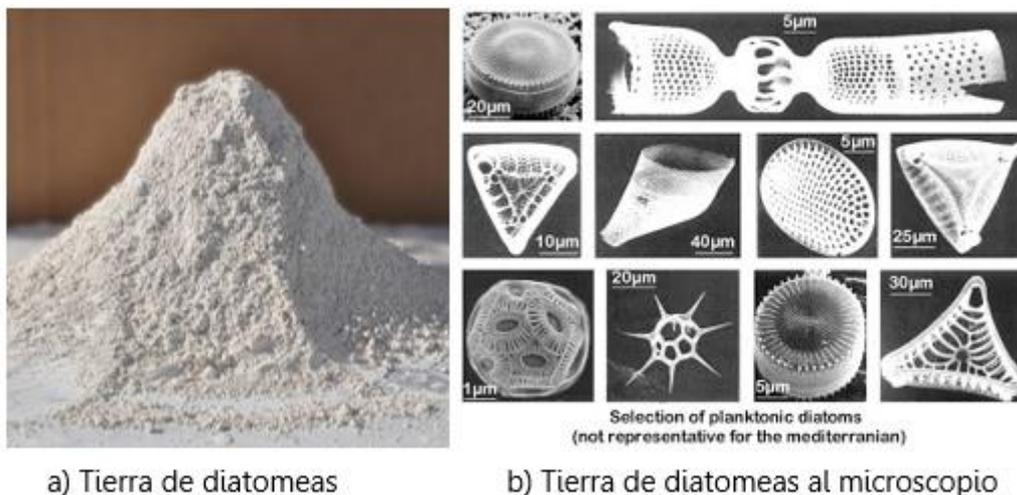


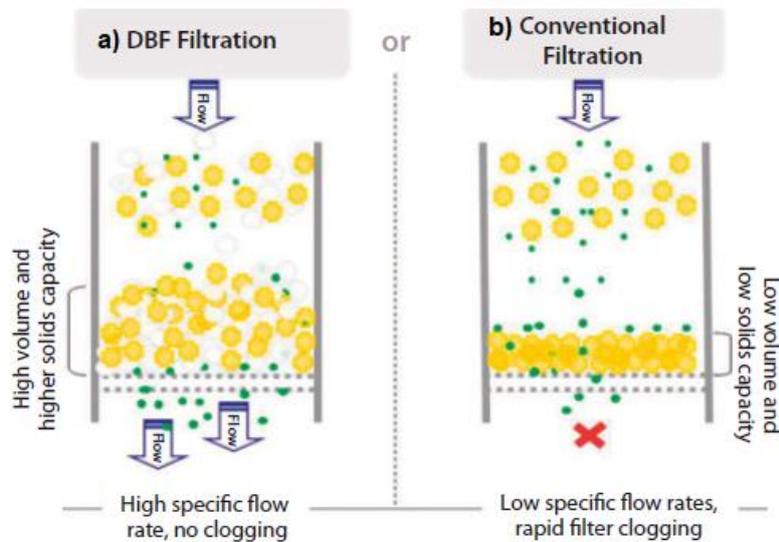
Figura 15. Tierra de diatomeas (Mercagarden, 2022) y tierra de diatomeas vista desde un microscopio (Burguess, Marten, & Taylor, 1990).

### Tierra de diatomeas

Las diatomeas son organismos unicelulares (algas marinas o de agua dulce) que cuentan con una pared celular o frústula dividida en dos mitades, la cual se puede disolver y acumular en el fondo del océano una vez que la diatomea muere. Cuando se acumula una gran cantidad de frústulas disueltas, se forma una capa gruesa conocida como diatomita o tierra de diatomeas (Burguess, Marten, & Taylor, 1990).

En las operaciones de filtración, cuando la concentración de sólidos o coloides es demasiado alta, la torta de filtración que se forma se vuelve impermeable y bloquea el filtro, sin embargo, el uso de tierra de diatomeas como coadyuvante permite la formación de una torta más permeable donde las impurezas quedan atrapadas, evitando

bloqueos, como se muestra en la **Figura 16** (Minow, Lagrange, Krumbein, Rollin, & van der Meer, 2014).



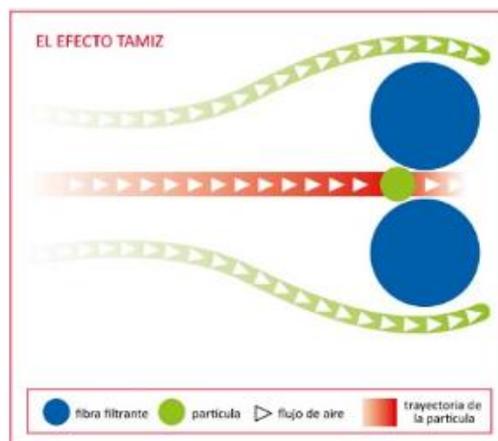
*Figura 16. Comparación entre filtración con sílice de diatomeas (a) y filtración convencional (b). Adaptado de (Minow, Lagrange, Krumbein, Rollin, & van der Meer, 2014).*

La filtración con tierra de diatomeas es utilizada en procesos biológicos que necesitan clarificación, como en el fraccionamiento de plasma sanguíneo. A partir del uso de este coadyuvante, se han desarrollado métodos como la filtración DBF (Dynamic body feed filtration) de la **Figura 16**, que mejora el rendimiento de los filtros al dejar pasar partículas micrométricas (Minow, Lagrange, Krumbein, Rollin, & van der Meer, 2014).

### Mecanismos de filtración (separación gas-sólido)

Existen diferentes mecanismos de filtración, los principales se describen a continuación:

**El efecto tamiz** es el más aplicado en filtros de aire, y se da cuando el tamaño de las partículas es superior al poro de la malla y por lo tanto quedan atrapadas, como se muestra en la **Figura 17** (Tecfilter, 2021).



*Figura 17. Efecto tamiz (Tecfilter, 2021).*

**En el efecto inercia** las partículas llegan a gran velocidad y son retenidas al chocar con el medio filtrante por acción de los coadyuvantes, chocando con la fibra en lugar de desviarse con el flujo de aire (**ver Figura 18**) (Tecfilter, 2021).

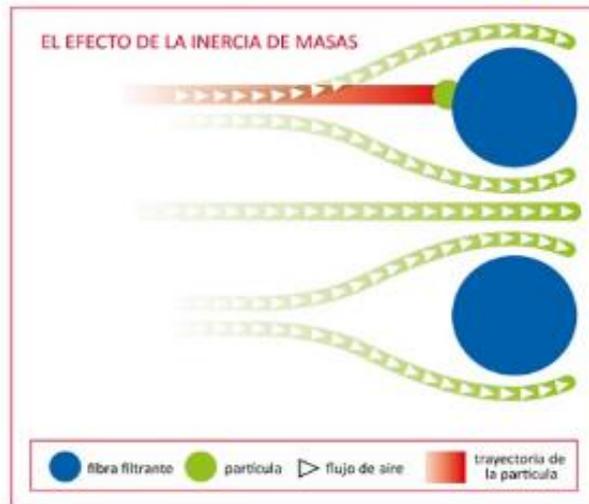


Figura 18. Efecto de inercia (Tecfilter, 2021).

En el efecto de adherencia o intercepción, las partículas son atraídas (retenidas) por fuerzas electrostáticas en las fibras del medio filtrante, donde las fibras más grandes atraen las partículas de polvo más pequeñas, como se muestra en la **Figura 19** (Tecfilter, 2021).

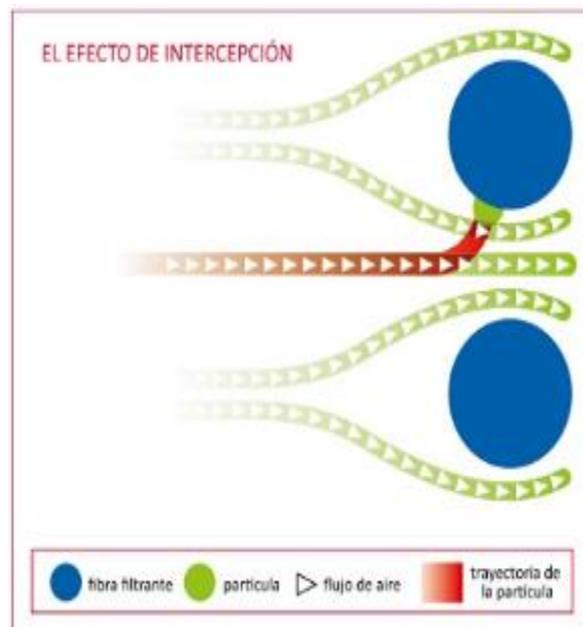


Figura 19. Efecto de adherencia o intercepción (Tecfilter, 2021).

### Mecanismos de filtración (separación líquido-sólido)

Dentro de los mecanismos de filtración para la separación líquido-sólido se encuentran el **mecanismo de clarificación** y el **mecanismo de torta**. En el mecanismo de **clarificación** las partículas del sólido son captadas por fuerzas superficiales e inmovilizadas en el medio filtrante, retirando pequeñas cantidades de sólidos o gotas de líquido a partir de líquidos o gases, como se observa en la **Figura 20**. La clarificación difiere del tamizado en que los poros del medio filtrante son mucho mayores que las partículas a retirar.

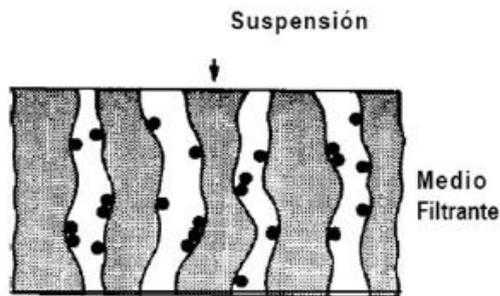


Figura 20. Mecanismo de clarificación

En el **mecanismo de torta** los sólidos se van acumulando y forman una capa sobre el medio filtrante, resultando en lo que se conoce como torta de filtración (**Figura 21**) (Colina, 2021). En muchas ocasiones la alimentación al filtro puede proceder de un sedimentador.

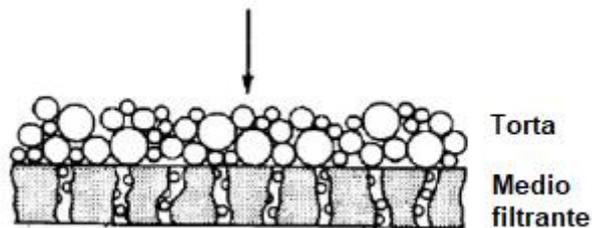


Figura 21. Mecanismo de torta

Como se observa en la imagen anterior, el medio filtrante es delgado. Al comienzo, algunas partículas entran en los poros del medio filtrante y después la torta de sólidos es la que realiza la filtración. La torta debe retirarse periódicamente (Colina, 2021).

## Equipos para realizar filtración

### Filtros por gravedad

Es el método más sencillo y tradicional. La única fuerza impulsora para que el líquido atraviese el filtro es la gravedad. El objetivo es separar un sólido de un líquido cuando lo que se quiere recuperar es el líquido (Angurell, et al., 2011). En el filtro de la **Figura 22** los materiales empleados son: soporte, aro metálico, embudo cónico, papel de filtro en forma cónica, recipiente para recoger el líquido (Erlenmeyer, matraz, vaso de precipitados) y varilla de vidrio.



Figura 22. Filtro por gravedad (Angurell, et al., 2011)

## Filtro de mangas (Separación gas-sólido)

Recibe este nombre por su forma cilíndrica y alargada, además de ser la tela de felpa (polipropileno) el material principal del medio filtrante. Este tipo de filtros puede capturar partículas finas de hasta 2.5 [µm] (Junco, 2019).

En la **Figura 23** se observa un esquema de funcionamiento de un filtro de mangas y sus principales componentes. El aire cargado de polvo se aspira en la tolva o directamente en el cuerpo del filtro (1) por medio de un conducto de entrada aerodinámico diseñado para obtener una distribución uniforme del gas, donde hay una disminución en su velocidad, así como un cambio en la dirección del flujo, lo que provoca la precipitación de las partículas más finas (Tama Aernova, 2021).

En la parte intermedia se encuentran las mangas del filtro (6) que cubren las canastillas (3) sostenidas verticalmente. En la parte superior o cabezal se encuentran la válvula de diafragma (11), las flautas o inyectores de aire (9), los temporizadores de control (12) y las salidas de aire filtrado indicadas con flechas azules (Celis, 2020).

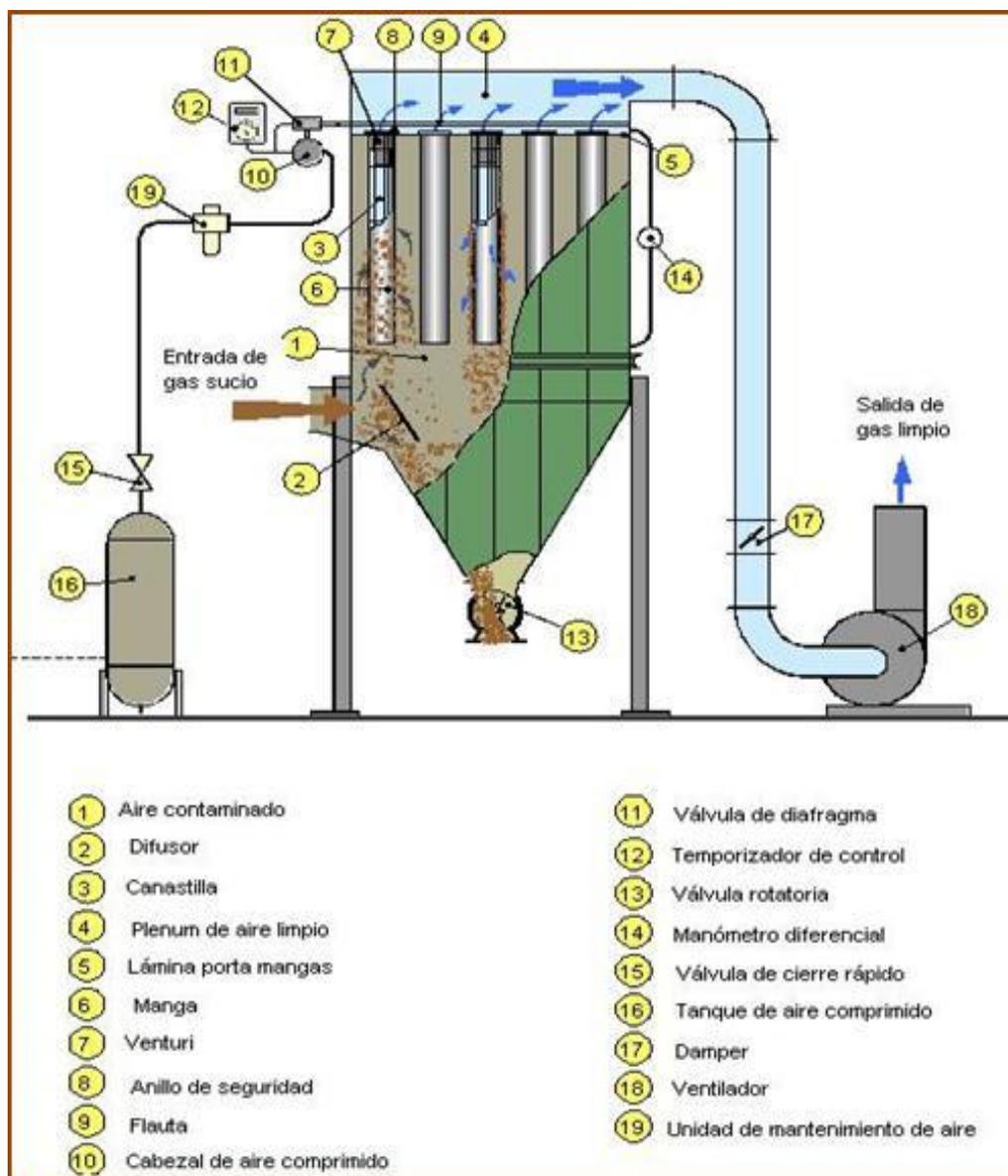


Figura 23. Esquema de funcionamiento y componentes principales de un filtro de mangas (Grupo Gaherma. Mantenimiento e Ingeniería, 2020).

Los filtros de mangas como el que se muestra en la **Figura 24** son muy utilizados en industrias que generan polvos o moliendas finas, como en la molienda de trigo, o donde es necesario extraer de la materia prima las sustancias polvorientas o livianas en el proceso de limpieza, son instalados en el techo y extraen el aire del inmueble (Celis, 2020).



*Figura 24. Filtro de mangas*

### **Filtros respiradores (Separación gas-sólido, gas-líquido)**

El **filtro electrostático avanzado** es un filtro respirador donde las microfibras cargadas electrostáticamente hacen que la respiración sea más fácil y fresca. El campo de captación es mayor a medida que la carga es más fuerte (3M, 2021).

En la **Figura 25** se muestra un respirador facial que funciona a través del mecanismo de filtración de efecto de adherencia.



*Figura 25. Respirador facial con microfibras cargadas electrostáticamente*

A medida que el usuario inhala, el aire pasa a través del respirador y la temperatura en la superficie desciende; mientras que cuando el usuario exhala, el respirador se llena con aire cálido húmedo, el cual pasa a través de una válvula y del medio de filtración (3M, 2021).

Otro ejemplo de filtros respiradores es el **filtro de carbón activado**. En este filtro, las capas de carbón activado eliminan muchos olores molestos y brindan mayor comodidad. (3M, 2021). En la **Figura 26** se muestra un respirador con filtro de carbón activado, que funciona por medio del efecto tamiz.



*Figura 26. Respirador con filtro de carbón activado*

Los **respiradores de presión positiva** empujan el aire hacia la parte superior de la máscara del respirador. Algunos son motorizados y usan un soplador alimentado por una batería para aspirar aire y partículas suspendidas a través de un filtro, llevando aire limpio a través de una manguera desde una fuente fuera del área de trabajo contaminada, como el que se muestra en la **Figura 27** (3M, 2021).

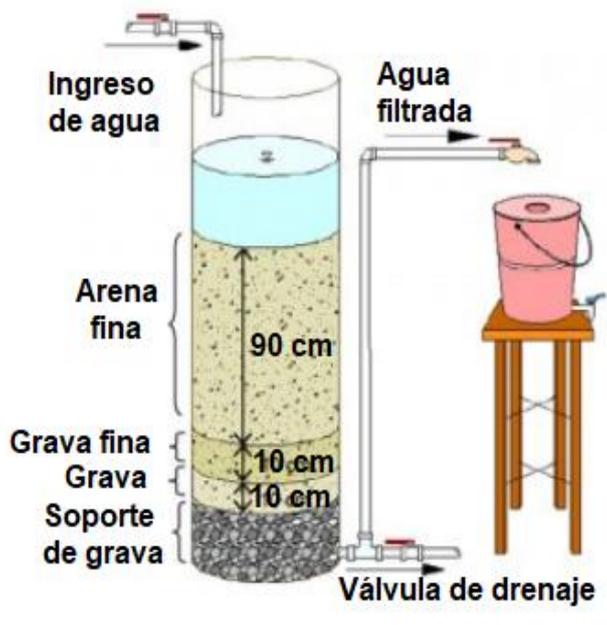


*Figura 27. Respirador de presión positiva*

Los respiradores de presión positiva son ideales para periodos de uso extensos en condiciones calientes y húmedas o en condiciones de trabajo físico intenso (3M, 2021).

### **Filtros clarificadores (Separación líquido-sólido)**

Un ejemplo de este tipo de filtros son los **filtros clarificadores de arena** para agua, como el que se observa en la **Figura 28**. Con este tipo de equipos se filtra agua de lluvia en casas habitación: el agua proveniente del techo o una superficie con captación, ingresa por la parte superior para que atraviese las diferentes capas de filtrado y puede ser adicionada una capa de carbón activado para mejorar la calidad del agua de salida<sup>1</sup>.



*Figura 28. Clarificador de arena*

Otro ejemplo de filtros clarificadores es el **clarificador de bolsa** como los que se muestran en la **Figura 29**. En estos equipos el líquido pasa a través de los poros permeables de una bolsa, que puede tener tamaños de poro de 1 a 200 [μ]. Su capacidad

<sup>1</sup> Para profundizar en el tema, puede consultar <https://islaurbana.org/>

depende de la superficie de la bolsa, sin embargo, hay equipos que pueden filtrar hasta 500 [m<sup>3</sup>/h] (Lenntech, 2021).



*Figura 29. Clarificadores de bolsa*

El líquido que debe ser filtrado es impulsado de dentro hacia afuera de la bolsa, de manera que los sólidos permanecen en la bolsa y el líquido es evacuado por un conducto de salida, como se muestra en la **Figura 30** (Lenntech, 2021).



*Figura 30. Funcionamiento de un clarificador de bolsa*

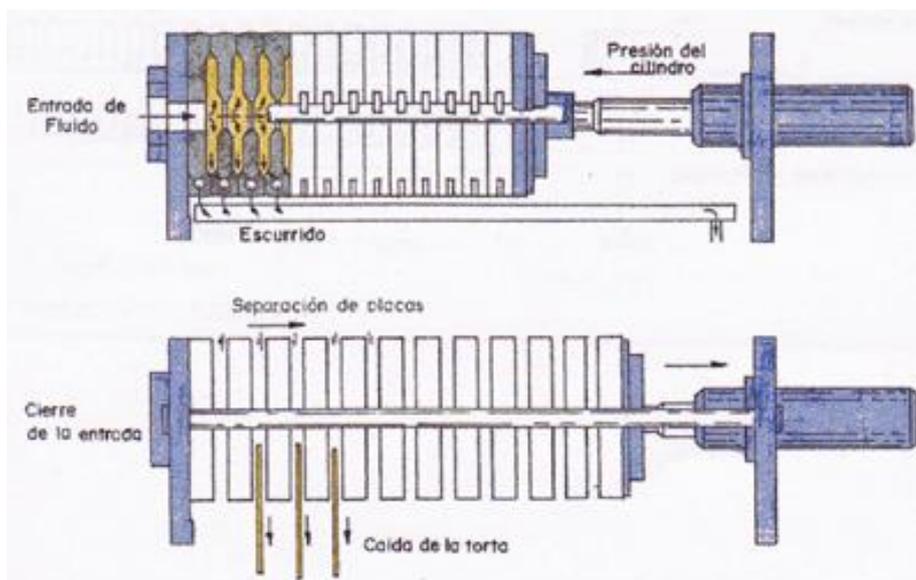
### **Filtros automáticos de prensa de presión discontinua (Mecanismo de torta - Separación líquido-sólido)**

Consisten en una serie de bastidores de acero que sostienen una tela o malla. Las placas filtrantes desmontables están hechas de polipropileno y pueden estar selladas o no. En estas placas se encuentra el medio filtrante que forma cámaras donde se recogen los sólidos. En la **Figura 31** se muestra un filtro automático de prensa.



*Figura 31. Filtro automático de prensa*

Los sólidos se bombean entre cada par de bastidores y por medio de un tornillo van oprimiendo unos contra otros expulsando el agua a través de la tela, y una vez que se separan, cae la torta, tal como se muestra en la **Figura 32**:



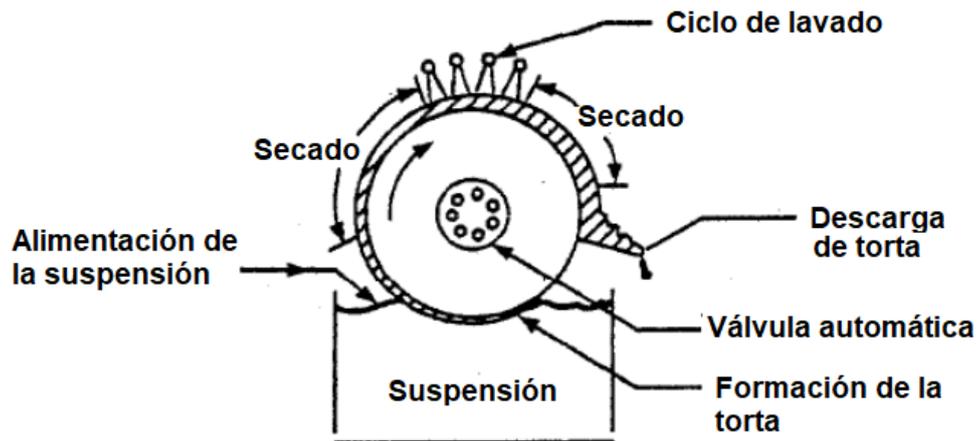
*Figura 32. Funcionamiento de un filtro automático de prensa*

Este tipo de filtro es utilizado en las industrias azucarera, chocolatera, cervecera, vinícola y aceitera, por mencionar algunas.

### **Filtros continuos rotatorios a vacío (Separación líquido-sólido)**

Son tambores horizontales con una superficie acanalada que va girando, por lo que el líquido es succionado a través de un medio filtrante en movimiento sobre el que se deposita una torta de sólidos, como se muestra en la **Figura 33** (McCabe, 2007).

Debajo de la superficie acanalada, se encuentra un tambor más pequeño. Entre estos tambores, hay una separación radial que divide el espacio en compartimentos separados, los cuales están conectados por medio de tuberías a un orificio de la válvula automática en la parte central. Así, conforme el tambor gira, cada compartimento se llena de aire y vacío alternadamente (McCabe, 2007).



*Figura 33. Esquema de funcionamiento de un filtro continuo rotatorio a vacío*

Posteriormente, la torta se separa de la zona de filtración para su lavado, se seca por aspiración y se descarga del medio filtrante para iniciar otro ciclo (McCabe, 2007).

En la **Figura 34** se observa un filtro continuo rotatorio a vacío, utilizado en la industria vinícola.



*Figura 34. Filtro continuo rotatorio a vacío*

### **Medios filtrantes (membranas de filtración)**

Las membranas de filtración son barreras físicas que actúan como medio filtrante, las cuales separan dos fases e impiden el paso de las partículas a filtrar de acuerdo con su tamaño. Estas membranas se fabrican con materiales poliméricos, cerámicos y metálicos.

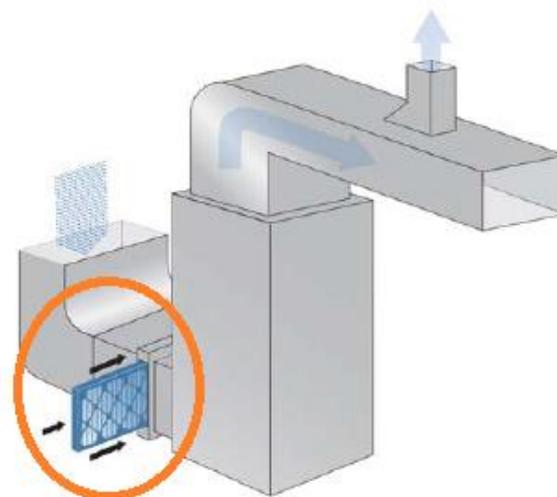
Cualquier membrana de filtración debe tener las siguientes características: retener los sólidos a filtrar, dando como resultado un filtrado razonablemente claro, no obstruirse o cegarse, ser física y químicamente resistente para soportar las condiciones del proceso y permitir que la torta formada se desprenda de una forma limpia y completa (McCabe, 2007).

En la **filtración industrial de fase líquida**, uno de los materiales frecuentemente usados en membranas de filtración es la tela de lona, sin embargo, los líquidos corrosivos requieren de otro tipo de medios filtrantes tales como telas de lana, de metal monel o acero inoxidable, de vidrio o de papel. Las fibras sintéticas como nylon, polipropileno y poliéster también tienen una elevada resistencia química (McCabe, 2007).

En la **filtración industrial de fase gaseosa** se suelen utilizar filtros de material fibroso, generalmente compuestos por fibras de vidrio, vegetales o sintéticas (poliéster o nylon), lanas metálicas o láminas expandidas. El medio de filtración normalmente es tratado previamente con una sustancia viscosa como el aceite para que las partículas se adhieran a las fibras. Estos filtros suelen tener entre 1 y 5 pulgadas de espesor y se usan en sistemas de calefacción residenciales y sistemas de aire acondicionado, pero también suelen usarse para proteger equipos de la acumulación de materiales no deseados como en motores de ventiladores e intercambiadores de calor (EPA, 2019). En la **Figura 35** se muestran ejemplos de filtros de materiales fibrosos comúnmente instalados en ductos de aire, mientras que en la **Figura 36**, la forma en que son instalados:



*Figura 35. Filtros de materiales fibrosos para filtración de gases (EPA, 2019)*



**Filtro del Sistema de Calefacción**

*Figura 36. Instalación de un filtro de aire en un sistema de calefacción. Adaptado de (EPA, 2019).*

En la **Tabla 3** se muestra la clasificación de las membranas de filtración que existen de acuerdo con el tamaño de abertura de sus poros.

*Tabla 3. Clasificación de membranas de filtración por tamaño de poro*

| Membrana                             | Tamaño de abertura de poro |
|--------------------------------------|----------------------------|
| De microfiltración                   | 0.1 a 1 $\mu$              |
| De ultrafiltración                   | 0.01 a 0.1 $\mu$           |
| De nanofiltración                    | 0.001 a 0.01 $\mu$         |
| De ósmosis inversa (hiperfiltración) | 0.0001 a 0.001 $\mu$       |

## **Ejemplo de operaciones de filtración: Proceso artesanal de extracción de oro**

En el proceso artesanal de extracción del oro, una de las operaciones unitarias presentes es la **filtración**. Este metal se extrae a través de la recolección de oro presente en piedras y arena de río, las partículas en suspensión de la corriente del río se hacen pasar a través de una malla, llevándose a cabo la filtración. El material recolectado se tritura y se mezcla con mercurio para amalgamar el oro. A continuación, se menciona la importancia de este proceso, su descripción y el impacto que tiene sobre el medio ambiente.

El oro es el segundo producto más exportado por Bolivia, donde existen más de 1100 cooperativas que se dedican a su extracción, exportando valores de hasta \$US 1.370 millones (en 2014). La exportación de oro es destinada casi en su totalidad a Estados Unidos, donde se usa en la fabricación de joyería o como ahorros en las bóvedas de los bancos (Vos, 2017).

En la región amazónica, el oro es extraído de sedimentos encontrados en los ríos de la zona (**Figuras 37 y 38**). En este tipo de minería, lo más común es el uso de dragas que son máquinas para extraer barro, piedras o arena de un río, este barro se filtra haciéndolo pasar a través de una malla, es decir, utilizando un **mecanismo de filtración con efecto tamiz**, lo cual permite **recuperar los sedimentos que contienen oro** (Vos, 2017), posteriormente se trituran hasta obtener una pasta (**mezcla con agua**) (1). Esta operación es de gran importancia en el proceso, pues de no ocurrir, la separación del oro se vuelve menos efectiva.

Después **se agrega mercurio a la pasta**, se disuelve uniéndose al oro en polvo y se forma una amalgama (2). Dicha amalgama se calienta para que el mercurio se evapore y quede únicamente el oro (2.1)

Aproximadamente el 10% del mercurio utilizado en la extracción de oro se une a este y el resto se vierte al medio ambiente (3). Una vez que el mercurio entra a un cuerpo de agua, es absorbido por bacterias que lo convierten en **metilmercurio** (4) y es así como se incorpora a la cadena alimenticia, pues los peces grandes se comen a otros más pequeños contaminados con metilmercurio acumulado en la sangre (5).

Los consumidores de pescado de las poblaciones cercanas son los más afectados, pues los peces contaminados con metilmercurio producen efectos negativos en la salud como: enfermedades cardíacas, pérdida de la memoria, problemas de fertilidad, afectaciones a la regulación de la presión arterial, entre otras (6).

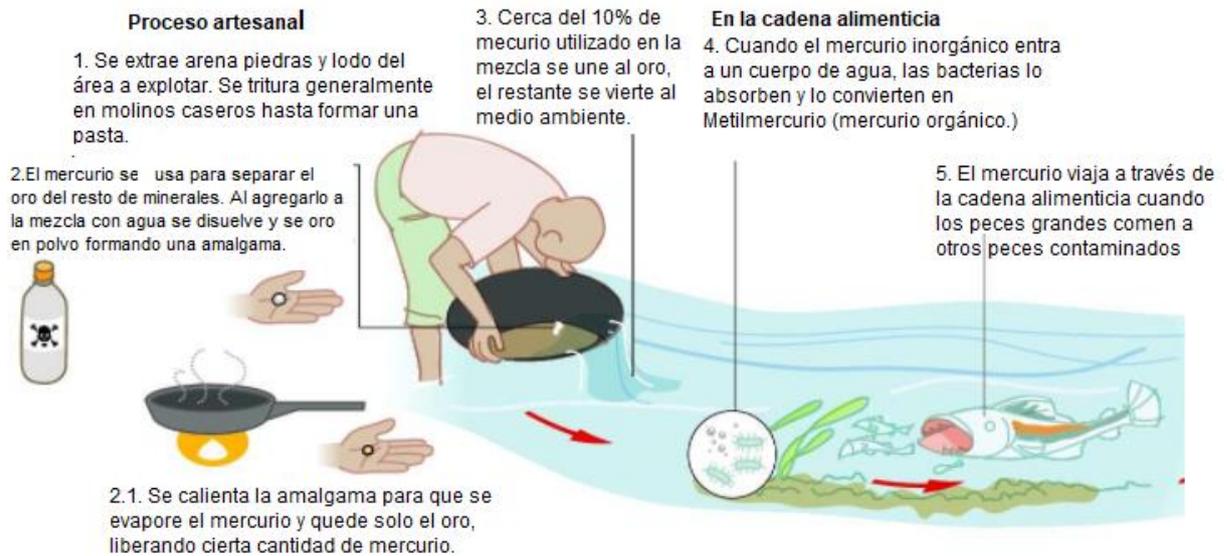


Figura 37. Proceso artesanal de extracción de oro. Adaptado de (Fundación por los Derechos Humanos y de la Naturaleza, 2014).

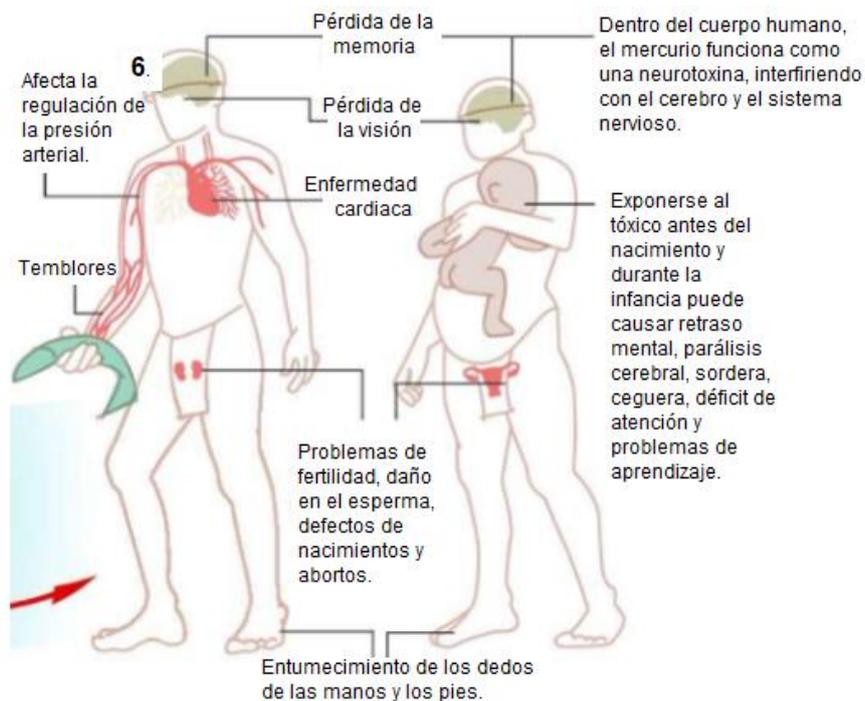


Figura 38. Proceso artesanal de extracción de oro (continuación). Adaptado de (Fundación por los Derechos Humanos y de la Naturaleza, 2014).

## 2.2 Transporte

El transporte es una operación que consiste en mover los materiales involucrados en un proceso industrial hacia otra etapa del proceso según sean requeridos. Se consideran tres tipos de transporte: transporte de fluidos, de sólidos fluidizados y de productos. También, se puede definir el fenómeno de transporte como el fenómeno físico que se pone de manifiesto cuando un sistema evoluciona hacia una situación de equilibrio, por ejemplo, cuando en una corriente fluida hay puntos en los que la velocidad en sentido normal al desplazamiento de dicha corriente es distinta, el sistema evolucionará contrarrestando esta diferencia de velocidades mediante un transporte de cantidad de movimiento, el cual predomina en operaciones de transporte de fluidos (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2005).

### 2.2.1 Transporte de fluidos

Un **fluido** es un conjunto de partículas que se mantienen unidas entre sí, por fuerzas cohesivas débiles, y las paredes de un recipiente. También se define como una sustancia que no resiste de manera permanente la deformación causada por una fuerza, y, por tanto, cambia de forma (Geankoplis, 1993).

En la industria de procesos, se trabaja con muchos tipos de **fluidos**, los cuales deben **almacenarse, manejarse, bombearse y procesarse**, esto constituye el transporte de fluidos (Geankoplis, 1993).

Entre las muchas propiedades consideradas para diseñar un sistema de transporte de fluidos están: Densidad, peso específico, volumen específico, viscosidad, presión, compresibilidad, dilatación térmica, etc. (Geankoplis, 1993).

#### Equipo usado para el transporte de fluidos

Por lo general los fluidos se transportan en **tuberías o tubos**, los cuales pueden variar en tamaño, espesor y materiales como aleaciones, cerámica, vidrio y plástico. Las paredes de las tuberías generalmente son rugosas, mientras que las paredes de los tubos son lisas. Por ejemplo, los tubos de cloruro de polivinilo (PVC), como el que se muestra en la **Figura 39**, es ampliamente usado como tubería en las conducciones de aguas residuales (McCabe, 2007).



*Figura 39. Tubos de cloruro de polivinilo*

En la elaboración de tuberías y elementos estructurales como varillas, el material más común es el acero de bajo contenido de carbono, con el cual se fabrica la llamada tubería de hierro negro, como la que se muestra en la **Figura 40** (McCabe, 2007). Este tipo de

tubería es ampliamente utilizada para transportar gases como el propano y gas natural (DMH United Steel Industry, 2018).

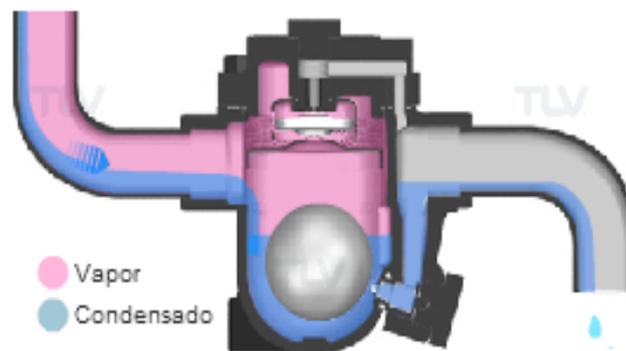


*Figura 40. Tubería de hierro negro*

Los métodos utilizados para unir tubos y tuberías dependen del espesor de la pared: aquellos de pared gruesa se conectan generalmente por accesorios de rosca, collarines o soldadura; mientras que los de pared delgada se unen por soldadura o compresión (McCabe, 2007).

Un dispositivo típico de los sistemas de tuberías de cualquier planta de procesamiento son las **válvulas**, cuyo objetivo es **permitir o impedir el paso de un fluido**. Algunas están diseñadas para suprimir o reducir la presión y velocidad de un fluido y otras que solo permiten el flujo en una dirección o bajo ciertas condiciones de temperatura y presión (McCabe, 2007).

Una **trampa de vapor**, por ejemplo, permite al vapor de agua y a un gas inerte pasar a través de ella mientras que retiene vapor, para luego descargar el condensado, como se observa en la **Figura 41** (McCabe, 2007).



*Figura 41. Trampa de vapor*

Los equipos usados para transportar fluidos a través de tubos y tuberías son las **bombas**, las cuales incrementan la energía mecánica del fluido aumentando su presión, velocidad o elevación. Los dos tipos de bombas más utilizadas son la **bomba de desplazamiento positivo** y la **bomba centrífuga** (ver **Figura 42**) (McCabe, 2007).

En una bomba centrífuga, el fluido entra por el aspirador, es dirigido al exterior a través de álabes y expulsado gracias a la acción de la fuerza centrífuga.

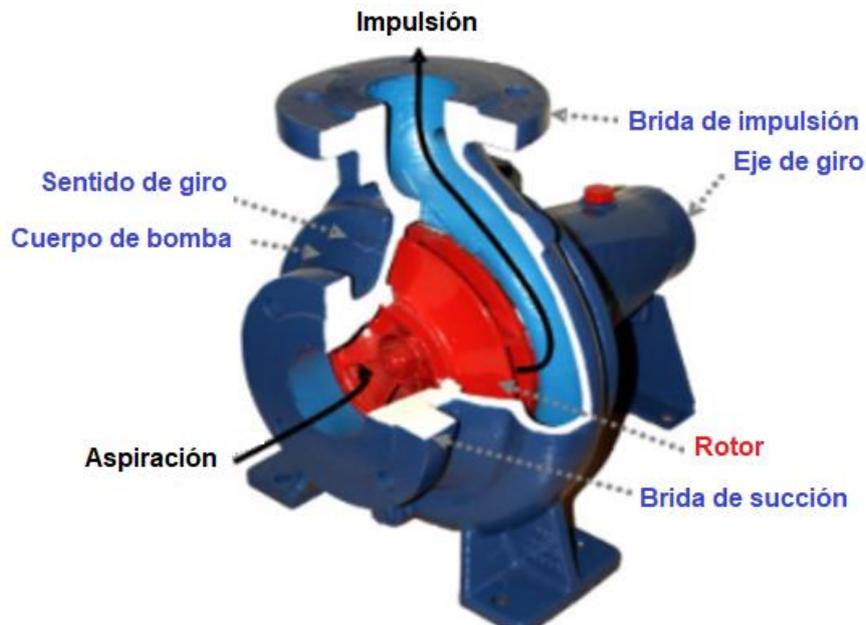


Figura 42. Bomba centrífuga

## 2.2.2 Transporte hidráulico en medios líquidos

Algunas veces los sólidos en pasta se manejan con métodos similares a los de transporte de líquidos y gases, al ser suspendidos en un líquido para formar un lodo o suspensión bombeable (McCabe, 2007).

Es más económico transportar fluidos que sólidos, y siempre que es posible los materiales son transportados como fluidos. En los procesos industriales, los fluidos casi siempre se transportan por gravedad a través de canales cerrados, ya sea de sección transversal cuadrada, rectangular o circular (McCabe, 2007).

En aplicaciones industriales previas al secado, el transporte hidráulico es una operación ampliamente utilizada debido a las ventajas que presenta comparado con otros medios de transporte como: el ferrocarril, camiones o bandas transportadoras. Dentro de estas ventajas están las siguientes:

- Simplicidad de la instalación
- El transporte puede ser en forma vertical, horizontal o inclinada
- Proporciona un flujo continuo de sólidos
- Tiene un bajo consumo de energía
- No produce daño al medio ambiente, pues evita que se construyan caminos o vías férreas para otros tipos de transporte

Además, para que el transporte hidráulico resulte factible, el sólido debe poder mezclarse y separarse fácilmente y no debe haber ninguna interacción entre las partículas que pueda provocar una aglomeración de ellas y aumentar el riesgo de obstruir la tubería. Además, el sólido a transportar no debe reaccionar con el líquido ni con la tubería.

Dependiendo de la topografía y el desnivel entre el punto de alimentación y de descarga de la tubería, se pueden usar dos tipos de fuerza impulsora para mover la suspensión:

### a. Gravitacional:

La fuerza impulsora es la gravedad, como se muestra en la **Figura 43**.

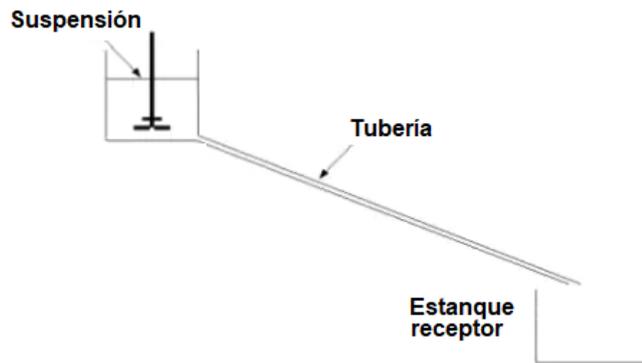


Figura 43. Transporte hidráulico gravitacional. Adaptado de (Bernedo, 2019)

Este método es usado en la industria para el transporte de relaves y pulpas,<sup>2</sup> como se observa en la **Figura 44**.



Figura 44. Conducción gravitacional de relaves y pulpas (EIC Ingenieros Consultores, 2015).

#### b. Por bombeo

Dependiendo hacia dónde se deba transportar la suspensión y las características de la superficie, se hace uso de bombas para transportar el fluido a su destino, como se muestra en la **Figura 45** (Ferreira, Masip, Barcelos, Yanes, & Vilalta, 2017).

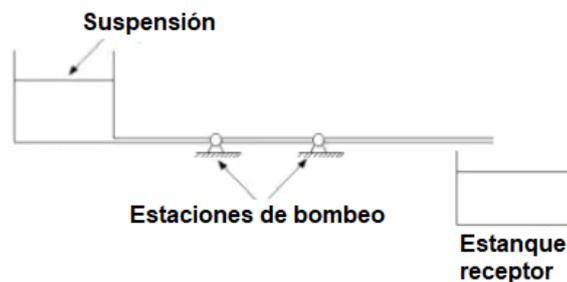


Figura 45. Transporte hidráulico por bombeo. Adaptado de (Bernedo, 2019)

Algunas aplicaciones del transporte hidráulico son:

- En yacimientos de arena y grava
- Extracción hidráulica y mecánica en minería
- Construcción de diques
- Transporte de lodo de caolín con un 20-25% en volumen de sólidos
- Conducción de mezclas de carbón, pirita y agua con un 10% en volumen de sólidos

<sup>2</sup> Colocar qué son relaves y pulpas

## 2.2.3 Transporte de sólidos fluidificados (neumático)

Normalmente este tipo de transporte se usa para **sólidos en polvo** aprovechando la posibilidad de tratar el material sólido como un fluido, haciendo que el aire fluya gracias a una diferencia de presión entre el inicio y fin de una tubería (Neidigh, 1966).

Algunos de los equipos necesarios para formar un sistema de transporte neumático son (para más información consultar *Sistemas de transporte neumático y componentes para el manejo de materiales a granel*<sup>3</sup>):

- Alimentador
- Bombas
- Mezcla aire sólido
- Tubería
- Válvulas
- Separador aire- sólido
- Recipiente receptor
- Colector de polvos
- Válvulas de alivio

En la **Figura 46** se muestra un sistema de transporte neumático, cuya ventaja es que evita pérdidas y contaminación de material, comienza con la llegada de material en polvo de la tolva sobre vagón de tren (izquierda), con la bomba de vacío se impulsa el material hacia la tolva receptora la cual separa el polvo del aire, el aire limpio se dirige a la bomba de vacío mientras que el polvo (rojo) cae a la tolva intermedia para dosificar el material y posteriormente el polvo llega al silo, el cual también tiene un colector de polvos para aliviar la presión de entrada de material y liberar aire limpio, en el silo se observan dos detectores de nivel para controlar el llenado y una válvula para permitir o bloquear la salida de material en la parte inferior. La bomba de vacío tiene otro filtro antes de la llegada para asegurar la entrada de aire limpio.

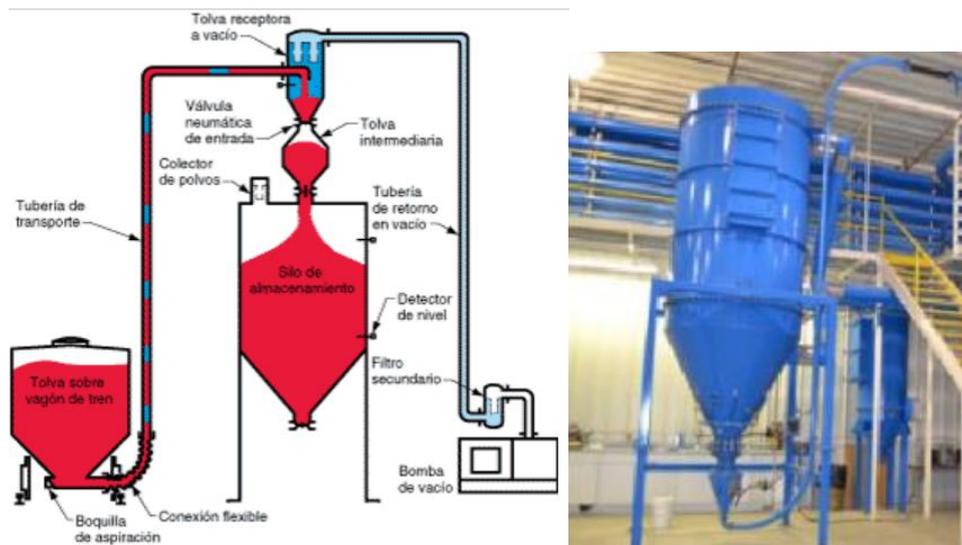


Figura 46. Izquierda: Esquema de sistema de transporte neumático desde ferro tolva a silo (Dynamic Air Conveying Systems, 2022). Derecha: Silo con válvula y tolva de alimentación a línea (Aspiradores industriales, 2018).

<sup>3</sup> *Sistemas de transporte neumático y componentes para el manejo de materiales a granel. Coperion K-tron* <https://docplayer.es/186958431-Sistemas-de-transporte-neumatico-y-componentes-para-el-manejo-de-materiales-a-granel.html>

## 2.2.4 Transporte de productos y materiales

El transporte de productos sólidos en la industria involucra el movimiento de los materiales, ya sea:

- Del punto de suministro de materia prima al inicio del proceso
- Entre dos puntos del proceso
- Del punto final del proceso hacia el lugar de almacenamiento
- Del lugar de almacenamiento a la línea de empaque y distribución

### Equipo para transporte de sólidos

**Vehículos industriales:** Son vehículos motorizados o manuales que se utilizan para el movimiento de cargas mixtas o uniformes, intermitentemente, a lo largo de diferentes trayectorias con el objetivo de apilar materiales. Ejemplo de ello son las carretillas y montacargas como los mostrados en la **Figura 47** (Biasca, 1997).



*Figura 47. Carretillas para transporte de sólidos a distancias cortas*

**Grúas:** Son dispositivos utilizados para mover cargas variadas dentro de un área determinada, por medio de rieles de guía y soporte. Ejemplo de ello son las grúas puente, en donde un carrito se desplaza perpendicularmente a los rieles, transportando el material entre ellos. Este tipo de transporte (**Figura 48**) es usado para recipientes con materiales muy pesados en distancias cortas (Biasca, 1997).



*Figura 48. Grúa puente*

**Transportadores:** Son dispositivos guiados por gravedad o fuerza de origen electromecánico para mover cargas uniformes de forma continua de un punto a otro. Algunos ejemplos son (Biasca, 1997):

- b) Transportadores por gravedad:** Los materiales se mueven por efecto de la gravedad y siempre que es posible se utiliza este método en una planta industrial. Una modalidad de este tipo de transporte son los **planos inclinados**, los cuales pueden ser rectos o en espiral, como se observa en la **Figura 49**:



Figura 49. Transportadores por gravedad de a) Plano inclinado y b) Espiral

- c) **Tornillo o rosca sin fin:** Es un eje de acero sobre el cual se desarrolla una espiral que gira dentro de un canal y se usa para el movimiento de materiales abrasivos y no abrasivos, secos y fluidizados, corrosivos o que pueden dañarse o quebrarse fácilmente. En la **Figura 50** se muestran los componentes que forman un transportador de tornillo sin fin y en la **Figura 51** un esquema de su funcionamiento:

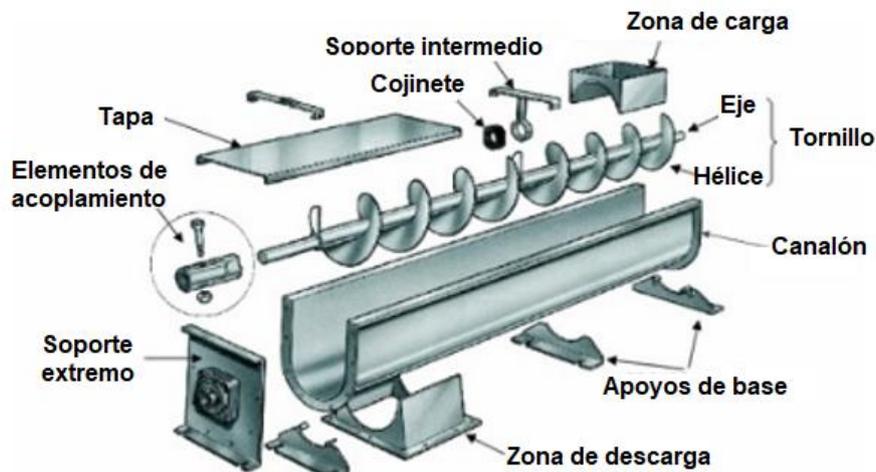


Figura 50. Elementos de un transportador de tornillo sin fin

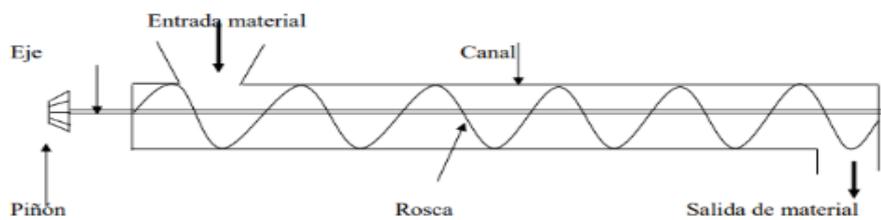


Figura 51. Esquema de funcionamiento de un tornillo sin fin

- d) **Cintas transportadoras:** Son bandas que cuentan dos poleas en cada extremo y con rodillos debajo de ellas que les sirven como apoyo para soportar el peso del material a transportar y para su retorno. Los materiales de dichas bandas pueden ser de tela, cuero, material sintético, entre otros. En la **Figura 52** se muestra un esquema de su funcionamiento:

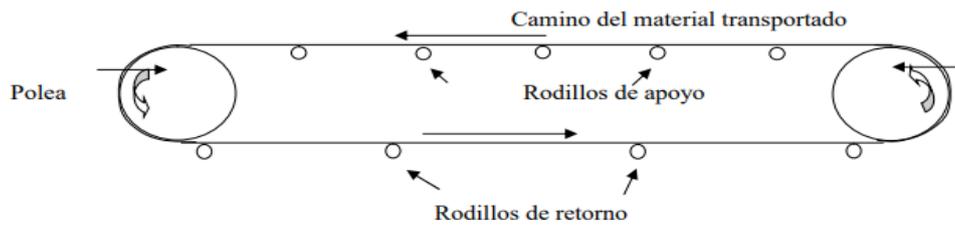


Figura 52. Funcionamiento de una cinta transportadora (Transporte de sólidos, 2015).

El uso de las cintas transportadoras en la industria es muy variado, pues se usa para transportar sólidos en trozos como: alimentos, minerales, cereales, entre muchos otros, así como cajas con producto terminado para su almacén o distribución, como se muestra en la **Figura 53**.

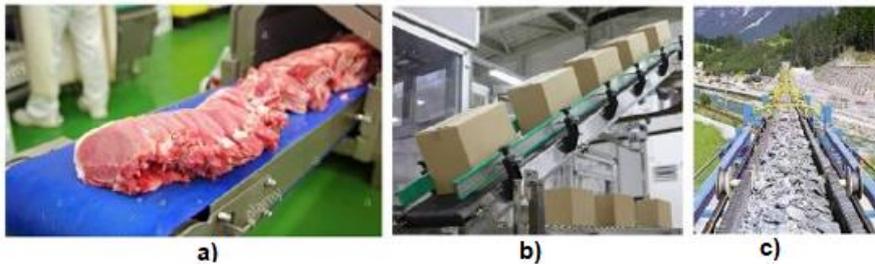


Figura 53. Uso de cintas transportadoras para a) Alimentos, b) Cajas con producto terminado y c) Sólidos grandes y pesados

- e) Elevador de cangilones:** Es una combinación de transporte por cintas y gravedad, pues consiste en una cadena o cinta puesta de forma vertical o inclinada con poleas en sus extremos. A dicha cinta van unidos cangilones (baldes o recipientes) separados uniformemente que recogen el material a transportar en la parte inferior de la cinta (cuando el balde está invertido), giran y posteriormente ascienden a través de la cinta hasta la parte superior para descargar el material.

Los elevadores de cangilones como el de la **Figura 54** son muy utilizados en industrias donde se maneja material a granel, como la industria alimenticia, química, metalúrgica y de construcción.



Figura 54. Elevador de cangilones

## 2.3 Mezclado y agitación

Muchas operaciones industriales dependen de la efectiva agitación y mezclado de fluidos, sin embargo, estos términos no son sinónimos: la **mezcla** es una distribución aleatoria de dos o más fases que inicialmente estaban separadas mientras que la **agitación** es el movimiento inducido de un material, normalmente de forma circular dentro de un contenedor (McCabe, 2007).

Algunos propósitos de la agitación y mezclado son (McCabe, 2007):

- Suspensión de partículas sólidas
- Mezclado de líquidos miscibles
- Dispersión de un gas a través de un líquido en forma de burbujas
- Dispersión de un segundo líquido, inmiscible para el primero, para formar una emulsión o suspensión de gotas finas
- Promoción de la transferencia de calor entre un líquido y un serpentín o enchaquetado

### Tipos de mezclado

Las mezclas se dan entre las diferentes combinaciones posibles de los estados o fases (sólido, líquido y gas), como puedes observar en la siguiente tabla:

Tabla 4. Tipos de mezclado (Portal Académico CCH, 2017).

| Estados de las sustancias en la mezcla | Ejemplo  |
|--|--|
| Gas-gas                                | Aire (mezcla de gases, principalmente de nitrógeno, oxígeno y argón)                           |
| Gas-líquido                            | Niebla (Mezcla de aire con vapor de agua)  |
| Gas-sólido                             | Humo (mezcla de aire con partículas sólidas producto de una combustión incompleta)             |
| Líquido-gas                            | Bebidas gaseosas (dióxido de carbono disuelto en agua)   |
| Líquido-líquido                        | Vinagre (contiene ácido acético en agua)   |
| Líquido-sólido                         | Agua del mar (contiene sales disueltas en el agua, principalmente cloruro de sodio con un 77%) |
| Sólido-gas                             | Maíz palomero (vapor de agua disuelto en almidón)  |
| Sólido-líquido                         | Amalgama dental (mercurio disuelto en plata)   |
| Sólido-sólido                          | Latón (disolución de cinc en cobre)  |

## Clasificación de las mezclas

Podemos clasificar a las mezclas en homogéneas y heterogéneas:

### Mezclas homogéneas

Para dos sustancias A y B, existen fuerzas intermoleculares iguales (A-A y B-B) y desiguales (A-B). Si las fuerzas intermoleculares A-B son mayores, menores o aproximadamente iguales a las de A-A y B-B se producirá una mezcla homogénea. Existen tres tipos de dicha mezcla (Portal Académico CCH, 2017):

#### 1. Disoluciones

Se producen cuando las fuerzas intermoleculares desiguales (A-B) son aproximadamente iguales a las fuerzas entre moléculas iguales (A-A y B-B). En la **Figura 55** se muestra un modelo de disolución ideal, en el cual, las moléculas A y B se encuentran en completo desorden:

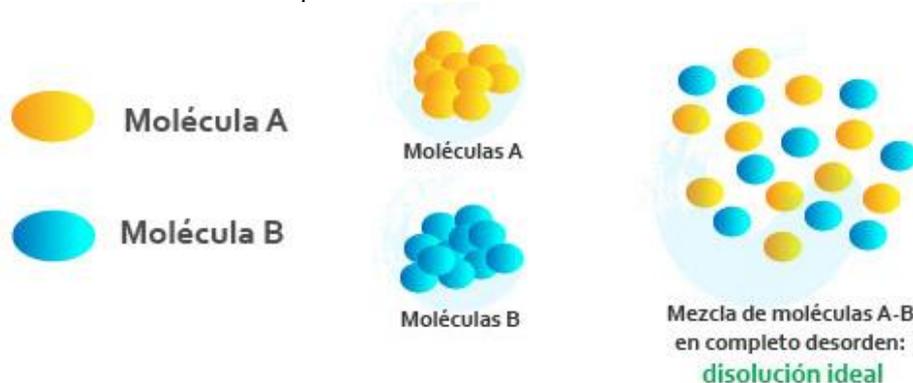


Figura 55. Modelo de una disolución ideal (Portal Académico CCH, 2017).

El tamaño de las partículas de los componentes de una disolución es menores a un nanómetro, es por ello que tienen un aspecto homogéneo. El componente que se encuentra en mayor cantidad recibe el nombre de **disolvente**, mientras que aquel que se encuentra en menor cantidad se denomina **soluto**.

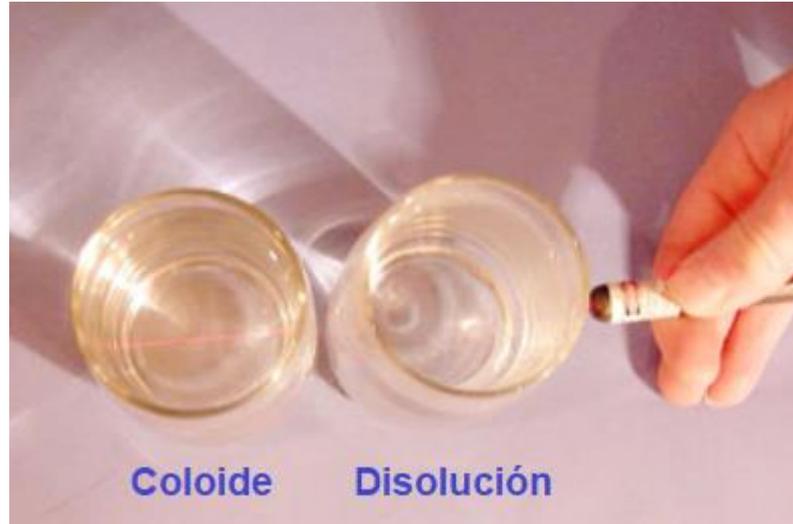
Una disolución puede presentarse en **estado gaseoso**, como el aire, que es una mezcla de nitrógeno (78%), oxígeno (21%) y otros gases como dióxido de carbono, argón, kriptón y vapor de agua. También existen **disoluciones en estado líquido o acuosas**, como las bebidas carbonatadas (dióxido de carbono disuelto en agua). En las **disoluciones sólidas** el disolvente y el soluto son sustancias sólidas, por ejemplo, algunas aleaciones como el acero (Sosa, 2007). Como se observa en la **Figura 56**:



Figura 56. Disoluciones a) Acuosa y b) Sólida

## 2. Coloides

Son mezclas a escala microscópica donde las partículas de una o más sustancias se dispersan (fase dispersa) en otra sustancia llamada medio dispersor o fase dispersante. En un coloide, las partículas son suficientemente grandes para dispersar la luz (efecto Tyndall) y demasiado pequeñas para precipitar, como se observa en la **Figura 57**, pues su tamaño es mayor a un nanómetro y menor a un micrómetro. De esta forma podemos distinguir entre un coloide y una disolución (Sosa, 2007).



*Figura 57. Diferencia entre un coloide y una disolución.  
Adaptado de (Portal Académico CCH, 2017).*

En la **Tabla 5** se muestran algunos ejemplos de coloides:

*Tabla 5. Ejemplos de coloides y fases involucradas. Adaptado de (Sosa, 2007).*

| Coloide       |    |                  | Ejemplo           |
|---------------|----|------------------|-------------------|
| Fase dispersa |    | Fase dispersante |                   |
| Líquido       | en | Gas              | Niebla            |
| Sólido        |    |                  | Humo              |
| Gas           | en | Líquido          | Crema batida      |
| Líquido       |    |                  | Leche             |
| Sólido        |    |                  | Pinturas de látex |
| Gas           | en | Sólido           | Hule espuma       |
| Líquido       |    |                  | Gelatina          |
| Sólido        |    |                  | Rubí              |

## 3. Suspensiones

Son mezclas homogéneas a escala macroscópica, pues las partículas, al tener un tamaño superior a un micrómetro, se observan a simple vista. En este tipo de mezcla, la fase dispersa permanece suspendida en la fase dispersora durante un tiempo determinado, para después sedimentar, es decir, al agitarse se convierten en una mezcla homogénea. Ejemplo de ello son algunos medicamentos como antibióticos en suspensión como el mostrado en la **Figura 58** (Portal Académico CCH, 2017).



Figura 58. Ejemplo de suspensión

## Mezclas heterogéneas

Una mezcla heterogénea se produce cuando las fuerzas intermoleculares A-B de una sustancia A y una sustancia B son mucho menores a las fuerzas A-A y B-B, como se muestra en la **Figura 59**. Una mezcla heterogénea no puede ser representada por una fórmula química, pues cada sustancia conserva sus propiedades y por lo tanto no tiene una apariencia uniforme y sus componentes se separan por medios físicos (Portal Académico CCH, 2017).



Figura 59. Modelo de una mezcla heterogénea (Portal Académico CCH, 2017).

## Equipos para agitación y mezclado

Los agitadores utilizados para cada tipo de operación de mezclado son los siguientes:

### a) Mezclado gas-líquido

A la mezcla de gas líquido se le llama dispersión, y se trata del mezclado de un gas en un líquido, en forma de pequeñas burbujas, las cuales se unen y se redispersan constantemente. En las dispersiones gas-líquido, las burbujas ascienden a través de la masa global del líquido, escapan por la superficie y posteriormente deben reemplazarse por otras nuevas (McCabe, 2007).

Las turbinas de palas rectas y de disco como las que se observan en la **Figura 60** son especialmente útiles para las operaciones de dispersión gas-líquido (McCabe, 2007).



a) Turbina de palas rectas

b) Turbina de disco

Figura 60. Turbina de palas rectas y de disco para mezclado gas-líquido

b) *Mezclado gas-sólido*

Consiste en la fluidificación de polvos con aire, en donde el objetivo es homogeneizar las fases involucradas. En esta operación se utilizan agitadores de elemento helicoidal como el mostrado en la **Figura 62**. Sus principales aplicaciones son en procesos de fabricación de leche en polvo, cacao en polvo, especias, etc. (Bachiller, 2020).

c) *Mezclado líquido-líquido*

La emulsión es la dispersión de un líquido con un segundo líquido inmisible, para formar una emulsión o suspensión de pequeñas gotas. En la dispersión líquido-líquido, la retención del volumen de la fase dispersa en la masa del líquido depende de la velocidad de las gotas dispersas (McCabe, 2007).

Los agitadores para esta operación son de flujo radial y consisten en un disco circular con una gran cantidad de dientes en su circunferencia (**Figura 61**). Son adecuados en operaciones donde se requiere formar emulsiones.



Figura 61. Agitador de flujo radial para mezclado líquido-líquido

d) *Mezclado líquido-sólido*

Una suspensión se refiere a la mezcla de partículas sólidas en un líquido, con el objetivo de producir mezclas homogéneas para la alimentación a una unidad de

proceso, para disolver los sólidos, catalizar una reacción química o para promover el crecimiento de un producto cristalino en una solución sobresaturada (McCabe, 2007). Los agitadores más utilizados para esta operación son el de **elemento helicoidal y de anclaje**, que se observan en la **Figura 62**, usados principalmente con líquidos altamente viscosos y pastas (McCabe, 2007).



*Figura 62. Agitadores para mezclas de alta viscosidad (TIMSA-Técnica e Ingeniería de Mezclas, 2022).*

*e) Mezclado sólido-sólido*

Es una mezcla de polvos en la que intervienen dos o más componentes para formar un producto semi uniforme. Además, el producto consta de dos o más fases fácilmente identificables que pueden tener partículas de tamaño considerable (McCabe, 2007).

La mezcla se realiza por agitación de la masa a baja velocidad con un agitador de elemento helicoidal, como el de la **Figura 62** (McCabe, 2007).

*f) Mezclado de componentes*

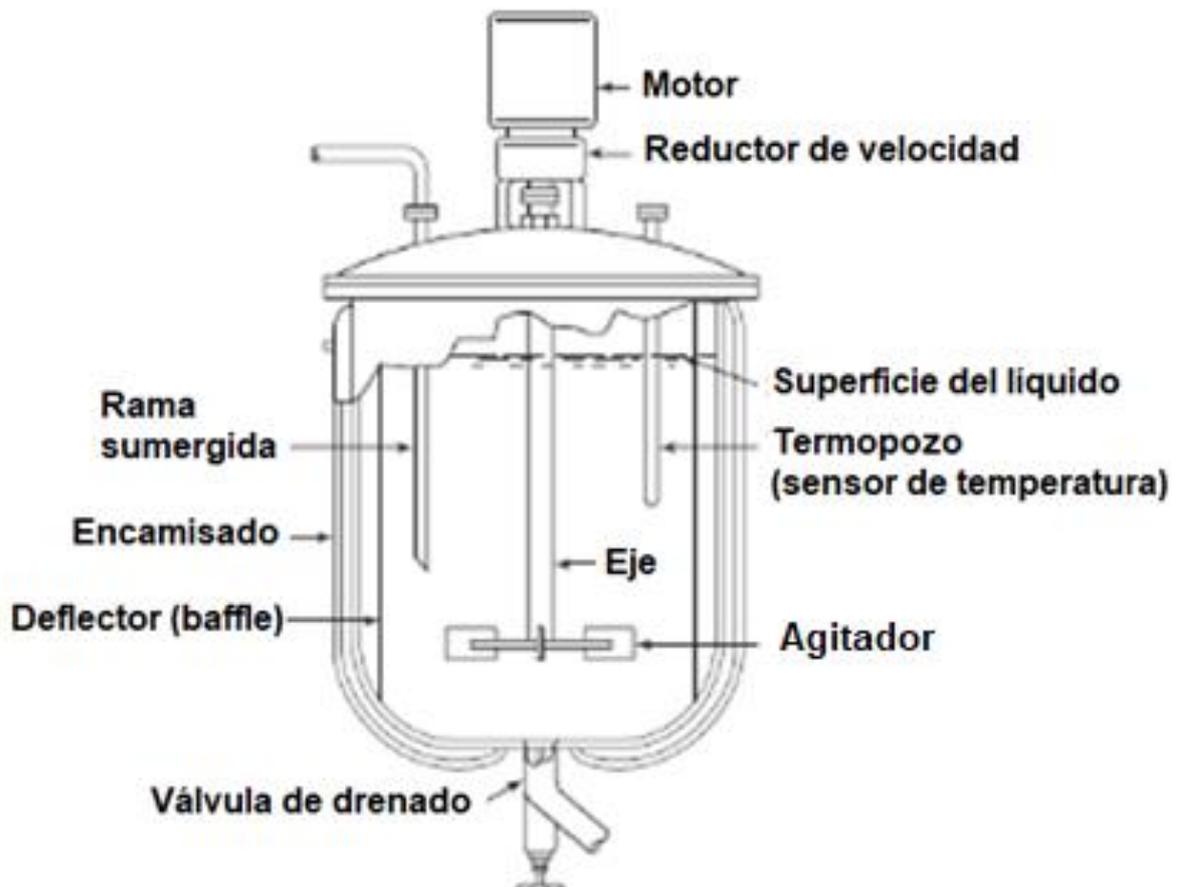
Las turbinas de palas inclinadas como el de la **Figura 63** son los agitadores usados para este tipo de mezclado, en el que intervienen productos de viscosidad baja (TIMSA-Técnica e Ingeniería de Mezclas, 2022).



*Figura 63. Turbina de palas inclinadas para mezclado de componentes (TIMSA-Técnica e Ingeniería de Mezclas, 2022).*

## Tanques agitados

Los equipos más comunes para realizar mezclado son los **tanques agitados**, recipientes de forma cilíndrica provistos de un eje vertical, cuya parte superior está abierta o cerrada. Dependiendo de los ingredientes a mezclar, varían las proporciones de cada tanque, sin embargo, en la mayoría de los casos se usa un tanque estándar, como el que se muestra en la **Figura 64** (McCabe, 2007).



*Figura 64. Tanque para agitación. Adaptado de (McCabe, 2007).*

El fondo del tanque es redondo, no plano, para evitar las esquinas o zonas donde no penetran las corrientes de fluido, y la profundidad del líquido es casi igual al diámetro del tanque. El agitador va instalado sobre un eje suspendido en la parte superior, el cual es accionado por un motor conectado a veces directamente al eje (McCabe, 2007), así provoca que el líquido circule a través del tanque él mismo.

Este tipo de tanque generalmente lleva otros accesorios incorporados como líneas de entrada y salida, serpentines, equipos de medición de temperatura, deflectores para reducir el movimiento tangencial (formación de vórtices), entre otros (McCabe, 2007).

## Molinos coloidales

Para mezclas líquido-líquido también suelen usarse molinos coloidales (**Figura 65**), por ejemplo, para mezclar benceno en un líquido no miscible como el agua y formar emulsiones estables de gotas muy pequeñas (McCabe, 2007). Estos molinos tienen aplicaciones en procesos de fabricación de cremas, salsas, concentrados, chocolate, espumas de afeitar, bloqueadores solares, entre otros (Bachiller, 2020).

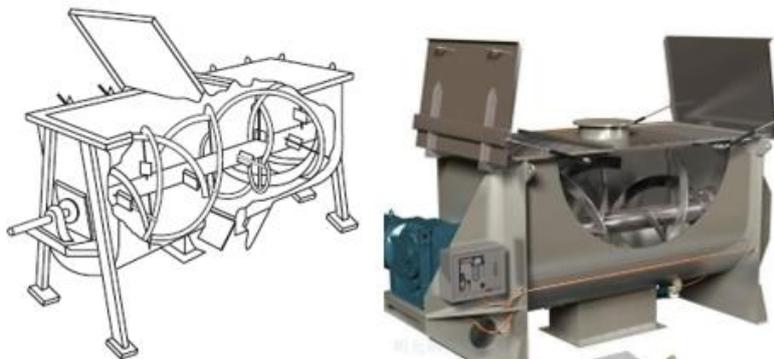


*Figura 65. Molino coloidal para dispersiones líquido-líquido (Bachiller, 2020).*

### **Mezclador de tornillo interno (tornillo sinfín)**

En las operaciones de mezcla sólido-sólido se usa el mezclador de tornillo interno, el cual consiste en un tanque horizontal con un agitador de elemento helicoidal en su interior que a su vez eleva y hace circular el material. Este equipo se muestra en la **Figura 66** (McCabe, 2007).

Ejemplos de aplicación: mezclado de concentrados alimenticios, ingredientes de panadería, cereales secos, polvos para comprimidos (industria farmacéutica), pigmentos, tintas y detergentes (industria química), entre otros (Pack-EU, 2022).

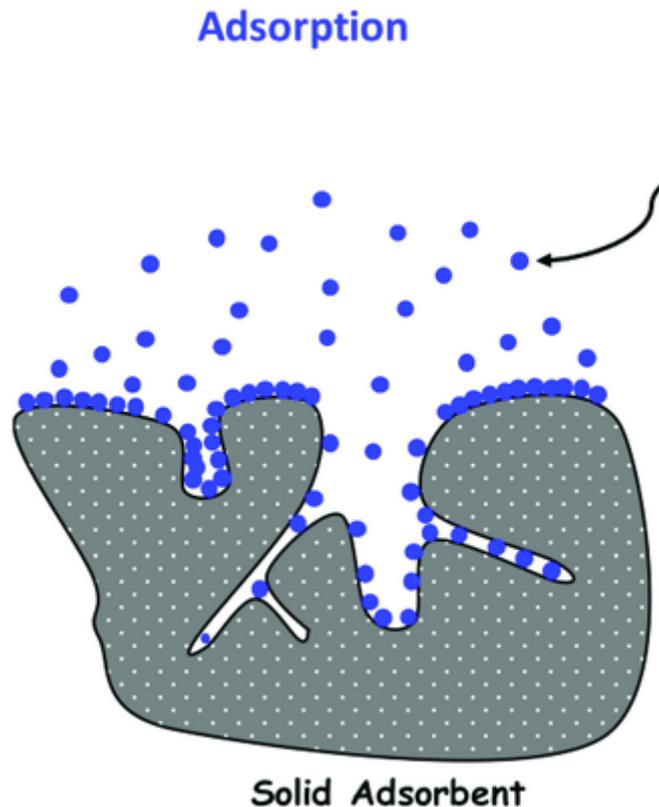


*Figura 66. Mezclador de tornillo interno para sólidos*

## 2.4 Adsorción

Consiste en la **eliminación de algunos componentes de una fase fluida mediante un sólido que lo retiene**, es decir, las moléculas, átomos o iones adsorbidos están confinados en la superficie de los poros del sólido, unidos por fuerzas de Van der Waals o enlaces químicos, como se observa en la **Figura 67** (Marcilla, 1998).

En esta operación el sólido adsorbente rellena normalmente el interior de una columna formando un lecho fijo, y a medida que circula el gas o el líquido que contiene el soluto a adsorber, se va saturando el sólido adsorbente, por lo que después de un tiempo se debe regenerar (Marcilla, 1998).



*Figura 67. Adsorción*

Las operaciones de adsorción son complejas, por lo que se pueden identificar diferentes tipos:

**Adsorción física:** Se da por fuerzas débiles y no específicas, y es la condensación de gases en sólidos a temperaturas por encima del punto de condensación (Granger, 1950).

**Adsorción química:** El adsorbato modifica su estructura y reacciona químicamente con la superficie, produciendo enlaces químicos definidos entre los átomos o moléculas en la superficie del sólido y los átomos o moléculas adsorbidos. Es más lenta que la adsorción física y es de carácter irreversible (Granger, 1950).

La operación contraria a la adsorción se llama **desorción**, la cual se realiza para regenerar el lecho sólido saturado de soluto o para recuperar el soluto adsorbido (Marcilla, 1998).

En la **Figura 68** se muestra con flechas azules la operación de adsorción de gases, la cual inicia con el llenado de poros del sólido adsorbente (1), que provoca la formación de una capa del soluto adsorbido (2). Dependiendo del área superficial del adsorbente, sus poros se llenarán continuamente (3) hasta cubrir el área por completo (4). La operación contraria (desorción) está marcada con flechas rojas.

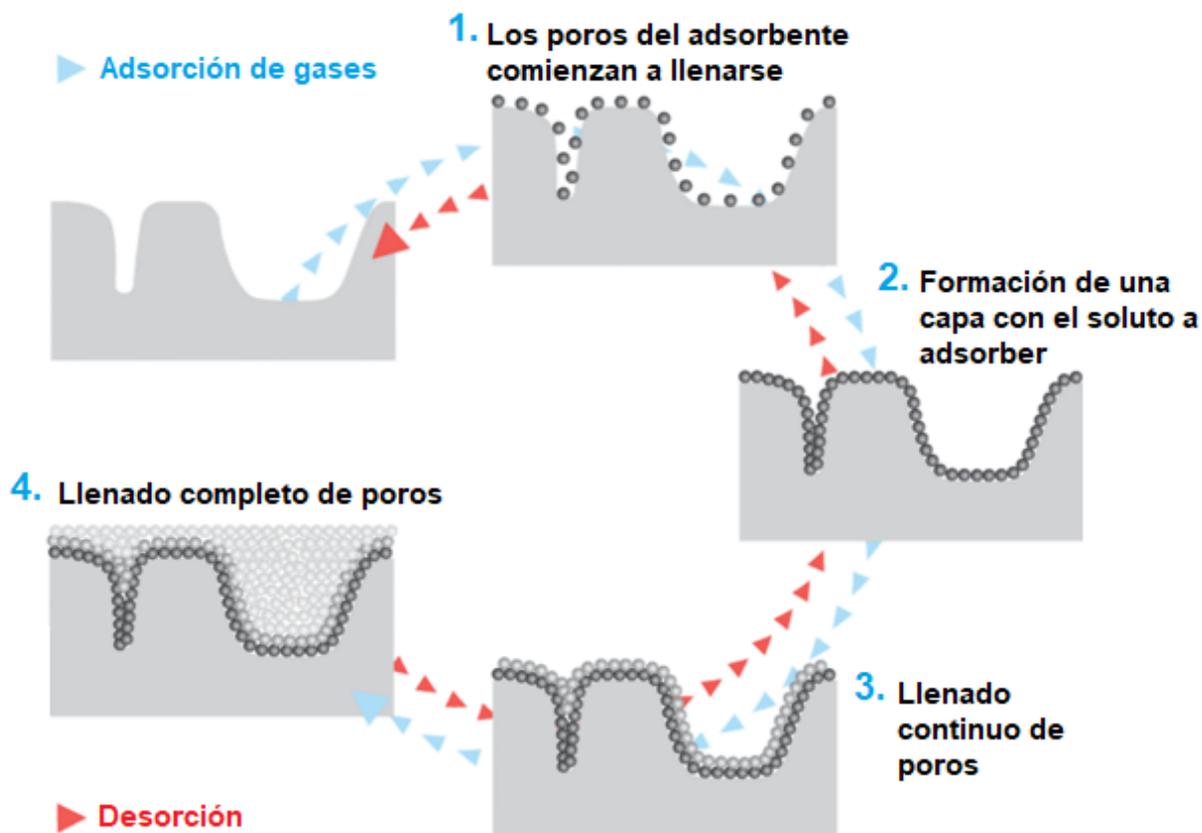


Figura 68. Adsorción y desorción de gases. Adaptado de (Nanobusiness. Información e innovación, 2020).

Se consideran adsorbentes o sólidos con un área superficial elevada los mencionados a continuación:

a) **Carbón activado.** Es un material microcristalino que se obtiene por la descomposición térmica de madera, cortezas vegetales y carbón. Tiene un área superficial de 300 a 1200 [ $m^2/g$ ] aproximadamente y un diámetro de poro promedio de 10 a 60 Å<sup>4</sup>. Los compuestos orgánicos generalmente son adsorbidos por carbón activado (Geankoplis, 1993).

Una aplicación importante es el uso de carbón activado para **remove contaminants a partir de desechos acuosos**. Los adsorbentes de carbón se usan para eliminar vestigios orgánicos de suministros de agua municipales, mejorando el sabor del agua y reduciendo la formación de compuestos tóxicos en la etapa de cloración (McCabe, 2007).

El carbón activado también es utilizado para adsorber metales como el oro. Las propiedades más importantes del carbón activado para la recuperación del oro son (Montenegro, 2011):

- Capacidad de adsorción del oro
- Velocidad de adsorción del oro
- Facilidad de elución
- Esfuerzo mecánico y resistencia al uso
- Características de reactivación y regeneración
- Distribución de tamaño de partícula

<sup>4</sup> Angstrom: Unidad de medida de distancias moleculares y atómicas, así como de longitudes de onda. Equivale a la diez mil millonésima parte de un metro ( $1 \times 10^{-10} m$ ).

**b) Gel de sílice.** Es una forma granular y porosa de dióxido de silicio hecho a partir de silicato sódico, teniendo una estructura dura y sólida. El término de gel se refiere a que durante su fabricación se forma un precipitado gelatinoso que se coagula, lava y seca para formar partículas sólidas (Aguilera, Ortiz, & Sánchez, 2013).

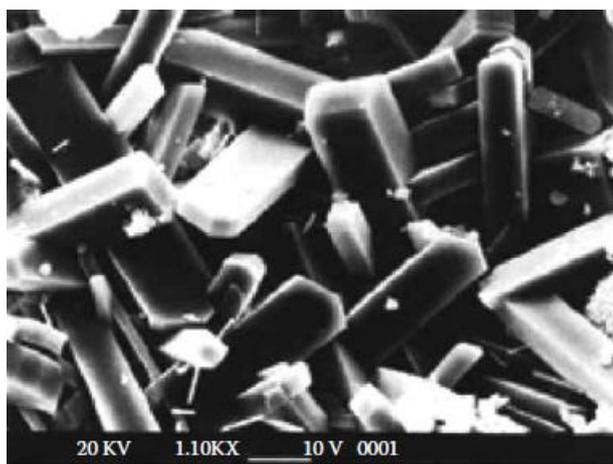
El gel de sílice es un adsorbente usado en el acondicionamiento del gas natural debido a su amplia área superficial que llega hasta los 800 [ $m^2/g$ ] aproximadamente (Aguilera, Ortiz, & Sánchez, 2013).

**c) Alúmina activada.** Se forma por medio de la deshidratación de hidróxido de aluminio ( $Al(OH)_3$ ) amorfo y es una mezcla de óxido de aluminio amorfo y cristalino. Se activa elevando su temperatura entre 400 y 500 °C en presencia de iones de metales alcalinos, lo que resulta en un material altamente poroso con un área superficial entre 50 a 300 [ $m^2/g$ ] (Hendricks, 2006).

Una de las aplicaciones de la alúmina activada es en la adsorción de gases y líquidos, ya que puede ser fácilmente utilizada en presencia de gases ácidos y alcalinos. Además, este adsorbente es preferido sobre el gel de sílice, ya que este último tiende a romperse en partículas más pequeñas en presencia de menor cantidad de agua (Aguilera, Ortiz, & Sánchez, 2013).

**d) Zeolitas.** Son minerales blandos con una baja resistencia a la abrasión. Además, tienen una estructura cristalina interna en forma de jaula con un canal central de tamaño uniforme, que puede llegar a tener varios cientos de metros cuadrados por gramo. Los poros de la zeolita varían en tamaño, pero tienen diámetros que van de 2.5 a 8 Å (Hendricks, 2006).

En la **Figura 69** se muestra una fotografía microscópica de la superficie del tipo de zeolita natural abundante en yacimientos mexicanos: la clinoptilolita, utilizada para tratar agua contaminada debido a su capacidad de adsorción de sustancias orgánicas e inorgánicas (Alvarado, Terán, Vargas, & Bautista, 2020).



*Figura 69. Vista en microscopio de la superficie del tipo de zeolita llamado clinoptilolita. (Hendricks, 2006)*

Las zeolitas naturales son utilizadas para la remoción de metales pesados en efluentes minero-metalúrgicos, en el drenaje ácido de minas y rocas, para la adsorción de vapores de mercurio en hornos de fundición de metales y en el tratamiento de suelos contaminados por radiación provenientes de centrales nucleares (Curi, Granda, Lima, & Sousa, 2006).

En la **Tabla 6** se muestran imágenes de los adsorbentes anteriormente mencionados y su respectiva área superficial.

*Tabla 6. Principales adsorbentes y su superficie efectiva. Adaptado de (Geankoplis, 1993), (Hendricks, 2006), (Aguilera, Ortiz, & Sánchez, 2013).*

|  |  |
|--|--|
| <p><b>Carbón activado</b><br/>300 - 1200 [<math>m^2/g</math>]</p>                          |    |
| <p><b>Gel de sílice</b><br/>hasta 800 [<math>m^2/g</math>]</p>                             |    |
| <p><b>Alúmina activada</b><br/>50 - 300 [<math>m^2/g</math>]</p>                           |   |
| <p><b>Zeolitas</b><br/>(Superficie activa muy variable dependiendo el tipo de zeolita)</p> |  |

### Equipos de adsorción

Uno de los equipos usados en las operaciones de adsorción es el **adsorbedor de lecho fijo**, comúnmente utilizados en la adsorción de vapores solventes. Las partículas de adsorbente se colocan en un lecho de 0.3 a 1.2 [m] de espesor soportado sobre un tamiz o placa perforada (McCabe, 2007).

Como puede observarse en la **Figura 70**, la alimentación en estado gaseoso (1) circula en sentido descendente a través de uno de los lechos mientras que el otro se encuentra en regeneración. El flujo descendente es preferible, ya que el flujo ascendente a velocidades elevadas provoca la fluidización de las partículas (McCabe, 2007).

Cuando la concentración de soluto en el gas que sale (2) alcanza cierto valor, se accionan automáticamente las válvulas con el fin de dirigir la alimentación al otro lecho e iniciar

la secuencia de regeneración, la cual puede realizarse con gas inerte caliente (3) pero generalmente se utiliza vapor de agua (4) (McCabe, 2007).

El vapor de agua se condensa en el lecho, aumentando la temperatura del sólido y suministrando la energía necesaria para la desorción. El solvente se condensa, se separa del agua (5) y se seca antes de su reutilización. Así, el lecho se enfría y se seca con un gas inerte (McCabe, 2007).

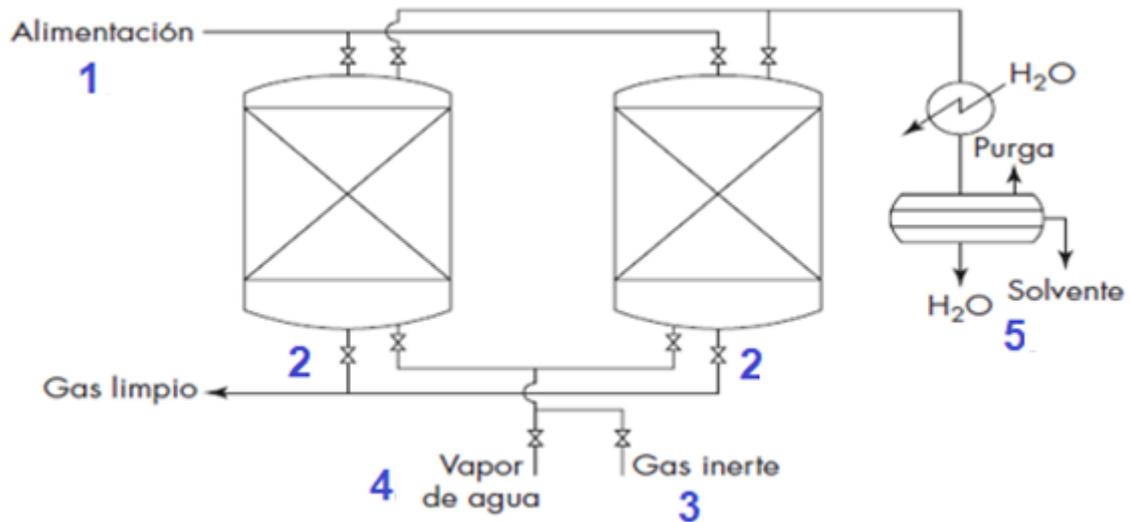


Figura 70. Sistema de adsorción de lecho fijo en fase de vapor. Adaptado de (McCabe, 2007)

En la **Figura 71** se puede observar un equipo de adsorción de lecho fijo:



Figura 71. Equipo de adsorción de lecho fijo

## Aplicaciones de la adsorción

### a) Cromatografía líquida en papel

Un ejemplo característico de la aplicación de adsorción es la **cromatografía**, un método de separación de una mezcla que se basa en la distinta adsorción de sus componentes sobre un sólido adsorbente o un líquido soportado por un sólido. Los componentes de la mezcla a separar quedan retenidos con mayor o menor facilidad y la adición de un eluyente<sup>5</sup> permite recuperar por separado los distintos componentes de la mezcla (Marcilla, 1998).

Las técnicas cromatográficas se clasifican de acuerdo con la naturaleza de la fase móvil: en la cromatografía líquida, la fase móvil es un líquido; en la cromatografía de gases, un gas (Schwartz, 2020). La cromatografía líquida en papel está compuesta por una fase estacionaria (la tira de papel) y una móvil (disolvente) como se observa en la **Figura 72** (Facultad de Química, UNAM, 2007).

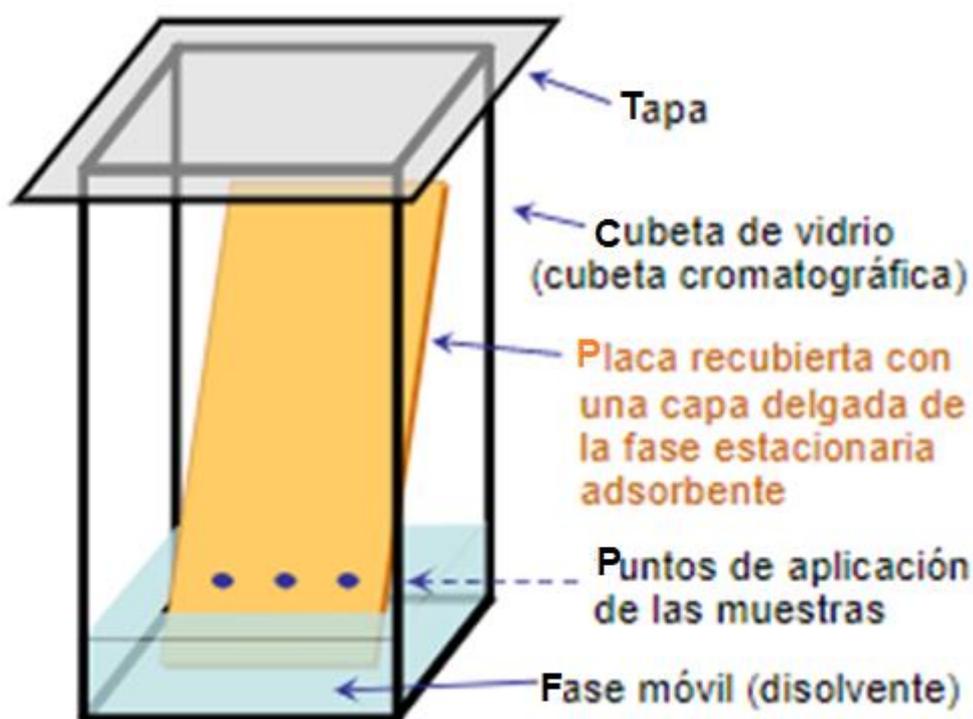


Figura 72. Cromatografía líquida

En la **Figura 73** se muestra un ejemplo de cromatografía en papel donde se realiza la separación de los pigmentos de una tinta, donde los componentes más afines a la fase estacionaria avanzan lentamente y son retenidos en la parte de abajo (color morado). Los componentes menos afines avanzan con mayor velocidad y son menos retenidos (color azul) (Facultad de Química, UNAM, 2007).

<sup>5</sup> Disolvente utilizado en cromatografía para extraer un componente que se quiere separar de otra fase.

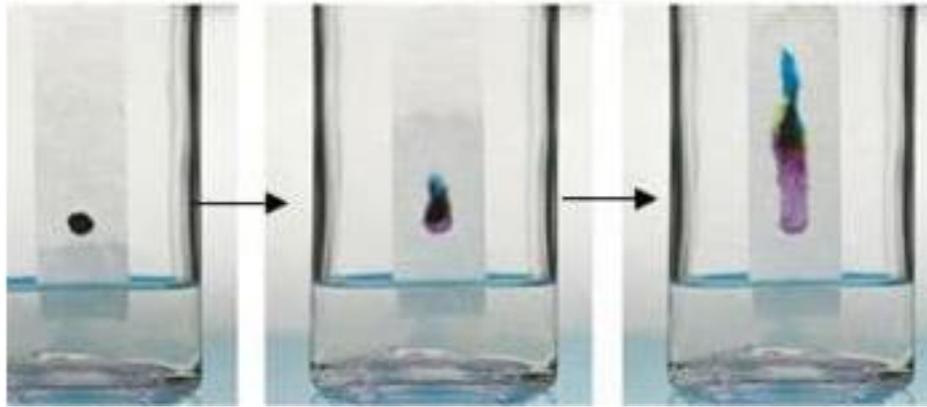


Figura 73. Aplicaciones de la adsorción: Cromatografía

La cromatografía de gases y líquida son técnicas utilizadas en los laboratorios para realizar diversos análisis donde se necesita separar los componentes químicos de una muestra, como en el análisis de residuos de explosivos para identificar las posibles fuentes o en las autopsias con muestras biológicas para determinar causas de muerte (Schwartz, 2020).

*b) Recuperación de oro por adsorción en carbón activado*

El proceso convencional para la adsorción de oro, que se muestra en la **Figura 74**, consta de una bomba que impulsa la solución cargada de oro a través del sistema de torres con carbón activado, las cuales adsorben el oro disuelto y liberan la solución empobrecida, que retorna nuevamente a la pila de material (Montenegro, 2011).

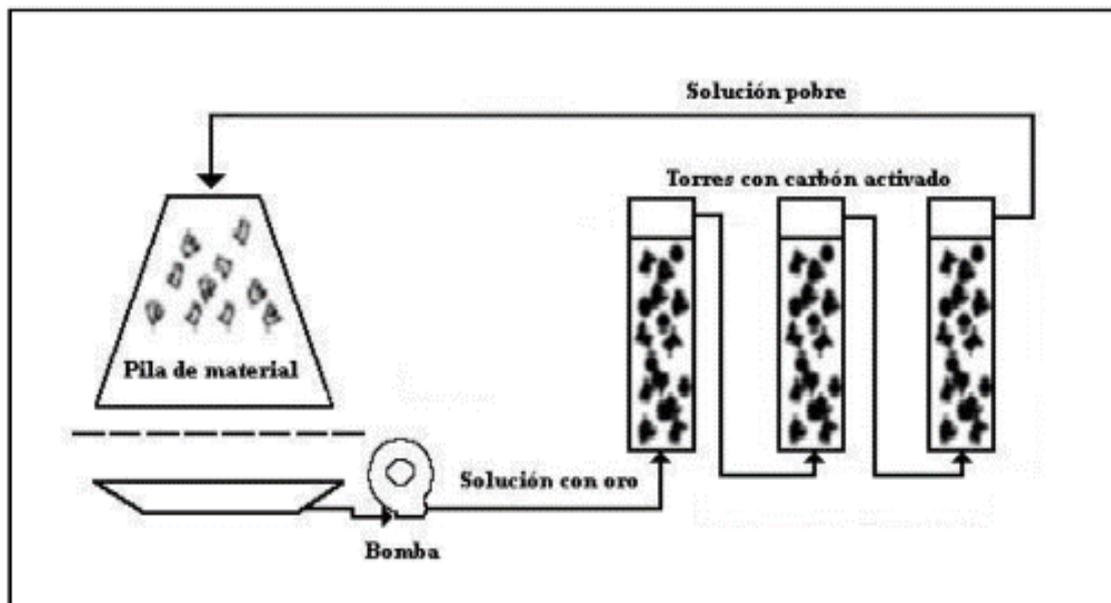


Figura 74. Diagrama de un sistema de adsorción de oro con carbón activado (Montenegro, 2011)

Con la operación de la desorción, se libera el oro adsorbido por el carbón activado variando las condiciones de presión y temperatura del sistema, como se muestra en la **Figura 75** (Montenegro, 2011).

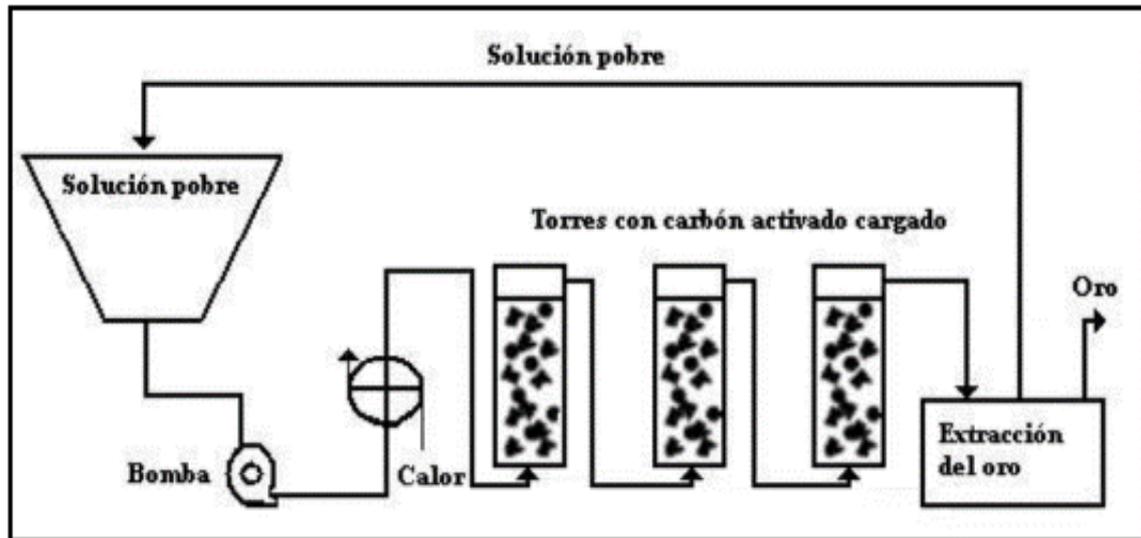


Figura 75. Diagrama de un sistema de desorción de oro con carbón activado (Montenegro, 2011).

c) Otras aplicaciones (McCabe, 2007):

- Para secar corrientes de gas por adsorción de su humedad sobre lecho de gel de sílice.
- Para eliminar olores de una corriente por adsorción sobre el carbón activo.
- Para decolorar líquidos.
- Para recuperar disolventes del aire ambiente evitando la contaminación por vapores orgánicos.
- Para la recuperación de solventes orgánicos utilizados en pinturas, tintas de imprenta y soluciones para formación de películas o recubrimientos de esmaltes.
- Para la separación de componentes orgánicos de aguas potables y residuales, impurezas coloreadas de soluciones de azúcar y aceites vegetales, así como agua de líquidos orgánicos.

## 2.5 Centrifugación

Es un método de separación donde partículas de diferente densidad contenidas en líquidos sedimentan por acción de una fuerza giratoria o centrífuga (McCabe, 2007).

Una partícula determinada sedimenta por acción de la gravedad en un fluido con una velocidad máxima constante, pero para aumentar dicha velocidad, la fuerza de gravedad que actúa sobre la partícula se sustituye por una fuerza centrífuga, la cual tiene mayor efectividad en operaciones que involucran partículas muy pequeñas o finas (McCabe, 2007).

### Nombres de la centrifugación según sus objetivos:

- a) **Purificación.** Cuando el objetivo de la separación de dos líquidos es obtener la fase ligera libre de la fase pesada. Ejemplo: en laboratorios para la eliminación de parásitos altamente patógenos como la *Eimeria tenella*, causante de infecciones intestinales en aves de corral (Qi, et al., 2020).
- b) **Concentración.** Cuando se requiere aislar la fase pesada libre de fase ligera. Ejemplo: en la separación de lactosa (azúcar de leche) y proteína de suero lácteo (Flottweg, 2022). También se usa en el proceso de descremado de leche, donde se separa el contenido graso (nata) para obtener leche desnatada (SPX Flow, 2015).
- c) **Clarificación.** Cuando en una separación sólido-líquido se pretende lograr un efluente puro libre de partículas sólidas. Ejemplos: clarificación de la cerveza, vino y jugos de frutas. También se utiliza en la clarificación de grasas, aceites y en la producción de biodiesel (Flottweg, 2022).
- d) **Espesamiento.** Cuando lo que se desea es obtener una suspensión, pero con mayor contenido de sólidos. Ejemplo: deshidratación de lodos en el tratamiento de aguas residuales (Flottweg, 2022) y deshidratación de relaves de carbón fino para separar minerales arcillosos (Nguyen, et al., 2021).

### Equipo de centrifugación

Los equipos utilizados para esta operación son conocidos como centrífugas, de las cuales existen diferentes tipos de acuerdo con su funcionamiento. A continuación, se describen las características de algunas de ellas:

#### Centrífuga tubular líquido-líquido

También conocidas como supercentrífugas, son usadas para la separación de líquidos, estos equipos pueden desarrollar fuerzas de aproximadamente 13,000 veces la fuerza de gravedad (Geankoplis, 1993).

Tal como se muestra en la **Figura 76**, una centrífuga tubular es un recipiente alto y estrecho, con un diámetro de entre 100 y 150 [mm] que gira a 15 000 revoluciones por minuto en una carcasa estacionaria. La alimentación entra desde una boquilla a través de una abertura en el fondo del recipiente y se separa en dos capas de líquido una vez en el interior (McCabe, 2007).

La capa más ligera es llevada hacia afuera y depositada dentro de un compartimento de descarga, mientras que la capa más pesada, situada en un compartimento separado, se descarga por otra tubería (McCabe, 2007).

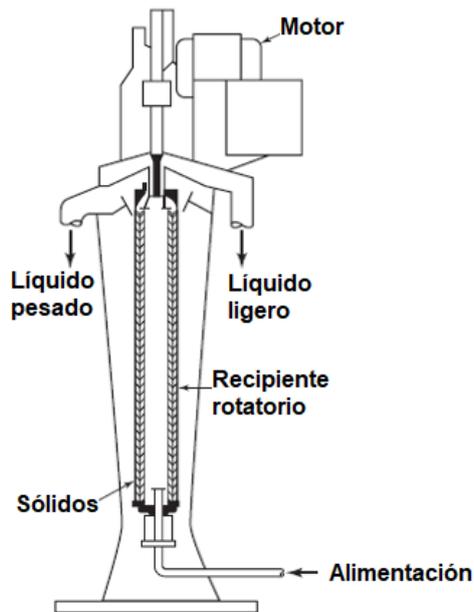


Figura 76. Centrífuga tubular. Adaptado de (McCabe, 2007).

### Ultracentrífuga

Estos equipos (**Figura 77**) cumplen un papel importante en laboratorios de biología, especialmente en procesos de purificación en análisis de ADN, proteínas, mitocondrias y el aparato de Golgi. Otra aplicación de las ultracentrífugas es el desarrollo de vacunas (Perkel, 2004).



Figura 77. Ultracentrífuga

A medida que el rotor gira, los objetos se alejan del eje de movimiento por la acción de la fuerza centrífuga, sin embargo, este equipo alcanza las 100,000 rpm. La ultracentrífuga de la **Figura 78** es compatible con rotores de ángulo fijo y basculante. En la imagen se muestra un rotor basculante, el cual se balancea horizontalmente durante la centrifugación para crear un camino despejado por donde pasa la muestra (1) (Perkel, 2004).

El sistema de vacío, en cambio, se activa automáticamente una vez que inicia la centrifugación. El rotor alcanzará 3,000 rpm y mantendrá esa velocidad hasta alcanzar un nivel de vacío menor a 750 micrones. Una vez que el nivel de vacío llegue a los 5 micrones, la velocidad de rotación de la centrifuga aumenta sin generar calor por fricción (2) (Perkel, 2004).

Las revoluciones por minuto se miden con un tacómetro de efecto Hall, y a medida que el rotor gira, el tacómetro registra los impulsos en función del tiempo, traduciendo la señal a revoluciones por minuto (3). Además, las ultracentrifugas cuentan con un tipo de frenado eléctrico, que, a diferencia del mecánico, evita la interrupción de gradientes frágiles y separaciones de muestras (4) (Perkel, 2004).

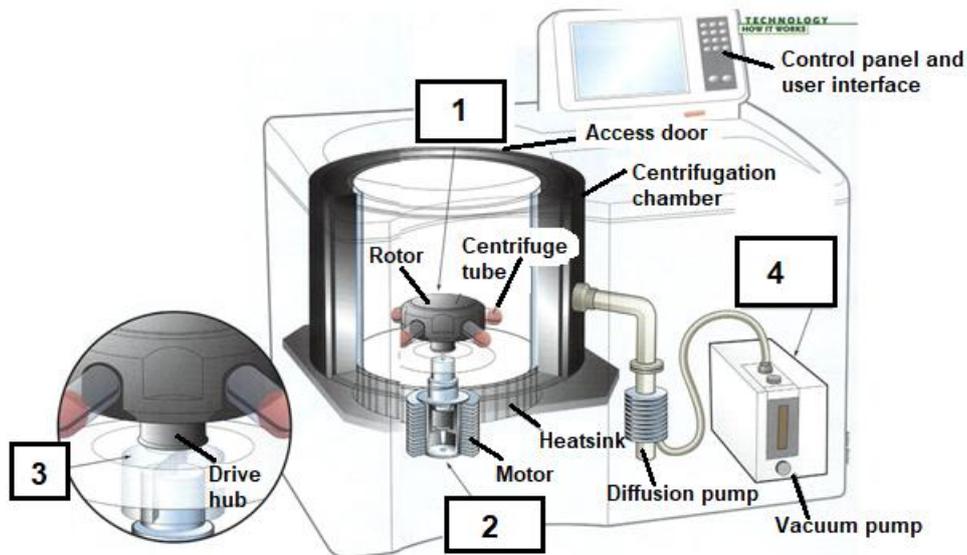


Figura 78. Funcionamiento de una ultracentrifuga. Adaptado de (Perkel, 2004).

### Centrífuga de discos

La alimentación entra por un compartimento hacia el fondo del recipiente y viaja hacia arriba a través de orificios separados verticalmente, llenando los espacios entre los discos (Geankoplis, 1993).

Los orificios dividen el ensamble vertical en una sección interna, donde se encuentra el líquido ligero; y una sección externa, donde está el líquido pesado, como se muestra en la **Figura 79**, un esquema del funcionamiento de una centrifuga de discos (Geankoplis, 1993).

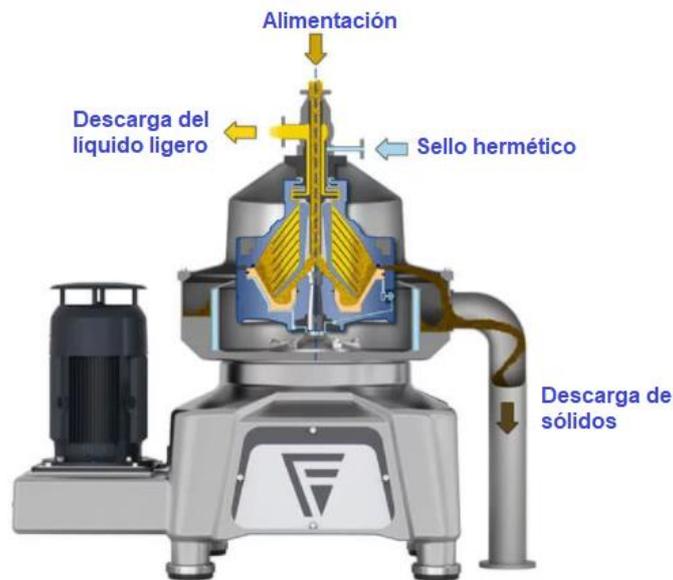


Figura 79. Funcionamiento de una centrífuga de discos. Adaptado de (Flottweg, 2022).

En la **Figura 80** se muestra una centrífuga de discos industrial, la cual tiene diversas aplicaciones en industrias como la farmacéutica, de alimentos y bebidas, aceites, entre otras.



Figura 80. Centrífuga de discos industrial

En industria láctea se utiliza la centrífuga de discos, donde la leche se centrifuga para escindir (dividir) su contenido de agua y lípidos, los cuales son empleados para elaborar mantequilla a partir del remanente de la leche desnatada.

### Rotores

El rotor es el dispositivo que hace girar los tubos de las *centrífugas de laboratorio* que contienen las sustancias a separar. Algunos tipos de rotores son:

- a) **Rotor basculante:** Los tubos con la sustancia a separar se colocan en una cestilla, la cual, al girar el rotor, se coloca en una posición perpendicular al eje de giro, quedando los tubos en dicha posición, como se muestra en la **Figura 81** (Huerta, 2021).

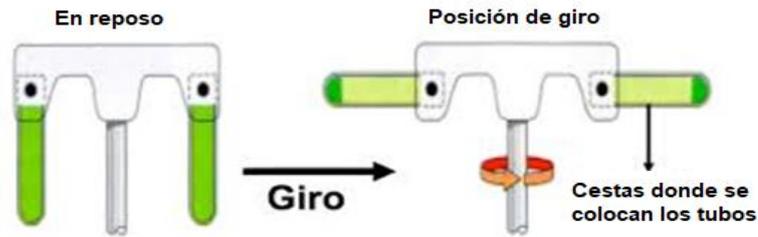


Figura 81. Rotor basculante

- b) **Rotor angular o de ángulo fijo:** Este tipo de rotores son típicos de ultracentrífugas. Los tubos se insertan en orificios en el interior de rotores fijos (**Figura 82**). Un caso es el de rotores verticales en los que el tubo se sitúa paralelo al eje de giro (Huerta, 2021).

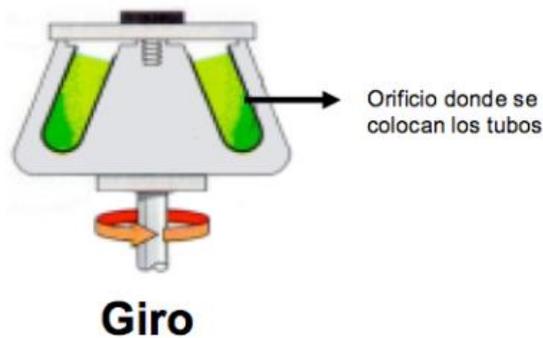


Figura 82. Rotor angular

En la **industria farmacéutica** se utilizan los rotores con tubos para la separación del plasma de la sangre, plaquetas, organelos intracelulares y ADN, como se muestra en la **Figura 83**, donde una vez que se extrae la sangre (1) se coloca en una probeta (2) y por medio de una operación de centrifugación (3) se separa en sus distintos componentes.

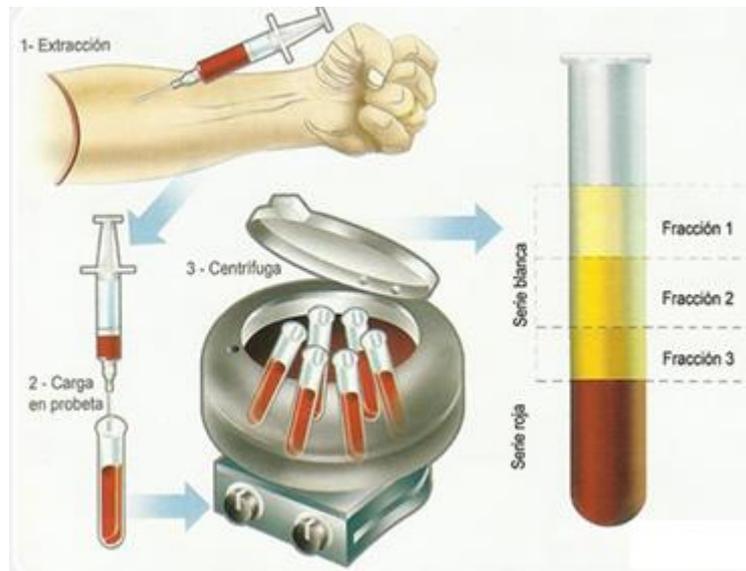


Figura 83. Separación de los componentes sanguíneos por medio de centrifugación.

## 2.6 Evaporación, condensación y transferencia de calor

La **evaporación** es una operación unitaria que consiste en la separación de una mezcla líquida, generando un vapor con sus componentes más volátiles a partir de su ebullición. Se utiliza para concentrar disoluciones al separar el vapor del disolvente, que generalmente es agua (Marcilla, 1998).

Conceptualmente, la evaporación es análoga a la destilación simple, la diferencia es que, en la evaporación, la alimentación contiene un soluto cuyo punto de ebullición es mayor al punto de ebullición del disolvente, por lo que los vapores obtenidos son de disolvente puro (Marcilla, 1998).

La **condensación** es la operación inversa a la evaporación, por la que un vapor pasa a estado líquido al intercambiar calor con un líquido frío. No se considera una operación de separación, pero tiene diversas aplicaciones en la industria (Marcilla, 1998).

### Equipo de evaporación

Los **evaporadores** son los equipos utilizados para esta operación, los cuales se construyen normalmente con algún tipo de acero, sin embargo, muchas soluciones atacan a los materiales ferrosos y llegan a producir contaminación. En estos casos se utilizan materiales especiales como cobre, níquel, acero inoxidable, aluminio, grafito y plomo (McCabe, 2007).

Al diseñar un evaporador, se deben tener en cuenta ciertas características del líquido, tales como su calor específico, calor de concentración, temperatura de congelación, concentración, liberación de gas durante la ebullición, entre otras (McCabe, 2007).

Existen diferentes métodos de operación de los evaporadores, los principales son:

### Evaporación de simple efecto

Este tipo de evaporador lleva a cabo la eliminación del vapor por medio de un solo equipo (**Figura 84**), la mayoría funciona con entrada de vapor de agua (steam) que sale por la parte derecha condensado (condensate) después de que atravesó el equipo en tubos metálicos provocando intercambio de calor con el líquido que se desea concentrar (feed solution), el vapor es de baja presión, menor a 3 atm y el líquido que se hierve se encuentra a un vacío moderado, finalmente, por la parte más baja del evaporador se recupera el líquido concentrado (concentrated solution) y por la parte más alta se libera el vapor de agua separado de la solución alimentada.

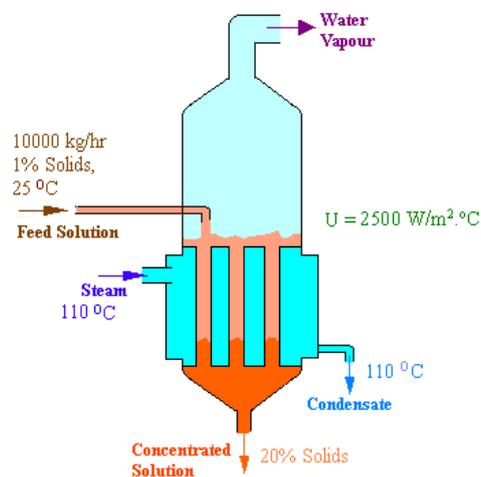


Figura 84. Representación de un evaporador de simple efecto

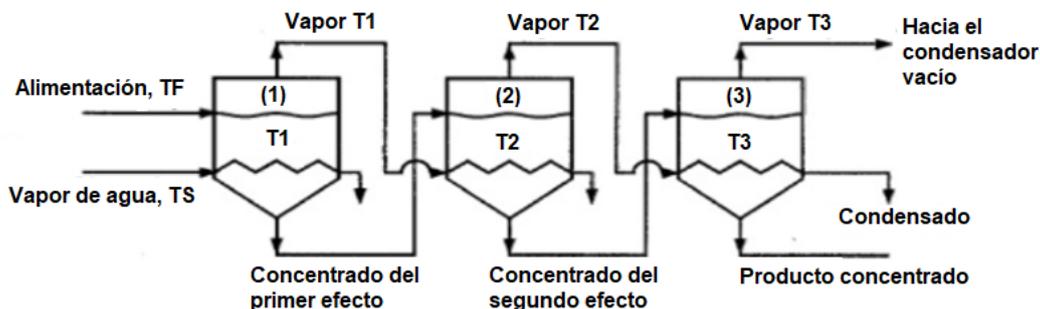
## Evaporación de efecto múltiple con alimentación hacia adelante

Son evaporadores con tubos largos conectados entre sí para formar un sistema de múltiple efecto (se le llama efectos a cada evaporador) (McCabe, 2007). Las conexiones entre tubos están hechas de tal forma que el vapor procedente de un efecto sirve como medio de calentamiento para el efecto siguiente.

Cada efecto, por sí solo, actúa como un evaporador de un solo efecto, y cada uno de ellos tiene una temperatura a través de su superficie de calentamiento correspondiente a la caída de presión en dicho efecto. El primer efecto es en el que se introduce el primer vapor de calentamiento y en el que la presión del vapor es más elevada, mientras que el último efecto la presión es mínima (McCabe, 2007).

Lo más común es que se disponga de varios evaporadores combinados y un condensador al final.

El líquido que se va a concentrar (alimentación, TF) entra al evaporador (o efecto) 1, donde pierde vapor de agua por la parte de arriba (Vapor T1) debido a que entró en ebullición en un intercambiador de calor que funciona con vapor de agua (TS), el concentrado con menor contenido de agua sale por la parte más baja (concentrado del primer efecto). En el evaporador 2 se emplea el vapor del disolvente (agua) generado en el evaporador 1 (Vapor T1) como medio de calefacción del intercambiador de calor, el cual se condensa y sale del sistema por la parte derecha baja, como se muestra en el esquema de la **Figura 85** (Marcilla, 1998). Respecto al efecto 2, tanto la entrada de vapor T<sub>1</sub>, como la entrada de concentrado (concentrado del primer efecto) entran a la misma temperatura entonces no se lograría una diferencia de temperatura para lograr evaporación, para lograr la evaporación deben operar a diferentes presiones distintas.



*Figura 85. Representación de un evaporador de efecto múltiple con alimentación hacia adelante*

En la **Figura 86** podemos observar un evaporador de efecto múltiple usado en la industria láctea y de alimentos.



*Figura 86. Evaporador de efecto múltiple*

Además de los métodos de operación, existen diferentes tipos de evaporadores, los cuales varían en sus dimensiones y funcionamiento, dependiendo el tipo de aplicación para el que sean requeridos. La mayoría de los evaporadores llevan al interior de tubos el vapor de agua que condensa el material sobre tubos metálicos, excepto en algunos casos donde el material a evaporar fluye dentro de los tubos. Los principales tipos de evaporadores son:

### Evaporadores de circulación forzada

En estos evaporadores se utiliza una bomba centrífuga (inferior izquierda **Figura 87**) que impulsa el líquido a gran velocidad a través de los tubos (intercambiador de calor a la izquierda), los cuales no producen ebullición. El intercambiador de vapor utiliza vapor de agua (*entrada de vapor de agua*) para poder calentar el líquido a evaporar, este vapor sale como *condensado* por la parte inferior.

El líquido comienza a sobrecalentarse en este intercambiador de calor, generando una mezcla de vapor y líquido pulverizado a la salida del intercambiador, justo antes de entrar al cuerpo del evaporador (tubo vertical superior a la izquierda de la **Figura 87**) (McCabe, 2007).

Como se puede observar, la mezcla de vapor y líquido choca con una *placa deflectora* en el espacio de vapor, y **el líquido** abandona el separador (parte inferior derecha) retorna a la *entrada de alimentación* de la bomba donde se mezcla con la alimentación o, dependiendo de la acción de la válvula, este **líquido** que abandona el separador se retira de forma continua como concentrado (*Salida del concentrado*). Después, el vapor sale por la parte superior del cuerpo del evaporador (*Salida del vapor*) hacia el condensador, o en su caso, hacia el siguiente efecto (McCabe, 2007).

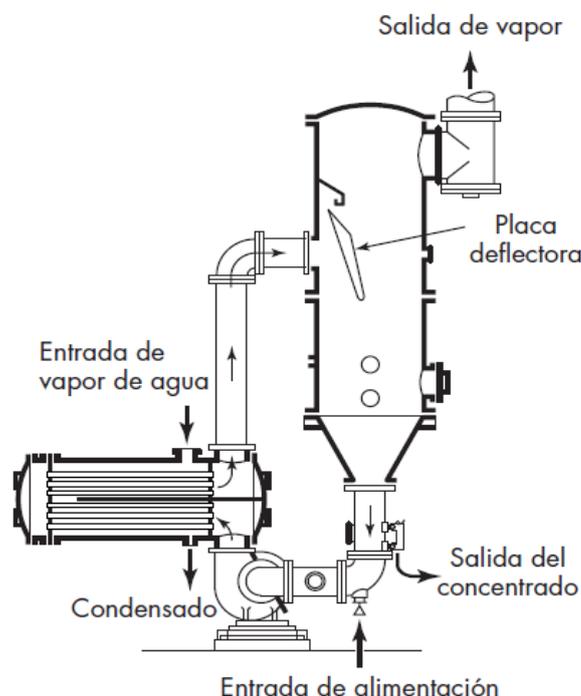


Figura 87. Esquema de funcionamiento de un evaporador de circulación forzada (McCabe, 2007)

Los evaporadores de circulación forzada se utilizan principalmente con líquidos muy viscosos, líquidos que tienden a producir escamas, materiales sensibles al calor o líquidos productores de cristales (Buflovak PK Hebel Process Solutions LLC, 2017).

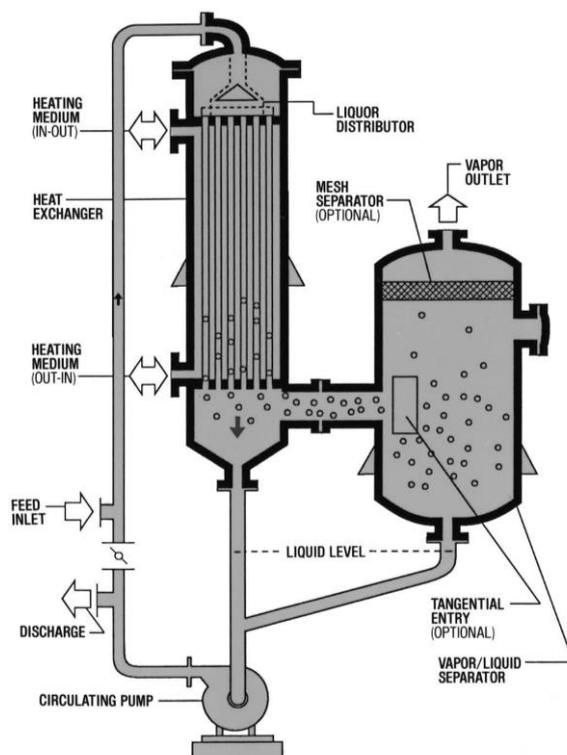
Algunos ejemplos de los productos que pueden ingresar a este tipo de evaporadores son: refinados ácidos, glicerina, sulfato de amonio, extractos de musgo irlandés, sulfato

de sodio anhidro, soluciones de pectina, caprolactum, clorato de sodio, cáustico de celda de diafragma, sulfato de sodio, caldos de sopa, sulfato de hierro, ésteres de azúcar, gelatina, aguas residuales, pasta de tomate, pegamento, crema de levadura y ácido glutámico (Buflovak PK Hebel Process Solutions LLC, 2017).

### Evaporadores de película descendente

El líquido diluido se alimenta en la parte izquierda de la **Figura 88** (*feed inlet*), se impulsa por la bomba (*circulation pump*) para ingresar por la parte superior de los tubos del intercambiador de calor (*heat exchanger*). El líquido fluye hacia abajo y corre por la superficie interior de los tubos en una película delgada y uniforme. El vapor viaja por los tubos en la misma dirección que el líquido, ganando velocidad por la adición de más vapor a medida que la mezcla desciende, lo que resulta en una alta velocidad tanto para el líquido como para el vapor (Buflovak PK Hebel Process Solutions LLC, 2017).

El vapor fluye hacia el separador (*vapor/liquid separator*) donde choca en placa deflectora (tangencial entry) para que condense una parte y salga como líquido por la parte inferior del separador, mientras que el vapor no condensado por la placa sale por la parte superior (*vapor outlet*). El líquido que fluye hacia abajo proveniente del intercambiador de calor regresa a la bomba para ser mezclado con la alimentación (Buflovak PK Hebel Process Solutions LLC, 2017).



*Figura 88. Evaporador de película descendente (Buflovak PK Hebel Process Solutions LLC, 2017).*

Los evaporadores de película descendente como el de la **Figura 89** se utilizan principalmente con líquidos demasiado viscosos para la circulación natural, líquidos donde se debe minimizar el tiempo de retención, líquidos sensibles al calor o cuando el exceso de temperatura es crítico y líquidos que requieren una diferencia de temperatura limitada (HATCO Systems, 2018).

Algunos ejemplos de los líquidos que ingresan a un evaporador de película descendente son la sosa cáustica, soluciones de pectina, sorbitol, jugos de fruta, productos farmacéuticos y sacarosa (HATCO Systems, 2018).

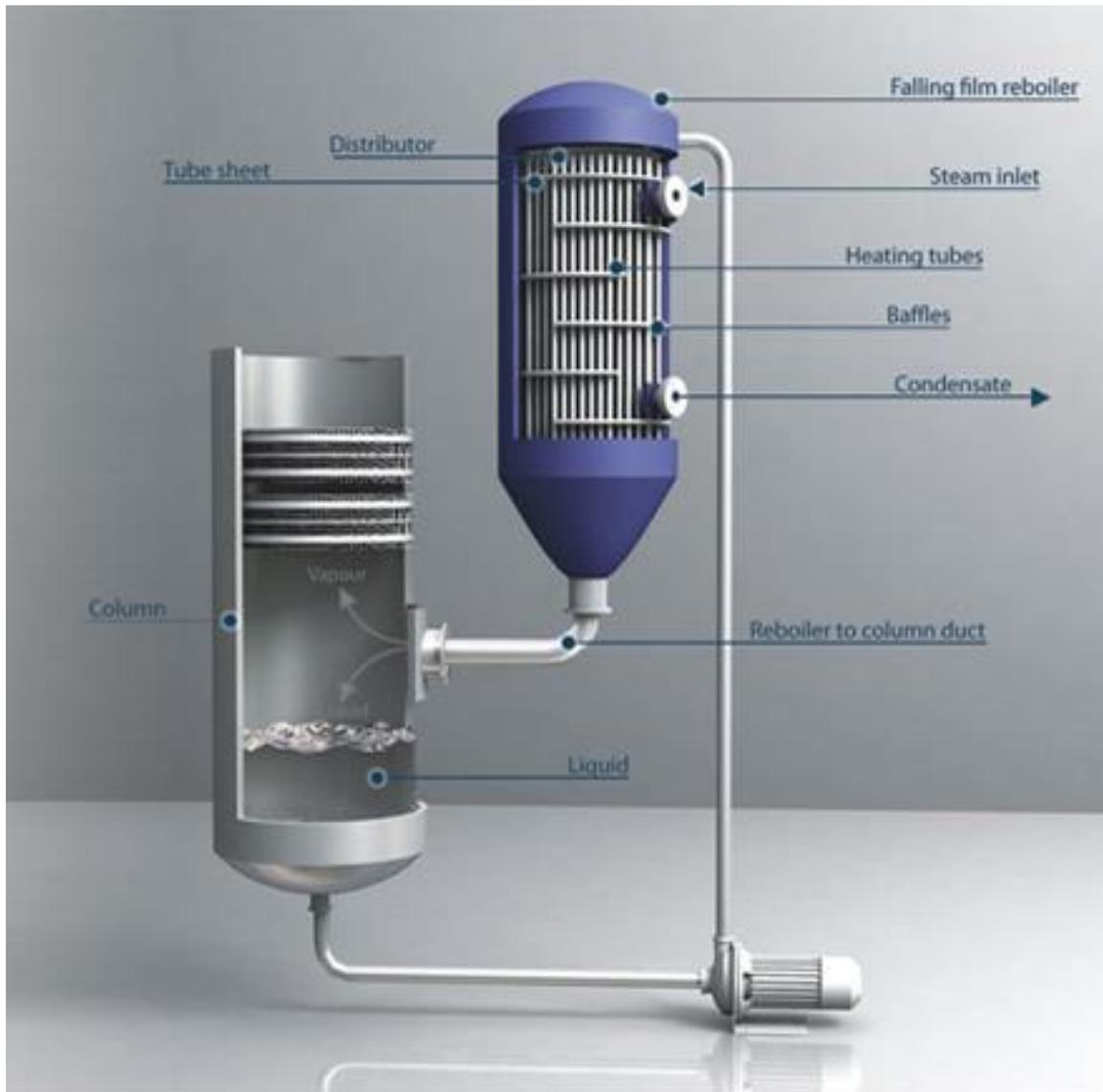


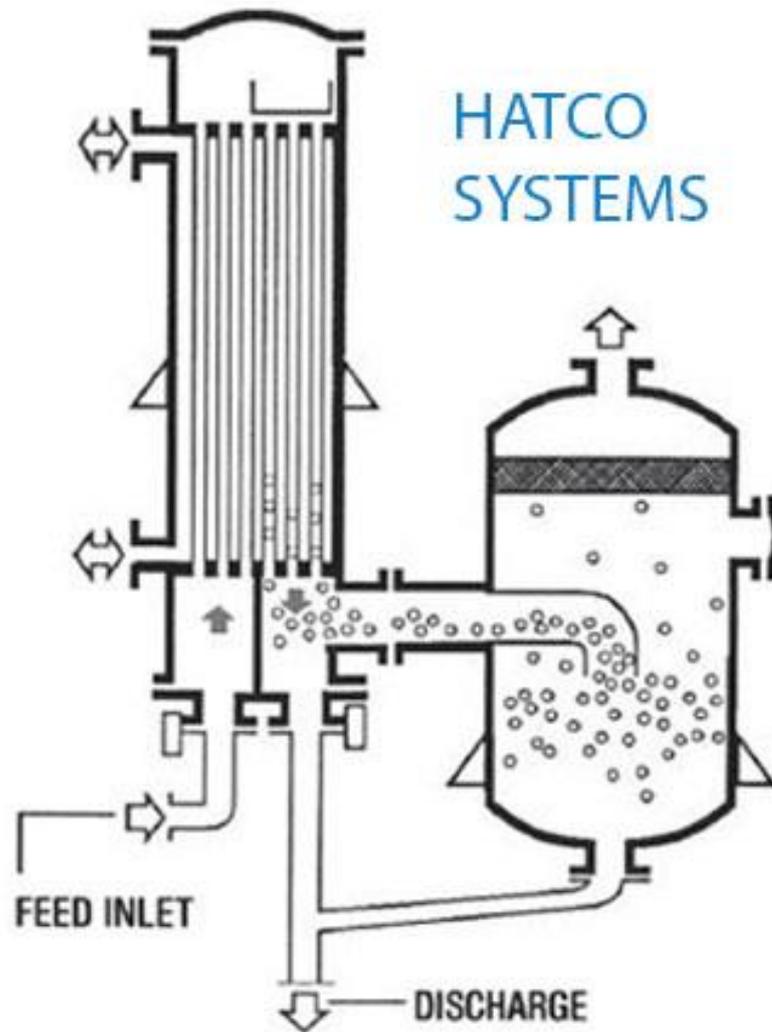
Figura 89. Componentes de un evaporador de película descendente (HATCO Systems, 2018)

### Evaporadores de película ascendente-descendente

El evaporador o concentrador descendente-ascendente tiene altas velocidades de flujo que aseguran una distribución uniforme y altos coeficientes de transferencia de calor (HATCO Systems, 2018).

La alimentación ingresa al fondo de la cámara de vapor (intercambiador de calor) y asciende a través de los tubos de lado izquierdo (**Figura 90**) con una velocidad que aumenta rápidamente. Después de dejar el lado izquierdo, el flujo de la mezcla de vapor líquido se invierte y se dirige hacia abajo a través de los tubos del lado derecho a una velocidad extremadamente alta. Luego, la mezcla ingresa al separador donde se separan el vapor y el líquido. En el separador, el vapor sale por la parte superior, y el líquido por la parte inferior que puede ser recirculado. En el extremo izquierdo del intercambiador de calor se puede ver la entrada de vapor de agua y salida como condensado (HATCO Systems, 2018).

Cuando no está diseñado con recirculación, el evaporador de película descendente ascendente proporciona una evaporación única de los materiales sensibles al calor, lo que requiere un tiempo de retención mínimo. Es adaptable a sistemas de efectos múltiples (HATCO Systems, 2018).



*Figura 90. Evaporador de película ascendente-descendente (HATCO Systems, 2018).*

Los evaporadores de película ascendente-descendente se utilizan para líquidos sensibles al calor que requieren un tiempo de proceso mínimo, líquidos puros o no formadores de cristales, líquidos que tienen viscosidades bajas a medias, líquidos espumosos, líquidos que contienen sólidos finos en suspensión y maneja fácilmente materiales tixotrópicos (HATCO Systems, 2018).

Algunos ejemplos de aplicación del evaporador de película ascendente-descendente son para nitrato de amonio, jugo de manzana, jarabe de azúcar de caña, caprolactama, jarabe de maíz, cáustico, extractos de café, gelatina, pegamento, jugo de uva, jugo de limón, jugo de naranja, productos farmacéuticos sensibles al calor, jugo de piña, y extractos de té (HATCO Systems, 2018).

### **2.6.1 Cristalización**

Esta operación consiste en la formación de partículas sólidas a partir de una base homogénea, partiendo de una solución líquida o vapor. En la cristalización industrial de una solución, la mezcla bifásica formada por los líquidos madre y cristales de cualquier tamaño que se obtiene como producto, se conoce como magma.

La cristalización (**Figura 91**) es una forma de pretratamiento para la operación de filtración. Se basa en la diferencia de solubilidad entre la sustancia a purificar y sus impurezas en una mezcla de solventes, los cuales se añaden a la sustancia, se agrega un

refrigerante (a) y se calienta la mezcla hasta su ebullición (b). Así, la tendencia de las moléculas a depositarse en las superficies compuestas por moléculas semejantes produce un notable incremento en la pureza del material cristalino obtenido (c) (Guaymas, Palacios, & Villalba, 2020).

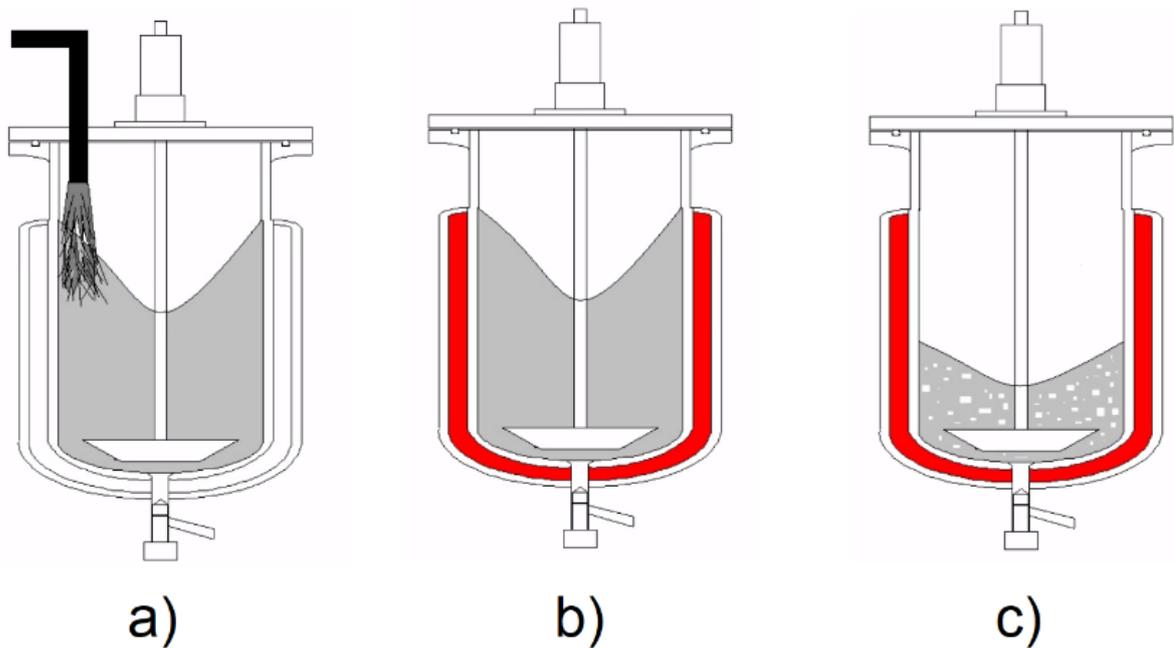


Figura 91. Cristalización. Adaptado de (Mettler Toledo AutoChem, 2017).

### Equipo para cristalización

Los equipos para esta operación se llaman cristalizadores y pueden operar de forma continua o por cargas. Un cristalizador debe tener la capacidad de crear una solución sobresaturada, pues sin sobresaturación, esta operación no es posible. Existen tres métodos para generar sobresaturación (McCabe, 2007):

- 1) *Enfriamiento*: Para solutos que son menos solubles a temperaturas bajas, como el nitrato de potasio y el sulfito de sodio.
- 2) *Evaporación*: Cuando la solubilidad es casi independiente de la temperatura (como en el caso de la sal común) o cuando disminuye al aumentar la temperatura.
- 3) *Combinación de enfriamiento y evaporación*.

Una diferencia importante entre cristalizadores es la forma en que los cristales se ponen en contacto con el líquido sobresaturado. En el **método de líquido circulante**, una corriente de solución sobresaturada pasa a través de un lecho fluidizado de los cristales en crecimiento. El líquido saturado se bombea a través de una zona de enfriamiento o evaporación, generando la saturación y recirculando la solución sobresaturada a través de la zona de cristalización. En el **método del magma circulante**, todo el magma circula a través de ambas etapas de la cristalización y sobresaturación sin separar el líquido del sólido (McCabe, 2007).

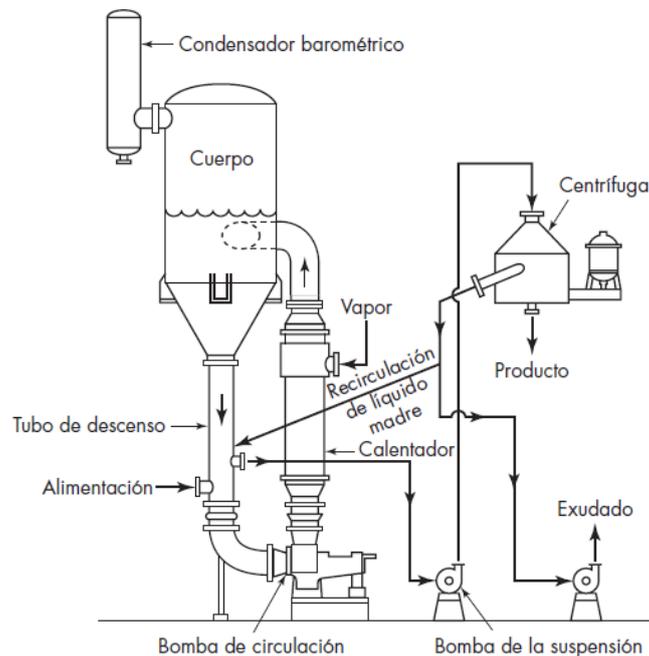
Algunos cristalizadores usan dispositivos de clasificación de tamaño para retener los pequeños cristales en la zona de crecimiento y que solo los de un tamaño determinado salgan del equipo como producto (McCabe, 2007).

### Cristalizador continuo de vacío

Son recipientes cerrados en los que se mantiene el vacío por medio de un condensador, y utilizan enfriamiento por evaporación adiabática para producir la sobresaturación.

Como se observa en la **Figura 92**, una solución saturada caliente a una temperatura superior al punto de ebullición a la presión del cristalizador se alimenta en un tanque, manteniendo un volumen de magma y controlando el nivel de líquido y sólido que cristaliza en el tanque. La alimentación se enfría espontáneamente hasta llegar a una temperatura de equilibrio y se evapora una parte del solvente, dando lugar a la nucleación<sup>6</sup> y crecimiento de los cristales (McCabe, 2007).

El magma circula desde el fondo cónico del cuerpo del cristalizador a través de un tubo descendente, hasta una bomba de circulación de baja velocidad y carga. Posteriormente, asciende a través de un calentador tubular vertical con vapor de agua que condensa en la carcasa y después retorna al cuerpo del cristalizador. El líquido madre y los cristales se retiran a través del tubo de descarga encima de la entrada de la alimentación en el tubo de descenso. El líquido madre se separa de los cristales por centrifugación y se recircula al tubo de descenso, mientras que los cristales se retiran como producto (McCabe, 2007).



*Figura 92. Cristalizador continuo de vacío (McCabe, 2007).*

### **Cristalizador de tubo de aspiración-deflector (DTB)**

El cuerpo del cristalizador tiene un tubo de aspiración que actúa como placa deflectora para controlar la circulación del magma, también tiene un agitador de turbina dirigido hacia abajo para producir una circulación controlable dentro del equipo. El calentador y la entrada de alimentación están contenidos en un sistema adicional de circulación, además, este equipo cuenta con una rama de elutriación que clasifica los cristales por tamaños, como se muestra en la **Figura 93**. El producto se retira por una salida cerca del fondo del cuerpo del cristalizador.

<sup>6</sup> Nacimiento de cuerpos muy pequeños al interior de una fase homogénea sobresaturada.

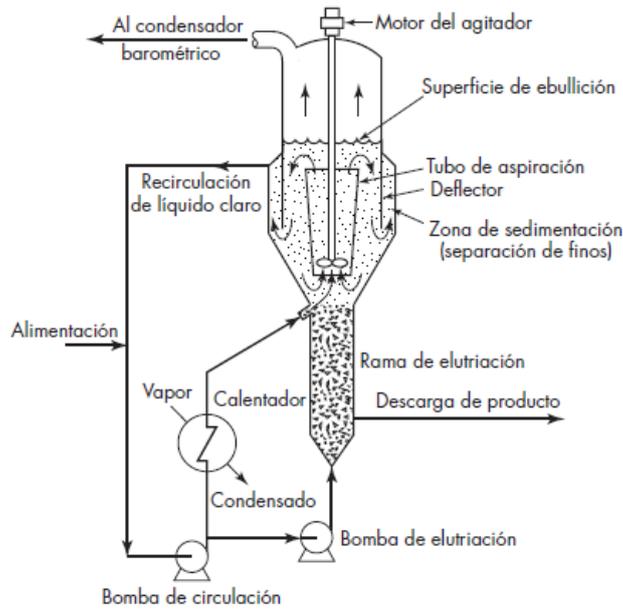


Figura 93. Cristalizador de tubo de aspiración-deflector (McCabe, 2007).

## Aplicaciones de la cristalización

### Industria de alimentos:

En los alimentos hay muchos componentes que cristalizan, ya sea total o parcialmente, por ejemplo: azúcares (glucosa, lactosa, sacarosa y fructuosa), hielo, lípidos, sal, proteínas, entre otros. La operación de cristalización es importante, pues define la estructura cristalina de los alimentos, la cual influye en su calidad, textura, apariencia y estabilidad. En la **Figura 94** se muestra una lista de productos alimenticios, sus principales componentes y la característica en la que influye la operación de cristalización (Myerson, 2002).

| Product               | Ingredient                 | Desired Characteristic                                      |
|-----------------------|----------------------------|---|
| Caramel               | Sucrose or lactose         | Smooth and short texture                                    |
| Fondant               | Sucrose                    | Smooth texture  |
| Panned confections    | Sucrose                    | Brittle texture (hard panned)<br>Soft texture (soft panned) |
| Cereal coatings       | Sucrose                    | Appearance  |
| Refined sugars        | Sucrose, lactose, etc.     | Size distribution for separation                            |
| Refined salt          | NaCl                       | Size distribution for separation                            |
| Organic acids         | Citric acid, etc.          | Size distribution for separation                            |
| Bread, baked products | Starch                     | Texture   |
| Frozen foods          | Ice                        | Thawed quality  |
| Frozen desserts       | Ice                        | Smooth texture  |
| Freeze concentration  | Ice                        | Size distribution for separation                            |
| Chocolate             | Cocoa butter               | Texture (snap) and gloss<br>Shelf stability to blooming     |
| Butter                | Milk fat                   | Hardness, spreadability                                     |
| Margarine             | Vegetable fats             | Hardness, spreadability                                     |
| Peanut butter         | Vegetable fats             | Texture, spreadability                                      |
| Fat fractionation     | Palm oil, tallow, milk fat | Size distribution for separation                            |

Figura 94. Alimentos involucrados en operaciones de cristalización y las características en las que influye (Myerson, 2002).

## 2.7 Secado

La operación de secado consiste en separar cierta cantidad de agua u otro líquido de un material sólido hasta reducir el contenido del líquido residual a un valor aceptablemente bajo, lo cual permite que muchos materiales sean más adecuados para su manejo. Generalmente el secado es la etapa final de una serie de operaciones, siendo con frecuencia el producto final para ser empaquetado (McCabe, 2007).

Es posible separar agua y otros líquidos de un sólido por métodos mecánicos mediante prensas centrífugas o de modo térmico por evaporación. En general el secado se refiere a la remoción de cantidades de agua relativamente pequeñas en forma de vapor con aire (Geankoplis, 1993).

Previo al secado es aconsejable que el material sólido tenga tamaño homogéneo de partícula por medio de reducción de tamaño, además reducir la cantidad de agua o líquido tanto como sea posible antes de alimentar el material a un secador térmico. Esto se realiza por medios mecánicos como filtros prensa o centrífugas (Geankoplis, 1993).

### Métodos generales de secado

De acuerdo con las condiciones físicas usadas para adicionar calor y extraer vapor de agua, los métodos de secado pueden ser clasificados en las siguientes categorías (Geankoplis, 1993):

1. *Secado por transferencia de calor*. El calor se añade por contacto directo con aire caliente a presión atmosférica, y el vapor de agua formado se elimina por medio del mismo aire.
2. *Sublimación*. El agua se sublima directamente de material congelado.
3. *Secado al vacío*: En el secado al vacío, el agua hervirá a temperatura ambiente si se le somete a una presión negativa. En muchos equipos de secado al vacío se añade calor indirectamente por contacto con una pared metálica o por radiación y la evaporación de agua se logra con más rapidez a presiones bajas.

Determinados productos son altamente termosensibles y un secado a altas temperaturas, necesarias para evaporar el solvente de la mezcla, estropearía las características originales del producto y no sería válido para la aplicación diseñada. Mediante el vacío, la temperatura necesaria para la evaporación se reduce, siendo posible realizarla a baja temperatura y respetando las características y morfología original (Bachiller, 2020).

### Equipos de secado

#### Secadores de bandejas

Uno de los equipos para realizar la operación de secado son los **secadores de bandejas**, también llamados secadores de gabinete. En estos equipos puede ingresar material sólido en forma de terrones o pasta, el cual se esparce uniformemente sobre una bandeja de metal de 10 a 100 [mm] de profundidad. En la **Figura 95** se muestra un secador de bandejas típico. (Geankoplis, 1993).

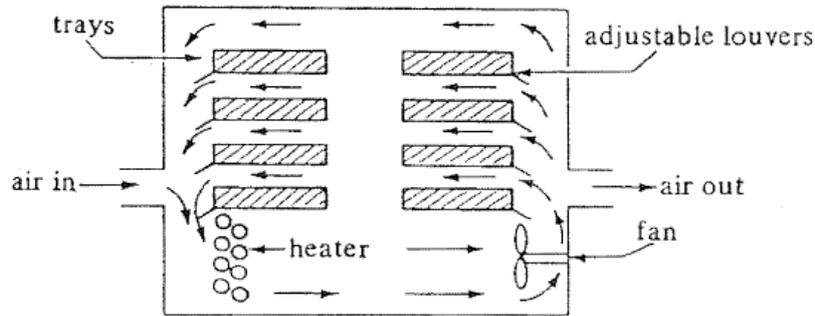


Figura 95. Funcionamiento de un secador de bandejas (Geankoplis, 1993)

Consisten en una cámara de vacío de forma cuadrangular o circular; el material húmedo a ser secado se carga en bandejas internas fijas (trays) y hechas a medida, que se colocan manualmente sobre los estantes, un ventilador (fan) hace circular aire de entrada (air in) calentado con un intercambiador de calor (heater) paralelamente sobre la superficie de las bandejas. Después del secado se abre el gabinete y las bandejas se reemplazan por otras con más material para secado (Geankoplis, 1993).

Los secadores de estantes al vacío son necesarios para productos que requieren un secado uniforme, a baja temperatura sin agitación ni compresión. Productos de estas características incluyen fármacos, nutracéuticos, extractos de vitaminas, alimentos especializados, químicos finos y productos granulares (JLS International, 2018).

Estos materiales delicados, altamente sensibles al calor se secan de manera segura a temperaturas de secado sumamente bajas. Procesado al vacío, el producto está protegido contra la oxidación y la contaminación atmosférica, además de recuperarse la totalidad de los disolventes liberados.

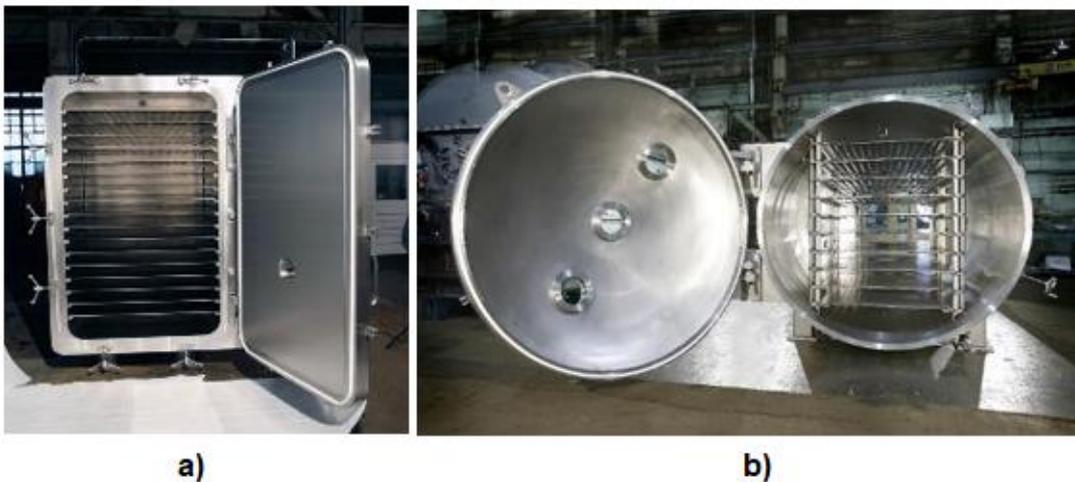


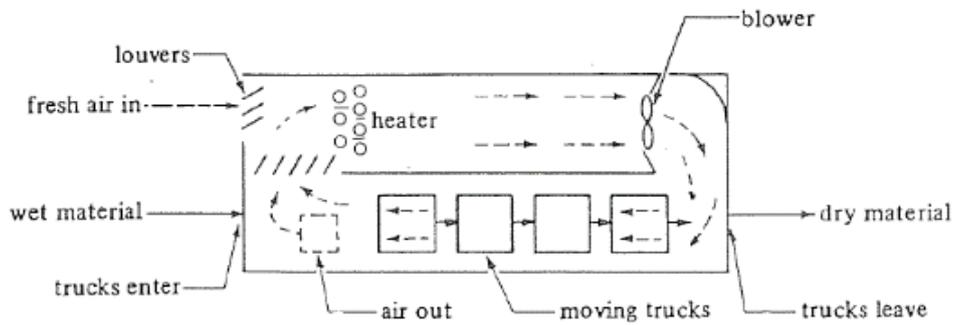
Figura 96. Secadores de bandejas a) Rectangular y b) Circular (JLS International, 2018).

En la **Figura 96**, se muestran dos secadores de la marca Buflovak, uno rectangular (izquierda) y otro circular (derecha), en ellos, la parte superior de cada estante es lisa con un intercambiador de calor de serpentín en su parte inferior para hacer circular calor en forma de vapor o líquido y obtener la temperatura operativa.

### Secadores continuos de túnel

Son compartimentos de bandejas que operan en serie. Los sólidos se colocan en bandejas en carretillas (moving trucks) que se desplazan con el material a secar, con espesor de menos de 3 [cm] en el túnel se induce una corriente de aire caliente y seco provocado por el intercambiador de calor (heater y un ventilador (blower) que atraviesa

el túnel, evaporándose el agua del material que sale por la parte inferior junto con el aire (air out) (**Figura 97**) (Geankoplis, 1993).



*Figura 97. Funcionamiento de un secador continuo de túnel (Geankoplis, 1993).*

El flujo de aire caliente en estos secadores se da a contracorriente, en paralelo o una combinación de ambos (Geankoplis, 1993).

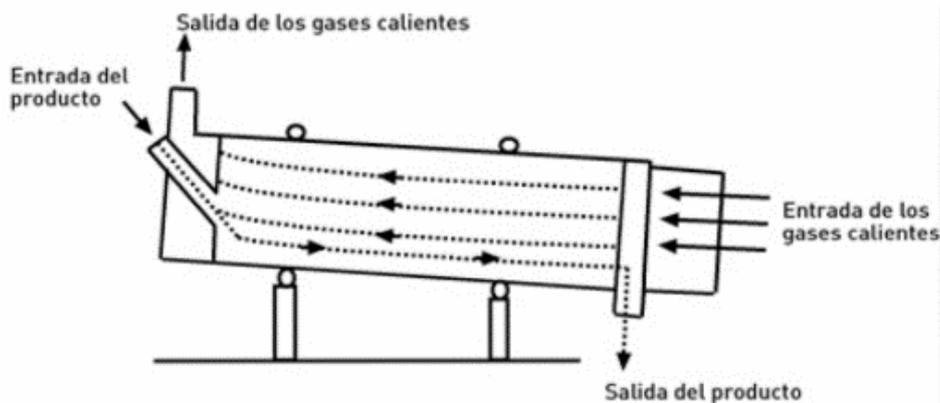
En la **Figura 98** muestra un secador continuo de túnel utilizado en la industria.



*Figura 98. Secador continuo de túnel (Turatti Group Food Processing Machinery, 2022).*

### Secadores rotatorios

Constan de un cilindro hueco que gira sobre su eje, con una ligera inclinación hacia la salida. Los sólidos húmedos se alimentan por la parte superior, tal como se observa en la **Figura 99**, y se desplazan por el cilindro mientras este va girando (Geankoplis, 1993).



*Figura 99. Funcionamiento de un secador rotatorio*

El calentamiento se lleva a cabo por contacto directo con gases calientes mediante un flujo a contracorriente, o por contacto indirecto a través de la pared del cilindro (Geankoplis, 1993).

Los secadores rotatorios son comúnmente usados para materiales que tienden a formar polvos (como sal y azúcar), y materiales granulares como en el tostado de nueces, semillas y granos de cacao (Geankoplis, 1993). En la **Figura 100** se muestra el interior de un secador rotatorio.



*Figura 100. Interior de un secador rotatorio*

### **Secador al vacío horizontal de paletas**

Consta de un tambor con agitación por rotación de paletas en su interior. La **Figura 101** muestra un equipo con **pulido interior espejo**, grado alimenticio, su aplicación comprende productos termosensibles húmedos, cristalinos, amorfos o pastas, en un proceso bajo vacío. Las paletas están girando muy cerca de la pared, para que se todo el producto tenga una mezcla uniforme.



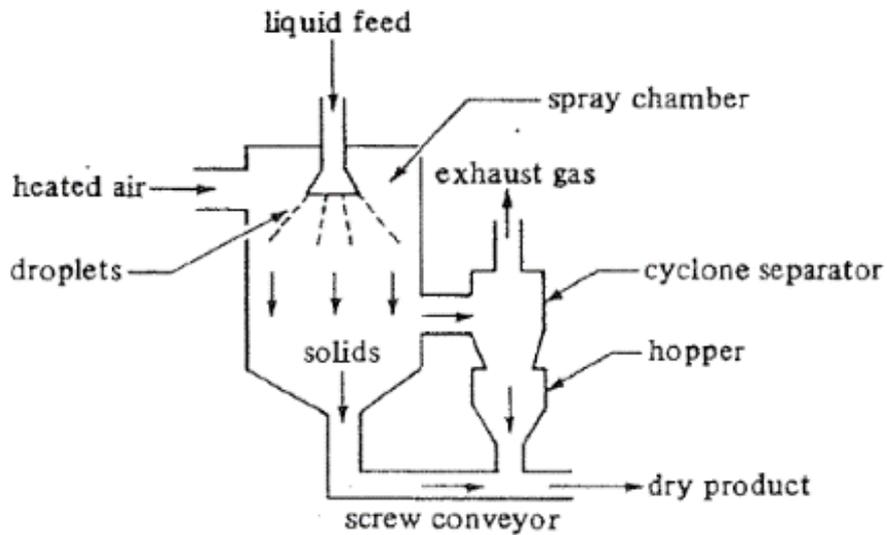
*Figura 101. Secador al vacío horizontal de paletas (Bachiller, 2020).*

### **Secadores por aspersión**

En estos equipos (**Figura 102**), un líquido o una suspensión (liquid feed) se atomiza (spray chamber) en una corriente de gas caliente (heated air) para obtener una lluvia de gotas finas (droplets). El agua se evapora de dichas gotas con rapidez y se obtienen partículas secas de sólido (*solids*) que se separan de la corriente de gas (Geankoplis, 1993).

Los sólidos ya secos salen por el fondo de la cámara (en la imagen se observa un tornillo sin fin, *screw conveyor*) y los gases de escape fluyen hacia un separador (*cyclone*) para filtrar las partículas finas, las cuales son ligeras y finas, que serán recogidas en una tolva (*hopper*) para unirse al tornillo sin fin (Geankoplis, 1993). Los secadores por aspersión,

como el que se muestra en la **Figura 103** son usados para secar productos lácteos y obtener leche en polvo.



*Figura 102. Funcionamiento de un secador por aspersión (Geankoplis, 1993).*



*Figura 103. Secador por aspersión*

En la **Figura 104** se muestran las boquillas que usan los equipos de secado para la aspersión de líquidos de la empresa Spraying Systems Co.



*Figura 104. Boquillas para equipos de secado por aspersión (Spraying Systems Co., 2022).*

## Ciclón – separador

En estos equipos (**Figura 105**), la mezcla gas-sólido entra en la cámara superior tangencialmente (a) y desciende en espirales hasta la sección cónica (b). El gas, en un flujo central ascendente sale por el tubo de salida (c) (Salcedo, Chibante, & Soro, 2007).

Mientras tanto, el líquido de absorción se ingresa por medio de una chaqueta (d) y posteriormente a presión por medio de boquillas (e), por lo que la mezcla de gas que rota en espiral choca constantemente con las gotas del líquido, las cuales fluyen hacia el fondo junto con los sólidos (f) (Wang, et al., 2021).

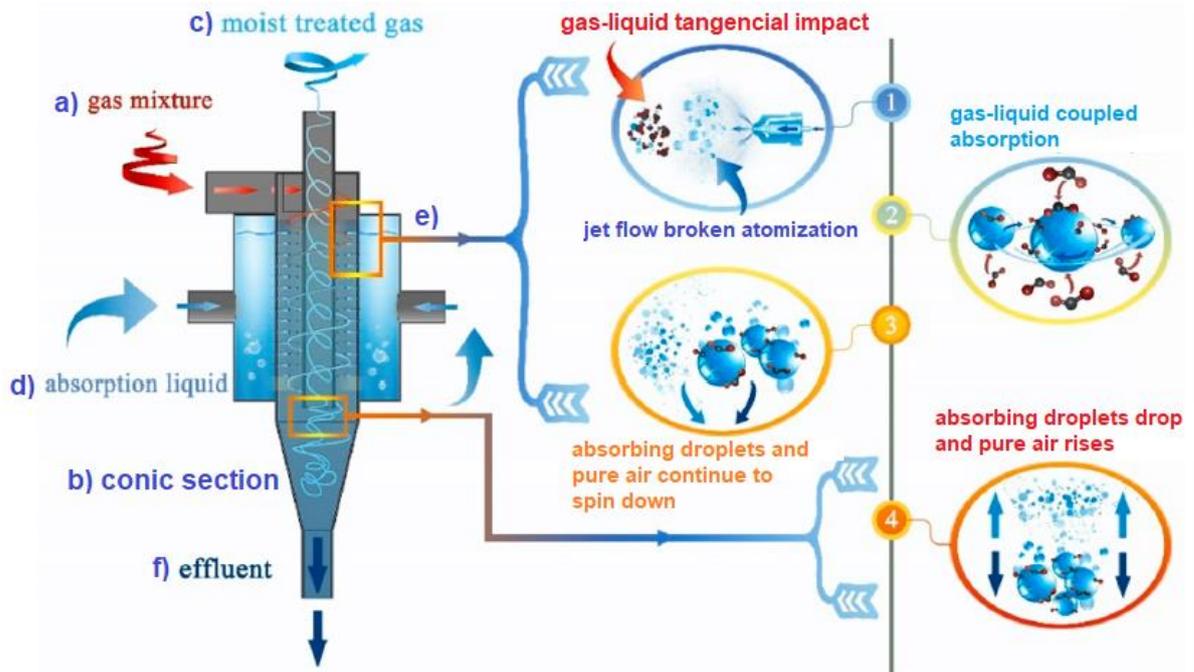


Figura 105. Funcionamiento de un ciclón-separador. Adaptado de (Wang, et al., 2021).

## 2.8 Liofilización

La liofilización o secado por congelación es una modalidad de secado usada con productos sensibles al calor, donde el agua es eliminada como vapor por sublimación del material congelado en una cámara al vacío, y una vez que la humedad se sublima como vapor, este se extrae con bombas de vacío mecánicas o eyectores de chorro de vapor (Geankoplis, 1993).

El material por secar se congela rápidamente y es colocado en capas delgadas sobre platos perforados en cámaras especiales de vacío o congelado en lugares por refrigeración circulante dentro de platos perforados (McCabe, 2007).

Con el método de secado por congelación se obtienen alimentos de más alta calidad que con métodos como el secado o la deshidratación. Un factor que destaca de esta operación es la rigidez estructural de los alimentos al producirse la sublimación, lo que evita el colapso de la estructura porosa después de la liofilización. Además, cuando se vuelve a agregar agua al producto, este conserva gran parte de su estructura original, incluyendo aroma y sabor. Las bajas temperaturas involucradas en esta operación minimizan las reacciones de degradación que ocurren en los procesos de secado ordinarios (Geankoplis, 1993).

En cambio, una de sus desventajas es la velocidad lenta de secado. Además, se requiere el uso de vacío forzosamente, lo que hace esta operación muy costosa (Geankoplis, 1993).

### Etapas de la liofilización

Las operaciones de liofilización se dividen principalmente en las siguientes etapas:

- a) **Congelación:** El primer paso en esta etapa es la solidificación del medio de la disolución. Para conseguir una congelación total del medio, se debe llevar la disolución a una temperatura que minimice su movilidad lo más posible. Esta temperatura dependerá de las características de cada producto (Ubach, 2020).
- b) **Evacuación:** Cuando la muestra está totalmente solidificada, se disminuye la presión de su entorno hasta crear un vacío (Ubach, 2020).
- c) **Secado primario:** Cuando la muestra se encuentra en las condiciones de vacío necesarias, se le aporta energía a través de las placas del liofilizador para lograr el cambio de fase del agua de sólido a gas. Una velocidad adecuada de sublimación es importante para que los parámetros del proceso como presión, temperatura y tiempo no dañen la muestra. Al final de esta etapa, se habrá eliminado entre 85% y 95% del agua de la muestra (Ubach, 2020).
- d) **Secado secundario:** Es en esta etapa que se retira el remanente de agua de la muestra mediante una operación de desorción. Factores como la presión, temperatura y tiempo van a determinar la humedad y el porcentaje final de agua en la muestra, lo que definirá las condiciones de conservación y almacenamiento del producto (Ubach, 2020).

En la **Figura 106** se muestra una gráfica con la temperatura y presión en cada etapa de la liofilización:

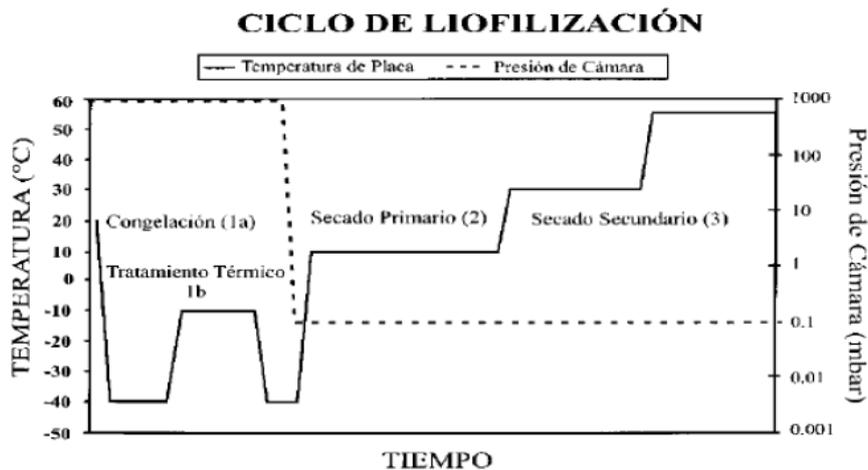


Figura 106. Gráfica de presión y temperatura durante la liofilización (Brito, Vallejo, Puente, & Marluxul, 2016).

Durante las etapas de la liofilización, se pueden destacar los siguientes fenómenos físicos, los cuales impactan directamente en la operación, la calidad del producto obtenido y los costos del proceso general (Novak & Jakubczyk, 2020):

- El cambio de fase del agua contenida en el producto a hielo
- La transición de hielo a fase de vapor
- La desorción de las moléculas de agua
- La obtención de presiones lo suficientemente bajas
- La re-sublimación del vapor de agua removido del producto en la superficie del condensador

En la **Figura 107** se observa una gráfica en donde se compara el tiempo y velocidad de secado en tres fases de la liofilización (Brito, Vallejo, Puente, & Marluxul, 2016):

**Fase 1:** La velocidad de sublimación crece rápidamente. Esta fase constituye entre 10% y 15% del tiempo total del proceso.

**Fase 2:** Hay un descenso importante de la velocidad de sublimación debido a la formación de una capa porosa de material seco.

Las fases 1 y 2 constituyen la etapa de secado primario de la liofilización.

**Fase 3:** Esta fase corresponde al secado secundario, donde la velocidad de sublimación continúa disminuyendo hasta aproximarse a cero, debido a que el calor necesario para retirar el agua ligada es más alto que el de sublimación.

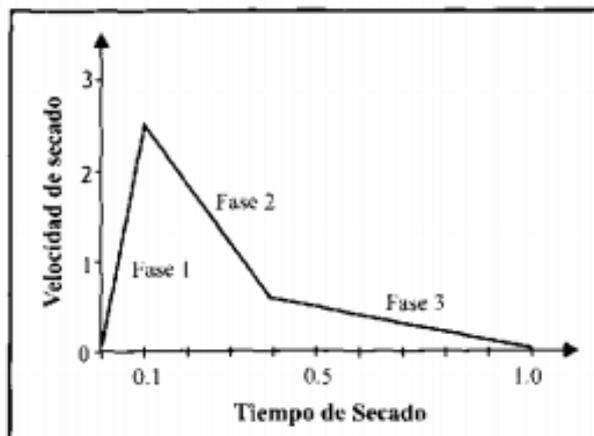
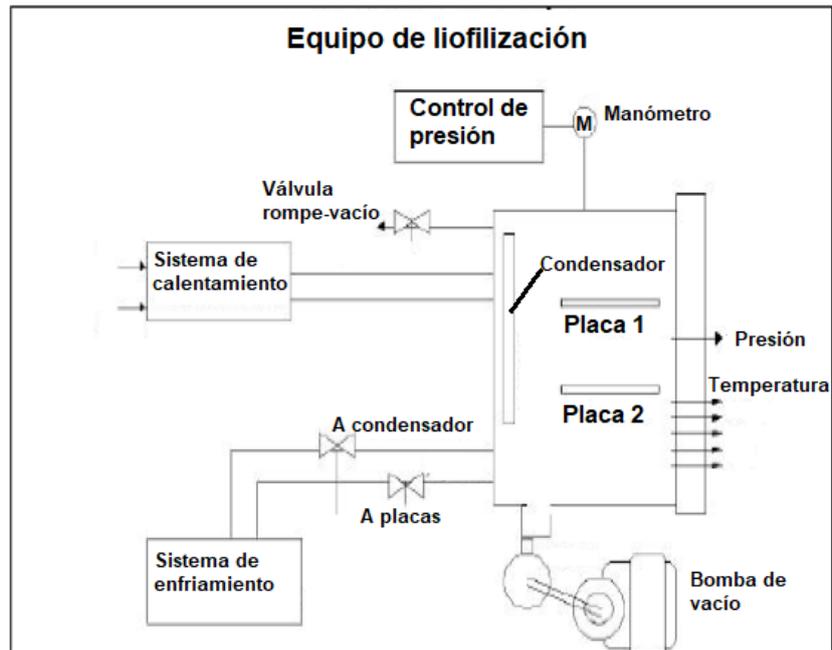


Figura 107. Velocidad y tiempo de secado de las etapas de la liofilización (Brito, Vallejo, Puente, & Marluxul, 2016).

## Equipo para liofilización

Los liofilizadores son equipos en los que el secado por congelación se lleva a cabo por calentamiento indirecto. Constan de una cámara hermética al vacío construida de hierro o placas de acero y en ocasiones con bandejas de soporte dentro de la cámara, una fuente al vacío y un condensador (Brito, Vallejo, Puente, & Marluxul, 2016), como se observa en el esquema de la **Figura 108**.

Las bandejas están hechas de acero y se sujetan en el interior de la cámara al vacío, conectadas en paralelo a los cabezales de entrada y salida (Brito, Vallejo, Puente, & Marluxul, 2016).



*Figura 108. Esquema de un equipo de liofilización. Adaptado de (Brito, Vallejo, Puente, & Marluxul, 2016).*

En la **Figura 109** se muestra un liofilizador de geometría rectangular, con el cual se aprovecha mejor el espacio dentro de la cámara, sin embargo, también existen liofilizadores de forma cilíndrica, los cuales tienen una mejor resistencia a la presión (Brito, Vallejo, Puente, & Marluxul, 2016).



*Figura 109. Liofilizador rectangular (Codols Technology, 2022).*

## Aplicaciones de la liofilización

Las principales aplicaciones de la liofilización se encuentran en el secado de productos sensibles a altas temperaturas, tales como té, café, flores, alimentos para uso militar, frutas como la fresa, verduras como champiñones para sopas deshidratadas (instantáneas), entre otros (Sierra, 2019).

En la **Figura 110** podemos observar el uso de la liofilización en diferentes tipos de frutas.

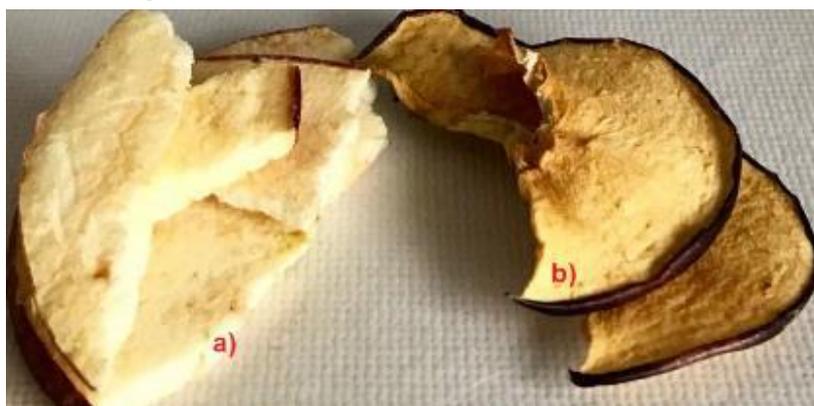


*Figura 110. Liofilizado de frutas*

La liofilización tiene ventaja sobre métodos como el secado a presión atmosférica y deshidratación, pues los alimentos conservan mejor sus propiedades como sabor y aroma, aunque la apariencia es diferente, como podemos ver en las **Figuras 111 y 112** (Sierra, 2019).



*Figura 111. Fruta deshidratada vs. fruta liofilizada*



*Figura 112. a) Fruta liofilizada b) Fruta seca*

Como se observa en la **Figura 113**, la preservación de flores para fines decorativos es otra de las aplicaciones de la liofilización.



*Figura 113. Liofilización en flores para fines decorativos*

Otra de sus aplicaciones es la conservación de **productos farmacéuticos y materiales biológicos** como **plasma sanguíneo, sueros y vacunas**, con el objetivo de preservarlos el mayor tiempo posible sin necesidad de refrigeración (Ubach, 2020).

## 2.9 Transesterificación

Es la reacción que se lleva a cabo para dar lugar a **ésteres metílicos y glicerol** como subproducto, teniendo como materia prima un alcohol y triglicéridos, que provienen de un aceite vegetal o una grasa animal (Navas M. B., 2018).

Los ésteres son compuestos orgánicos derivados del petróleo o inorgánicos oxigenados en los que uno o más protones son sustituidos por grupos orgánicos alquilino. La palabra "éster" proviene del alemán Essig-Äther que significa éster de vinagre (antiguamente acetato de etilo) (Rondón, Díaz, Fernández, & Tabio, 2017).

El glicerol o glicerina es un compuesto químico no tóxico muy versátil. Se usa en alimentos como edulcorante y conservador, en bebidas deportivas, lociones para la piel, pasta de dientes, enjuague bucal, medicamentos, anticongelante para autos e incluso explosivos (Dewey, 2022).

La aplicación más significativa de la transesterificación es la producción de biodiesel, sin embargo, los ésteres metílicos también se utilizan como materia prima en la producción de coadyuvantes de uso agrícola para incrementar la eficiencia de fungicidas e insecticidas (Molinari, 2021).

### Reacción de transesterificación

La transesterificación consiste en una serie de reacciones consecutivas y reversibles. En cada paso se genera una molécula de éster metílico de ácidos grasos, y los triglicéridos son convertidos en diglicéridos, monoglicéridos y finalmente el glicerol, uno de los principales productos secundarios (Navas M. B., 2018).

En la **Figura 114** se muestra la reacción de transesterificación.

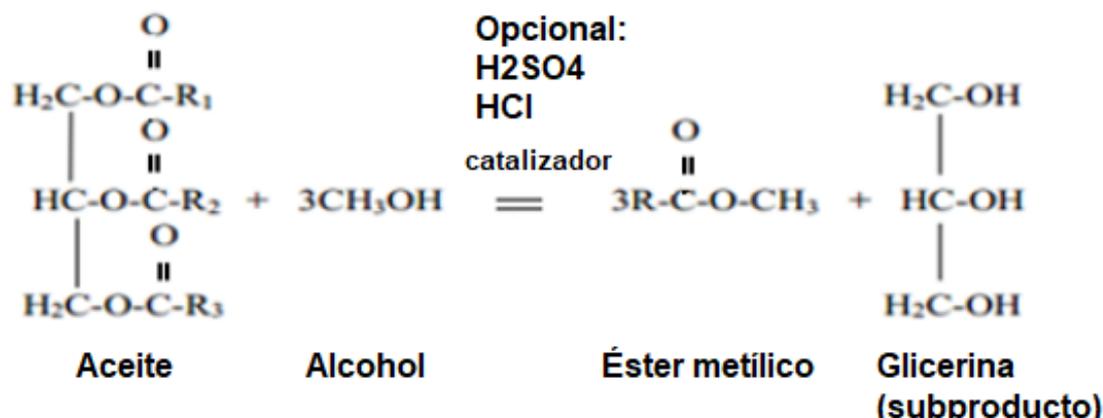


Figura 114. Reacción de transesterificación.  
Adaptado de (Rondón, Díaz, Fernández, & Tabio, 2017).

### Etapas de la transesterificación

- 1) Los triglicéridos se hacen reaccionar con moléculas de bajo peso molecular como alcoholes (**etanol, metanol**, etc.) tal como se muestra en la **Figura 115**.

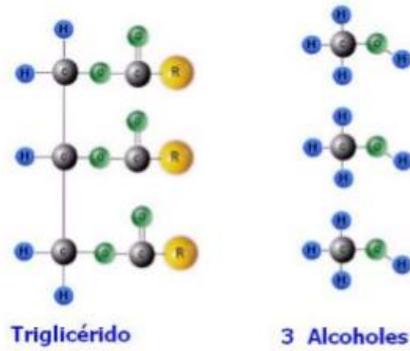


Figura 115. Etapa 1 de la transesterificación: los triglicéridos reaccionan con moléculas de alcohol

- 2) Se produce un intercambio de sus grupos funcionales y los alcoholes comienzan a atacar el triglicérido para formar un **diglicérido (Figura 116)**.



Figura 116. Etapa 2 de la transesterificación: formación de un diglicérido

- 3) Se forma un monoglicérido y queda todavía un alcohol sin reaccionar (**Figura 117**).

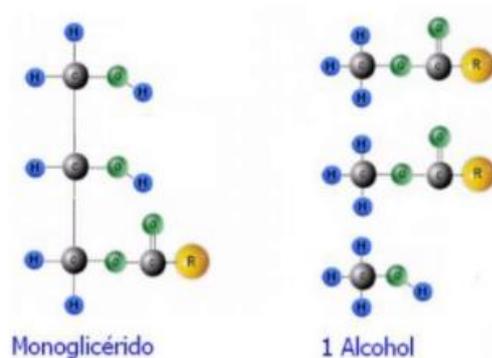


Figura 117. Etapa 3 de la transesterificación: formación de un monoglicérido.

- 4) Al final de la reacción se forma una molécula de glicerol, conocida como **glicerina**, así como **tres moléculas de éster metílico (Figura 118)**.

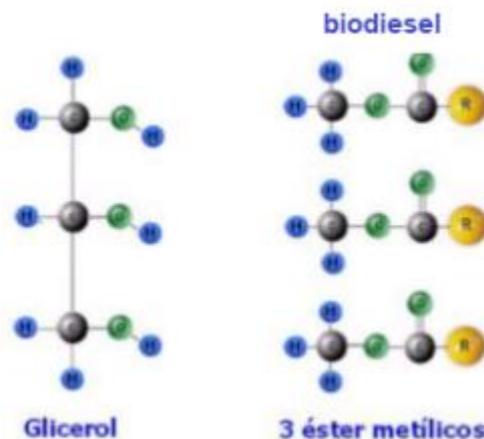


Figura 118. Etapa 4 de la transesterificación: formación de una molécula de glicerol y tres ésteres metílicos.

## Biodiesel

El **biodiesel** está definido por la American Society for Testing and Materials (ASTM) como un combustible formado por ésteres mono-alquílicos de ácidos grasos derivados de aceites vegetales o grasas animales (Navas M. B., 2018).

Es un biocombustible no tóxico, biodegradable y que proviene de fuentes renovables que puede ser empleado en motores de compresión-ignición con la ventaja de producir un menor daño al medio ambiente debido a que el biodiesel puede generar **dos veces menos CO<sub>2</sub> comparado con combustibles fósiles** (Navas M. B., 2018).

### Materia prima para la producción de biodiesel

Las principales materias primas utilizadas en la producción de biodiesel consisten en grasas y aceites, las cuales se describen a continuación:

- **Aceites vegetales:** Sus constituyentes principales son **triglicéridos y ácidos grasos** y son ampliamente utilizados debido a su bajo costo y disponibilidad, además de su alta viscosidad, baja volatilidad y renovabilidad, propiedades que los hacen ser preferidos sobre las grasas vegetales (Navas M. B., 2018).

Cada región produce biodiesel de acuerdo con las características de la zona, pero los aceites más empleados son **aceite de soja, de colza, de palma, de ricino, jatropha, karanja, coyol, algas y algodón** (Navas M. B., 2018).

- **Grasas animales:** Es un subproducto de la industria de carnes y es muy utilizado por su bajo precio. Dichas grasas pueden ser de **cerdo, pescado, res y pollo**. Hasta ahora se han realizado muy pocos estudios referentes al uso de grasas animales para la producción de biodiesel debido, entre otras cosas, a la dificultad para su manipulación y transporte, además de la producción masiva de aceites vegetales (Incertis, Bolta, & Pascual, 2022).
- **Aceites gastados de cocina:** A pesar de ser materia prima de baja calidad, este tipo de aceites han despertado gran interés por su bajo costo, sin embargo, poseen un alto contenido de ácidos grasos libres y agua a causa de su exposición a altas temperaturas y al contacto con la comida (Navas M. B., 2018).

El contenido de ácidos grasos y agua en el aceite usado de cocina suele ser contraproducente en la producción de biodiesel, pues disminuye la transformación de triglicéridos y hace necesario el uso de catalizadores alcalinos para neutralizarlos (Navas M. B., 2018).

## Convenios para la recolección de aceite vegetal usado

En 2012, la Facultad de Ingeniería de la UNAM firmó un convenio de colaboración e intercambio tecnológico en el área de biocombustibles con la empresa Biofuels de México, líder en el acopio y recolección de aceite vegetal usado que aprovecha los aceites comestibles de diversas cadenas de restaurantes para su conversión en biodiesel y posterior uso en transportes como Turibús y ADO.

La empresa donó también una planta de biodiesel a la Facultad para transformar aceite vegetal proveniente de cafeterías y establecimientos de comida del campus en combustible para el sistema de transporte Pumabús en Ciudad Universitaria, lo que reduciría al 12% las emisiones contaminantes de cada unidad.

Alumnos de Ingeniería Química, Civil, Eléctrica, Mecánica, Mecatrónica e Industrial realizaron una cuantificación del aceite de desecho de los diferentes establecimientos de comida del campus, la cual asciende aproximadamente a 10, 720 litros al año.

(González, 2012).

## Reactivos para la producción de biodiesel

Para que la reacción de transesterificación se lleve a cabo adecuadamente, se necesitan adicionar ciertos materiales reactivos, los cuales son:

**Alcoholes:** Dependiendo del tipo de aceite usado, se necesita cierta relación entre alcohol y aceite para completar la transesterificación, y estequiométricamente un mol de triglicéridos requiere 3 moles de alcohol para completar dicha reacción (Navas M. B., 2018).

Entre los alcoholes más empleados en la producción de biodiesel se encuentran **metanol, etanol, propanol, butanol y amil alcohol** (Navas M. B., 2018).

**Catalizadores (opcionales):** La reacción de transesterificación requiere de catalizadores para mejorar la velocidad de reacción y su rendimiento final. Estos pueden ser (Navas M. B., 2018):

**a. Ácidos homogéneos:**

- Ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ )
- Ácido clorhídrico ( $HCl$ )
- Ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ )
- Sulfonato ( $RSO_3$ )

**b. Ácidos heterogéneos:**

- Zeolitas
- Resinas sulfónicas

**c. Básicos heterogéneos:**

- Óxido de magnesio ( $MgO$ )
- Óxido de calcio ( $CaO$ )

**d. Básicos homogéneos:**

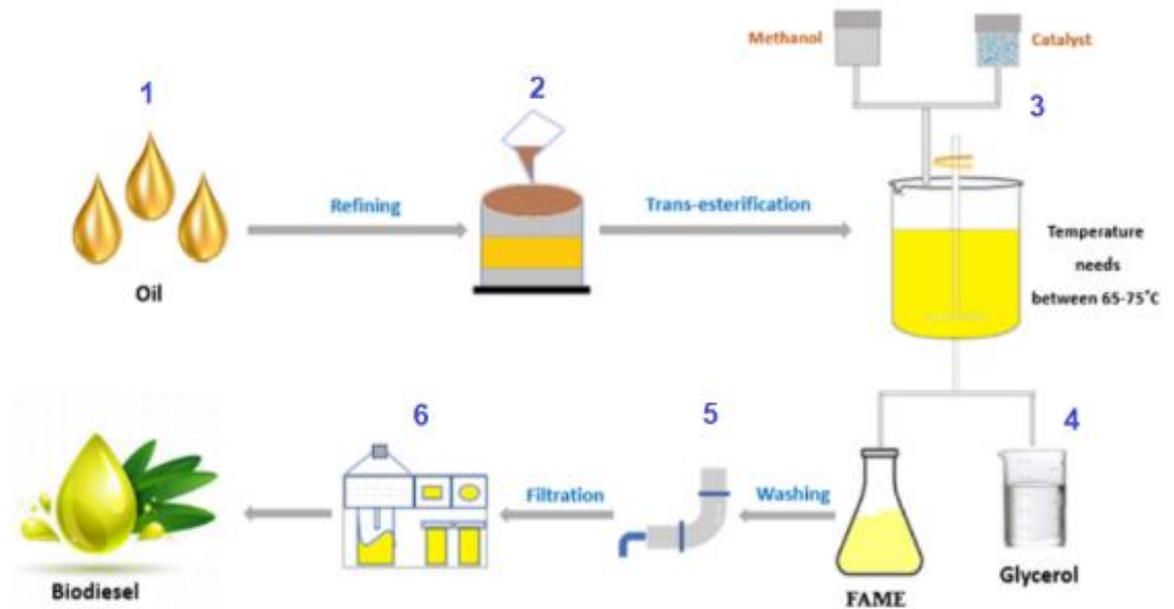
- Hidróxido de potasio ( $KOH$ )
- Hidróxido de sodio ( $NaOH$ )

De los catalizadores mencionados los que más se suelen utilizar son los **homogéneos básicos** ya que actúan más rápido y permiten operar en condiciones moderadas. Al utilizar un catalizador ácido se requieren condiciones de temperaturas elevadas y tiempos de reacción largos (Ortiz J. C., 2011)

Al inicio de la reacción de transesterificación, la mezcla entre un aceite vegetal y un alcohol consiste generalmente en dos fases inmiscibles. Lo mismo al final de la reacción, donde se encuentran presentes la **fase éster y la fase glicerol**, las cuales pueden ser separadas por gravedad o centrifugación (Navas M. B., 2018).

### Configuración básica de planta

Como se muestra en la **Figura 119**, después de la obtención del aceite vegetal **(1)** la producción de biodiesel comienza con el refinamiento del aceite (en caso de ser uno ya usado) con el fin de remover impurezas y otros contaminantes de este **(2)**. Posteriormente se mezcla con un alcohol (metanol, etanol, propanol, etc.) y opcionalmente con un catalizador para mejorar el rendimiento de la reacción **(3)** (Navas M. B., 2018).



*Figura 119. Configuración básica de planta en la producción del biodiesel.*

Es importante resaltar que dependiendo el tipo de catalizador y alcohol que se use, debe mantenerse una temperatura entre 65°C y 75°C, **siempre debajo de la temperatura de ebullición del alcohol** para que la transesterificación se lleve a cabo de forma adecuada. Una vez completada la reacción, se obtiene el subproducto llamado **glicerol** y un conjunto de **ésteres metílicos (4)**. Los ésteres metílicos son sometidos a un proceso de lavado **(5)** y filtración **(6)** para obtener **biodiesel** de mayor calidad (Navas M. B., 2018).

## 2.10 Aglomeración

El término aglomeración implica la formación de agregados por medio de la adhesión de partículas sólidas: aquella que se realiza mediante **agitación** recibe el nombre de **granulación**, mientras que la aglomeración realizada por medio de **compresión** recibe el nombre de **compactación** (Ortiz A. , 2017).

Los conjuntos de partículas pueden recibir nombres tales como: **copos, grumos, aglomerados, pellets, briquetas o pastillas** (Gunt Hamburg, 2022).

Los principales objetivos de la aglomeración son (Perry, 1997):

- Producción de formas y estructuras útiles
- Suministro de una cantidad definida para dosificación y medición
- Eliminación de riesgos por manipulación de polvos
- Reducción de pérdida de polvos
- Remoción de partículas de un líquido
- Control de solubilidad y porosidad de un producto

### Aglutinantes

Los aglutinantes son aditivos cuya función es **unir partículas sólidas para obtener un aglomerado**. La elección del aglutinante es un factor importante en la aglomeración, porque además de ayudar a formar el aglomerado, mejora las características y propiedades del producto final, pues mantiene la fuerza de enlace entre las partículas aglomeradas (Ortiz A. , 2017).

En la **Tabla 7** se enlistan los principales aglutinantes utilizados, clasificados de acuerdo con su origen:

*Tabla 7. Clasificación de los diferentes tipos de aglutinantes por su origen. Adaptado de (Ortiz A. , 2017).*

| Clasificación de los diferentes tipos de aglutinantes por su origen  |   |
|--|---|
| Naturales  | Polímeros sintéticos  |
| -Almidón de maíz<br>-Almidón pregelatinizado<br>-Gelatina<br>-Goma acacia y de tragacanto<br>-Alginato de sodio<br>-Ácido algínico | -Polivinilpirrolidona (PVP)<br>-Metilcelulosa<br>-Hidroxipropilcelulosa<br>-Carboximetilcelulosa sódica<br>-Etilcelulosa<br>-Alcohol polivinílico |

### Equipo para aglomeración

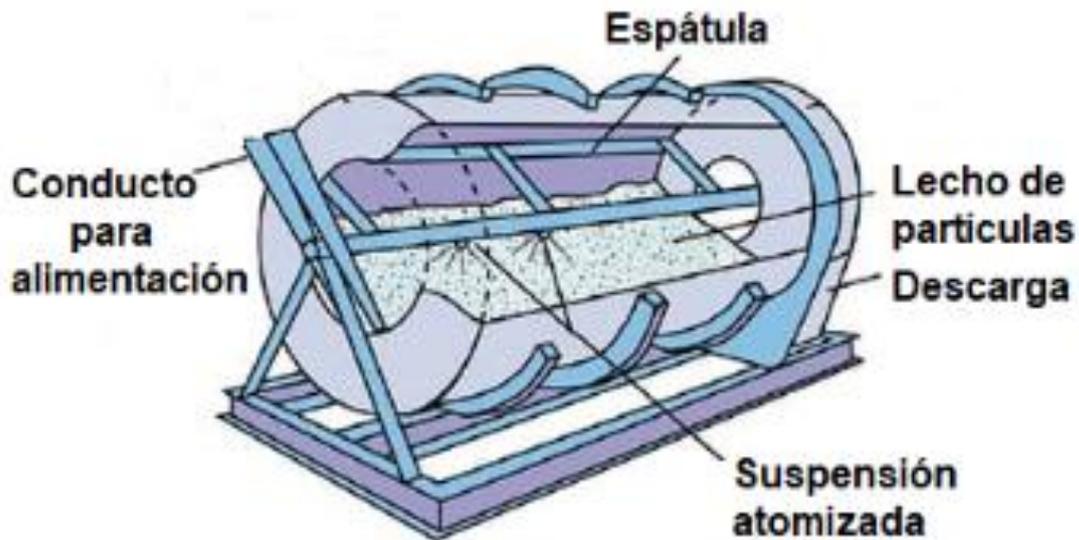
Para métodos de **aglomeración por agitación**, generalmente se usan los siguientes equipos:

#### Granuladores de tambor rotatorio

Promueven el contacto entre finos y gruesos y se usan cuando el material contiene una gran proporción de finos (mayor a 15% de tamaño menor a 150 [µm]) y un contenido de gruesos mayor al 50% (Perry, 1997).

En este equipo, los aglutinantes líquidos se atomizan sobre el lecho de partículas para promover la nucleación de polvos finos o un recubrimiento para tamaños de partículas superiores al tamaño de gota (Jenkins, 2017).

En la **Figura 120** se puede observar un esquema del funcionamiento de un granulador de tambor rotatorio, donde la alimentación entra por un conducto en uno de los extremos. El tambor va girando mientras se atomiza el aglutinante sobre el lecho de partículas y una espátula va separando el polvo que queda en las paredes del tambor (Jenkins, 2017).



*Figura 120. Funcionamiento de un granulador de tambor rotatorio. Adaptado de (Jenkins, 2017).*

Los granuladores de tambor rotatorio como el que se muestra en la **Figura 121**, puede ser utilizado para la aglomeración de finos de minerales como oro, plata, níquel y cobre, así como para la granulación de fertilizantes y de finos de mineral de hierro en el proceso de fabricación de acero.

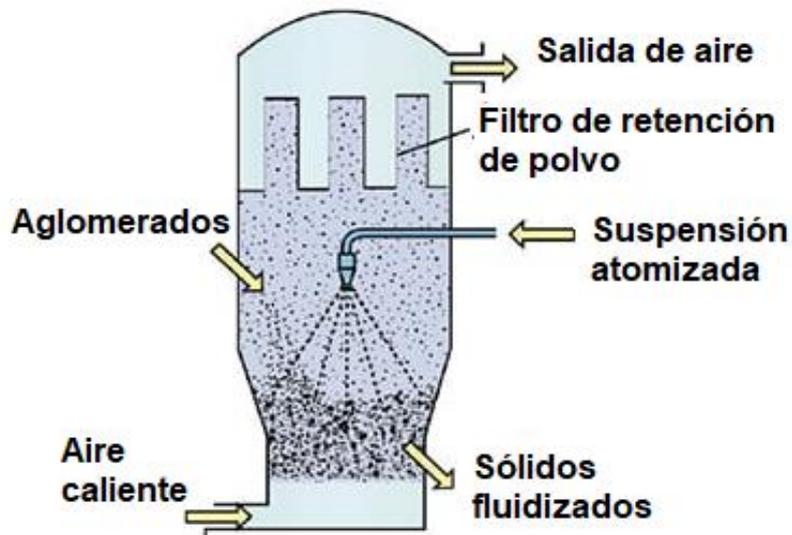


*Figura 121. Granulador de tambor rotatorio*

## Granuladores de lecho fluidizado

En este equipo las partículas se mezclan y son secadas con aire caliente. La alimentación es generalmente una mezcla de ingredientes sólidos que incluye un ingrediente activo, aglutinantes, diluyentes, lubricantes, coadyuvantes, entre otros. Sin embargo, la aglomeración es inducida de muchas formas: en caso de ser aglutinantes líquidos, estos son atomizados en el lecho de partículas para cubrir las superficies granuladas, o las gotas de spray forman pequeños núcleos si la alimentación es en polvo (Perry, 1997).

En la **Figura 122** se muestra la configuración interna de un granulador de lecho fluidizado, donde la entrada de aire caliente se encuentra casi siempre en la parte inferior del granulador, además de tener filtros de bolsa para la retención de polvo y evitar que escape por el conducto de salida del aire.



*Figura 122. Configuración interna de un granulador de lecho fluidizado.  
Adaptado de (Jenkins, 2017).*

En la **Figura 123** se muestra un granulador de lecho fluidizado, comúnmente utilizado para aglomerar leche en polvo instantánea:



*Figura 123. Granulador de lecho fluidizado*

## Granuladores de disco

También conocidos como **peletizadores (Figura 124)**, consisten en un disco rotatorio inclinado al cual se le agregan los sólidos y aglutinantes constantemente mientras se forma una capa de material cuyo grosor es controlado por raspadores que oscilan mecánicamente (Perry, 1997).

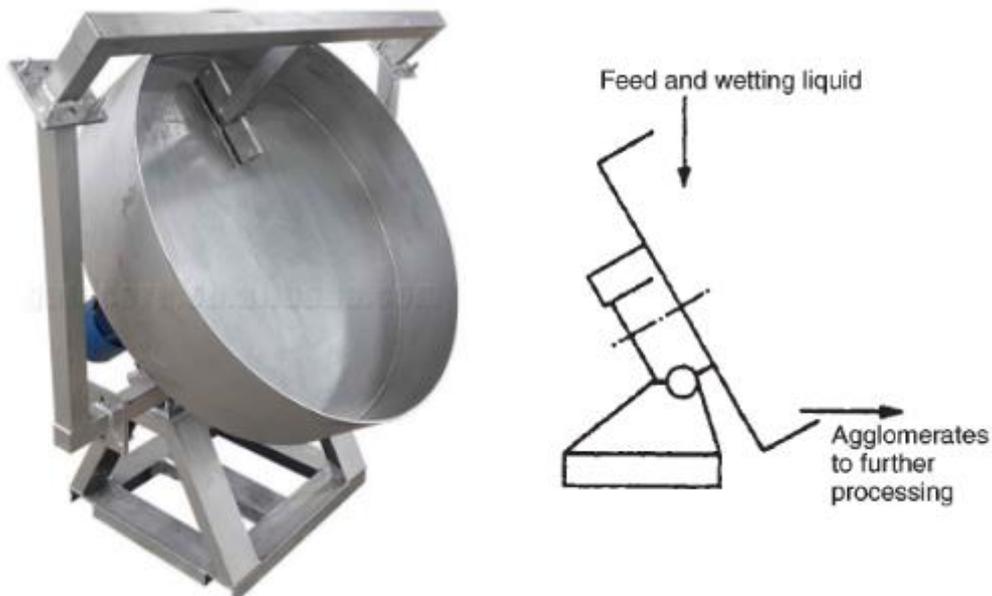


Figura 124. Granulador de disco

Para métodos de **aglomeración por compresión**, la alimentación se coloca en equipos como:

## Prensas de rodillos

Como se observa en la **Figura 125**, el material a aglomerar es forzado a pasar entre rodillos giratorios aumentando la presión del material a medida que el espacio entre los rodillos se reduce. Dicha presión, junto con el tiempo de permanencia en la prensa, controla la calidad del aglomerado, produciendo láminas de material sólido (Jenkins, 2017).

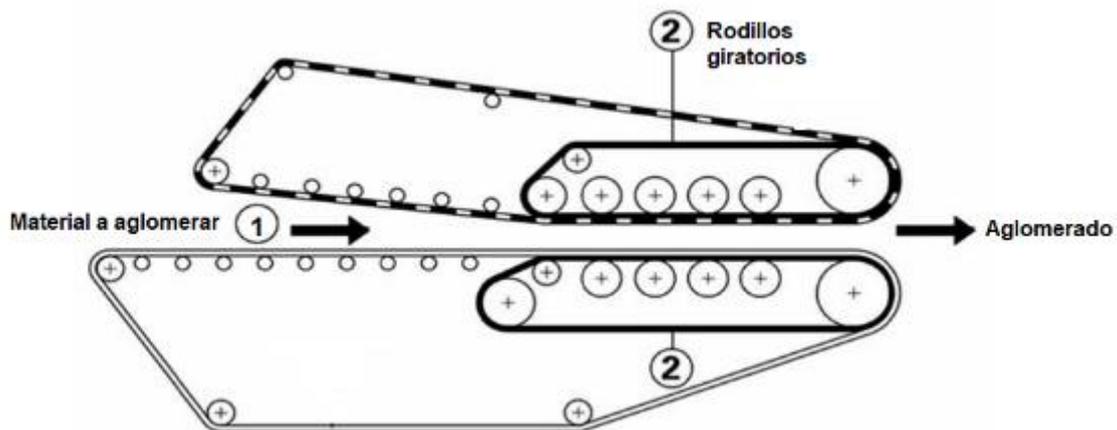
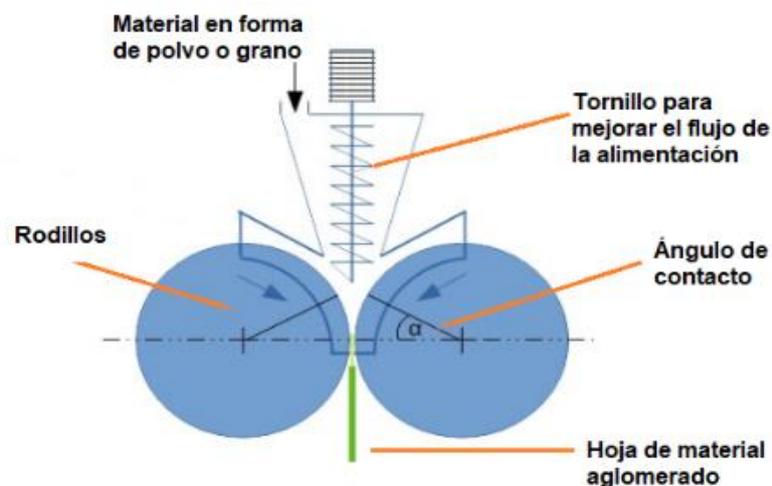


Figura 125. Funcionamiento de una prensa de rodillos

Las prensas de rodillo son usadas en la **industria metalúrgica** para la producción de estructuras, figuras y formas más usuales mediante la aglomeración de minerales de hierro, oro y plata (Ortiz A. , 2017).

### Briquetadoras

En estos equipos la alimentación es en forma de polvo o grano, la cual pasa a través de una tolva que tiene en su interior un tornillo helicoidal que permite un mejor flujo del material a aglomerar, como se muestra en la **Figura 126**. La parte principal de este equipo son el par de rodillos rotatorios en su interior, pues una vez que el material pasa a través de ellos, es compactado lo suficiente gracias al ángulo de contacto de los rodillos (Charcoal Machine, 2021).



*Figura 126. Funcionamiento de una briquetadora*

En la **Figura 127** se muestran máquinas briquetadoras, usada para compactar distintos materiales como aserrín, madera molida, aluminio, acero, plástico, carbón, entre otros, para formar bloques sólidos compactos llamados **briquetas**.



*Figura 127. Briquetadora (Charcoal Machine, 2021).*

A nivel industrial, la operación de aglomeración involucra otras operaciones unitarias tales como molienda, mezclado y secado que en conjunto forman un circuito de aglomeración, como el que se muestra en la **Figura 128**, que es típico de procesos de la industria farmacéutica y química, donde generalmente se incluyen tanto el método de granulación por medio de agitación **(1)** como de compresión **(2)** para la fabricación de tabletas y comprimidos (Perry, 1997).

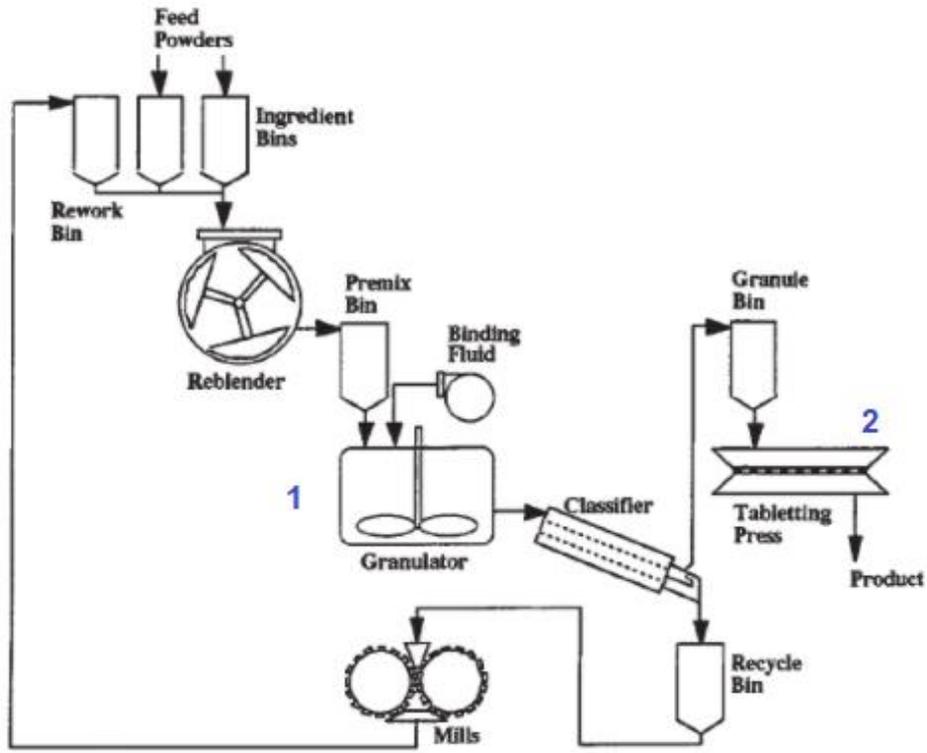


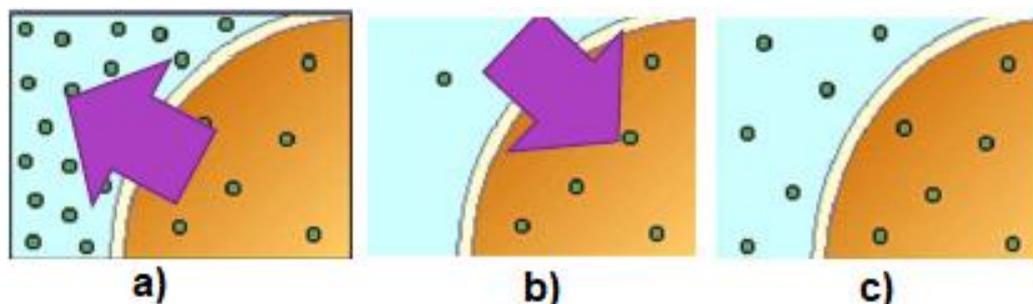
Figura 128. Circuito de aglomeración (Perry, 1997).

## 2.11 Ósmosis

Cuando se habla de ósmosis, se debe tener en cuenta que en dicha operación están involucradas dos o más soluciones de concentraciones diferentes, las cuales podemos clasificar en:

- a) **Soluciones hipertónicas:** Son aquellas con una mayor concentración de soluto con respecto a otra solución.
- b) **Soluciones hipotónicas:** Son aquellas con una menor concentración de soluto respecto a otra solución.
- c) **Soluciones isotónicas:** Son aquellas que tienen la misma concentración que otra solución.

En la **Figura 129** se muestra una representación gráfica de los tipos de soluciones hipertónica, hipotónica e isotónica:



*Figura 129. Soluciones: a) Hipertónica, b) Hipotónica y c) Isotónica*

Por lo tanto, **ósmosis** es la difusión de un solvente **desde la solución menos concentrada (hipotónica) hacia la más concentrada (hipertónica)**, donde la actividad del solvente es menor. Esto ocurre en la separación de soluciones miscibles de concentración diferente por medio de una membrana permeable al solvente pero casi impermeable al soluto (McCabe, 2007).

### Ósmosis inversa

Es la operación que controla el paso forzado del fluido en sentido contrario: **desde la disolución hipertónica hacia la hipotónica**, lo cual se logra ejerciendo una presión superior a la presión osmótica. El fluido atraviesa la membrana a presión, mientras que los sólidos disueltos (soluto) son retenidos (McCabe, 2007).

Cuando se aplica una presión más alta que la presión osmótica, el solvente se difunde desde la solución más concentrada a través de la membrana dentro de la solución diluida. A esto se le conoce como **ósmosis inversa**, pues el flujo del solvente es opuesto al flujo osmótico normal (McCabe, 2007).

En la **Figura 130** podemos observar el principio de funcionamiento de las operaciones de ósmosis y ósmosis inversa, en donde el flujo del líquido se da de la solución diluida o menos concentrada a la solución concentrada y de la solución concentrada a la menos concentrada, respectivamente.

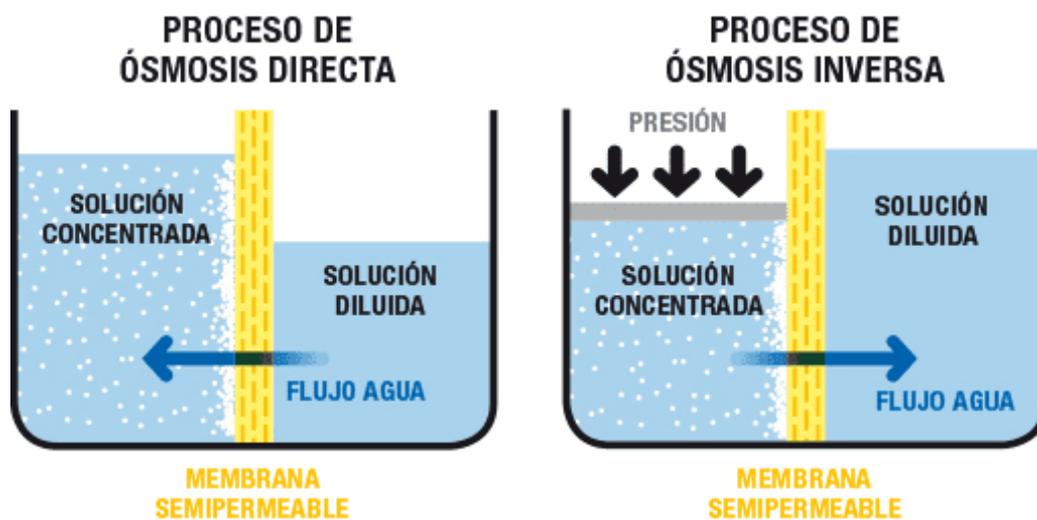


Figura 130. Principio de funcionamiento de ósmosis y ósmosis inversa

Una de las principales ventajas de la ósmosis inversa es que la separación tiene lugar a temperatura ambiente y no existe cambio de fase. (McCabe, 2007).

### Aplicaciones de la operación de ósmosis inversa

Al ser una operación de ultrafiltración, la ósmosis inversa tiene diversas aplicaciones. A continuación, se mencionan algunas de ellas (Orellana, 2005):

- **Abastecimiento de agua potable o de aguas industriales**, sobre todo en localidades que como recursos naturales solo disponen de aguas salobres y la desmineralización del agua es el objetivo principal.
- **Producción de agua de elevada calidad**, como las aguas de calderas, aguas ultrapuras de la industria electrónica, farmacéutica, nuclear, de laboratorios y hospitales, donde se utilizan las propiedades de las membranas para eliminar no solo las sales disueltas, sino también las moléculas orgánicas de masa superior a 70 [g/mol] aproximadamente, así como virus.
- **Desalinización de agua de mar**. Comparado con métodos como la destilación o el intercambio de iones, la instalación de un sistema de ósmosis inversa es mucho más sencillo y su consumo eléctrico es menor, sin embargo, para el pretratamiento del agua se requieren grandes cantidades de consumo de aglutinantes, membranas de filtración, ultrafiltración, entre otros materiales (Jones, Qadir, van Vliet, Smakhtin, & Kang, 2019).  
Cabe mencionar que el uso de energías renovables como alimentación para las operaciones de plantas desalinizadoras en vez de combustibles fósiles, reduce las emisiones de gases de efecto invernadero al ambiente (Shahabi, McHugh, Anda, & Ho, 2013).
- **Tratamiento de aguas residuales industriales**, como las provenientes de los baños de galvanización donde se recuperan los metales o la recuperación de nitrato amónico en condensados de industrias productoras de abonos nitrogenados.
- **Tratamientos de recuperación de agua de calidad a la salida de sistemas clásicos de tratamiento de agua residual**, lo que hace posible la eliminación de productos orgánicos disueltos y de sales que subsisten después de los tratamientos clásicos de adsorción.

Por el tipo de industria, otras aplicaciones son (Asociación Española de Desalación y Reutilización AEDyR, 2020):

- a. **Industria farmacéutica:** La creación de productos farmacéuticos de uso humano y veterinario requiere niveles de sales disueltas bacterias y restos orgánicos, hasta 10 mil veces inferiores a los del agua potable.
- b. **Industria química:** Se usa en la manufactura de disolventes, pinturas, plásticos, pesticidas y productos agroquímicos, fibras sintéticas, resinas, etc.
- c. **Industria sanitaria:** Esterilización y desinfección termal de instrumental sanitario y equipos médicos como endoscopios.
- d. **Industria electrónica:** Proceso de manufactura, principalmente en el aclarado de varias fases del proceso de producción y en la descarga de los efluentes utilizados en los procesos.
- e. **Industria de alimentos y bebidas:** Refrigeración, producción de vapor y labores de limpieza para mantener la calidad en la producción de alimentos y prevenir problemas de salud.
- f. **Producción de energía eléctrica:** Eliminación de impurezas en el vapor de agua usado para hacer girar las turbinas que generan la electricidad. Estas impurezas reducen la electricidad producida y aumentan el combustible consumido en el proceso.
- g. **Industria metalúrgica:** Eliminación de impurezas para soldadura y soluciones de recubrimiento y sellado.
- h. **Agricultura y ganadería:** Adecuación del agua para cultivos y ganado en zonas donde el agua tiene un alto contenido de sales.

## **Funcionamiento de una planta desaladora por ósmosis inversa**

El proceso de desalación de agua por ósmosis inversa se lleva a cabo en las siguientes etapas (Asociación Española de Desalación y Reutilización AEDyR, 2019):

### **Fase 1: Captación de agua**

Se obtiene el agua de mar (también conocida como agua bruta) a través de tuberías impulsadas por bombeo hacia la planta de tratamiento.

### **Fase 2: Pretratamiento**

Una vez que el agua de mar llega a la planta, se aplica un aglutinante para formar agregados de partículas que serán eliminadas tras un proceso de decantación y continúa un proceso de desinfección para eliminar la carga biológica del agua. Posteriormente, el agua pasa a través de operaciones de filtración y ultrafiltración con distintas presiones para eliminar la materia en suspensión restante.

Cabe mencionar que las membranas de ósmosis inversa son muy sensibles a las variaciones en la calidad del agua y a la temperatura, lo que hace fundamental que esta etapa sea óptima para evitar dañar dichas membranas.

### **Fase 3: Membranas**

El agua de la fase de pretratamiento es impulsada por bombas de alta presión hacia las membranas de ósmosis inversa. La presión ejercida debe superar la presión osmótica.

Después de pasar a través de las membranas, se obtienen dos corrientes diferentes: **agua desalada** (producto final) con baja concentración de sales y **salmuera**, que es agua residual con mayor cantidad de sales.

#### Fase 4: Post-tratamiento

El agua desalada se almacena y es tratada según el uso para el que sea destinada. Si es necesario, se remineraliza para mejorar su calidad para el consumo humano según las normas sanitarias vigentes y es conducida a las redes de abastecimiento.

#### Fase 5: Descarga de salmuera

El resto de salmuera que no se utiliza es enviada de vuelta al mar. Para ello se diseñan sistemas de descarga de salmuera que minimizan el impacto al medio ambiente, a través de la construcción de emisarios con difusores y dilución previa que hacen que la salmuera, al entrar en contacto con el mar, se diluya rápidamente. De lo contrario, un impacto de salmuera en especies marinas sería letal, afectando al ecosistema marino (Jones, Qadir, van Vliet, Smakhtin, & Kang, 2019).

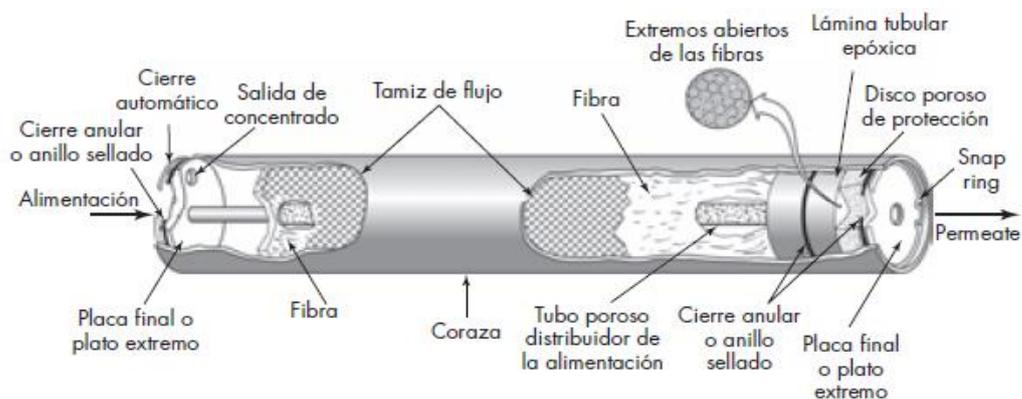
En la **Figura 131** se muestra un equipo de ósmosis inversa.



*Figura 131. Equipo de ósmosis inversa*

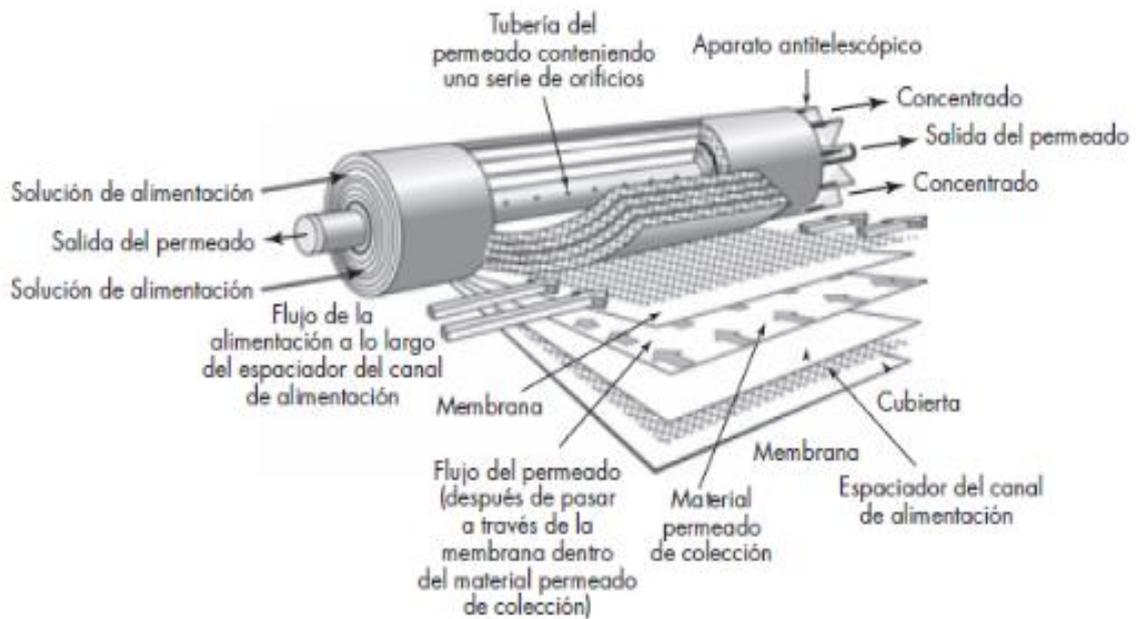
#### Membranas de separación para ósmosis inversa

Existen diferentes tipos de membranas utilizadas para esta operación. Las **membranas de fibra hueca** son un ejemplo de ellas, y generalmente son hechas con la superficie de transferencia en el exterior y un paquete con miles de fibras empaquetadas se sella en un cilindro metálico. La alimentación pasa a lo largo de las fibras o flujos paralelos hacia las fibras en el lado de la coraza, y el agua producida se colecta de los lúmenes de las fibras. En la **Figura 132** se puede observar el interior de un separador de fibra hueca (McCabe, 2007).



*Figura 132. Membrana de fibra hueca (McCabe, 2007).*

Otro tipo de membranas utilizadas son las **membranas de lámina plana**, que se utilizan en módulos de espiral abierta. Dicha membrana se dobla sobre una lámina espaciadora porosa a través de la cual drena el producto y los bordes se sellan. Un tamiz plástico se coloca en la parte superior, el cual sirve como distribuidor de la alimentación y el emparedado se enrolla en una espiral alrededor de una pequeña tubería de drenado perforada, como se observa en la **Figura 133** (McCabe, 2007).



*Figura 133. Separador de espiral abierta para ósmosis inversa (McCabe, 2007)*

### Sistema de ósmosis inversa de uso doméstico

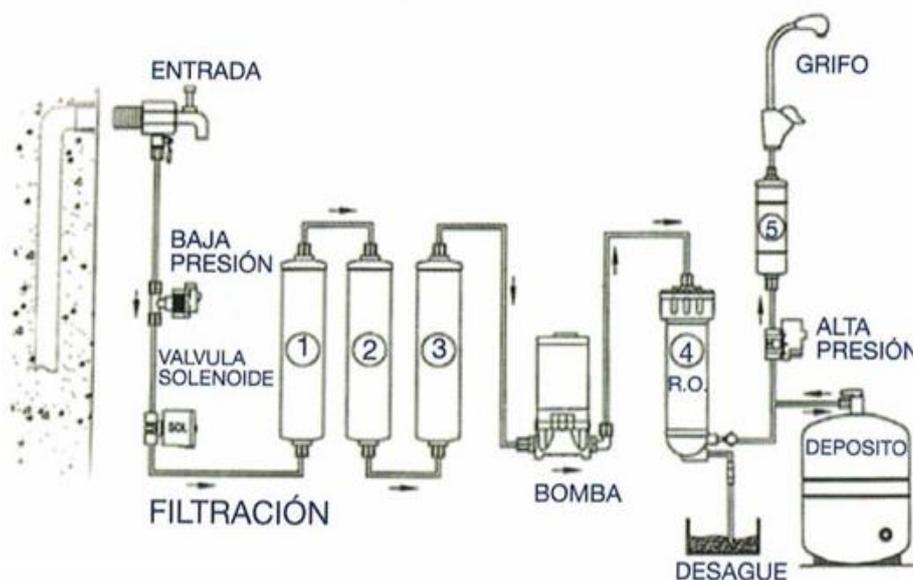
Están diseñados para reducir los minerales presentes en el agua y producir agua con bajo contenido de sales. En la **Figura 134** podemos observar un sistema de ósmosis inversa para uso doméstico. Este tipo de sistemas retienen virus y bacterias, metales como arsénico, plomo y cromo, por lo que son muy utilizados en zonas con alta concentración de metales pesados. Pueden proveer hasta 185 [L] de agua purificada al día (Rotoplas, 2020).



*Figura 134. Sistema de ósmosis inversa de uso doméstico*

En la **Figura 135** se muestra un diagrama de funcionamiento de un sistema doméstico de ósmosis inversa, el cual funciona de la siguiente manera:

1. Entra el agua desde el sistema de abastecimiento hacia el equipo, pasando primero por un pre-filtro de sedimentos de 5  $\mu$ , el cual se encarga de retener todas las partículas de mayor tamaño contenidas en el líquido (1).
2. El agua pasa por dos pre-filtros más, normalmente de carbón activado, que se encargan de decolorar el agua y prepararla para que pueda entrar al sistema de ósmosis inversa (2 y 3).
3. Se bombea agua hacia la membrana de ósmosis inversa (4) y el líquido se filtra eliminando las impurezas que quedan contenidas.
4. El agua que no pasa por el proceso de filtración se va directo al desagüe, mientras que el agua que pasa por la membrana se acumula en el depósito (5), lista para su uso.



*Figura 135. Diagrama de funcionamiento de un sistema doméstico de ósmosis inversa (Hidroquivir S.L., 2019).*

## **Desalación y producción de salmuera: Impacto al medio ambiente**

La salinidad del agua está dada por la cantidad de sales minerales disueltas en ella. En promedio, la salinidad del agua de mar está comprendida entre 35 y 45 [g/L]. La concentración de sales en la salmuera, por otro lado, es mayor a la salinidad promedio del agua de mar y depende de factores como los ratios de conversión de la planta desaladora y el nivel de salinidad del agua de entrada. Por lo tanto, la mayor o menor dilución durante la descarga de salmuera en el agua de mar u otros cuerpos de agua depende de factores como su diferencia de densidades y temperaturas, la velocidad de salida de la salmuera y la altura y ángulo de la descarga respecto al fondo marino, todos ellos controlables en el diseño del sistema de descarga (Asociación Española de Desalación y Reutilización AEDyR, 2019).

Existe una gran inquietud asociada con la descarga de salmuera con grandes concentraciones salinas en los diferentes cuerpos de agua. Las más importantes están relacionadas con los efectos ecológicos asociados a alteraciones fisicoquímicas del agua de mar en zonas cercanas o zonas donde se descarga directamente la salmuera, como el incremento en la salinidad del agua. A esto se le añade la descarga de productos

químicos utilizados en el pretratamiento del agua en el proceso de desalación (Jones, Qadir, van Vliet, Smakhtin, & Kang, 2019).

Este tipo de acciones constituye un grave riesgo para los ecosistemas marinos, pues la alta concentración salina en la salmuera tiene una densidad muy elevada comparada con el cuerpo de agua receptor, lo cual provoca el agotamiento del oxígeno disuelto en este, generando un profundo impacto en los organismos marinos con efectos ecológicos en la cadena alimentaria (Jones, Qadir, van Vliet, Smakhtin, & Kang, 2019).

La producción de salmuera a nivel mundial es de 141.5 millones [ $m^3$ /día], es decir, 51.7 billones [ $m^3$ /año], la cual se concentra en gran parte en Medio Oriente y el norte de África, con un 70.3% de la producción a nivel mundial, como se muestra en la **Tabla 8** (Jones, Qadir, van Vliet, Smakhtin, & Kang, 2019).

*Tabla 8. Producción de salmuera y participación mundial por región, nivel de ingreso y uso por sector (Jones, Qadir, van Vliet, Smakhtin, & Kang, 2019).*

|                               | <b>Brine Production</b>               |            |
|-------------------------------|---------------------------------------|------------|
|                               | <b>(million <math>m^3</math>/day)</b> | <b>(%)</b> |
| <b>Global</b>                 | <b>141.5</b>                          | <b>100</b> |
| <b>Geographic region</b>      |                                       |            |
| Middle East & North Africa    | 99.4                                  | 70.3       |
| East Asia & Pacific           | 14.9                                  | 10.5       |
| North America                 | 5.6                                   | 3.9        |
| Western Europe                | 8.4                                   | 5.9        |
| Latin America & Caribbean     | 5.6                                   | 3.9        |
| Southern Asia                 | 3.7                                   | 2.6        |
| Eastern Europe & Central Asia | 2.5                                   | 1.8        |
| Sub-Saharan Africa            | 1.5                                   | 1.0        |
| <b>Income level</b>           |                                       |            |
| High                          | 110.2                                 | 77.9       |
| Upper middle                  | 20.7                                  | 14.6       |
| Lower middle                  | 10.5                                  | 7.4        |
| Low                           | 0.03                                  | 0.0        |
| <b>Sector use</b>             |                                       |            |
| Municipal                     | 106.5                                 | 75.2       |
| Industry                      | 27.4                                  | 19.3       |
| Power stations                | 5.8                                   | 4.1        |
| Irrigation                    | 1.1                                   | 0.8        |
| Military                      | 0.5                                   | 0.3        |
| Other                         | 0.3                                   | 0.2        |

En las **Figuras 136** y **137** se muestran las instalaciones y el equipo de una planta desaladora de agua a partir de ósmosis inversa ubicada en Ensenada, Baja California, con una capacidad de 250 [L/s]. Inició operaciones en junio de 2018 y cuenta con sistemas de captación de agua de mar, instalaciones de pretratamiento y un sistema de descarga

de salmuera al océano<sup>7</sup>, así como un tanque de almacenamiento, planta de bombeo y líneas de conducción al sistema de distribución de agua de Ensenada (El Economista, 2018).



*Figura 136. Planta desaladora de agua en Ensenada, Baja California (El Economista, 2018).*



*Figura 137. Equipo para ósmosis inversa en planta desaladora de Ensenada, Baja California (El Economista, 2018).*

---

<sup>7</sup> Ver material audiovisual: Planta desalinizadora de agua de mar Atacama

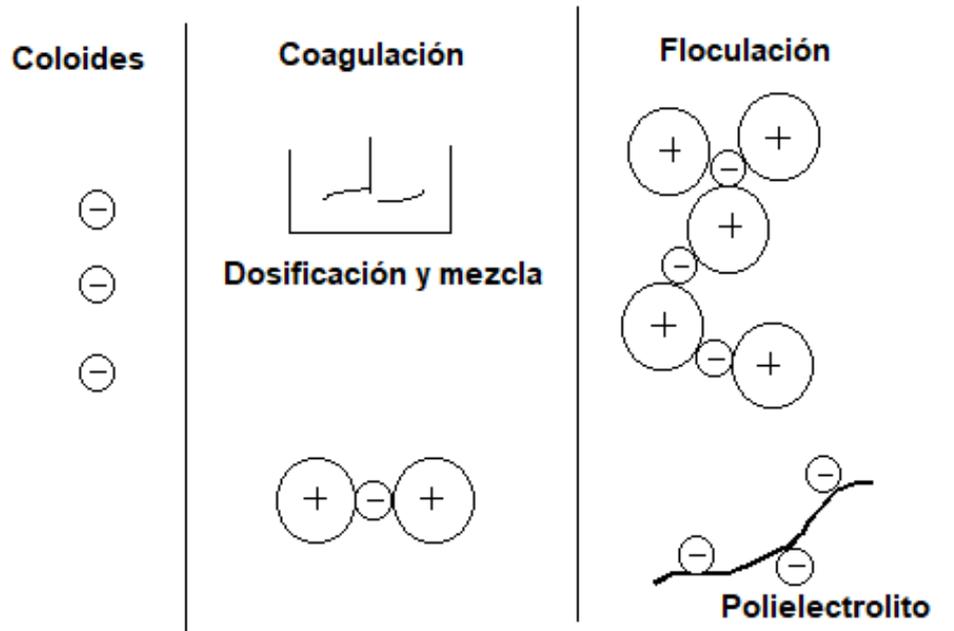
## 2.12 Sedimentación y floculación

La sedimentación es un método de separación de suspensiones, es decir, partículas sólidas en un fluido impulsadas por la fuerza de gravedad. Dicho fluido es un gas o un líquido, y está en movimiento o en reposo. El objetivo de esta operación es separar las partículas de un fluido para eliminar contaminantes, o bien, recuperar las partículas, como en el caso de la eliminación de polvos del aire y gases de combustión o la separación de sólidos o lodos de líquidos residuales (McCabe, 2007).

Las aguas naturales o residuales contienen sustancias disueltas o en suspensión que pueden ser orgánicas o inorgánicas, con tamaño y densidad tal que pueden ser eliminadas por simple sedimentación, sin embargo, existen partículas tan pequeñas y con carga eléctrica superficial llamadas **coloides** que se repelen continuamente, lo que impide su aglomeración y la formación de partículas pesadas que puedan sedimentar. Para ello, se requiere de una operación de coagulación-floculación (Lorenzo-Acosta, 2006).

La coagulación se define como el resultado de la acción electroquímica producida en el agua por adición de coagulantes químicos que reducen la carga eléctrica superficial de las partículas coloidales, generalmente negativa (Lorenzo-Acosta, 2006).

Es así que si los sólidos en la suspensión son principalmente partículas individuales de unos pocos micrómetros de diámetro, la velocidad de sedimentación por gravedad será muy lenta. Para evitar esto, las partículas forman aglomerados o agregados de partículas que sedimentan a velocidades razonables, promovidos por la acción de **agentes floculantes** como electrolitos fuertes que reducen las fuerzas repulsivas de las partículas coloidales cargadas, como se muestra en la **Figura 138** (McCabe, 2007).



*Figura 138. Interacciones entre las partículas en las operaciones de coagulación y floculación*

La operación de **coagulación-floculación** es, por lo tanto, el proceso en el que las partículas se aglomeran en pequeñas masas con peso específico superior al del agua, llamados flóculos (Lorenzo-Acosta, 2006). Esta operación se realiza también por adición de materiales como cal, alúmina o silicato de sodio (McCabe, 2007). En la **Figura 139** podemos observar el comportamiento de los floculantes en una suspensión de tipo coloidal.

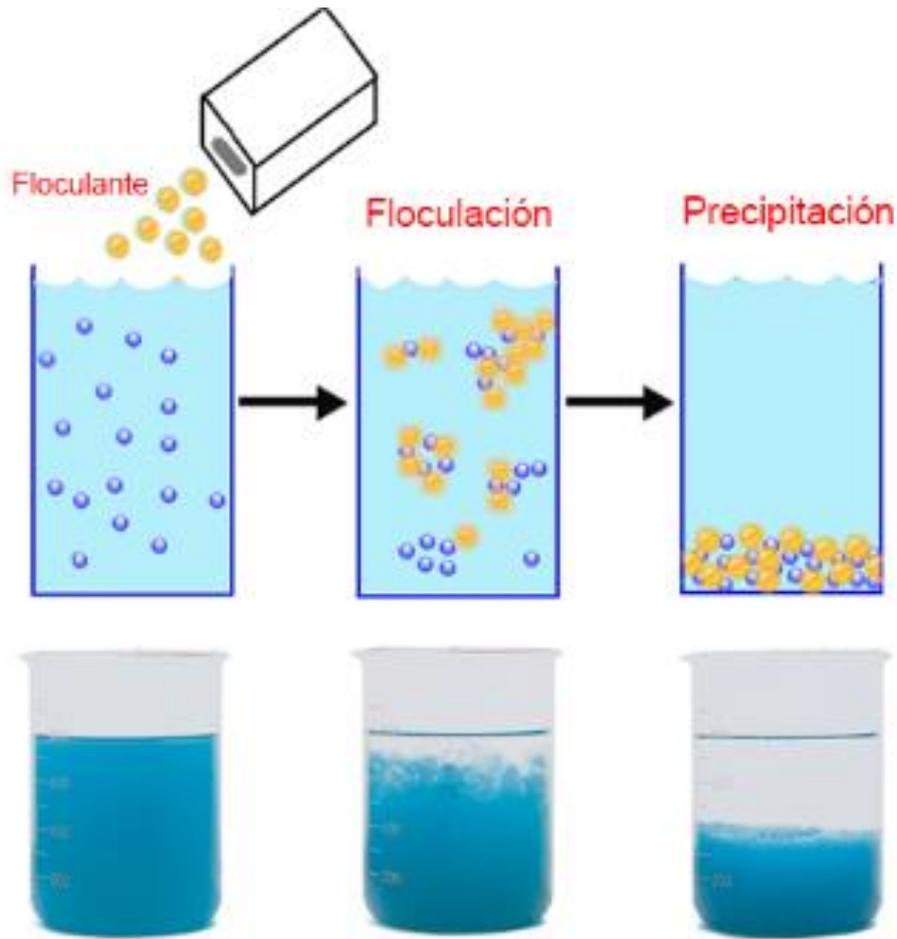


Figura 139. Acción de los floculantes en una suspensión de tipo coloidal

Según su naturaleza química, los floculantes se clasifican de la siguiente manera (García & Rojas, 2006):

**a) Inorgánicos o electrolíticos**

Fueron los primeros floculantes usados, y una de sus características es que disminuyen las fuerzas de repulsión entre las partículas, obteniendo flóculos pequeños, rígidos y compactos con alta resistencia a la compresión. Sin embargo, deben utilizarse en grandes dosis para obtener buenos resultados.

Este tipo de floculantes se emplea en el tratamiento de aguas residuales, y los principales usados son sales de aluminio (sulfatos, cloruros y aluminatos de sodio), sales de hierro (cloruros ferroso y férrico), sales de magnesio y zinc, ácido sulfúrico y fosfatos.

**b) Naturales**

Son compuestos orgánicos y están formados por polisacáridos como el almidón. Se emplean en el tratamiento de aguas residuales, preparación del carbón, procesos minerales, químicos, de pulpa y papel, petróleo, etc. aunque en menor dosis que los floculantes inorgánicos.

Uno de sus inconvenientes es que modifican las propiedades físico-químicas del agua clarificada y añaden sustancias insolubles en los lodos.

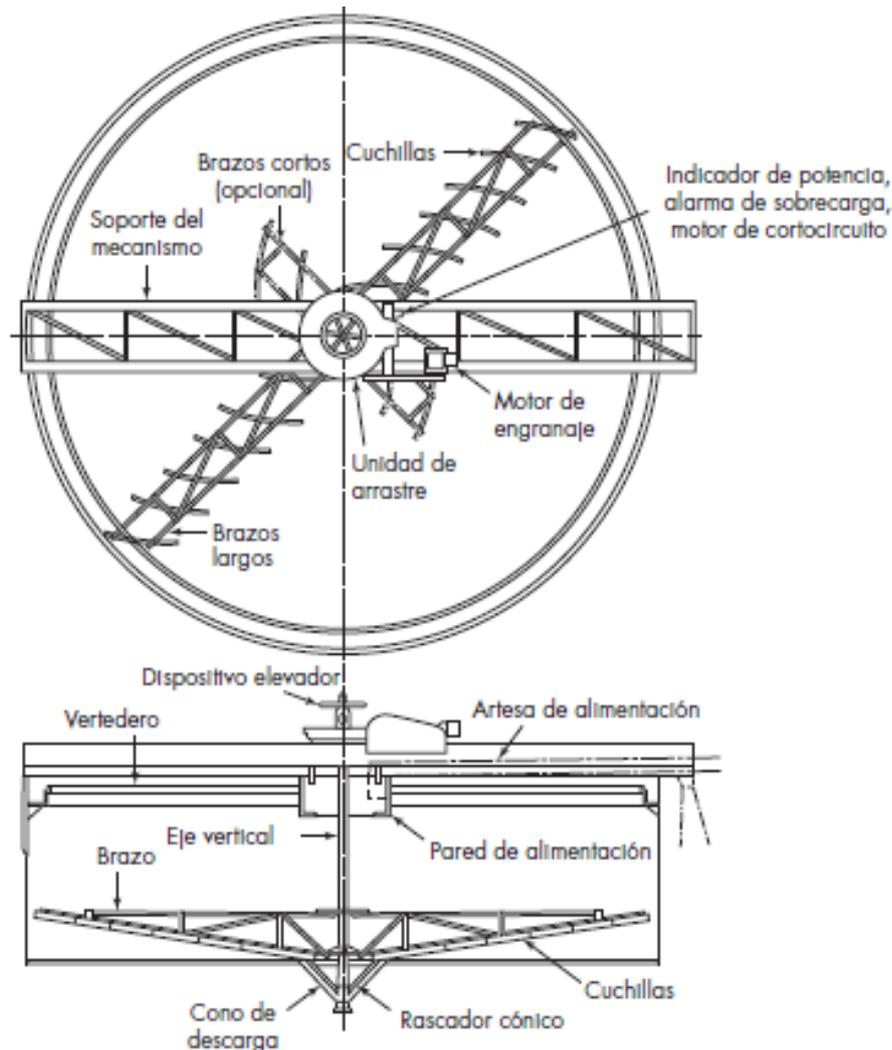
**c) Sintéticos**

Son polímeros solubles en agua con gran afinidad a las superficies sólidas y pueden ser iónicos o polielectrolíticos, no iónicos o copolímeros. Se emplean en el

tratamiento de agua, residuos, procesos de papel y pulpas, industria fotográfica, refinamiento de petróleo, etc.

### Equipo para sedimentación

Esta operación se realiza a gran escala en equipos llamados **espesadores por gravedad**, los cuales son tanques grandes, poco profundos y provistos de unos rastrillos o rasquetas radiales que se mueven muy lento y son accionados desde un eje central. El fondo de estos tanques puede ser plano o ligeramente cónico. En la **Figura 140** se muestra las vistas superior y lateral de un espesador usado para sedimentación (McCabe, 2007).



*Figura 140. Espesador por gravedad para sedimentación (McCabe, 2007)*

En el espesador de la **Figura 140** la suspensión de alimentación fluye desde un canal o artesa inclinada hacia el centro del espesador. Dicha suspensión, al ser más densa que el agua, tiende a fluir hacia abajo hasta alcanzar una zona de igual densidad, entonces se mueve radialmente hacia afuera a una velocidad decreciente de manera constante, lo que permite la sedimentación de los sólidos en el tanque (McCabe, 2007).

Los brazos del rastrillo (**Figura 141**) agitan suavemente los lodos, desplazándolos hacia el centro del tanque, donde son retirados por una abertura que comunica con la entrada de una bomba de lodos (McCabe, 2007).



*Figura 141. Rastrillos de un espesador por gravedad*

## Aplicaciones

Las principales aplicaciones de la operación de sedimentación son las siguientes (García & Rojas, 2006):

- En el tratamiento de aguas residuales para eliminar contaminantes y otras impurezas del agua. Uno de los equipos más usados en las plantas de tratamiento son los espesadores por gravedad, como los mostrados en la **Figura 142**.
- En la refinación del petróleo, para separar lodos y sedimentos disueltos en el líquido.
- En la industria del papel, para recuperar materiales como residuos de madera, cortezas y lodos secos a través del tratamiento de aguas, los cuales se queman para proporcionar vapor a los generadores de energía eléctrica.
- El uso de floculantes tiene un uso muy amplio en la industria minera para mejorar la sedimentación y clarificación de pulpas, lo que aumenta la capacidad de operación de otros equipos sólido-líquido.



*Figura 142. Espesadores por gravedad usados en el tratamiento de aguas residuales*

Las ventajas de esta operación son la tecnología simple y de bajo costo para el pretratamiento de agua y el efecto de los floculantes en la reducción del tiempo de sedimentación de los sólidos en la suspensión, así como en la remoción de bacterias y virus (Bruni, 2018).

Dentro de sus desventajas se tiene que esta operación no es suficiente para procesos completos de purificación de agua, sino que se necesitan operaciones adicionales. Además, si no se usan floculantes la sedimentación toma mucho tiempo, y de no usarse correctamente, llegan a ser tóxicos (Bruni, 2018).

## 2.13 Extracción líquido-líquido

Es una operación unitaria de transferencia de materia basada en la disolución de uno o varios de los componentes de una mezcla líquida en un disolvente selectivo, que aprovecha la diferencia de solubilidades de los componentes de dicha mezcla en el disolvente añadido (Marcilla, 1998).

Principales elementos involucrados en la extracción líquido-líquido (Gunt Hamburg, 2021).

- **Alimentación:** Mezcla líquida homogénea que se desea separar en sus componentes.
- **Disolvente:** Disolución que ayuda a separar el líquido específico de la mezcla inicial.
- **Refinado:** Líquido portador del soluto de la mezcla inicial.
- **Extracto:** Disolvente con el soluto ya recuperado (fase acuosa).

En el caso más sencillo de esta operación participan: El soluto **A**, el disolvente **B** y el líquido portador **C**, como se observa en la **Figura 143**.

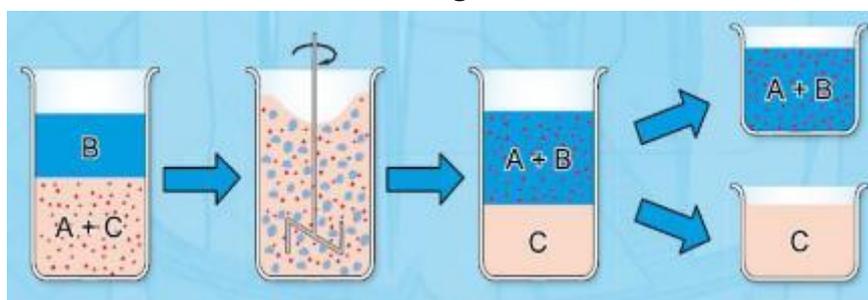


Figura 143. Extracción líquido-líquido (Gunt Hamburg, 2022).

Se agita la **mezcla inicial (A+C)** y el **disolvente B**, pasando el soluto A al disolvente B y obteniendo dos fases: **fase extracto (A+B)** y el **líquido portador o refinado C** (Gunt Hamburg, 2021).

Para realizar una extracción líquido-líquido, el disolvente elegido debe ser parcial o totalmente inmiscible con la fase líquida que contiene el soluto (Marcilla, 1998).

En la **Tabla 9** se enlistan algunos de los disolventes inmiscibles frecuentemente utilizados en la extracción líquido-líquido.

Tabla 9. Disolventes inmiscibles más usados. Adaptado de (UNLP, 2020).

| Disolventes inmiscibles más usados |                 |
|------------------------------------|-----------------|
| Disolvente                         | Densidad [g/mL] |
| Acetato de etilo                   | 0.9             |
| Diclorometano                      | 1.3             |
| Éter etílico                       | 0.7             |
| Hexano (éter de petróleo)          | 0.65            |

## Equipo para extracción líquido-líquido

Los equipos en los que se lleva a cabo esta operación deben poner en adecuado contacto las fases inmiscibles. Para ello se emplean **columnas en contracorriente** que producen un movimiento de agitación periódica a lo largo de la columna. Estas son verticales u horizontales con placas perforadas (Marcilla, 1998).

También pueden emplearse **tanques agitados (mezcladores-sedimentadores)** para el contacto por etapas que varían desde un solo tanque con agitador que provoca la mezcla de las fases y después se dejan sedimentar (**Figura 144**). La mezcla se lleva a cabo de formas diferentes: por impacto en un mezclador de chorro, por acción de cizalladura en una bomba centrífuga, mediante inyectores u orificios de mezcla (Marcilla, 1998).

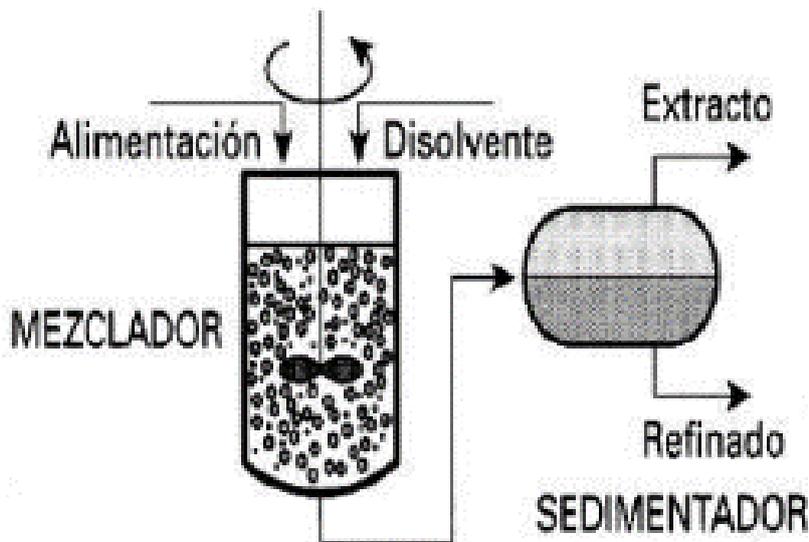


Figura 144. Mezclador-sedimentador para extracción líquido-líquido

Como en la absorción de gases, también se usan **columnas de pulverización**. La dispersión en la fase continua limita la aplicación de este equipo a los casos en los que solamente se requiere una o dos etapas. Algunas configuraciones típicas se muestran en la **Figura 145** (Marcilla, 1998).

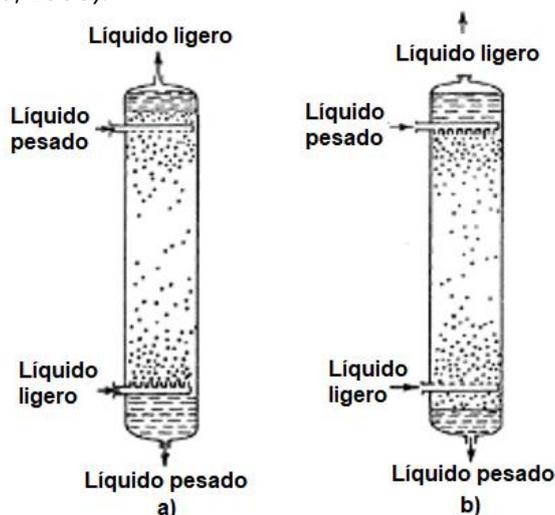


Figura 145. Torre de pulverización para extracción con a) líquido ligero dispersado y b) líquido pesado dispersado. Adaptado de (Marcilla, 1998).

Otro equipo usado en la extracción líquido-líquido son las **columnas de relleno** con los mismos tipos de relleno usados en absorción y destilación (véase el capítulo *Columnas de separación*). Estas columnas se usan en contacto continuo a contracorriente, son

verticales y en ellas el líquido se distribuye en el empaque (relleno) y desciende a través de él exponiendo una gran superficie de contacto con el gas (Valiente, 2010).

Las **columnas de platos** también son usadas en esta operación, solo que en este caso se prefieren los platos perforados, como se observa en la **Figura 146**, donde la separación entre ellos es mucho menor que en destilación (10 a 15 [cm]). Cuando se opera con un régimen de flujo adecuado la velocidad de extracción es elevada (Marcilla, 1998).



*Figura 146. Plato perforado para columna usada en extracción líquido-líquido*

En este tipo de columnas, el líquido ligero es la fase dispersa y los conductos de descenso permiten el paso de la fase continua de un plato a otro (McCabe, 2007).

El líquido ligero se recoge formando una delgada capa debajo de cada plato y se proyecta en forma de chorros en el interior de la capa gruesa del líquido pesado situado encima. Las perforaciones solo existen en un lado del plato, alternando a la derecha e izquierda de un plato a otro (McCabe, 2007).

### **Ventajas de la extracción líquido-líquido:**

Algunas de las ventajas de la extracción líquido-líquido sobre la destilación, por ejemplo, son (Marcilla, 1998):

- Instalaciones más sencillas
- Se tiene la posibilidad de separar componentes sensibles al calor
- La selectividad del disolvente para componentes de naturaleza química similar permite la separación de componentes que no podrían lograrse basándose solo en su punto de ebullición

### **Aplicaciones**

Dentro de las principales aplicaciones de la extracción líquido-líquido se encuentran (McCabe, 2007):

- En la industria del petróleo, para separar productos con diferente estructura química pero aproximadamente con el mismo punto de ebullición. Así, por ejemplo, la separación de los asfaltos del petróleo se realiza mediante esta operación con propano a baja temperatura.
- Recuperación de compuestos aromáticos como fenol, anilina o compuestos nitrogenados de aguas de desecho.

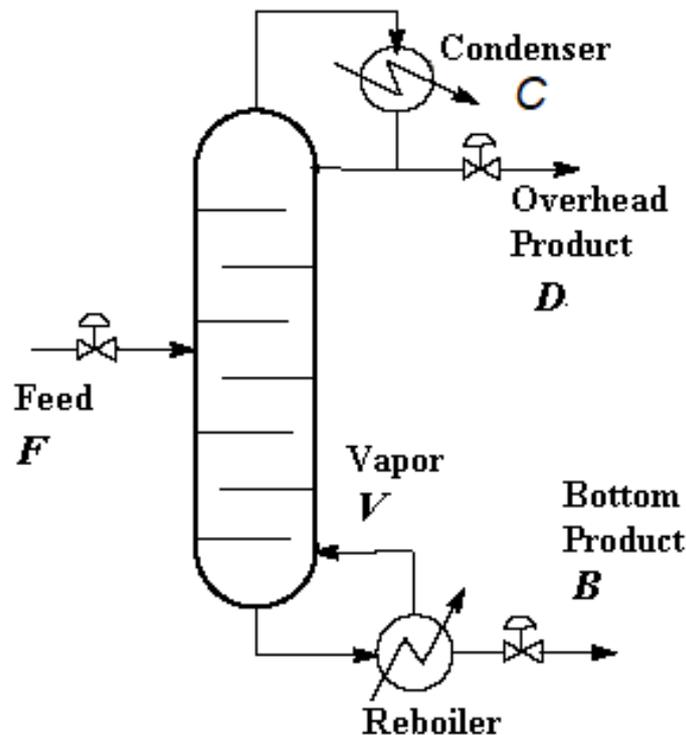
## 2.14 Destilación

La destilación es una operación unitaria que **consiste en separar dos o más componentes de una mezcla líquida** en la que todos los componentes son más o menos volátiles, aprovechando la diferencia de volatilidades. Esto se consigue seleccionando la temperatura y presión de tal manera que la fase líquida y el vapor que se forman tengan concentraciones relativas diferentes (Marcilla, 1998).

Cuanto mayor sea la diferencia de volatilidades entre los componentes de la mezcla, mayor será la diferencia entre la composición del líquido y el vapor que se generen. Así, la mezcla líquida, en su punto de ebullición, desprenderá vapores más ricos en componentes volátiles y los vapores se condensarán aparte, constituyendo el **destilado** (Marcilla, 1998).

En la destilación se produce vapor por medio de la ebullición de un líquido, después se separa y se condensa sin ninguna otra transferencia de materia entre el vapor y el líquido (Granger, 1950).

La destilación a nivel industrial se lleva a cabo en equipos llamados **columnas**, las cuales aseguran un contacto adecuado entre el vapor y el líquido. Generalmente, en la parte inferior están la salida del líquido (B) y la entrada de vapor (V), mientras que en la parte media de la columna está la entrada para el líquido o alimentación (F) y en la parte superior la salida para el vapor que pasa a un condensador (C), como se muestra en la **Figura 147** (Skogestad & Morari, 1988):



*Figura 147. Columna de separación utilizada para destilación.*

*Adaptado de (Skogestad & Morari, 1988)*

En el capítulo **Columnas de separación** se mencionan los tipos de columnas utilizados para la destilación, así como sus diferentes configuraciones y las características de cada una.

## Configuraciones para los diferentes tipos de destilación

### 1. Destilación flash o vaporización equilibrada

En esta configuración se mantiene todo el vapor y el líquido en contacto íntimo, de forma que el vapor que es separado al final de la operación esté en equilibrio con el líquido residual (Granger, 1950).

Este tipo de destilación se usa en la separación de componentes con temperaturas de ebullición muy diferentes, y no es eficaz en la separación de componentes de volatilidad similar (McCabe, 2007).

Como se puede observar en la **Figura 148**, la alimentación se hace circular por medio de la **bomba a**, a través del **calentador b**, y después se reduce la presión en la **válvula c**. Una mezcla íntima de vapor y líquido entra en la columna o **separador d**, en el que permanece el tiempo necesario hasta que se separan las corrientes de vapor y líquido. Debido al contacto que existe entre el líquido y el vapor antes de su separación, las corrientes que se separan están en equilibrio, saliendo el vapor a través de la parte superior de la columna **e** y el líquido por la parte inferior **g** (McCabe, 2007).

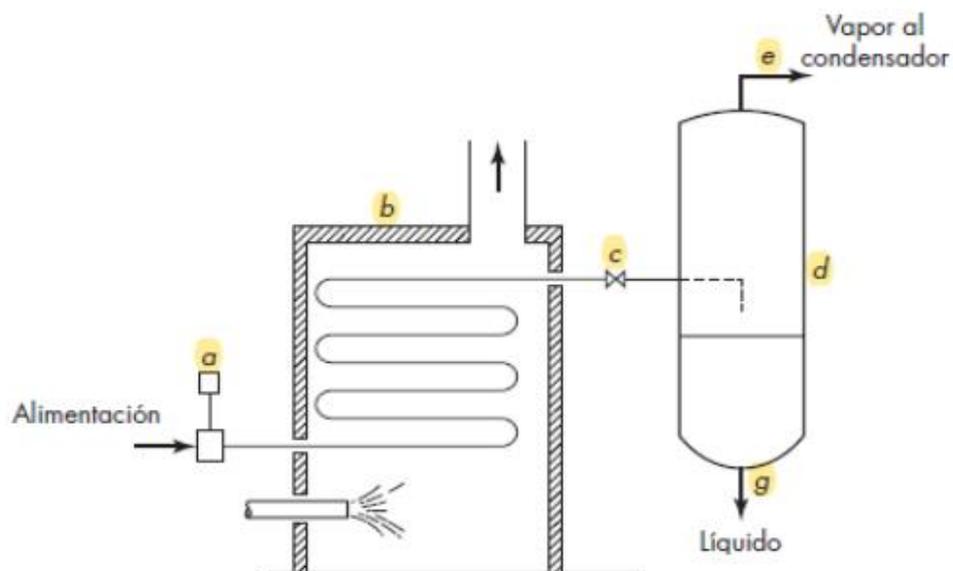


Figura 148. Diagrama de una planta de destilación flash (McCabe, 2007).

### Aplicaciones de la destilación flash

- Se usa en la **refinación del petróleo**, en donde sus fracciones se calientan en destiladores de tubos y el fluido caliente se evapora al instante en corrientes de vapor y líquido residuales, los cuales contienen diferentes componentes (McCabe, 2007).

En la **Figura 149** se pueden observar destiladores flash horizontales.



Figura 149. Destiladores flash horizontales.

- b) En la **desalinización de agua (agua destilada)**, solo que en este caso se usa un sistema multi etapa de destilación flash, como se muestra en la **Figura 150**, del cual las etapas principales son entrada de calor, recuperación de calor y rechazo de calor. En la etapa de **entrada de calor (1)**, se eleva la temperatura del agua salina entre 90°C y 110° C con vapor y se transfiere a la etapa de **recuperación de calor (2)**, que se mantiene a una presión más baja que el agua salina precalentada (Toth, 2020).

El agua salina se vaporiza parcialmente y **se condensa (3)**, obteniendo el producto final: agua desalinizada. La solución salina se enfría en la etapa de **rechazo de calor (4)**; una parte se reutiliza en el proceso y la otra es devuelta al mar (Toth, 2020).

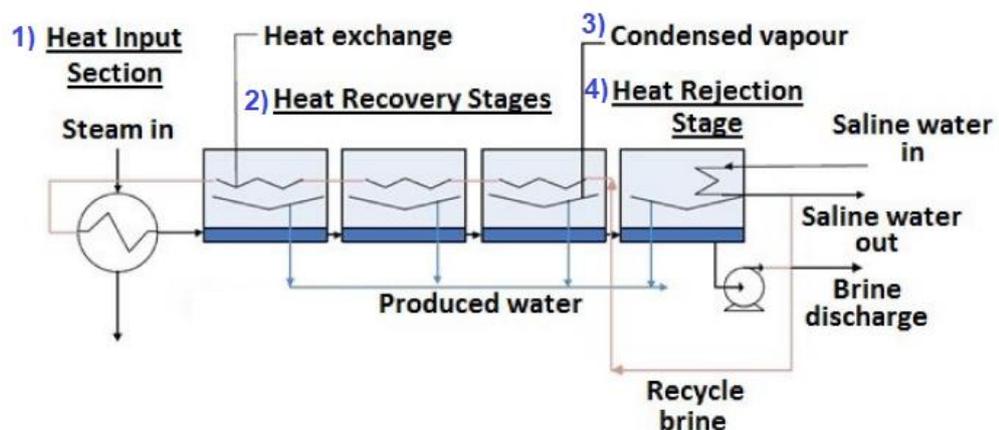


Figura 150. Esquema del funcionamiento de un sistema multi-etapa de destilación flash para desalinización de agua. Adaptado de (Toth, 2020).

## 2. Destilación con reflujo o rectificación

En la destilación con reflujo o rectificación, como se observa en la **Figura 154**, el vapor (V) que abandona la columna por la parte superior se condensa, y una fracción del líquido condensado se devuelve a la columna, lo cual constituye el **reflujo**, mientras que el resto se retira como producto destilado (D) (Marcilla, 1998).

En el interior de la columna de la **Figura 151** se ponen en contacto el vapor ascendente con el líquido descendente. En cierto nivel de la columna estas dos corrientes se ponen en contacto entre sí, por lo que existe una **transferencia de materia**: pasan los componentes más volátiles del líquido al vapor y los menos

volátiles del vapor al líquido, lo que hace que el vapor se enriquezca en componentes volátiles mientras va ascendiendo (Marcilla, 1998).

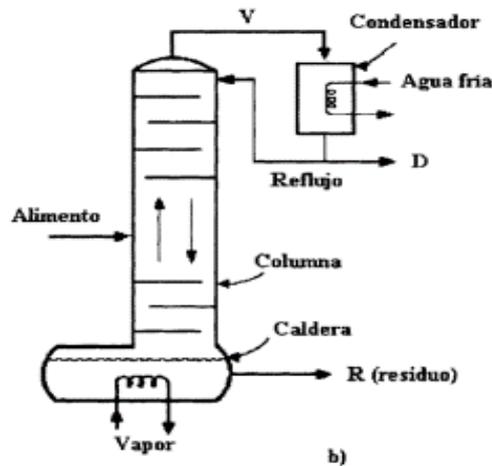


Figura 151. Rectificación (Marcilla, 1998).

Para obtener productos prácticamente puros, tanto de la parte inferior como superior de una columna de destilación, la alimentación se introduce en un plato de la parte central de la columna. Si dicha alimentación es líquida, ésta desciende por la columna hacia el hervidor (caldera) y se agota en la sección de agotamiento por el vapor que asciende hacia el hervidor. Así se obtiene un producto residual casi puro, como se observa en la **Figura 152** (McCabe, 2007):

La **columna A** se alimenta en la parte central con un flujo constante de concentración definida. El plato por el que se introduce la alimentación se conoce como plato de alimentación, y todos los que se encuentran por encima de este constituyen la zona de rectificación, mientras que los platos por debajo del plato de alimentación (incluyendo éste) conforman la sección de agotamiento. La alimentación desciende a través de la sección de agotamiento hasta el fondo de la columna, y el líquido fluye por gravedad hacia el **hervidor o caldera B**, el cual genera vapor, que se devuelve al fondo de la columna para que ascienda de nuevo a través de esta. El producto residual se retira desde la masa de líquido y circula a través del **enfriador de residuo G** (McCabe, 2007).

El vapor que asciende a través de la sección de rectificación se condensa totalmente en el **condensador C** y se recolecta en el **acumulador D**. El líquido obtenido pasa a través del **enfriador E** llamado enfriador de producto y de esta forma se obtiene el producto destilado. La **bomba de reflujo F** descarga parte del líquido del acumulador en el plato superior de la torre, corriente que recibe el nombre de reflujo (McCabe, 2007).

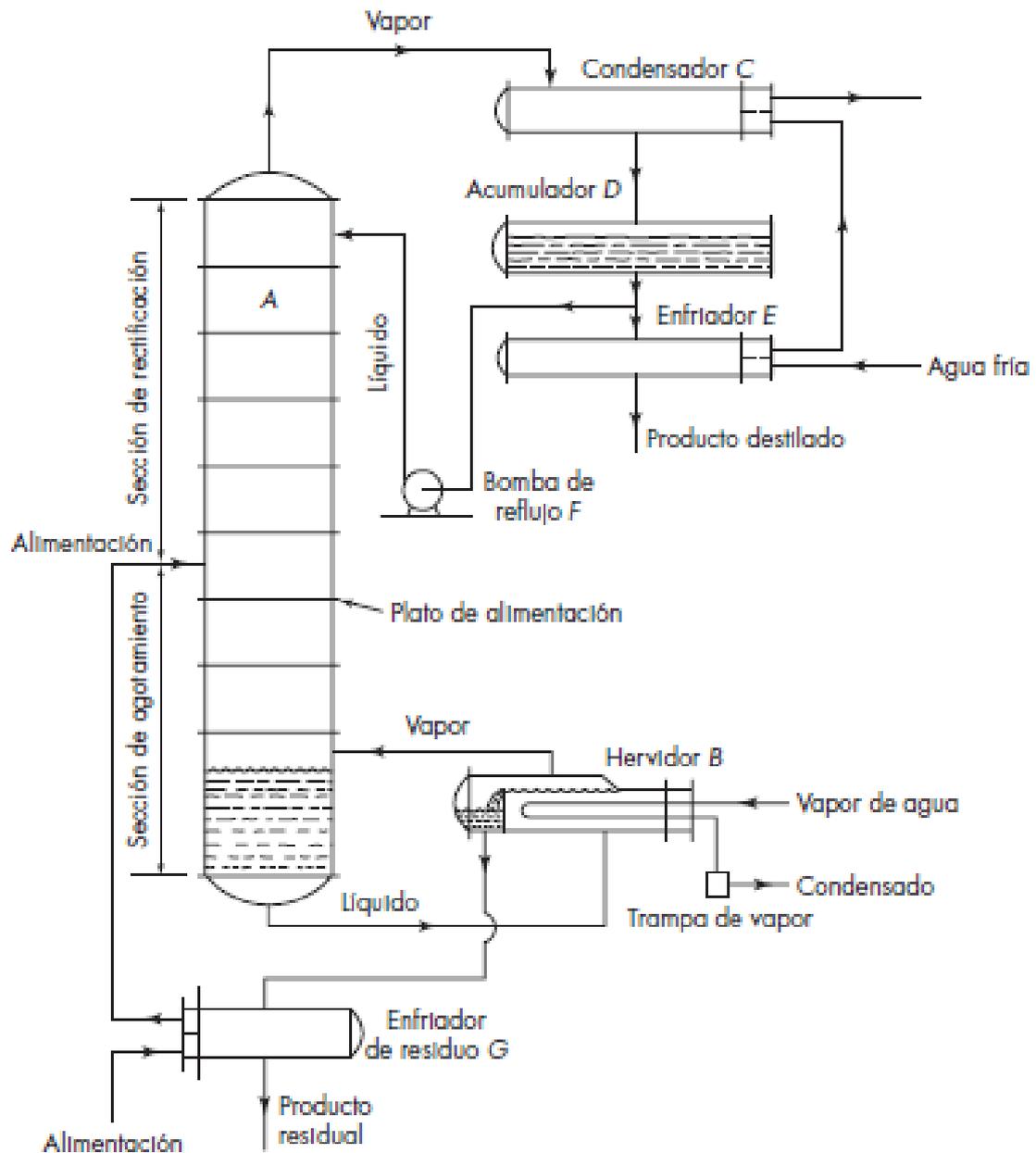


Figura 152. Columna de fraccionamiento continuo con secciones de rectificación y agotamiento (McCabe, 2007).

En la **Figura 153** se pueden observar columnas de fraccionamiento continuo, usadas en destilación industrial a gran escala, como en la purificación de etanol para reducir su contenido de agua (Dasan, Abdullah, & A.H.Bhat, 2014):



*Figura 153. Columnas de fraccionamiento continuo con rectificación*

### **3. Destilación por arrastre de vapor**

Es un método con el que se logra la destilación a temperaturas inferiores al punto de ebullición normal, y se aplica con materiales inmiscibles y que no reaccionan con el agua, como ácidos grasos y aceite de soya. Consiste en hacer pasar vapor al líquido en el interior de la columna, para suministrarle calor y provocar su evaporación (Britannica, The Editors of Encyclopaedia, 2022).

Este tipo de destilación se aplica a la **obtención de aceites esenciales**, los cuales son mezclas de sustancias obtenidas a partir materia prima vegetal y cuya característica principal es su compleja composición química y fuerte aroma (Ortuño, 2006).

En la **Figura 154** se muestra un esquema del funcionamiento de un sistema de destilación por arrastre de vapor. En el destilador (1) (puede ser un alambique), se introduce agua y el material vegetal a destilar (flores, hierbas, hojas, raíces, etc.), quedando separados por una rejilla que evita su contacto directo. Se eleva la temperatura del agua hasta su punto de ebullición, y el vapor, cargado de aceite esencial se escapa por el cuello de cisne del destilador. Posteriormente, pasa por un serpentín donde al enfriarse, se condensa (2) (Ortuño, 2006).

Después, el aceite esencial llega mezclado con el agua al separador (3), donde la fase orgánica, formada por el aceite esencial, se separa fácilmente de la acuosa debido a su inmiscibilidad y densidad diferente (Ortuño, 2006).

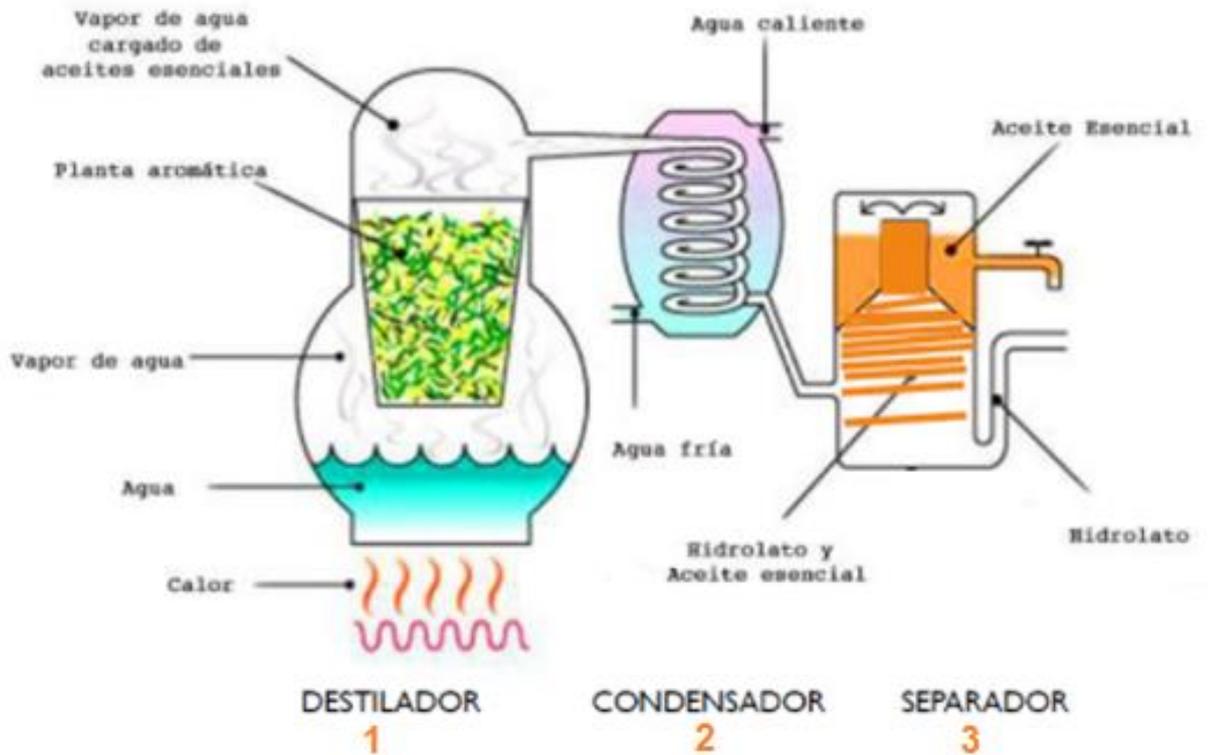


Figura 154. Destilación por arrastre de vapor para obtener aceite esencial de romero

En cuanto a los equipos industriales para la producción de aceites esenciales por destilación con arrastre de vapor, se componen de un destilador, un condensador y varios recipientes separadores de la mezcla de agua y aceite esencial. En este caso, los destiladores se alimentan con vapor a presión generado externamente (Ortuño, 2006). En la **Figura 155**, se muestran los componentes principales de un equipo de destilación por arrastre de vapor:

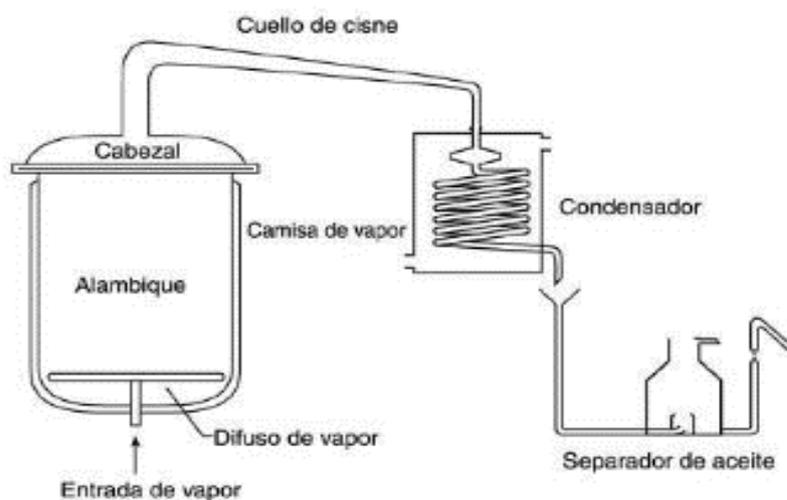


Figura 155. Componentes de un equipo tradicional de destilación por arrastre de vapor (Bandoni, 2003).

En la **Figura 156** se observa el equipo utilizado en la industria:



*Figura 156. Equipo de destilación por arrastre de vapor*

## 2.15 Transferencia de calor e intercambiadores

Recordando que cuando dos objetos se encuentran a temperaturas diferentes y se ponen en contacto térmico, el calor fluye **desde el objeto de mayor temperatura hacia el objeto de menor temperatura**. El flujo neto se produce siempre en el sentido de la temperatura decreciente, hasta que ambos objetos estén a la misma temperatura, como se muestra en la **Figura 157** (McCabe, 2007).

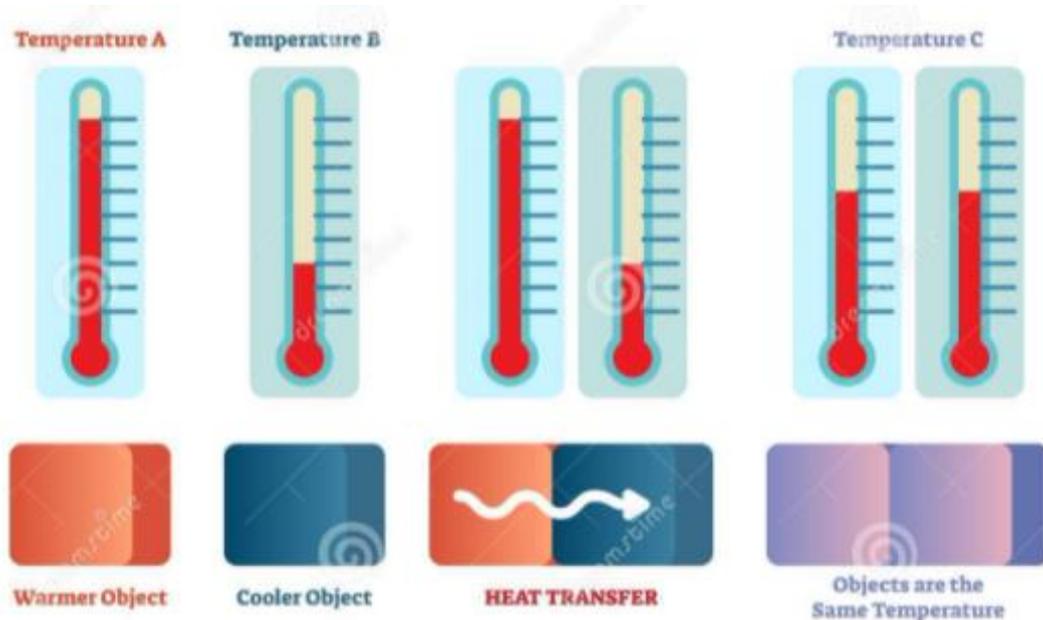


Figura 157. Principio básico de la transferencia de calor

Los mecanismos por los que fluye el calor son tres:

- a) **Conducción:** Por este mecanismo, el calor puede ser conducido a través de sólidos, líquidos y gases en los que existe un gradiente de temperatura, y esto se verifica mediante la transferencia de energía cinética entre moléculas adyacentes (Geankoplis, 1993).

En un gas, por ejemplo, las moléculas con mayor temperatura tienen más energía y movimiento y son las que transmiten energía a las moléculas colindantes con niveles energéticos más bajos (Geankoplis, 1993).

Ejemplos de este tipo de transferencia de calor son los intercambiadores de una nevera, el tratamiento térmico en el forjado de acero y la congelación del suelo durante el invierno, por mencionar algunos (Geankoplis, 1993).

- b) **Convección:** Se refiere al flujo de calor asociado con el movimiento de un fluido, y en operaciones unitarias incluye la transferencia de calor a partir de paredes metálicas, partículas sólidas y superficies líquidas (McCabe, 2007).

La transferencia de calor por convección puede ser **forzada**, en la cual se provoca el flujo de un fluido en una superficie sólida por medio de una bomba, ventilador u otro dispositivo mecánico; o **convección natural**, en la cual un fluido con mayor o menor temperatura que está en contacto con la superficie sólida causa una circulación debido a la diferencia de densidades que resulta del gradiente de temperaturas en el fluido (Geankoplis, 1993).

Algunos ejemplos de este tipo de transferencia son la pérdida de calor en el radiador de un automóvil donde un ventilador hace circular aire o el enfriamiento de una taza de café al soplar sobre su superficie (Geankoplis, 1993).

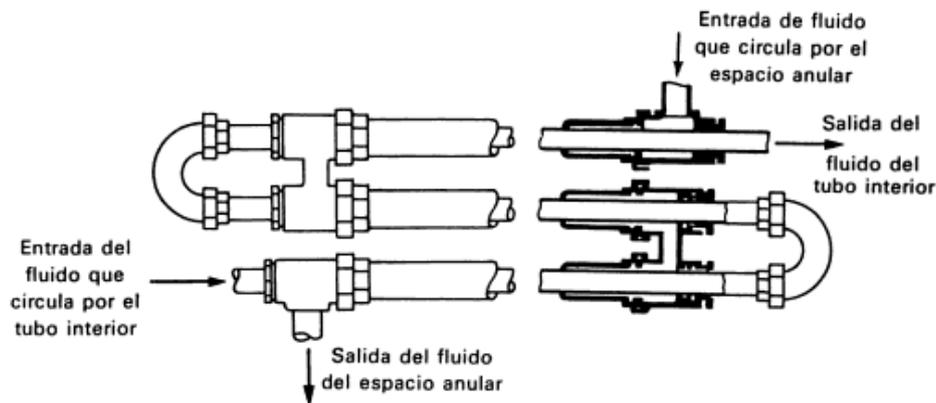
c) **Radiación:** Es la transferencia de energía por medio de ondas electromagnéticas, y un ejemplo de ello es la transferencia de calor del Sol hacia la Tierra (Geankoplis, 1993).

Si la radiación pasa a través de un espacio vacío, no se transforma en calor ni en otra forma de energía y tampoco se desvía de su trayectoria, pero si encuentra algún material a su paso, la radiación se transferirá, reflejará o absorberá (McCabe, 2007).

### Equipo para intercambio de calor

Los **intercambiadores de calor** son dispositivos para transferir calor entre dos fluidos separados por un material conductor térmico sólido.

**Intercambiador de calor de doble tubo:** Consisten en dos tubos concéntricos, donde los fluidos están confinados, y uno de ellos circula por el interior de un tubo mientras que el otro lo hace en el espacio anular comprendido entre la pared interior de dicho tubo y la pared interior del otro de mayor diámetro, ya sea en contracorriente o en sentido paralelo a la dirección del primer fluido, tal como se muestra en la **Figura 158** (Granger, 1950).



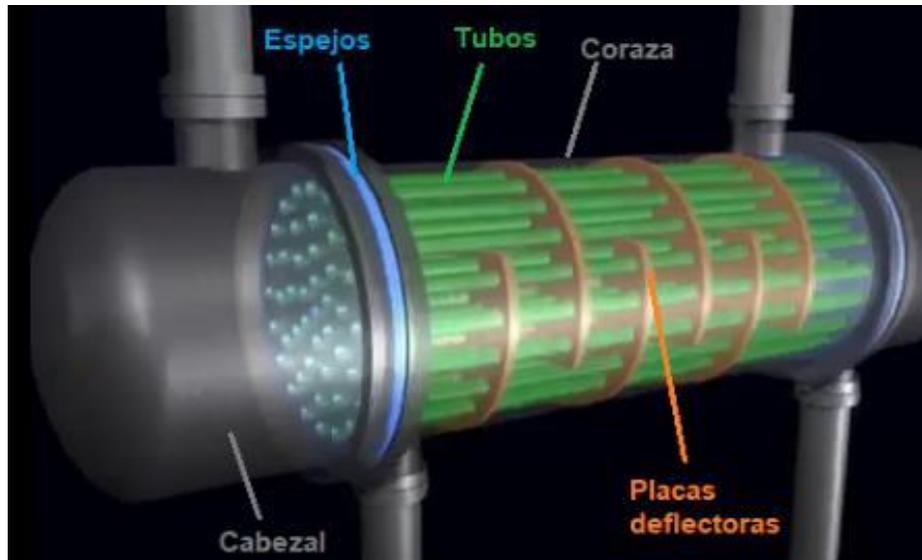
*Figura 158. Esquema de funcionamiento de un intercambiador de calor de doble tubo*

En la **Figura 159** se muestra un intercambiador de calor de doble tubo, utilizado en procesos de esterilización y pasteurización, así como en el enfriamiento de productos de baja viscosidad como carne, jugo, yogurt, pescado y algunas cremas (SACOME, 2019).



*Figura 159. Intercambiador de calor de doble tubo (SACOME, 2019).*

**Intercambiadores de tubos y coraza:** Son intercambiadores de flujo continuo que tienen configuraciones de más de 3 tubos en paralelo, en el que se instalan placas deflectoras para favorecer el flujo transversal y aumentar la velocidad media del fluido en la coraza. En la **Figura 160** se muestran las partes principales de componen este equipo (Miranda J. , 2014).



*Figura 160. Partes principales de un intercambiador de tubos y coraza. Adaptado de (Miranda J. , 2014)*

Las placas deflectoras están perforadas para recibir los tubos, y para minimizar las fugas, el espacio entre la coraza, las placas y los tubos es muy pequeña (McCabe, 2007).

Como se observa en la **Figura 161** en un intercambiador de tubos y coraza, el fluido 1 de mayor temperatura circula en el interior de los tubos, mientras que el fluido 2 de menor temperatura fluye por el exterior de los tubos dentro de la coraza (McCabe, 2007).



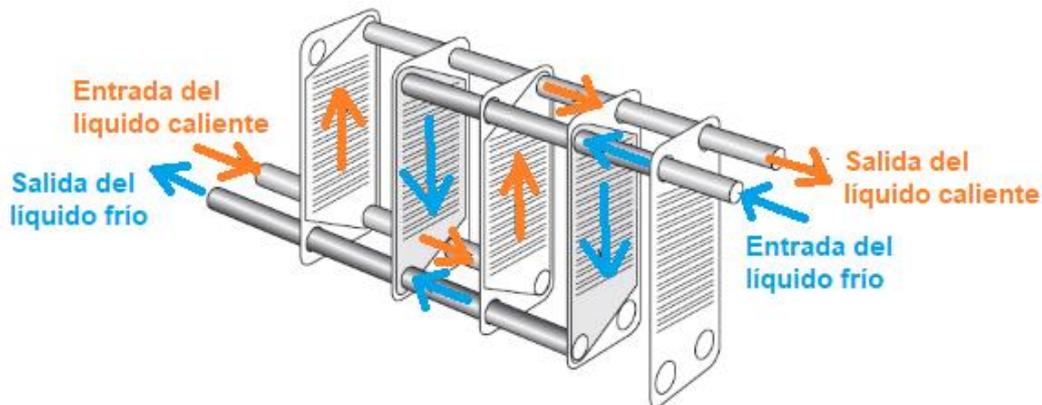
*Figura 161. Esquema de funcionamiento de un intercambiador de tubos y coraza*

En la **Figura 162** se muestra un intercambiador de tubos y coraza, equipo utilizado en la industria química y petrolera, por ejemplo, para realizar la ebullición en torres de destilación.



*Figura 162. Intercambiador de calor de tubos y coraza*

**Intercambiador de placas:** Constan de placas acanaladas de acero inoxidable separadas por empaques, fijas en un armazón de acero. Los portales interiores y ranuras de entrada en las arandelas dirigen el fluido frío y caliente en los espacios alternados entre las placas, como se muestra en la **Figura 163** (McCabe, 2007).



*Figura 163. Diseño típico de un intercambiador de placas (McCabe, 2007)*

Como se observa en la **Figura 163** el líquido de mayor temperatura ingresa por la parte inferior, sigue su camino a través del tubo pasando a través de todas las placas intercaladas y sale por la parte superior derecha, mientras que el líquido con menor temperatura hace lo contrario, entrando por la parte superior izquierda, pasando a través de todas las placas y saliendo por la parte inferior izquierda (McCabe, 2007).

Ambos fluidos se encuentran en contracorriente en los canales alternos creados por las placas que poseen una superficie corrugada con una pendiente áspera y profunda que permite lograr un alto coeficiente de transferencia de calor. Están selladas con juntas de caucho sintético que permiten dirigir los fluidos hacia canales distintos (McCabe, 2007).

Las canalizaciones inducen turbulencia para mejorar la transferencia de calor y cada placa está soportada por contactos múltiples con las placas contiguas, que tienen un patrón o ángulo de canalización diferente. En la **Figura 164** se muestra una placa de este tipo de intercambiador (McCabe, 2007).



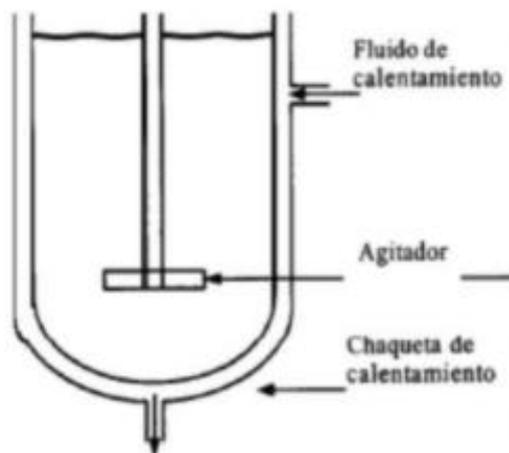
*Figura 164. Placa acanalada de acero inoxidable con empaque para intercambiador*

En la **Figura 165** se muestran intercambiadores de calor de placas, usados para refrigeración industrial y control de temperatura de agua, pintura e hidrógeno, por ejemplo. Algunas de las ventajas que tiene este intercambiador son su tamaño compacto y un flujo altamente turbulento, lo que da como resultado una mayor transferencia de calor (Froztec, 2018).



*Figura 165. Intercambiadores de calor de placas*

**Recipientes con chaqueta:** Son tanques de acero inoxidable con un revestimiento o chaqueta alrededor que envuelven al tanque. A través de la chaqueta circula líquido para refrigeración o calentamiento, como se observa en la **Figura 166**.



*Figura 166. Tanque con chaqueta*

**Chiller:** Es un equipo con forma cilíndrica muy largo usado para generar agua fría y cuyos componentes principales son: **evaporador, condensador, válvula expansora y compresor** (The Engineering Mindset, 2017).

El agua fría se produce en el evaporador y sale del chiller a una temperatura de 6 °C. Después, con ayuda de una bomba centrífuga es conducida a unidades de tratamiento de aire que colectan el calor no deseado dentro de las habitaciones y finalmente regresa de nuevo al chiller con una temperatura de 12 [°C], repitiendo el ciclo una y otra vez, como se muestra en la **Figura 167** (flechas rojas del evaporador) (The Engineering Mindset, 2017).

El calor colectado abandona el evaporador (1) (flechas verdes), con ayuda de un gas refrigerante que es conducido a través del condensador (2), y por medio de una bomba centrífuga es conducido hacia una torre de enfriamiento (3) (flechas rojas del condensador) que contiene un ventilador que disipa y rechaza el calor proveniente de las habitaciones (The Engineering Mindset, 2017).

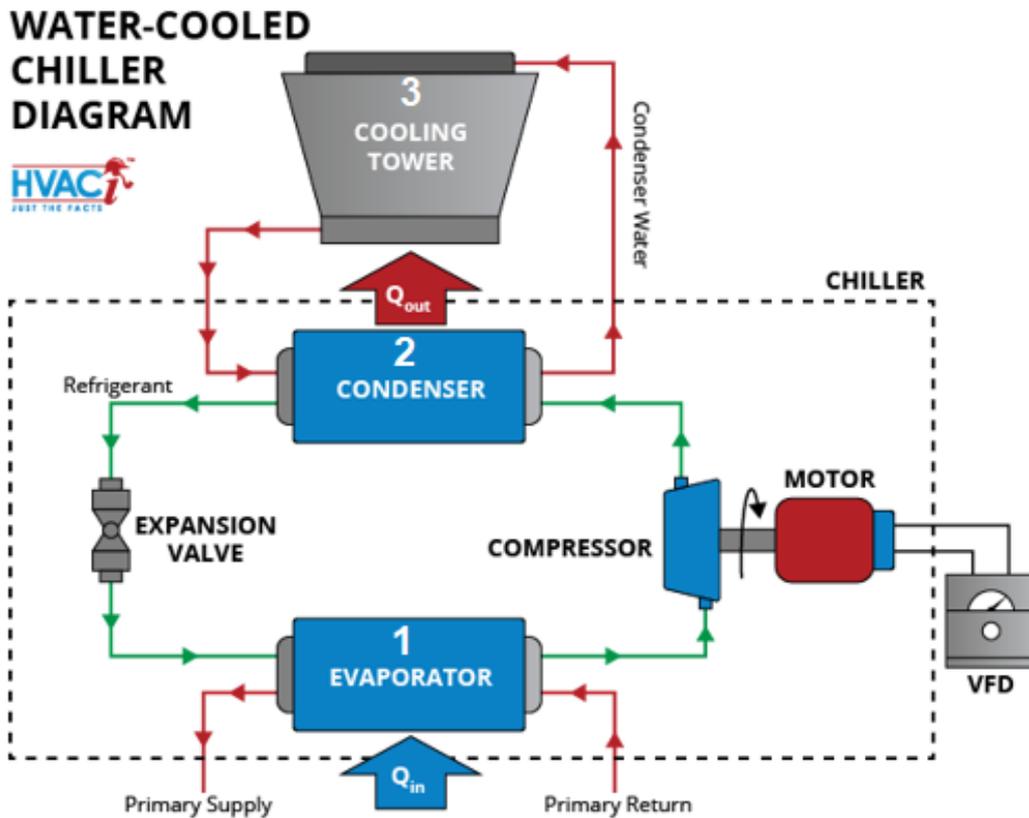


Figura 167. Diagrama de funcionamiento de un chiller (HVAC, 2022).

La **Figura 168** representa los tres circuitos principales de un chiller: el circuito de gas refrigerante (1), de agua helada (2) y del condensador (3):

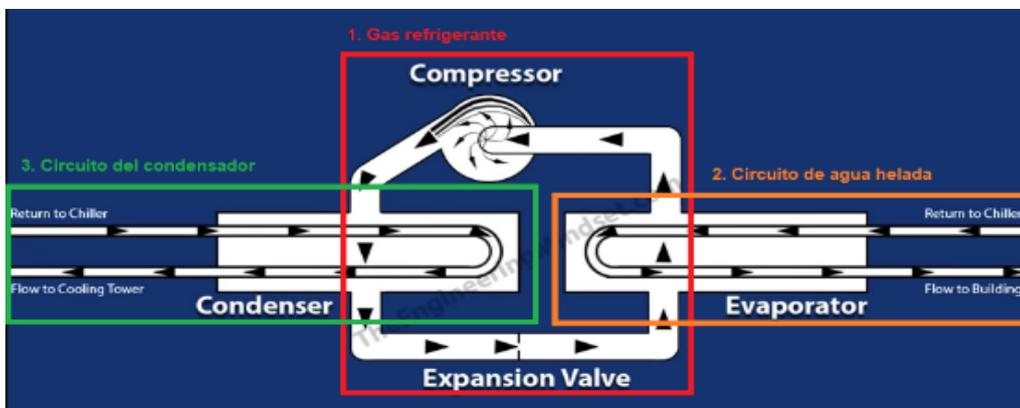


Figura 168. Principales circuitos en un chiller. Adaptado de (The Engineering Mindset, 2017)

En la **Figura 169** se muestra un chiller, el cual tiene distintos usos en la industria y suele ser preferido ante sistemas de aire acondicionado debido a que el agua suele ser un mejor conductor de calor que el aire (HVAC, 2022).

Algunas aplicaciones de los chillers son el enfriamiento de plástico caliente que es inyectado, soplado o extruido; también en la industria de la impresión, para eliminar el calor generado por los rodillos de impresión y para enfriar el papel una vez que sale de de los hornos de secado de tinta; en dispositivos electrónicos de alta potencia utilizados en escáneres de resonancia magnética, entre otros (Sherwin, 2012).



*Figura 169. Chiller*

## 2.16 Reducción de tamaño y tamizado

Muchos materiales sólidos se encuentran en tamaños demasiado grandes para ser utilizados, por lo cual deben ser reducidos. A menudo, los sólidos se reducen de tamaño para que la separación de distintos componentes se lleve a cabo (Geankoplis, 1993).

El término **reducción de tamaño** se aplica a todas las formas en que **las partículas de sólidos se cortan o rompen en piezas más pequeñas**. En los procesos industriales, la reducción de tamaño se lleva a cabo a través de diferentes métodos y con distintos objetivos, por ejemplo, las grandes piedras de un mineral crudo se desintegran hasta un tamaño manejable; productos químicos sintéticos se muelen hasta convertirlos en polvo y las láminas de plástico se cortan en cubos pequeños (McCabe, 2007).

Los métodos más usados en la reducción de tamaño son (McCabe, 2007):

- a. **Compresión:** Se utiliza para la reducción gruesa de sólidos duros, dando lugar a relativamente pocos finos.
- b. **Impacto:** Genera productos gruesos, medios o finos.
- c. **Frotación o rozamiento:** Produce productos muy finos a partir de materiales blandos no abrasivos.
- d. **Corte:** Da lugar a un tamaño definido de partícula y en algunas ocasiones también de forma definida, con muy pocos o nada de finos.

### Equipo para reducción de tamaño

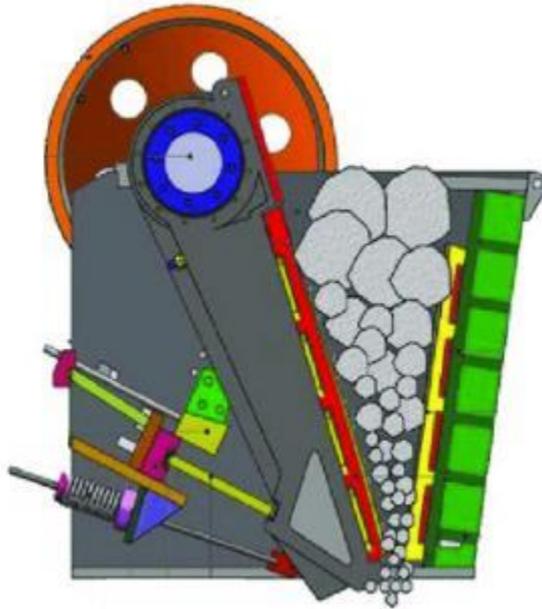
El equipo para esta operación se divide en (McCabe, 2007):

- 1) *Trituradores:* Realizan el trabajo pesado de romper las piezas grandes de materiales sólidos en pedazos de 150 a 250 [mm], mientras que un triturador secundario reduce a su vez dichos pedazos en tamaños de 6 [mm]
- 2) *Molinos:* Reducen el producto del triturado hasta formar un polvo, y la mayor parte de este producto pasa a través de un tamiz de 200 mallas con una abertura de 74 [μm]
- 3) *Molinos de ultrafinos:* Acepta como alimentación partículas no mayores a 6 [mm], mientras que el tamaño del producto generado es de 1 a 50 [μm]
- 4) *Máquinas de corte:* Producen partículas de tamaño y forma definidos, de 2 a 10 [mm] de longitud.

Los **trituradores** son máquinas de baja velocidad usados en la reducción de grandes cantidades de sólidos. Los principales tipos son:

#### Trituradores de mandíbulas

Este equipo trabaja a compresión y la alimentación ingresa entre dos mandíbulas colocadas formando una "V" en la parte superior. Una de ellas está fija (mandíbula verde de la **Figura 170**), mientras que la otra (mandíbula roja) oscila en el plano horizontal y tritura grandes trozos de material atrapados entre las mandíbulas (McCabe, 2007).



*Figura 170. Vista en corte de una trituradora de mandíbulas*

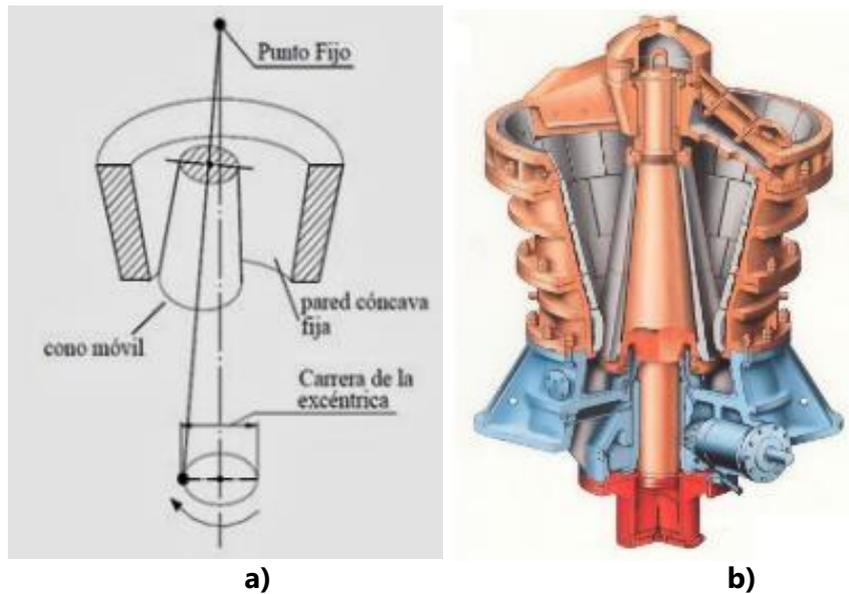
En la **Figura 171** se muestra una trituradora de mandíbulas, equipo al que también se le considera un triturador primario, pues reducen piezas grandes de materiales muy duros. Se utilizan principalmente en minería para la reducción de rocas y minerales metálicos (McCabe, 2007).



*Figura 171. Trituradora de mandíbulas*

### **Trituradores giratorios**

Un cabezal cónico de trituración gira dentro de una carcasa con forma de embudo, abierta en la parte superior. Un excéntrico mueve la flecha que lleva al cabezal de trituración y los sólidos atrapados entre el cabezal y la coraza se quiebran una y otra vez hasta que salen por el fondo, como se observa en la **Figura 172** (McCabe, 2007).



*Figura 172. a) Principio de funcionamiento de un triturador giratorio b) Vista en corte de un triturador giratorio*

Los materiales son triturados por medio de esfuerzos de compresión producidos entre las paredes cónicas; una de ellas es fija y cóncava, mientras que la otra es móvil y genera un movimiento excéntrico, el cual permite que ambas paredes se acerquen favoreciendo tanto la trituración de los fragmentos atrapados entre ambas paredes como su desalojo al separarse dichas paredes. En la **Figura 173** se observa un equipo para trituración giratorio:



*Figura 173. Tritrador giratorio*

### Trituradores de rodillos lisos

Son equipos de trituración secundarios que trabajan a compresión y generan un producto de tamaños entre 1 y 12 [mm]. Están limitados por el tamaño de partícula que es atrapada por los rodillos para alimentaciones que varían en tamaño desde 12 a 75 [mm]. En la **Figura 174** se muestra un esquema de dicho equipo (McCabe, 2007).

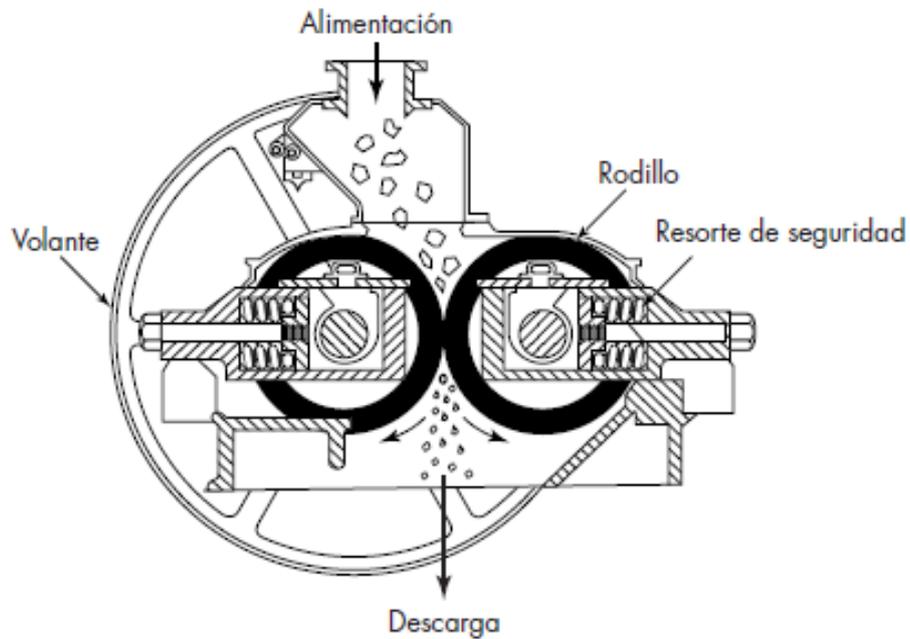


Figura 174. Triturador de rodillos lisos (McCabe, 2007)

### Trituradores de rodillos dentados

Este equipo no solo trabaja a compresión, sino también por impacto y corte. Las caras de los rodillos presentan rugosidades, barras de quebrado o dientes y contienen uno o dos rodillos, como se observa en la **Figura 175** (McCabe, 2007).



a)

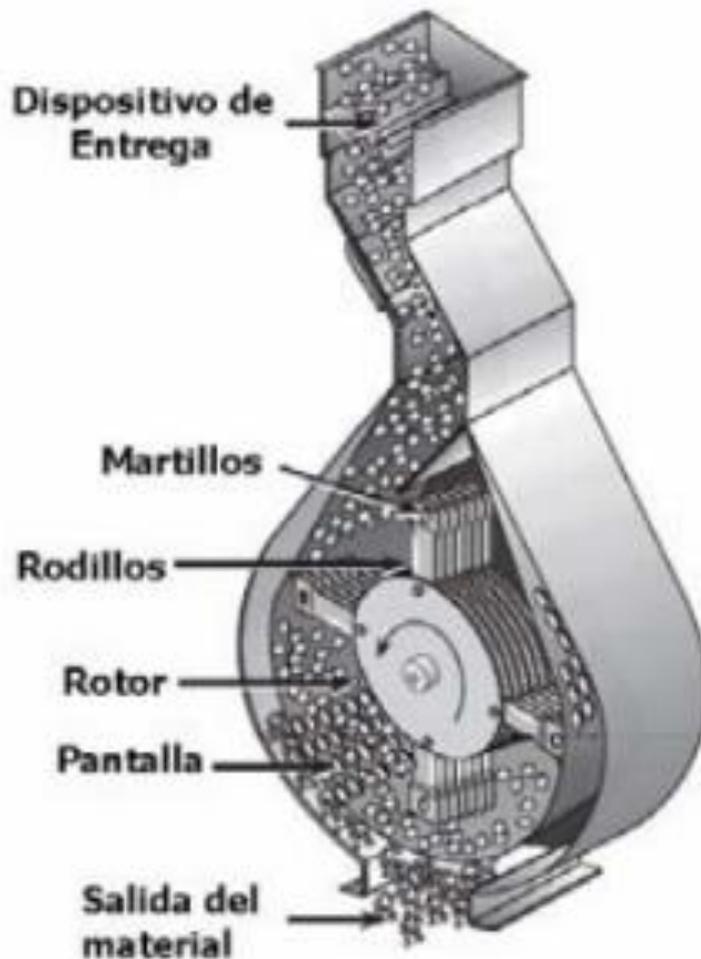
b)

Figura 175. a) Triturador de rodillos dentados, b) Triturador con rodillo único

Los **molinos** son equipos de reducción de tamaño para servicio intermedio. El producto que constituye la alimentación pasa por una fase previa de trituración y en el molino se reduce a polvo (McCabe, 2007). Algunos tipos son:

## Molinos de martillos

Contienen un rotor que gira a gran velocidad en el interior de una coraza cilíndrica, donde generalmente el eje es horizontal. En el molino de la **Figura 176** la alimentación entra por la parte superior de la coraza, se trocea y cae a través de una abertura situada en el fondo (McCabe, 2007).



*Figura 176. Esquema general del funcionamiento de un molino de martillos*

Las partículas se rompen por una serie de martillos giratorios acoplados a un disco rotor. El material de alimentación que entra no puede salir sin ser golpeado por los martillos, pues se rompe en pedazos que a su vez se proyecta contra la placa yunque estacionaria situada dentro de la coraza, rompiéndose en fragmentos todavía más pequeños. Estos fragmentos son pulverizados por los martillos e impulsados a través de un tamiz que cubre la abertura de la descarga (McCabe, 2007).

En la **Figura 177** se observa un molino de martillos, usado para pulverizar casi cualquier producto: sólidos fibrosos duros como corteza de un árbol o piel, virutas de acero, pastas húmedas blandas, arcilla viscosa y roca dura (McCabe, 2007).



Figura 177. Molino de martillos

### Molino de bolas

La mayor parte de la reducción se realiza por impacto de la caída de las bolas cercanas a la parte superior de la carcasa, la cual tiene hasta 3 [m] de diámetro y 4.25 [m] de longitud. En la **Figura 178** se muestra un esquema de su funcionamiento (McCabe, 2007).

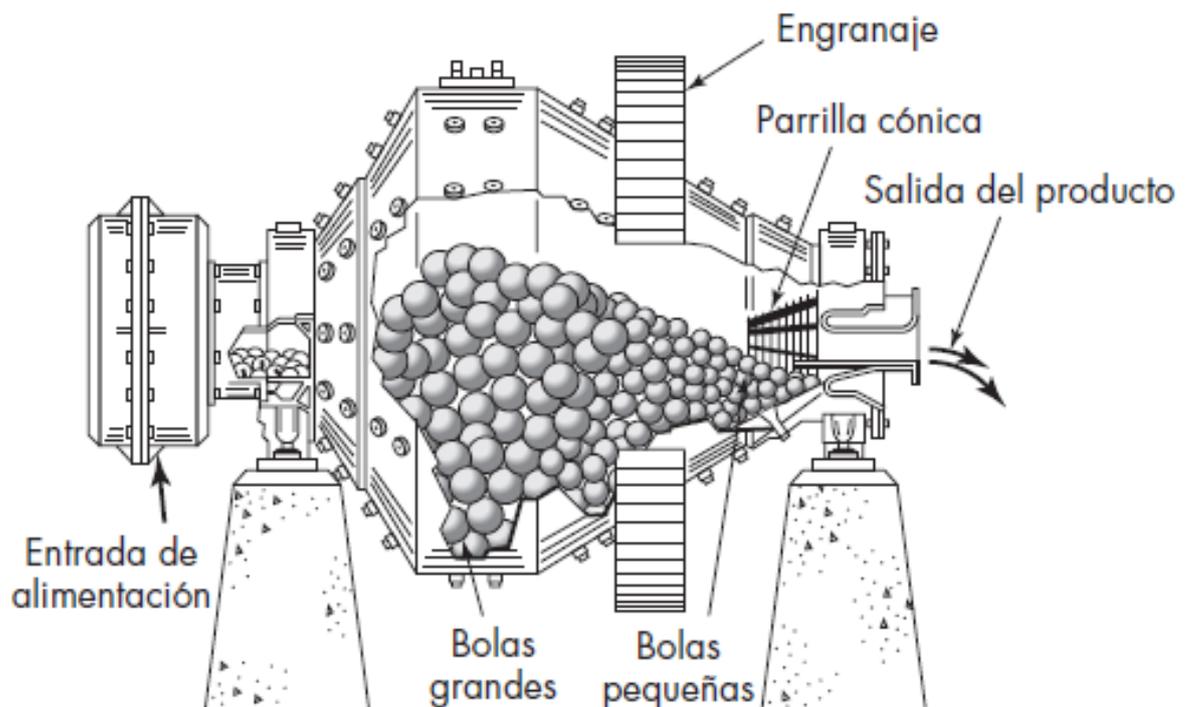


Figura 178. Molino de bolas (McCabe, 2007)

En la **Figura 179** podemos observar un equipo industrial, usado en el procesamiento de minerales metálicos y no metálicos, así como en las líneas de producción de pólvoras, cemento, silicatos, material refractario, vidrio y cerámicas.



*Figura 179. Molino de bolas (GCP Applied Technologies, 2020).*

### **2.16.1 Tamizado**

El propósito de la reducción de tamaño no es solo producir pequeñas unidades de la masa de otras más grandes, sino también obtener productos de un tamaño deseado o dentro de un rango de tamaño. Un rango de tamaño satisfactorio para determinado propósito podría ser totalmente inaceptable para otro, incluso cuando se trata del mismo material. En muchos casos es necesario usar un producto de un tamaño específico, lo cual es imposible de lograr únicamente con reducción de tamaño (Granger, 1950).

El tamizado es un método de separación de material granulado que se basa solamente en la diferencia de tamaño. En esta operación se vierten los sólidos sobre una superficie perforada o tamiz, como el que se muestra en la **Figura 180**, el cual es usado en laboratorios de control de calidad. El tamiz se compone de varias mallas colocadas una sobre otra que dejan pasar las partículas pequeñas o "finos" hacia la parte inferior, reteniendo las partículas de tamaños superiores o "rechazos" en los tamices superiores. Es recomendable tener un sistema de **vibración** para forzar el paso del material (McCabe, 2007).



*Figura 180. Operación de tamizado*

El material se hace pasar a través de una serie de tamices diferentes y se separa en fracciones clasificadas por tamaños. Lo más frecuente es que el tamizado se lleve a cabo en seco, pero en ocasiones también se realiza en húmedo (McCabe, 2007).

### **Equipo para tamizado**

Los tamices industriales se construyen con tela metálica, de seda o plástico; barras o placas metálicas perforadas, o alambres dispuestos en sección transversal triangular. Los metales más usados son el **acero al carbón** y el **acero inoxidable** (McCabe, 2007).

En la mayoría de los equipos de tamizado, las partículas más gruesas pasan fácilmente a través de aberturas grandes en una superficie estacionaria, pero las más pequeñas necesitan una forma de agitación, como rotación o vibración mecánica (McCabe, 2007).

**Tamiz estacionario:** Es un enrejado de barras metálicas paralelas dispuestas de forma inclinada (**Figura 181**). La pendiente y el camino que sigue el material por lo general son paralelos a la longitud de las barras. Las partículas muy gruesas se dejan caer sobre el extremo más elevado del tamiz (1) y las más pequeñas (2 y 3) pasan a través de la parrilla y se recogen en un colector (McCabe, 2007).

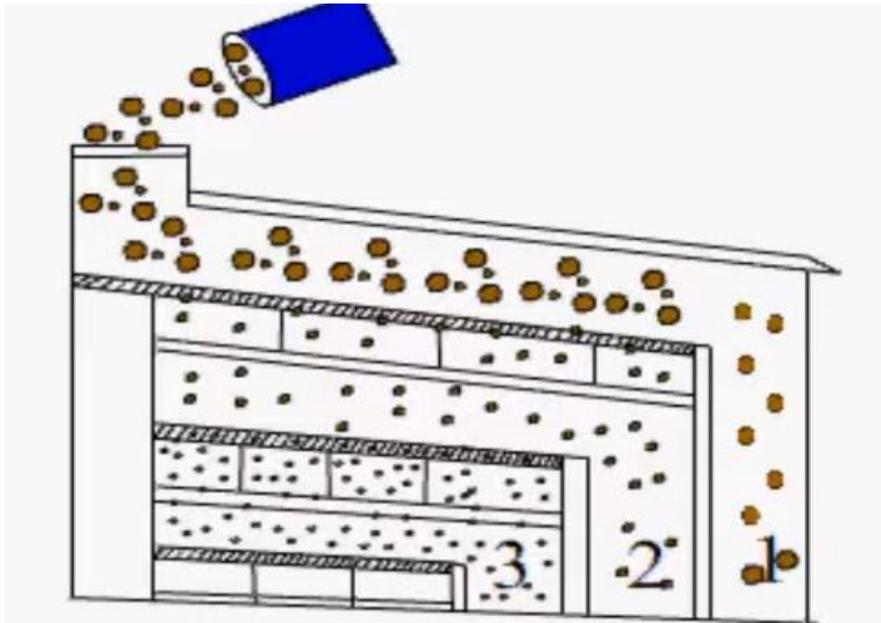


Figura 181. Tamiz estacionario

### Tamiz giratorio

Dos tamices, uno sobre otro, están sostenidos en una carcasa inclinada en un ángulo de entre  $16^\circ$  y  $30^\circ$  con la horizontal. La mezcla se alimenta en el tamiz superior cerca de su punto más alto (**Figura 182**), mientras que la carcasa (1) y los tamices superiores (2) e inferior (3) giran en un plano vertical alrededor de un eje horizontal (4) por una excéntrica situada cerca del punto de alimentación. Las partículas muy grandes pasan a través de ductos recolectores en los extremos inferiores de los tamices, mientras que los finos pasan hacia el fondo del tamiz a una tolva de descarga (McCabe, 2007).

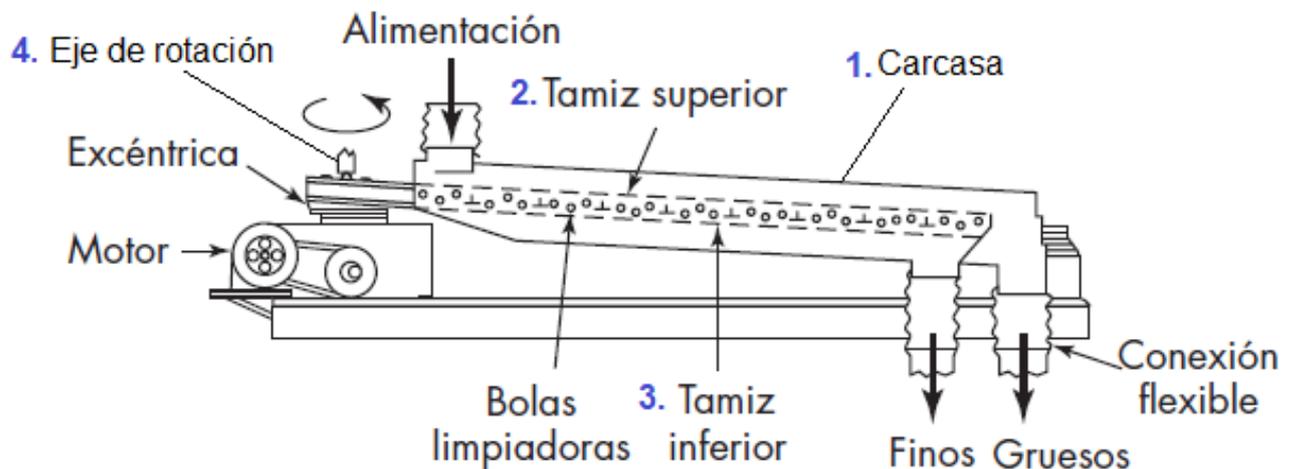


Figura 182. Funcionamiento de un tamiz giratorio. Adaptado de (McCabe, 2007).

### Tamiz vibratorio

Vibra con rapidez y se obstruye con menos facilidad que un tamiz giratorio. Las vibraciones son generadas de forma mecánica o eléctrica y por lo general se transmiten desde excéntricos de alta velocidad hasta la carcasa de la unidad y de esta hasta los tamices inclinados (McCabe, 2007).

En la **Figura 183** se muestra un tamiz vibratorio, equipos que llegan a tener hasta tres superficies de tamizado.



*Figura 183. Tamiz vibratorio*

### **Aplicaciones de la reducción de tamaño y tamizado**

En la **industria de alimentos**, una gran cantidad de productos se someten a reducción de tamaño, como en la molienda de trigo y centeno para obtener harina y maíz o en la obtención de azúcar. El tamizado muchas veces se requiere para obtener un tamaño uniforme de material en grano o polvo (Geankoplis, 1993).

En la **industria de procesamiento de minerales**, esta operación se utiliza para la molienda de la mena de cobre, níquel, cobalto y hierro antes de su procesamiento químico, mientras que, en la **industria de la construcción**, para la molienda a gran escala de materias primas como cal, alúmina y sílice para la elaboración de cemento (Geankoplis, 1993).

También se utiliza en la **industria química** para la reducción de tamaño de los pigmentos de pinturas, los cuales deben ser muy finos para poder dar una buena cobertura al ser aplicados en una superficie (Granger, 1950).

## 2.17 Fermentación

La fermentación es un proceso catabólico de oxidación de sustancias orgánicas para producir otros compuestos orgánicos y energía. Los procesos de fermentación son realizados por levaduras y bacterias, generalmente en ausencia de oxígeno (Puerta, 2010).

Los procesos de fermentación industrial comienzan con ciertos microorganismos y condiciones específicas, dando como resultado una gran variedad de productos (Britannica, The Editors of Encyclopedia, 2020). En la **Tabla 10** se muestran los principales microorganismos involucrados y los productos resultantes de algunos tipos de fermentación:

*Tabla 10. Microorganismos involucrados y principales productos de la fermentación. Adaptado de (Voidarou, et al., Fermentative Foods: Microbiology, Biochemistry, Potential Human Health Benefits and Public Health Issues, 2020).*

| Tipo de fermentación | Microorganismos involucrados  | Principales productos finales  |
|----------------------|---|--|
| <b>Alcohólica</b>    | Levaduras   | 2 glucosa → 2 glicerol + ácido acético + etanol  |
| <b>Láctica</b>       | Bacterias del género <i>Lactobacillus</i> .   | Glucosa → 2 ácido láctico + 1 ATP<br>5 y 6 azúcares → ácido láctico + ácido acético + etanol + 1 ATP |
| <b>Butírica</b>      | Bacterias del género <i>Clostridium</i> .   | 4 glucosa → 2 acetato + butirato → ácido butírico, butanol, acetona, isopropanol, etanol, acetato    |
| <b>Acética</b>       | Bacterias del género <i>Acetobacter</i> , <i>Gluconobacter</i> y <i>Bacillus subtilis</i> . | Oxidación de azúcares, alcoholes y etanol → ácido acético  |

### Variables que influyen en el proceso de fermentación

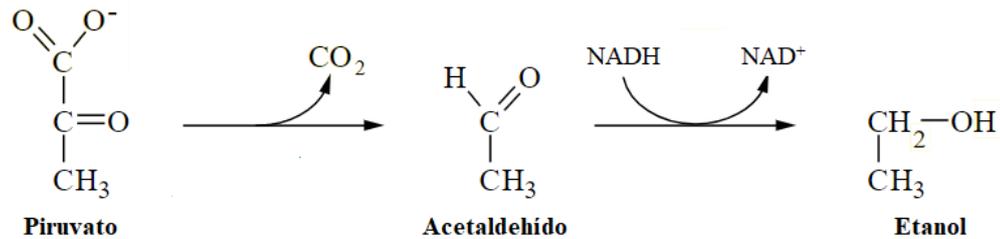
Existen ciertas variables que requieren ser controladas con el objetivo de no alterar el proceso de fermentación y que éste se lleve a cabo de forma adecuada, tales como: *temperatura, pH, concentración de azúcares, células vivas*, entre otros. De no ser controladas, estas variables podrían tener un impacto negativo en la eficiencia del proceso y en los costos, por lo que deben estar dentro de intervalos restringidos (Maza, Cárdenas, & Ones, 2019).

### Tipos de fermentación

De acuerdo con las condiciones en que se lleve a cabo y los microorganismos involucrados, los procesos de fermentación se dividen en:

- a) **Fermentación alcohólica:** Es un proceso biológico que se lleva a cabo en ausencia de oxígeno y se origina por la actividad de microorganismos que procesan los carbohidratos (generalmente azúcares como glucosa, fructosa y sacarosa) para producir etanol (Corrales, Antolínez, Bohórquez, & Corredor, 2015).

En la **Figura 184** se muestra un esquema de la reacción que se lleva a cabo en la fermentación alcohólica: la primera reacción es catalizada por piruvato descarboxilasa, una enzima citoplasmática, con una coenzima de pirofosfato de tiamina (TPP). Un grupo carboxilo se elimina del ácido pirúvico (piruvato), liberando dióxido de carbono como gas. La pérdida de dióxido de carbono reduce el tamaño de la molécula en un carbono, lo que produce acetaldehído. La segunda reacción es catalizada por alcohol deshidrogenasa para oxidar  $\text{NADH}^8$  a  $\text{NAD}^+$  y reducir el acetaldehído a etanol. La fermentación del ácido pirúvico por la levadura produce el etanol que se encuentra en las bebidas alcohólicas (Rye, 2016).



*Figura 184. Proceso de fermentación alcohólica (Navas J. J., 2020).*

Ejemplos de procesos en los que se lleva a cabo la fermentación alcohólica: producción de vino, cerveza y sidra (Maicas, 2020).

Las principales responsables de esta transformación son las **levaduras**, de las cuales, la *Saccharomyces cerevisiae* es de las más usadas en la industria, pues es uno de los principales ingredientes en la elaboración de diversos productos (Vázquez & Dacosta, 2007).

- b) Fermentación láctica:** Este tipo de fermentación es una reacción anaerobia y es usada por ciertas bacterias como las del yogurt, que utilizan la lactosa como fuente de energía para producir ácido láctico. La enzima involucrada en esta reacción es lactato deshidrogenasa (LDH) y la reacción puede llevarse a cabo en cualquier dirección (Rye, 2016).

Ejemplos de productos derivados de la fermentación láctica son el yogurt, leche, queso, mantequilla, entre otros. A las bacterias clásicas empleadas en la elaboración de productos lácteos fermentados (*bulgaricus*, *lactococcus*, *cremoris*, etc.) se incorporan **probióticos**, que son bacterias no patógenas con efectos benéficos para la salud, pues colonizan el intestino y modifican la microflora intestinal y sus actividades metabólicas (Tojo, Leis, Barros, & Prado, 2006).

- c) Fermentación acética:** Se define como la oxidación bioquímica del etanol contenido en un sustrato alcohólico para formar ácido acético (**Figura 185**). Dicha oxidación es una vía que usan las bacterias acéticas para obtener su energía y tiene la particularidad de llevarse a cabo en presencia de oxígeno (Centro Europeo de Posgrado CEUPE, 2021). Ejemplo de productos derivados de este tipo de fermentación es el vinagre (Gomes, Borges, Rosa, Castro-Gómez, & Spinosa, 2018).

<sup>8</sup> Nicotinamida Adenina Dinucleótida, coenzima presente en células vivas involucrada en la producción de energía.

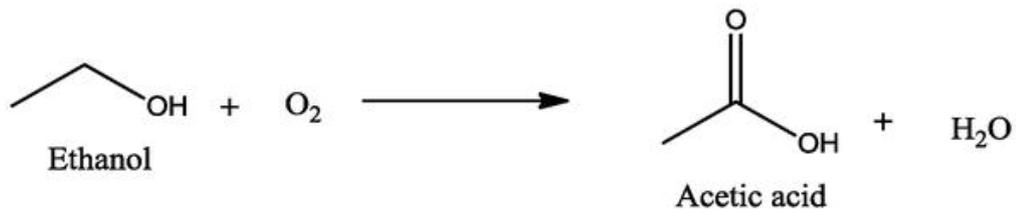


Figura 185. Producción de ácido acético por fermentación (Deshmukh & Manyar, 2020).

- d) Fermentación pútrida:** Este tipo de fermentación se genera a partir de un pH muy alto en el proceso, lo que contribuye al desarrollo de las bacterias del género Clostridium y a la generación de olores similares a la materia orgánica en descomposición (Lanza, 2013). Como resultado de este proceso, se obtienen sustancias orgánicas malolientes como el indol, cadaverina y escatol.
- e) Fermentación butírica:** En este tipo de fermentación están involucradas bacterias del género Clostridium, las cuales transforman la glucosa en ácido butírico y otros gases, en condiciones anaeróbicas, como se representa en la reacción de la **Figura 186**. Los productos finales de este tipo de fermentación son: etanol, acetato, butirato, butanol, acetona e isopropanol (Corrales, Antolinez, Bohórquez, & Corredor, 2015).



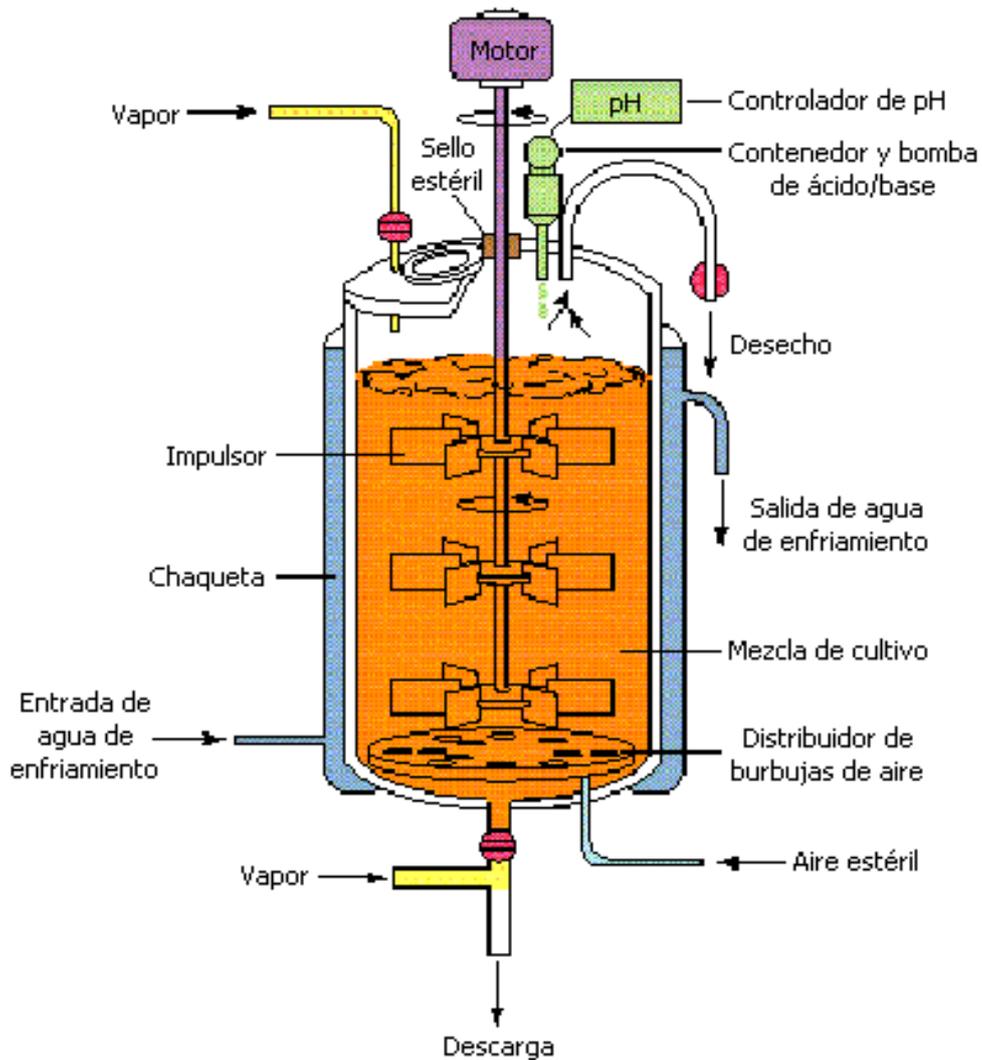
Figura 186. Reacción de la fermentación butírica

## Equipo de fermentación

Los principales equipos para llevar a cabo procesos de fermentación son:

- a) Fermentador de tanque agitado:** Son tanques aireados agitados, son los más tradicionales y se usan para la **producción de antibióticos** como la penicilina a escala industrial. En este equipo, como el que se observa en la **Figura 187**, el medio de cultivo es agitado interiormente por medios mecánicos, y consiste en un cilindro vertical que posee varios deflectores para prevenir la formación de un torbellino (vórtice) durante la agitación. La mezcla y dispersión de las burbujas se alcanza mediante agitación mecánica, lo que requiere una gran cantidad de energía por unidad de volumen, donde el aire estéril<sup>9</sup> entra al tanque por la parte inferior y pasa a través de un distribuidor circular (Candia, 2017).

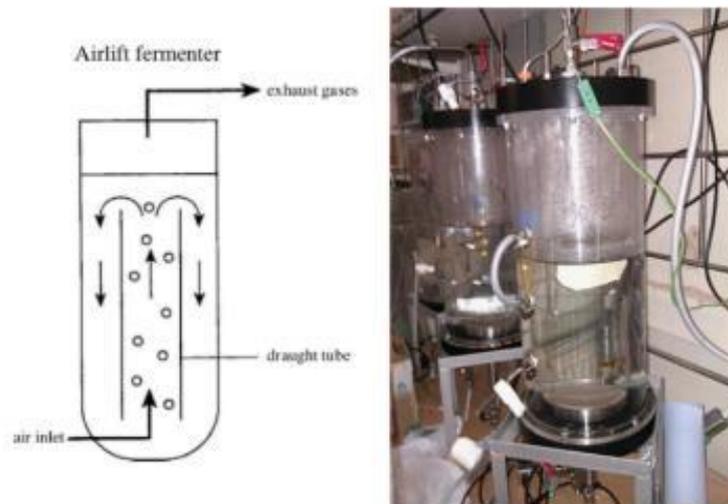
<sup>9</sup> Aire comprimido libre de gérmenes que se propaguen. Se usa para evitar que bacterias, virus, polvo, etc. provoquen efectos adversos en el producto que causen daño al usuario final (BEKO Technologies, 2022).



*Figura 187. Funcionamiento de un fermentador de tanque agitado*

La mezcla y dispersión de las burbujas se alcanza mediante agitación mecánica, lo cual requiere una gran cantidad de energía por unidad de volumen donde el aire estéril penetra por la base del reservorio a través de un distribuidor circular. El eje vertical lleva una o varias hélices en función de la relación altura/diámetro, las cuales evitan la formación de vórtices (Candia, 2017).

**b) Fermentador air-lift:** Es un reactor en forma de torre o columna en el cual el aire es introducido en la base del tubo, y el ascenso de las burbujas de aire constituye el único tipo de agitación existente, como se muestra en la **Figura 188** (Candia, 2017).

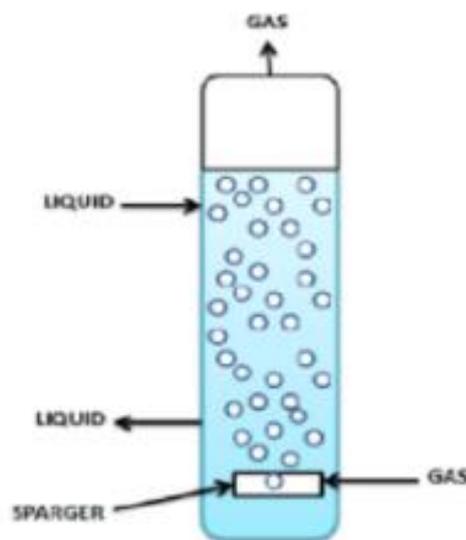


*Figura 188. Fermentador airlift*

El gas existente en el reactor de fermentación y la disminución de la densidad producen un movimiento ascendente del líquido en el tubo de subida. El gas se retira del líquido por la parte superior del reactor, dejando el líquido más pesado libre de las burbujas, recirculando al reactor (Candia, 2017).

Estos fermentadores se utilizan para cultivos de células animales, vegetales y catalizadores inmovilizados, pues los niveles de metabolitos<sup>10</sup> son muy inferiores comparados con los de un fermentador de tanque agitado (Candia, 2017).

- c) **Fermentador de columna de burbujas:** Consiste en un recipiente cilíndrico lleno de líquido con alturas superiores al doble de su diámetro. Además del difusor para la inyección de aire comprimido, estos reactores no presentan estructuras internas, como se observa en el diagrama de la **Figura 189** (Candia, 2017).



*Figura 189. Fermentador de columna de burbujas*

En los fermentadores de columna de burbujas muy altos suelen instalarse placas horizontales perforadas para evitar la coalescencia de las burbujas y lograr una mejor redistribución del aire (Candia, 2017).

<sup>10</sup> Metabolito: Compuesto orgánico que participa en reacciones químicas a nivel celular.

d) **Fermentador de lecho fijo:** En este reactor, las células se inmovilizan sobre un soporte fijo dentro del fermentador, mientras que el medio de cultivo con nutrientes fluye continuamente a través del lecho evitando que los microorganismos se difundan y facilitando su recuperación (Martínez V. , 2010).

En la **Figura 190** se muestra el diagrama de un fermentador de lecho fijo, el cual presenta ventajas como baja turbulencia y menor consumo de energía eléctrica, además de ser apto para cultivos anaeróbicos (Martínez V. , 2010).

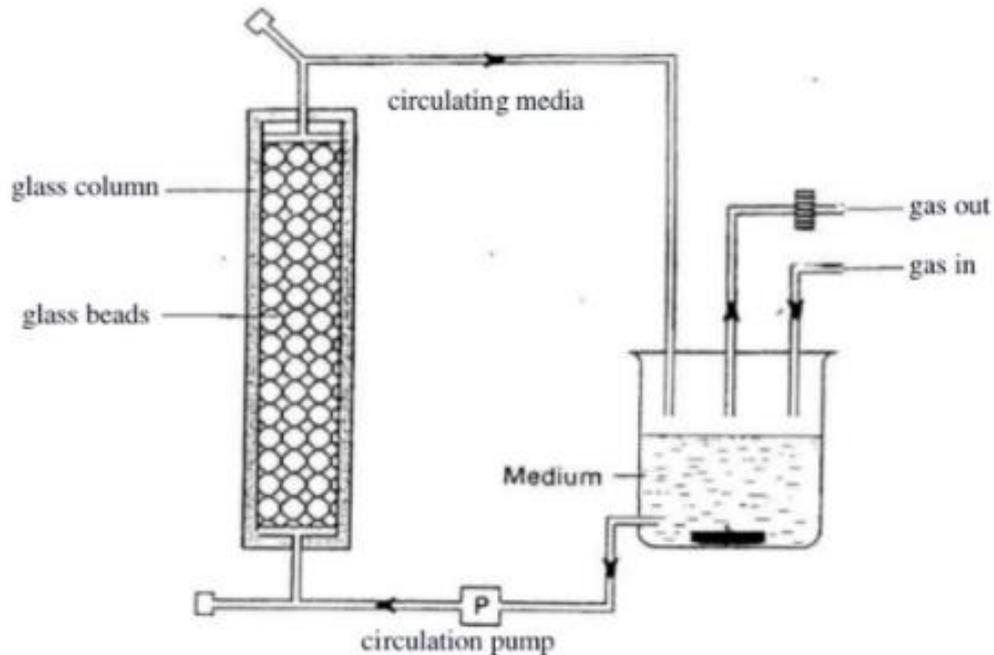


Figura 190. Fermentador de lecho fijo

### Caso: Fermentación alcohólica en la elaboración de pan y tequila

Un ejemplo de procesos en donde se llevan a cabo reacciones de fermentación es la **elaboración de pan**. Cuando se mezclan los ingredientes básicos (harina de trigo, agua, sal y levadura), los gránulos de almidón presentes en el trigo formados por amilosa y amilopectina absorben agua (Buehler, 2012).

Después, las enzimas existentes en la harina, como la amilasa, se activan y reaccionan con el almidón para dar lugar a la **glucosa**, que es el sustrato de la fermentación. Por la acción enzimática de la levadura, la glucosa u otro azúcar fermentable por ella, es transformada en **anhídrido carbónico ( $CO_2$ ) y alcohol** (García F. , 2021).

El alcohol pasa a la fase líquida de la masa, mientras que el anhídrido carbónico en estado gaseoso se disuelve parcialmente, dando como resultado ácido carbónico. El resto escapa o es retenido en la masa haciendo que ésta se infle. En esta etapa se debe controlar la temperatura para que las levaduras no mueran. Lo ideal es que se mantenga una temperatura entre 26 y 30 [°C]. Una vez en el horno, las levaduras mueren y el alcohol se evapora (Buehler, 2012).

En la **Figura 191** se muestra un diagrama del proceso de fermentación alcohólica llevado a cabo en la fabricación de pan.



Fuente: Enzymes. The little molecules that bake bread. Emily Buehler. Scientific American

Figura 191. Diagrama del proceso de fermentación alcohólica en la fabricación de pan (Buehler, 2012).

Otro ejemplo es el **proceso de elaboración del tequila**, donde el sustrato de la fermentación son los azúcares contenidos en las piñas del agave, los cuales se extraen de la fibra para obtener el **mosto**. Una vez en el fermentador, se le añaden levaduras y se ajusta el pH (4-5) y la temperatura (32 °C a 35 °C) para que el proceso de fermentación pueda llevarse a cabo (Consejo Regulador del Tequila, 2019).

En esta fase, los azúcares contenidos en el mosto son transformados en alcohol etílico y dióxido de carbono. Es importante controlar la temperatura, pues su incremento favorece la evaporación del etanol (Consejo Regulador del Tequila, 2019).

## 2.18 Lixiviación

También llamada **extracción sólido-líquido, lavado o percolación**, esta operación unitaria tiene como objetivo separar uno o más componentes solubles contenidos en una fase sólida mediante una fase líquida (disolvente). El componente que se transfiere de la fase sólida a la líquida se llama soluto, mientras que el componente insoluble se denomina sólido inerte (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2005).

Como se observa en la **Figura 192**, las fases sólido y líquido se ponen en íntimo contacto, ocasionando que el soluto (3) pase del sólido (2) al líquido o disolvente (1), lo que da paso a la separación de los componentes originalmente contenidos en el sólido en: el sólido agotado (4) y el disolvente con el soluto disuelto (5) y (Geankoplis, 1993).

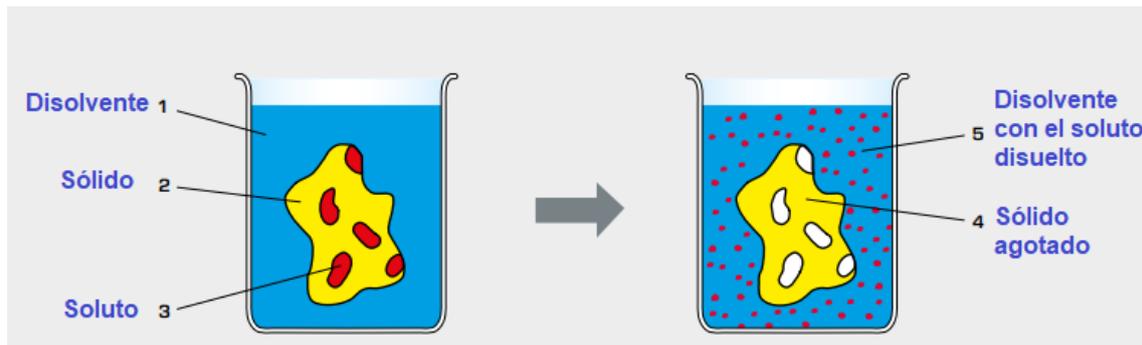


Figura 192. Principio de funcionamiento de la lixiviación. Adaptado de (Gunt Hamburg, 2021).

### Equipo de lixiviación

A continuación, se describe el funcionamiento de los principales equipos utilizados para llevar a cabo esta operación.

### Lixiviación en tanques

La extracción sólido-líquido de un soluto contenido en un sólido a través de un líquido ocurre en tres etapas, hasta que se alcanza el equilibrio (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2005):

- 1) *Cambio de fase del soluto:* El soluto pasa de la fase sólida al líquido, y su disolución se realiza a través de una interfase sólido-líquido.
- 2) *Difusión del soluto en el disolvente contenido en los poros del sólido:* Casi siempre el soluto se encuentra al interior de las partículas sólidas, por ello, el disolvente debe llenar los poros del sólido inerte y así lograr el contacto con el soluto. El disolvente permanece prácticamente estacionario al interior de los poros, por lo que la transferencia de soluto hacia el exterior se realiza por difusión molecular.
- 3) *Transferencia del soluto desde la superficie de las partículas hasta el seno de la disolución:* Cuando el soluto llega a la superficie de la partícula sólida, se transfiere desde este punto hasta la disolución gracias a un gradiente de concentración, realizándose esta transferencia de materia de forma simultánea.

Una vez que el sistema llega al equilibrio, al dejarlo en reposo se separarán dos fases (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2005):

- a. *Extracto o miscela:* Es la disolución separada (soluto y disolvente).
- b. *Refinado:* Es el residuo formado por los sólidos inertes y la solución retenida en ellos, la cual tendrá la misma concentración en soluto que el extracto. Si la solución está saturada, el sólido inerte puede contener soluto sin disolver.

### Extractor de contacto simple (Lixiviado por percolación en un lecho estacionario de sólidos)

Es un tanque con un falso fondo perforado para soportar los sólidos y permitir la salida del disolvente. Los sólidos se cargan en el tanque, se rocían con el solvente hasta reducir su contenido de soluto a una cantidad mínima y después se vacían, como se muestra en la **Figura 193** (McCabe, 2007).

Estos equipos se utilizan en la extracción de azúcar de remolacha, aceite de semillas oleaginosas y frutos secos, extracto de café a partir de granos tostados y molidos, así como solubles de té a partir de hojas deshidratadas (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2005).

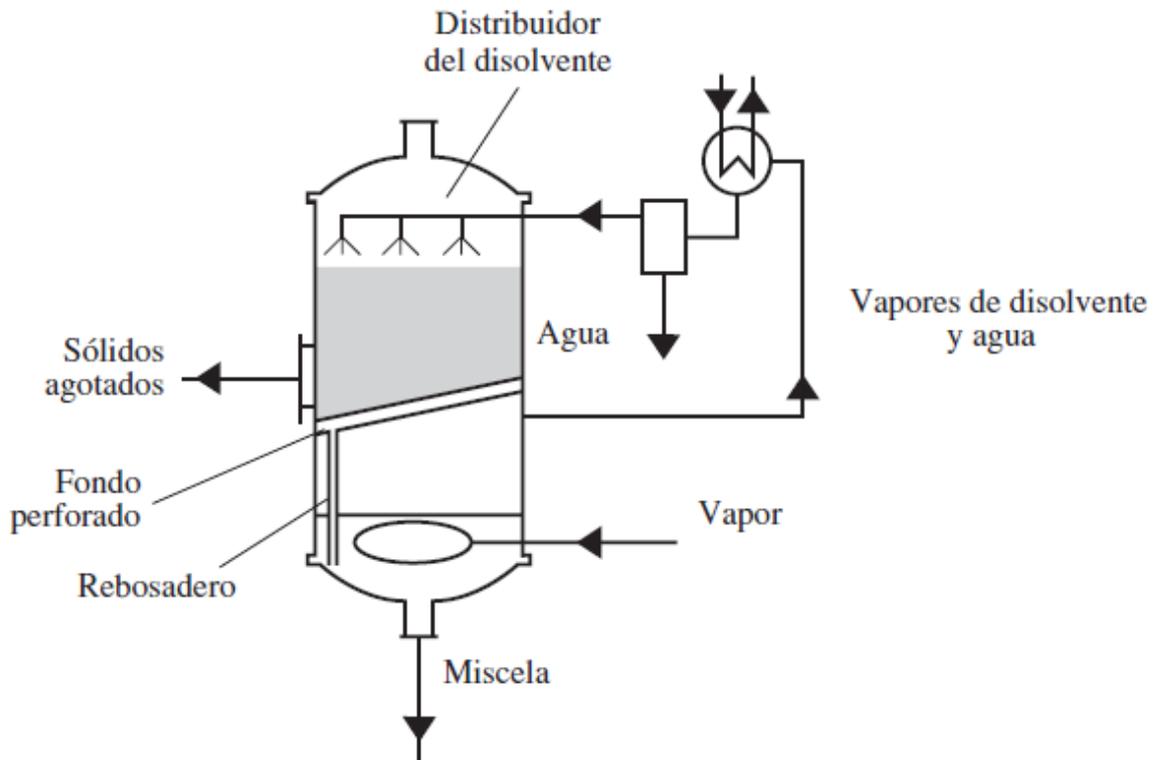


Figura 193. Extractor de contacto simple (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2005).

### Extractor de múltiple contacto con lecho fijo

En algunos casos, la velocidad de disolución es tan rápida, que es suficiente un solo paso del disolvente a través del material, pero es más frecuente usar un flujo en contracorriente del disolvente a través de una batería de tanques. En este método, el disolvente se introduce en el tanque que contiene el sólido y fluye a través de varios tanques en serie para finalmente ser retirado del tanque por el que se carga la alimentación del sólido, tal como se muestra en la **Figura 194**. La serie de tanques de este tipo recibe el nombre de **batería de extracción** (McCabe, 2007).

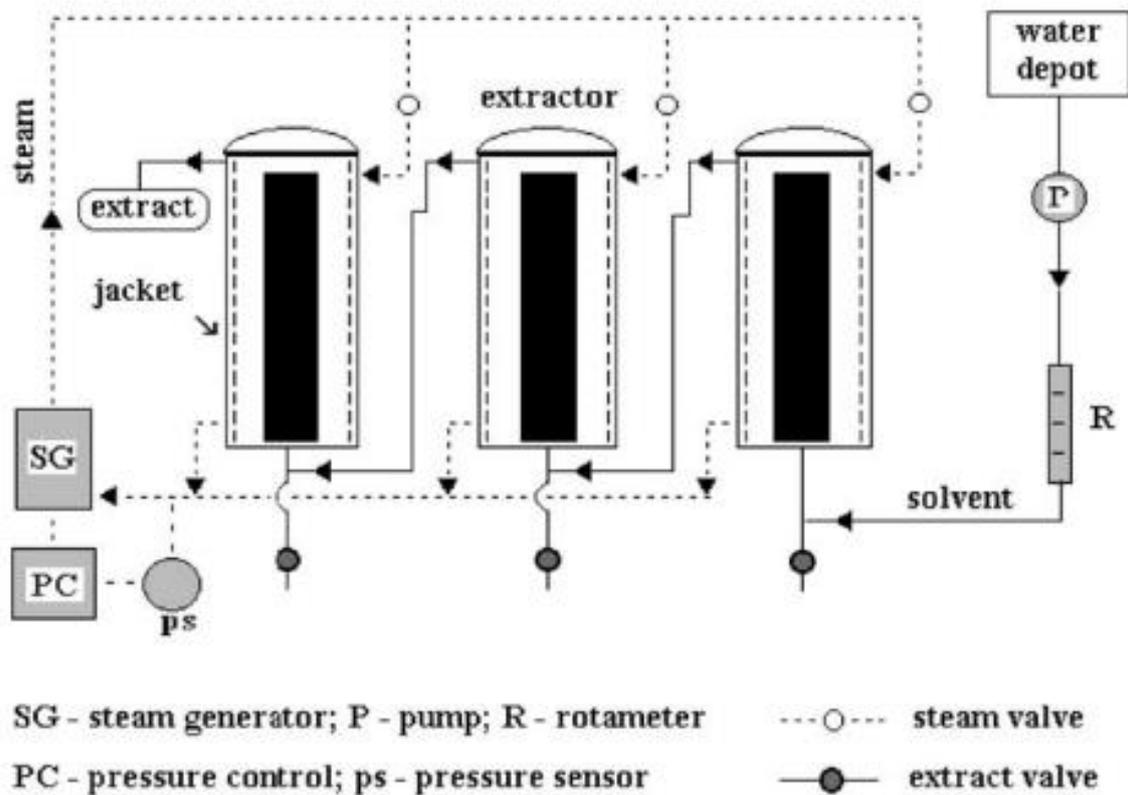


Figura 194. Batería de extracción (Senol & Aydin, 2005).

### Extractores de lecho móvil (lixiviación de aceites)

En estos equipos los sólidos se mueven a través del disolvente con muy poca o ninguna agitación. El **extractor de Bollman**, por ejemplo, es un equipo de lixiviación de lecho móvil que tiene un elevador de palas en el interior de una carcasa cerrada con perforaciones en el fondo de cada una (McCabe, 2007).

En el extremo superior derecho de la máquina (**Figura 195**), las palas son cargadas con sólidos en forma de hojuelas, las cuales se rocían con una cantidad apropiada de miscela intermedia (solución intermedia del disolvente que contiene aceite extraído y pequeñas partículas sólidas) a medida que descienden. Cuando esto sucede, el disolvente va extrayendo más aceite de las hojuelas, mientras que los sólidos finos se separan del disolvente por filtración. Mientras que las hojuelas parcialmente extraídas ascienden por la parte izquierda del equipo, una corriente de solvente puro percola a través de ellos en contracorriente. El producto ya extraído es retirado de las palas en la parte superior del elevador en una tolva mediante un transportador de paletas (McCabe, 2007).

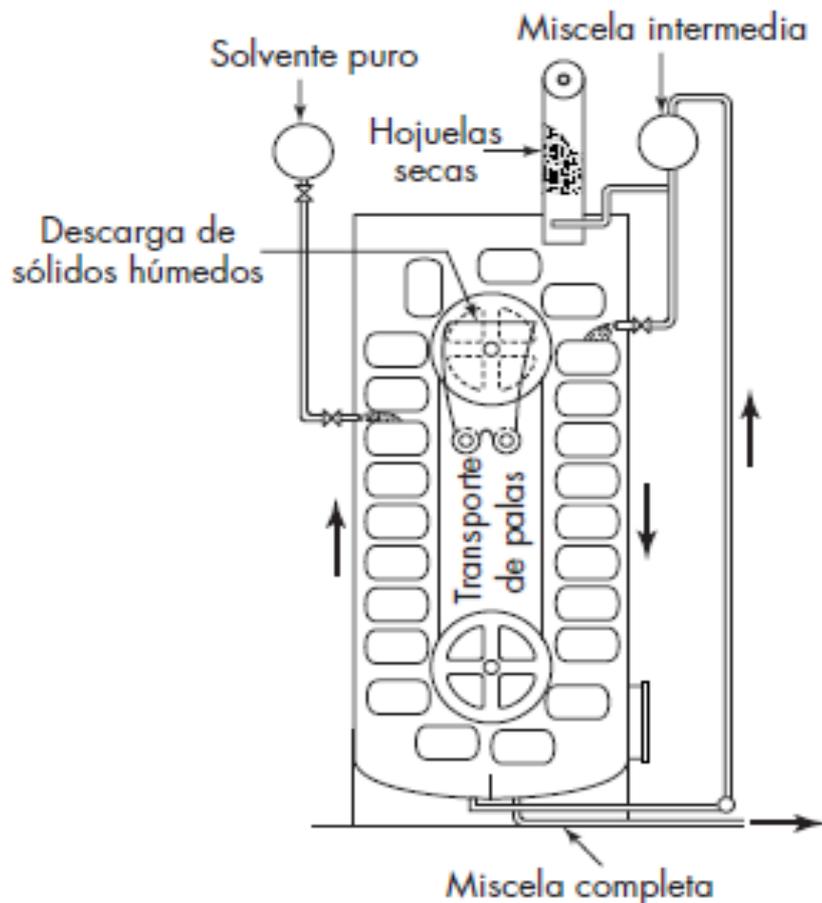


Figura 195. Equipo de lixiviación de lecho móvil: Extractor de Bollman (McCabe, 2007).

Otro de los equipos de lecho móvil utilizados para esta operación es el extractor Rotocel (Figura 196), el cual consta de una cámara cilíndrica vertical cerrada donde gira un tanque cilíndrico en su interior dividido en compartimentos (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2005).

Para cada compartimento los sólidos entran por la alimentación y los compartimentos pasan sucesivamente a una serie de fases de rociado de solvente, luego el solvente con el soluto pasa a una sección de drenaje y un punto de descarga en donde el piso del compartimento se abre para descargarlos (McCabe, 2007).

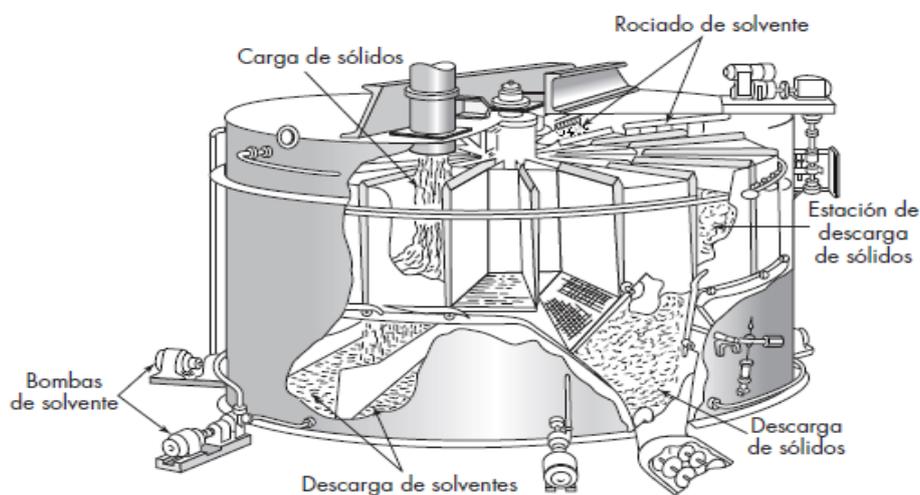


Figura 196. Funcionamiento de un extractor Rotocel (McCabe, 2007).

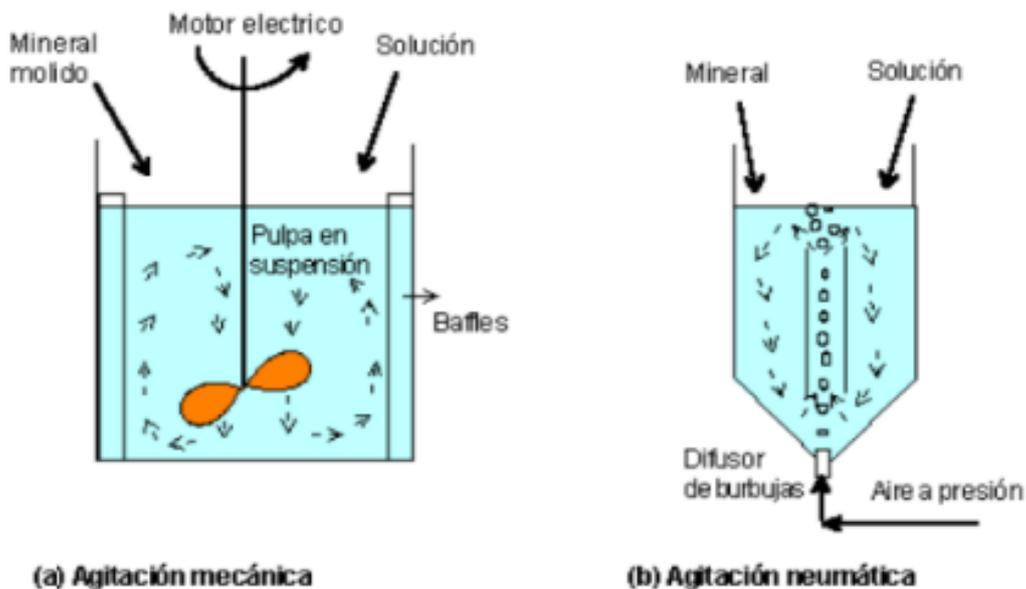
En la **Figura 197** podemos observar un extractor Rotocel, utilizado en extracciones de azúcar o de aceite (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2005).



*Figura 197. Extractor Rotocel*

### Tanques agitados (lixiviación por agitación)

Los sólidos que forman lechos impermeables antes o durante la lixiviación se dispersan en el disolvente mediante agitación mecánica o neumática en un tanque o mezclador, como se muestra en la **Figura 198**. Posteriormente, el residuo lixiviado se separa de la solución concentrada por sedimentación o filtración. (McCabe, 2007).

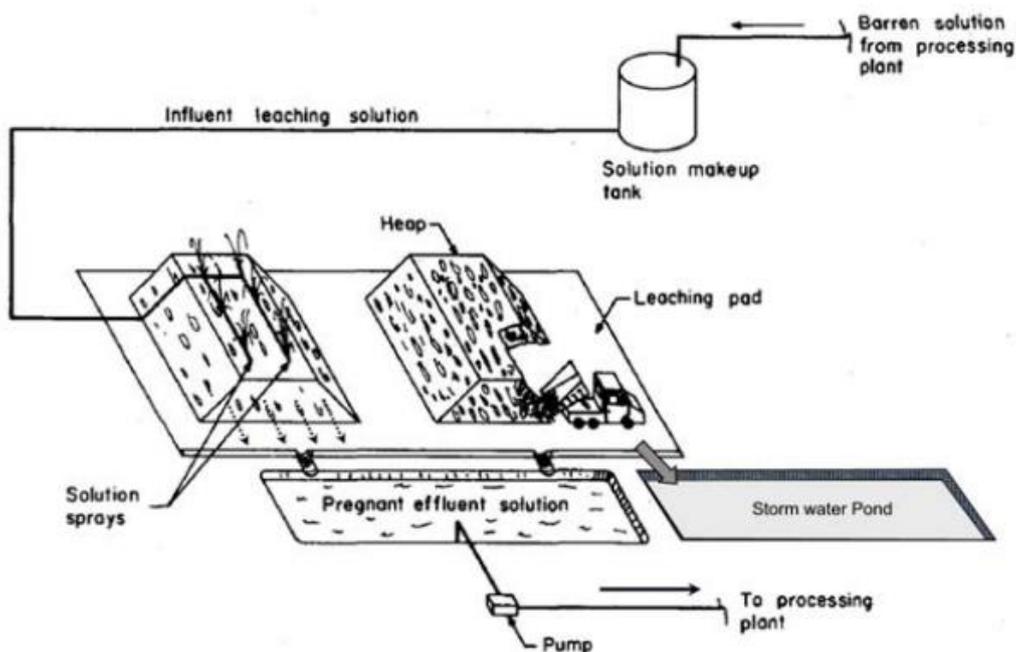


*Figura 198. Lixiviación por agitación: a) Mecánica y b) Neumática*

## Lixiviación en pilas

Es una operación de recuperación de metales en la que el material líquido o triturado y/o minerales aglomerados se apilan sobre una geomembrana impermeable, la cual cuenta con un sistema de drenaje que recolecta la solución lixiviada (Zanbak, 2012).

Debido a que la percolación del disolvente a través del mineral se obtiene bajo condiciones atmosféricas, la recuperación del metal requiere periodos largos de tiempo para concluir en su totalidad (semanas, meses o incluso años), comparada con la lixiviación en tanques. Además, esta operación requiere superficies que permitan que la mena ya pulverizada del mineral sea descargada por equipos y transporte de carga con el objetivo de formar pilas de lixiviación, como se muestra en la **Figura 199** (Zanbak, 2012).



*Figura 199. Lixiviación en pilas (Gusek & Fattore, 2015).*

En este tipo de lixiviación el disolvente más utilizado es el **cianuro**, y se utiliza un sistema de riego por goteo para humedecer la superficie (aproximadamente 50 [g] de cianuro por cada 1000 [L] de agua). (Zanbak, 2012).

Los principales factores que actúan en la operación de lixiviación en pilas son: el **tipo de disolvente a utilizar**, pues este debe solubilizar al soluto; la **temperatura del proceso**, ya que cuando se eleva, aumenta el coeficiente de difusión del disolvente en las partículas del sólido y, por lo tanto, la velocidad de extracción. Por último, el **tamaño de partícula**, el cual debe acondicionarse previamente por medio de corte, trituración y/o molienda (Zanbak, 2012).

## Aplicaciones de la lixiviación

Las principales aplicaciones de esta operación en la industria alimenticia son: extracción de aceites y grasas animales y vegetales, lavado de precipitados, obtención de extractos de material animal o vegetal, obtención de azúcar y fabricación de café instantáneo y té en una sencilla taza (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2005).

La lixiviación también es una operación importante en la recuperación de cobre proveniente de minerales de cobre oxidados, usando como disolvente ácido sulfúrico diluido (Granger, 1950).

## 2.19 Absorción de gases

La absorción es una operación unitaria de transferencia de materia que consiste en poner un gas en contacto con un líquido para que este **disuelva** determinados componentes del gas, quedando éste libre de dichos componentes. La absorción puede ser **física**, si el gas se disuelve en el líquido absorbente; o **química**, si el gas reacciona con el líquido dando un nuevo compuesto químico (Marcilla, 1998).

En la absorción de gases un **gas soluble (soluto)** se disuelve por medio de un líquido en el que el gas es más o menos soluble, como se observa en la **Figura 200**. El soluto se recupera después de dicho líquido por destilación, y el líquido absorbente se desecha o se reutiliza (McCabe, 2007).

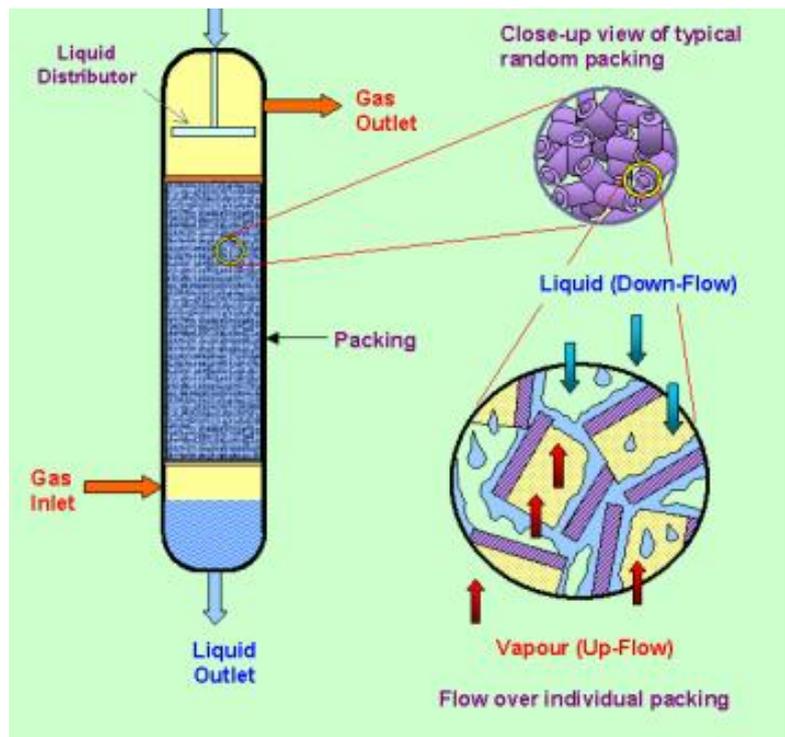


Figura 200. Absorción de gases (Titilayo, 2021).

La **desabsorción o eliminación de gases** es la operación unitaria contraria a la absorción, en donde un gas disuelto en un líquido es arrastrado por un gas inerte, siendo eliminado del líquido (Marcilla, 1998).

El principio en el que se fundamentan las operaciones de absorción y desabsorción es la diferencia de concentración que existe entre las fases, del componente que se transfiere, respecto de la de equilibrio. Cuando se está más alejado de las condiciones de equilibrio, existe mayor transferencia de materia entre las fases (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2005).

Generalmente, las operaciones de absorción se llevan a cabo en columnas de platos o de relleno. En el primer caso, la transferencia de materia se realiza en cada plato, mientras que en las columnas de relleno la transferencia se realiza de forma continua a lo largo de la columna.

La **Figura 201** presenta un sistema típico de absorción-desabsorción: un gas con ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) se trata con monoetanolamina (M.E.A.) fría, con la que el  $H_2S$  reacciona dando el bisulfuro de amina (absorción con reacción química). Esta reacción es reversible, por lo que en una columna de desabsorción anexa, el vapor de agua hace que la reacción vaya en sentido contrario, desabsorbiendo el  $H_2S$ . La monoetanolamina caliente recircula a la columna de absorción y la corriente de amina se enfría con la corriente del sulfuro de amina en el intercambiador de calor central (Marcilla, 1998).

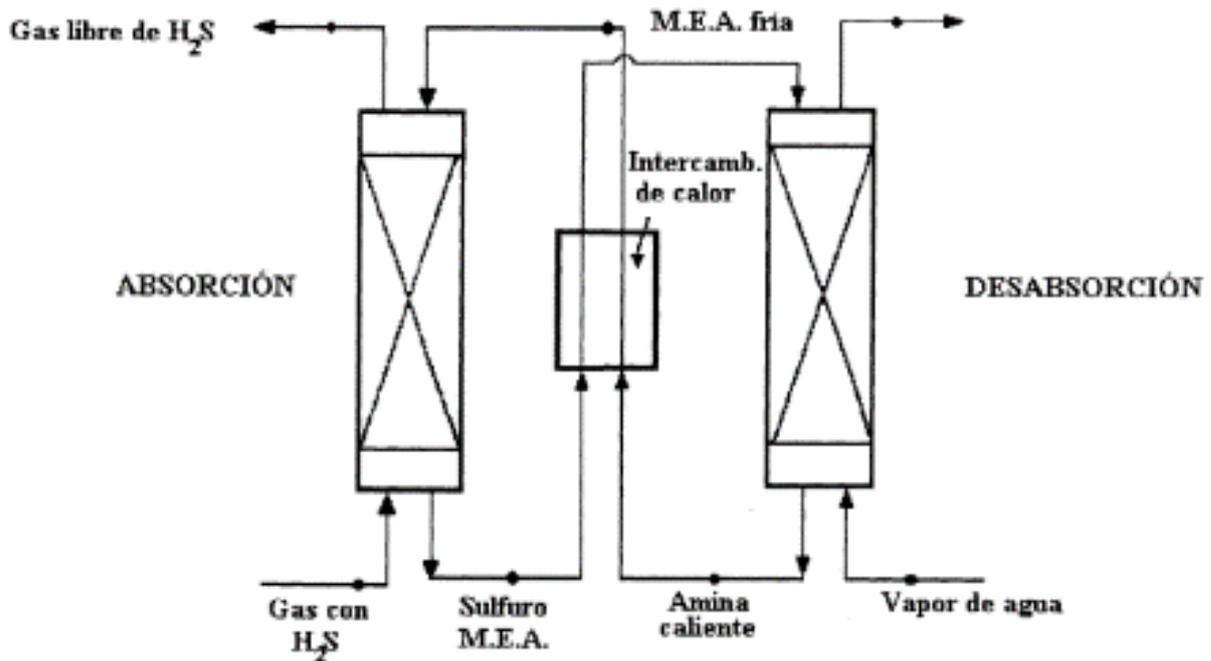


Figura 201. Sistema de eliminación de H<sub>2</sub>S de un gas por absorción con reacción química (Marcilla, 1998).

### Aplicaciones de la absorción y desabsorción de gases

Las principales aplicaciones de esta operación son (Marcilla, 1998):

- La separación de hidrocarburos aromáticos (benceno, tolueno y xileno) de los gases de coquería mediante aceites minerales.
- El secado del cloro mediante la absorción del agua con ácido sulfúrico concentrado.
- Una aplicación de la desabsorción de gases es la eliminación de gases ácidos como H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> de los gases de chimenea mediante distintas corrientes, como agua a presión, solución de NaOH o soluciones de etanolaminas.

### 2.19.1 Columnas de separación

Diferentes operaciones unitarias en la industria como la destilación y la absorción se llevan a cabo en equipos llamados columnas, pues las fases también son un líquido y un gas. Dichas columnas suelen ser de platos (contacto discontinuo por etapas) o de relleno (contacto continuo) y ambas usan la fuerza de gravedad para hacer circular la mezcla líquida (destilación) o el líquido disolvente (absorción). A continuación, se mencionan las características cada una de ellas (Marcilla, 1998):

#### 1) Columnas de relleno o empacadas (absorción, destilación, lixiviación)

La **columna empacada** consiste en una columna cilíndrica equipada con una entrada de gas y un espacio de distribución en la parte inferior; una entrada de líquido y un distribuidor en la parte superior; salidas para el gas y el líquido en las partes superior e inferior respectivamente y una masa de cuerpos sólidos inertes que constituyen el relleno o empaque (McCabe, 2007).

Estas columnas de contacto continuo entre el vapor y el líquido están llenas de dichos cuerpos sólidos pequeños, inertes a las fases circulantes, distribuidos al azar o en orden, y entre más se dispersa la corriente del líquido, se logra más exposición del mismo al vapor que circula en sentido contrario, poniéndose ambos en **contacto** íntimo (Marcilla, 1998). En la **Figura 202** se muestra una columna empacada de laboratorio de carcasa transparente:



*Figura 202. Columna empacada*

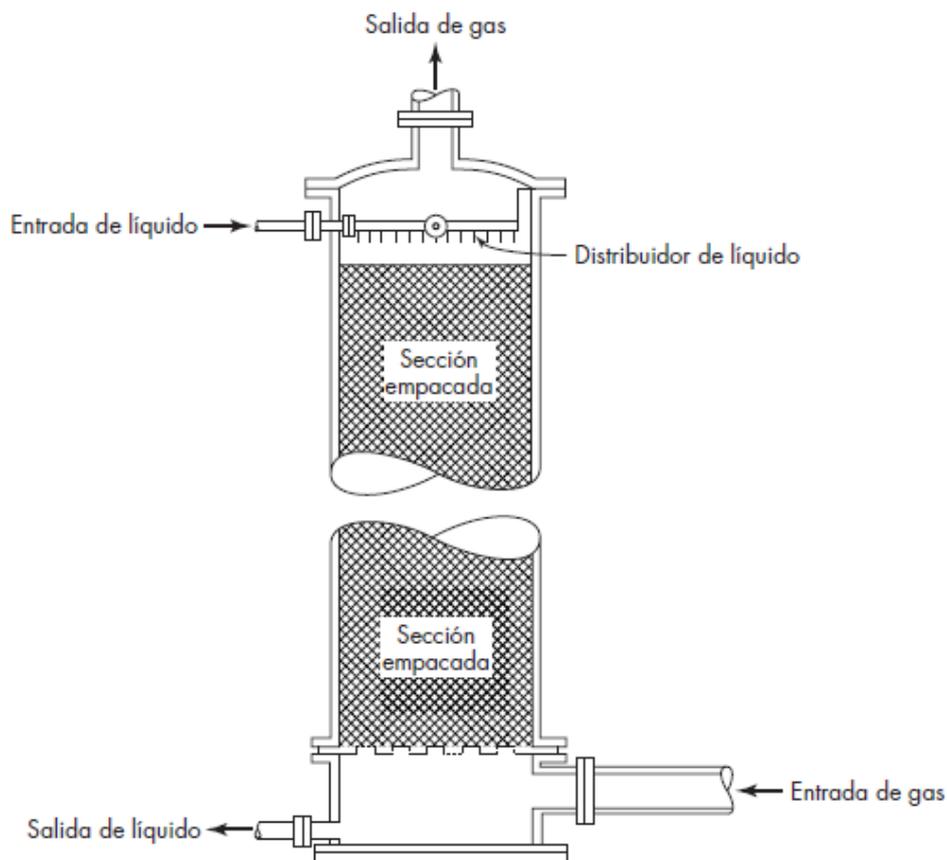
En una columna empacada, el líquido entrante recibe el nombre de **licor débil** refiriéndose al disolvente puro (en el caso de la absorción) **o de muy baja concentración** refiriéndose a la solución diluida del soluto en el solvente (en el caso de la destilación), y se distribuye sobre la parte superior del empaque mediante un distribuidor (en torres

grandes, es más común el uso de boquillas rociadoras o platos distribuidores con un vertedero de desbordamiento) (McCabe, 2007).

Los componentes menos volátiles y más volátiles en el caso de la destilación (o menos solubles y más solubles en el caso de la absorción) se transfieren en sentidos opuestos, sin embargo, como el tiempo de contacto en cada sección de la columna es muy corto, dichos componentes no llegan a estar en equilibrio en ningún punto (Marcilla, 1998).

El gas es llamado gas rico porque contiene el soluto en el caso de la absorción, en el caso de la destilación es el vapor resultante de la ebullición de la mezcla líquida de entrada a la columna. Este gas, en todo caso, entra en el espacio de distribución situado debajo del empaque y asciende a través de los intersticios del empaque en sentido contrario al flujo del líquido. El empaque proporciona una gran área de contacto entre el líquido y el gas, favoreciendo un íntimo contacto entre las fases (McCabe, 2007).

En el caso de la absorción el soluto contenido en el gas rico es absorbido por el líquido solvente que entra en la torre y el gas diluido o agotado sale de la torre por la parte superior. El líquido se enriquece en soluto a medida que desciende por la torre y el **líquido o licor concentrado** sale por el fondo de la torre a través de la salida del líquido, como se muestra en la **Figura 203** (McCabe, 2007).



*Figura 203. Torre empacada de absorción (McCabe, 2007).*

En el caso de la destilación, existe una **transferencia de materia**: pasan los componentes más volátiles del líquido al vapor y los menos volátiles del vapor al líquido, lo que hace que el vapor se enriquezca en componentes volátiles mientras va ascendiendo (Marcilla, 1998) (**ver apartado de destilación**).

## Empaques o rellenos

Los empaques de las columnas producen un aumento de la superficie de contacto entre las fases líquida y gaseosa, provocando una mayor transferencia de materia entre ambas (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2005). Pueden ser de dos tipos principales: aleatorios u ordenados.

Los **empaques al azar o aleatorios** son los empaques más comunes, consisten en unidades de 6 a 75 [mm] y la mayoría se construyen con materiales como arcilla, porcelana o diferentes plásticos (McCabe, 2007). Con este tipo de relleno la interfase vapor-líquido se crea por combinación de los efectos de penetración de superficie, burbujeo y formación de niebla (Marcilla, 1998).

Algunos ejemplos de empaques aleatorios son:

- a) *Anillo Raschig*: Tiene una forma sencilla, poco espesor y su altura y diámetro son iguales, como se muestra en la **Figura 204** (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2005). Se fabrican con materiales como cerámica y acero inoxidable.



*Figura 204. Anillos Raschig*

- b) *Silla intalox*. Tiene la forma de una silla de montar (**Figura 205**), pero no es posible superponer unas con otras, lo que disminuye el área de transferencia. Generalmente son de plástico o cerámica (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2005).



*Figura 205. Silla intalox*

- c) *Anillos pall*: Tienen las mismas características de los anillos Raschig, con la particularidad de tener aperturas laterales, como se muestra en la **Figura 206**. (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2005). Son fabricados en cerámica, plástico y acero inoxidable.



*Figura 206. Anillos pall*

- d) *Silla berl*: Son de cerámica o plástico de  $\frac{1}{2}$ " a 3" y caben más por unidad de volumen que en el caso de los anillos, sin embargo, pueden encajar unas encima de otras y disminuir el área de transferencia de materia. En la **Figura 207** se muestra este tipo de empaque (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2005).



*Figura 207. Silla berl*

- e) *Anillo lessing*: Cuentan con un tabique transversal que aumenta la superficie de contacto, como se observa en la **Figura 208**. Su tamaño máximo es de 6" (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2005).



*Figura 208. Anillo lessing*

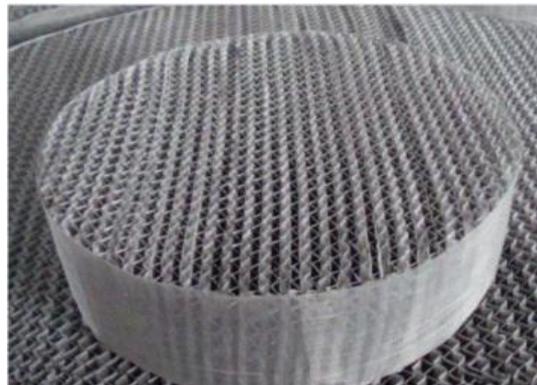
- f) *Anillo de partición*: Cuenta con dos tabiques en forma de cruz, como se muestra en la **Figura 209**:



*Figura 209. Anillo de partición*

Los **empaques ordenados** (rejas o mallas) tienen una estructura abierta y se usan para velocidades de gas elevadas donde se necesita una pérdida de presión baja, como en torres de enfriamiento, por ejemplo (Marcilla, 1998). Además, son de tamaños

comprendidos entre 50 a 200 [mm] y son menos usados que los empaques aleatorios (McCabe, 2007). En la **Figura 210** se muestra este tipo de relleno.

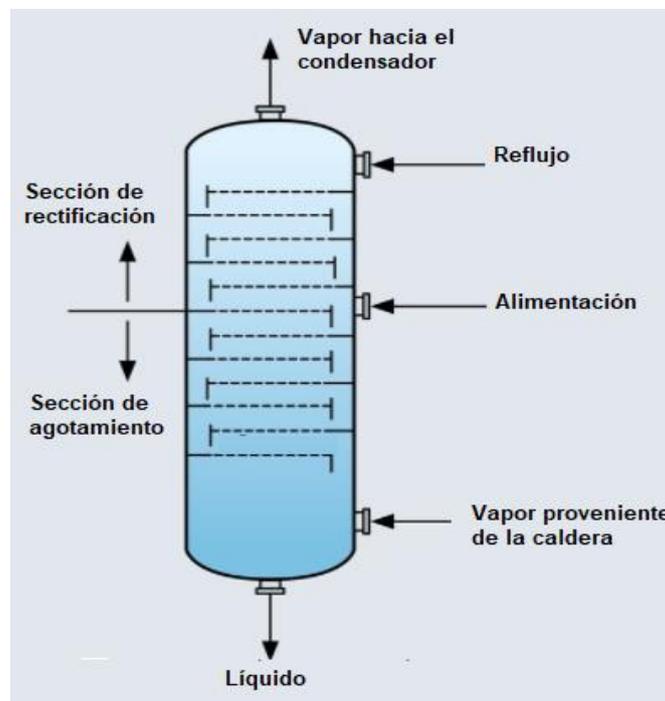


*Figura 210. Empaque ordenado de malla para columna de destilación*

Ya sea que se utilicen empaques aleatorios u ordenados, todo empaque debe proporcionar una gran área superficial (área interfacial alta entre el gas y el líquido), tener una estructura abierta (baja resistencia al flujo de gas) y facilitar tanto la distribución uniforme del líquido sobre su superficie como el paso uniforme del vapor a través de toda la sección de la columna (Marcilla, 1998).

## 2) Columnas de platos o de contacto por etapas (destilación, absorción)

Estas columnas poseen superficies planas o pisos (platos) en su interior que dividen la columna en una serie de etapas, las cuales tienen por objeto retener una cierta cantidad de líquido en su superficie, a través de la cual se hace burbujear el vapor que asciende desde la caldera en el caso de la destilación, logrando un contacto adecuado entre el vapor y el líquido (Marcilla, 1998). En la **Figura 211** se muestra el esquema de funcionamiento de una columna de platos.

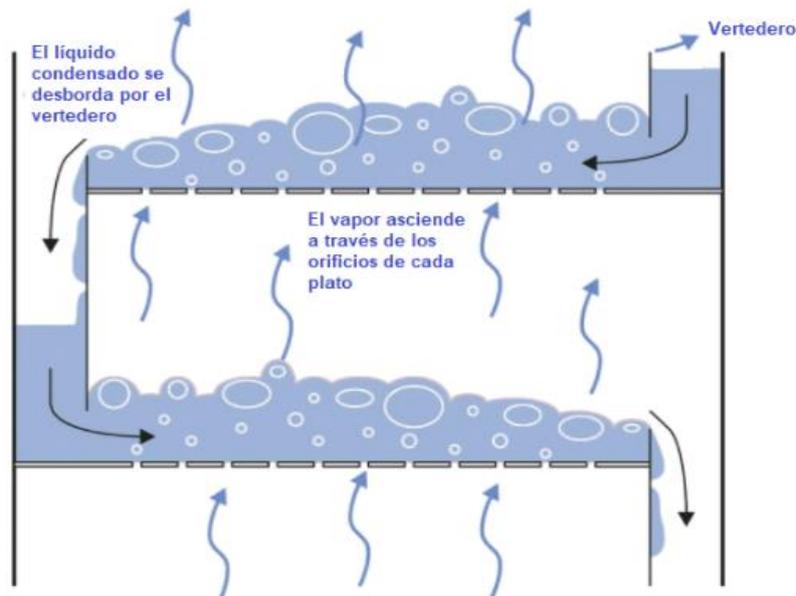


*Figura 211. Funcionamiento de una columna de platos destilación*

El líquido de un plato cae al plato siguiente por un **vertedero** situado en el extremo del **plato** y ni el vapor que llega a un plato por debajo ni el líquido que le llega por encima

están en equilibrio, en el plato se da la mezcla de ambas corrientes y se produce la transferencia de materia (Marcilla, 1998).

En la **Figura 212** se muestra la dirección del flujo del vapor y el líquido en una columna de platos, en donde cada plato tiene dos vertederos, uno en cada lado, a través de los cuales el líquido desciende al siguiente plato por acción de la gravedad (Sölken, 2008).



*Figura 212. Funcionamiento interno de una columna de platos usado en destilación o absorción. Adaptado de (Sölken, 2008)*

Al ser más ligero, el vapor fluye de forma ascendente a través de la columna y es forzado a atravesar el líquido por medio de los **orificios** que hay en cada plato. El área donde se encuentran los orificios, la cual permite el paso de vapor en cada plato, se considera el **área activa del plato** (Sölken, 2008). En la **Figura 213** se observan una columna de platos y su estructura interior.



**a)**

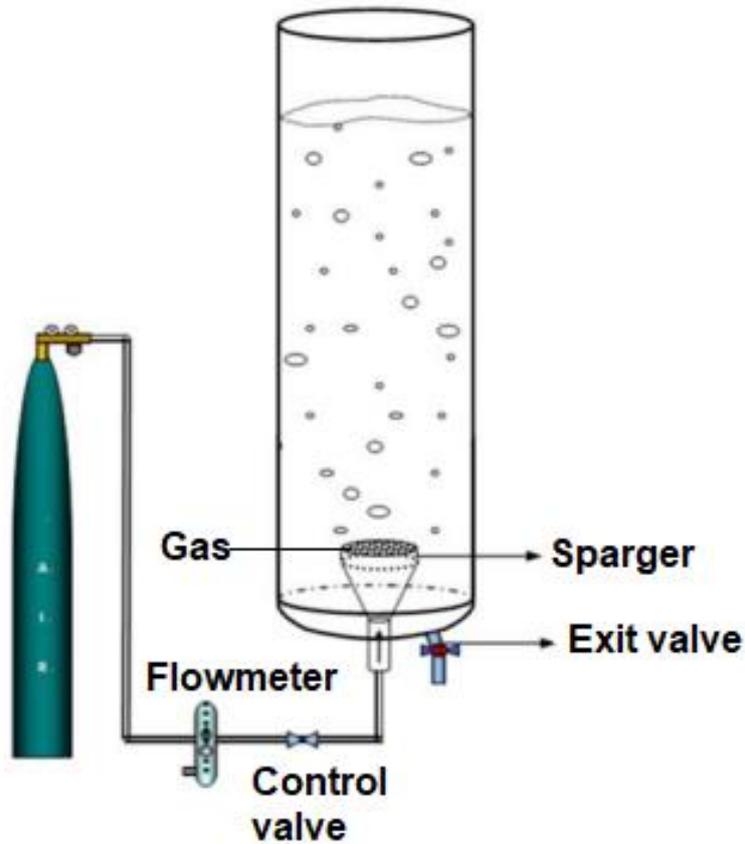


**b)**

*Figura 213.a) Exterior de columna de platos b) Estructura interior de una columna de platos de extracción líquido-líquido (Ver aparatado de extracción líquido-líquido).*

### 3) Columnas de burbujeo (extracción líquido-líquido, absorción)

Este reactor se aplica en procesos químicos como tratamiento de aguas residuales, fermentaciones aeróbicas y producción biológica. Tiene ventajas como su construcción simple, alta capacidad y flexibilidad, así como un alto rendimiento de mezcla entre las fases gaseosa y líquida, permitiendo una transferencia adecuada de materia. El gas se introduce por el fondo de la columna de burbujeo para inducir la mezcla entre fases, como se muestra en la **Figura 214** (Arjomandzadegan, Rafiee, & Moraveji, 2014).



*Figura 214. Esquema de una columna de burbujeo.  
Adaptado de (Arjomandzadegan, Rafiee, & Moraveji, 2014).*

## 2.20 Oxidación

Es la ganancia de oxígeno y pérdida de hidrógeno. La reacción opuesta a la oxidación se llama reducción, la cual implica pérdida de oxígeno y ganancia de hidrógeno (Housecroft & Sharpe, 2006).

El término **reacción de oxidación** también implica la pérdida de electrones y en la antigüedad se empleaba este término para expresar la combinación de elementos con oxígeno. El **número de oxidación**, también llamado estado de oxidación se refiere al número de cargas que tendría un átomo en una molécula si los electrones fueran transferidos completamente, este número refleja la cantidad de electrones "transferidos" y permiten identificar los elementos que se han oxidado (Chang, 2013).

Los compuestos orgánicos más simples son aquellos formados por carbono e hidrógeno: los hidrocarburos. El más sencillo es el metano ( $CH_4$ ), componente principal del gas natural. El metanol ( $CH_3OH$ ), en cambio, es el alcohol más simple, se produce a partir de monóxido de carbono e hidrógeno y es usado para sintetizar otros compuestos orgánicos o como disolvente (Petrucci, 2011).

Cuando un alcohol primario pasa por un proceso de oxidación se obtiene un aldehído, compuesto utilizado como agente aromático. El aldehído más simple es el formaldehído, un gas incoloro que se disuelve fácilmente en agua y es usado en la fabricación de resinas sintéticas. Si este compuesto vuelve a oxidarse, se obtiene ácido carboxílico (Petrucci, 2011). En la **Figura 215** se muestran algunos compuestos formados por carbono y su correspondiente número de oxidación.

| Compuesto          | Fórmula estructural | Fórmula molecular | Número de oxidación |
|--------------------|---------------------|-------------------|---------------------|
| Metano             | $CH_4$              | $CH_4$            | -4                  |
| Metanol            | $CH_3OH$            | $CH_4O$           | -2                  |
| Formaldehído       | $HCHO$              | $CH_2O$           | 0                   |
| Ácido fórmico      | $HCOOH$             | $CH_2O_2$         | +2                  |
| Ácido carbónico    | $HOCOOH$            | $H_2CO_3$         | +4                  |
| Dióxido de carbono | $O=C=O$             | $CO_2$            | +4                  |

Figura 215. Compuestos orgánicos formados por carbono y sus números de oxidación

### Reacciones de oxidación

Uno de los tipos más conocidos de oxidación es la **reacción de combustión**, en la cual la sustancia reacciona con el oxígeno, por lo general con la liberación de luz y calor para producir una flama. Como se ilustra en el ejemplo de la **Figura 216**, el magnesio entra en combustión con el oxígeno para formar óxido de magnesio. Otro ejemplo es la combustión del propano, un componente del gas natural utilizado para cocinar y para calefacción doméstica (Chang, 2013).

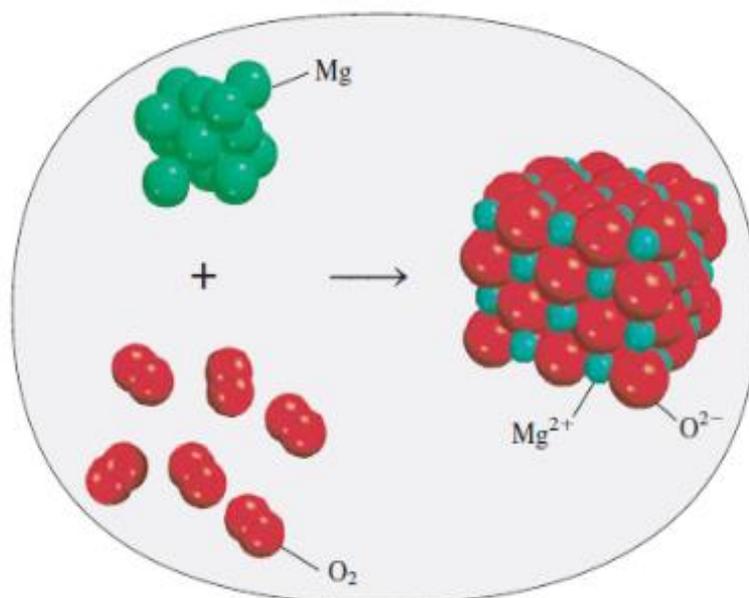


Figura 216. Combustión de magnesio con oxígeno para formar óxido de magnesio (Chang, 2013).

La **oxidación de olefinas e hidrocarburos** es otro ejemplo de este tipo de reacción. Tienen gran importancia en la industria química, pues a partir de su oxidación se obtienen compuestos químicos como óxido de etileno, ácido acrílico, ácido benzoico, entre otros (Massó, 2017).

La oxidación de un hidrocarburo no siempre es total, sino que existen estados intermedios con incorporación parcial de oxígeno. Las moléculas provenientes de estas oxidaciones parciales son de gran importancia (Romo, 2022), un ejemplo es la reacción de oxidación de etano (**Figura 217**):

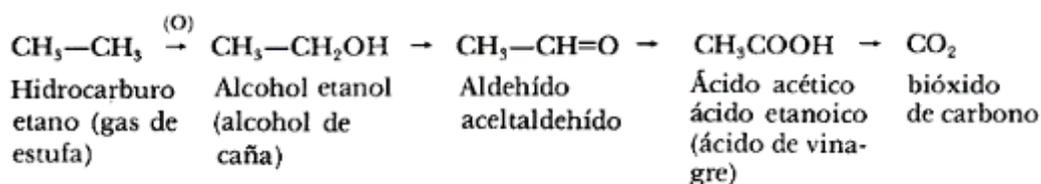


Figura 217. Fases de oxidación del gas etano

Otro ejemplo clásico de oxidación ocurre entre el hierro y el oxígeno en presencia de aire húmedo, dando lugar a la formación de **óxido de hierro**, cuya reacción química es la mostrada en la **Figura 218**.



Figura 218. Formación de óxido de hierro

### Corrosión galvánica

La **corrosión** es un término que se utiliza para describir el proceso de deterioro de materiales metálicos tanto de metales puros como de aleaciones, por medio de reacciones químicas. La mayoría de los procesos de corrosión involucran reacciones de óxido-reducción donde son necesarios un ánodo, un cátodo, un electrolito y una conexión eléctrica entre los electrodos, formando en conjunto una **celda electroquímica** como se muestra en el esquema de la **Figura 219** (Salazar-Jiménez, 2015).

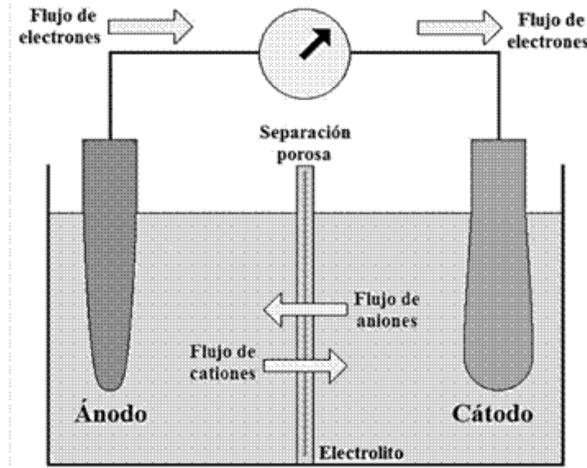


Figura 219. Esquema de una celda electroquímica (Salazar-Jiménez, 2015).

La corrosión galvánica es un tipo de corrosión que ocurre cuando existe una unión, física o eléctrica, entre metales de diferente naturaleza que, en presencia de un electrolito, forman una celda electroquímica donde el material de menor potencial electroquímico se corroe (Salazar-Jiménez, 2015).

Un ejemplo común de corrosión galvánica se presenta en uniones que involucran tornillos y tuercas (Figura 220), así como en instalaciones de drenaje que utilizan tuberías de metal.

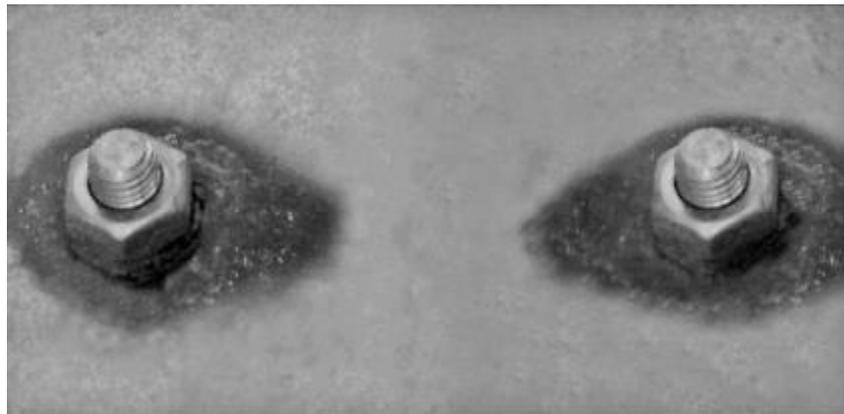


Figura 220. Corrosión galvánica sobre una placa de acero en contacto con tornillos y tuercas de acero inoxidable (Salazar-Jiménez, 2015).

El **potencial electroquímico** es la resistencia de un material metálico a la corrosión, cuyo valor depende de la composición del electrolito. Entre más positivo sea dicho valor, más resistente es el material a la corrosión; mientras que, entre más negativo, se dice que el material es más reactivo a la corrosión (Salazar-Jiménez, 2015).

En la **Figura 221** se muestra una lista de metales y aleaciones comunes de mayor a menor potencial electroquímico. El Oro es uno de los metales más resistentes a la corrosión, con un potencial eléctrico de +1.50, mientras que el Magnesio es uno de los más reactivos a la corrosión con un potencial de -2.38 (Salazar-Jiménez, 2015).

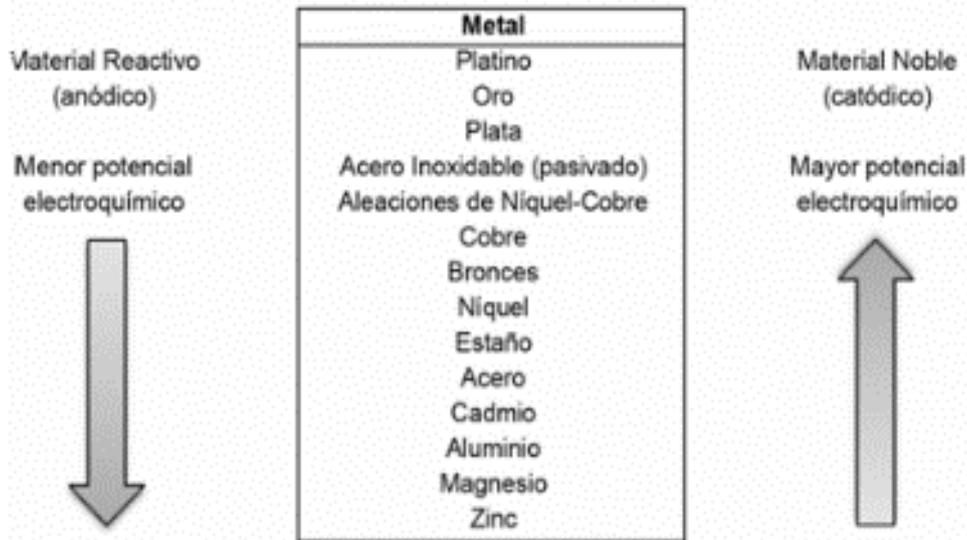


Figura 221. Serie galvánica para metales y aleaciones más comunes (Salazar-Jiménez, 2015).

A continuación, se describen los principales factores involucrados en la corrosión galvánica (Salazar-Jiménez, 2015):

- 1) *Acidez de la solución.* Debido a la capacidad de aceptar electrones, las soluciones ácidas son más corrosivas que las soluciones neutras ( $\text{pH}=7$ ), pues permiten que la zona anódica reaccione en mayor proporción.
- 2) *Sales disueltas:* Las sales ácidas, al diluirse en la solución electrolítica, disminuyen su  $\text{pH}$  y aceleran el proceso de corrosión. Algunos ejemplos de sales ácidas son el cloruro de aluminio, cloruro de hierro, y el cloruro de amonio.

Por otro lado, las sales alcalinas incrementan el  $\text{pH}$  de la solución electrolítica y funcionan como inhibidores del proceso de corrosión. Ejemplos de estas sales son el fosfato trisódico, tetraborato de sodio, silicato de sodio y el carbonato de sodio.

- 3) *Capas protectoras.* La tendencia a la corrosión de un material se reduce con capas que protejan su superficie, las cuales pueden ser aplicadas artificialmente en forma de recubrimiento o a través del fenómeno de pasividad, donde se forman capas de óxidos metálicos que impiden el proceso de corrosión.
- 4) *Concentración de oxígeno:* La concentración de oxígeno en el medio electrolítico acelera o retarda el proceso de corrosión dependiendo el material. En el caso de materiales ferrosos, el aumento de la concentración de oxígeno aumenta la velocidad de corrosión.

Para materiales pasivables, cuanto mayor sea la concentración de oxígeno, mayor capacidad tendrá el material de formar una capa protectora.

- 5) *Temperatura:* A mayor temperatura, la velocidad de corrosión aumenta, pues se acelera la dispersión de oxígeno del medio hacia el material. Un aumento en la temperatura de  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  llega a incrementar al doble la tasa de corrosión.
- 6) *Velocidad de flujo:* En sistemas de transporte de fluidos, al aumentar la velocidad del flujo del medio, aumenta la tasa de corrosión debido a que permite a las sustancias corrosivas alcanzar y atacar zonas aún no afectadas y evita la formación o acumulación de capas resistentes a la corrosión.

## Prevención y control de la corrosión galvánica

Debido a las implicaciones económicas, de seguridad y de conservación de materiales que involucran impactos negativos de los procesos de corrosión, se han desarrollado diferentes métodos para su control y la protección de los materiales expuestos a esta. Algunos de los más usados son (Salazar-Jiménez, 2015):

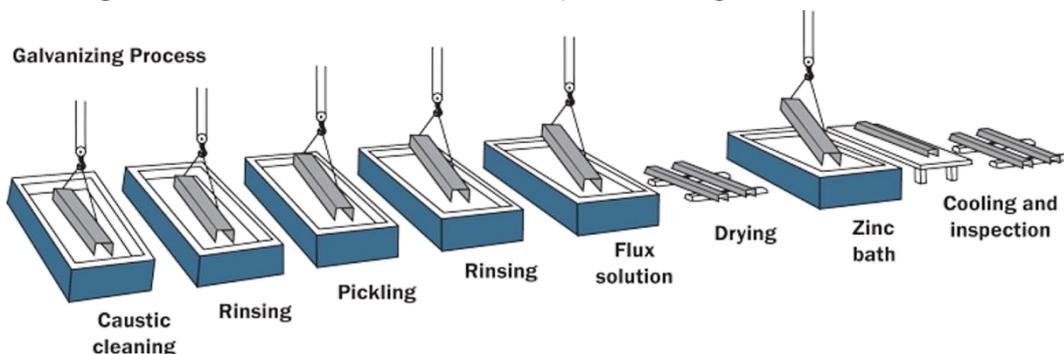
**a. Inhibidores:** Son sustancias químicas que, al añadirse al medio corrosivo, disminuyen la velocidad de corrosión. Los dos principales tipos son los inhibidores anódicos (pasivadores), los cuales aumentan el potencial electroquímico del material a proteger.

Los inhibidores catódicos, en cambio, controlan el pH del medio corrosivo, impidiendo que las reacciones de reducción ocurran.

**b. Recubrimientos orgánicos:** Son sustancias a base de polímeros resistentes a la degradación que recubren el material a proteger. Actúan ya sea mediante la formación de una barrera que impide la penetración de oxígeno y agua, o la inhibición del proceso de corrosión al incrementar su resistividad eléctrica.

**c. Recubrimientos metálicos:** Consiste en recubrir el material a proteger con un metal que sea más resistente a la corrosión. Los métodos de recubrimiento más comunes son el electroplating, donde usa una corriente eléctrica externa para depositar un material con mayor resistencia a la corrosión en una superficie; y el **galvanizado**, el cual se realiza sumergiendo el material a proteger en un baño de metal de recubrimiento con mayor resistencia a la corrosión, normalmente zinc.

En la **Figura 222** se muestran las fases del proceso de galvanizado de acero:



*Figura 222. Proceso de galvanizado de acero (American Galvanizers Association, 2022).*

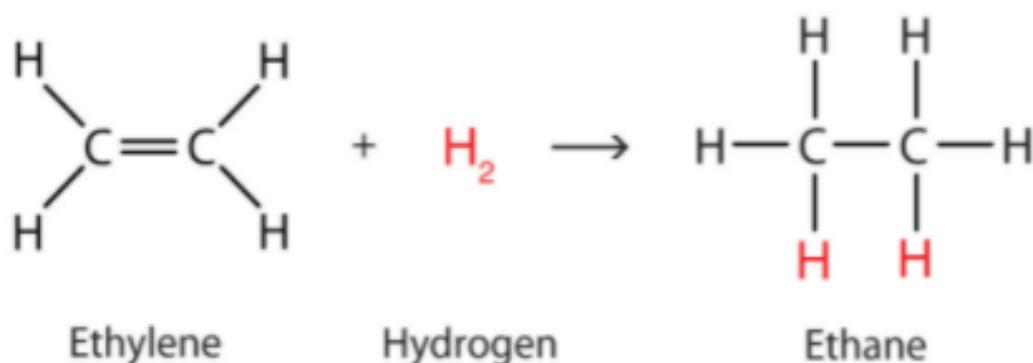
En el proceso de galvanizado por inmersión en caliente, se sumerge hierro o acero en un baño de zinc fundido para producir un revestimiento resistente a la corrosión. Mientras el material está sumergido en el zinc, se lleva a cabo una reacción de difusión en la que el recubrimiento se forma perpendicularmente a la superficie creando un espesor uniforme en toda la pieza (American Galvanizers Association, 2022).

Primero, el material a proteger se sumerge en un baño desengrasante para eliminar la suciedad y contaminantes de su superficie, posteriormente se enjuaga con agua. A continuación, se decapa el material en una solución de ácido clorhídrico o sulfúrico que elimina los óxidos y vuelve a enjuagarse en agua. Finalmente, el material se sumerge en el fundente, el cual lo limpia y crea una capa protectora que lo prepara para ser sumergido en la caldera de galvanizado, la cual tiene temperaturas entre 438 y 460 °C. La inmersión completa dura aproximadamente 10 minutos, dependiendo el grosor del acero (American Galvanizers Association, 2022).

## 2.21 Hidrogenación

La **hidrogenación** es la adición de hidrógeno a un compuesto químico, generalmente en presencia de un catalizador. Esta reacción puede ser una en la que el hidrógeno simplemente se agrega a moléculas con dobles o triples enlaces, conectando dos átomos en la estructura de una molécula, o bien, una donde la adición de hidrógeno da como resultado la disociación o ruptura de una molécula (Britannica, The Editors of Encyclopaedia, 2017).

Las reacciones de hidrogenación típicas incluyen la reacción de hidrógeno y nitrógeno para formar amoníaco y la reacción de hidrógeno y monóxido de carbono para formar metanol o hidrocarburos, dependiendo el catalizador seleccionado (Britannica, The Editors of Encyclopaedia, 2017). Otro ejemplo es la hidrogenación de etileno, donde las moléculas de  $H_2$  se disocian en átomos de hidrógeno, formando otro enlace C-H, como se observa en la **Figura 223**:



*Figura 223. Hidrogenación de etileno*

### Importancia del proceso de hidrogenación en la industria

Casi todos los compuestos orgánicos con múltiples enlaces que conectan dos átomos pueden reaccionar con hidrógeno en presencia de un catalizador. La hidrogenación de compuestos orgánicos es una reacción de gran importancia en la industria, ya que se utiliza en la **producción de grasas comestibles** a partir de aceites líquidos (Britannica, The Editors of Encyclopaedia, 2017).

En la industria del petróleo, por ejemplo, numerosos procesos involucrados en la producción de gasolina y productos petroquímicos se basan en la hidrogenación (Britannica, The Editors of Encyclopaedia, 2017).

### Catalizadores

Los catalizadores más usados en reacciones de hidrogenación generalmente son metales nobles como **níquel, platino y paladio**. Para hidrogenaciones a alta presión, el **chromito de cobre y níquel con tierra de diatomeas** son ampliamente utilizados (Britannica, The Editors of Encyclopaedia, 2017).

La hidrogenación de grasas y aceites en la industria alimenticia, por ejemplo, se realiza casi siempre de forma exclusiva usando níquel como catalizador, por su bajo costo comparado con otros metales y su buena actividad (Ajzenberg, 2002).

## Caso: Hidrogenación de aceites

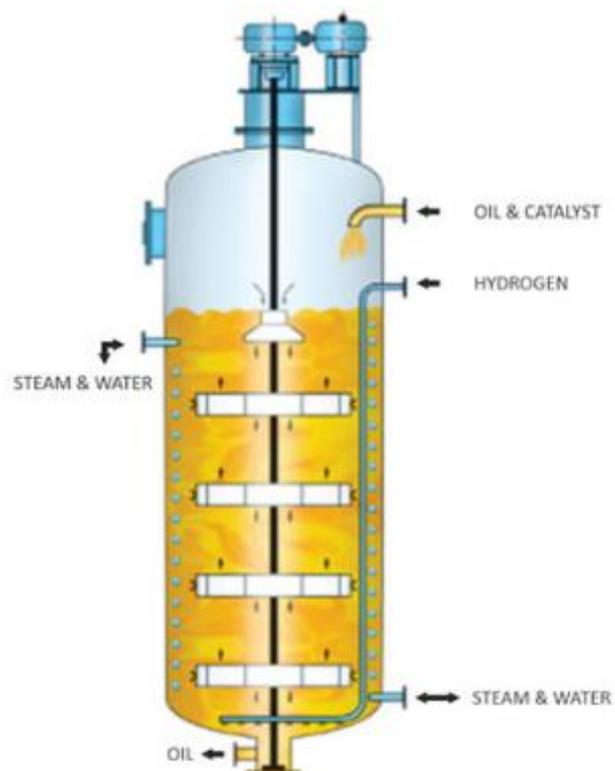
En el caso de los aceites, la hidrogenación consiste en saturar los dobles enlaces de los ácidos grasos en presencia de un metal noble que cataliza la reacción. Es un proceso en el cual el grado de insaturación de los triglicéridos naturales disminuye con el objetivo de **convertir los aceites líquidos en grasa sólida** para su aplicación en la industria de la alimentación como la producción de margarinas, grasas para repostería, manteca, aceite de mesa, cosméticos, etc. (Ajzenberg, 2002).

La reacción de hidrogenación de grasas y aceites es muy compleja debido a la gran variedad de triglicéridos que se encuentran en los aceites y el hecho de que muchos ácidos grasos contienen más de un doble enlace, lo que significa que el hidrógeno podría ser agregado en cualquier punto de la cadena (Pramparo, 2013).

Esta reacción se lleva a cabo mediante un proceso continuo o discontinuo, siendo este último el más empleado. El reactor que se emplea es del **tipo suspensión o slurry**, como el que se muestra en la **Figura 224**, el cual se caracteriza por la presencia de tres elementos (Pramparo, 2013):

1. Un reactivo gaseoso (hidrógeno)
2. Un reactivo líquido (aceite)
3. Catalizador (sólido)

El rango de temperatura para la hidrogenación de aceites vegetales es de 127 a 190 [°C] y una presión entre 0.5 y 5 [bar] (Ajzenberg, 2002).



*Figura 224. Funcionamiento de un reactor tipo slurry para hidrogenación de aceites (Mech Tech Process Engineers, 2022).*

El reactor se alimenta con aceite refinado y el catalizador (níquel, generalmente), se burbujea el hidrógeno para comenzar con la saturación de los ácidos grasos y una vez llevada a cabo la reacción, el aceite vuelve a refinarse y se desacidifica en una columna de destilación. El reactor debe tener un sistema de enfriamiento para controlar la temperatura de la reacción que es exotérmica. Industrialmente, la hidrogenación se

realiza en reactores discontinuos que deben tener las siguientes características (Ajzenberg, 2002):

- El aceite debe de llegar hasta la temperatura de reacción lo más rápido posible.
- La distribución del catalizador en el aceite debe ser lo más homogénea posible.
- El hidrógeno debe disolverse y dispersarse en la suspensión aceite-catalizador.
- Por seguridad, debe ser hermético.

En el proceso de hidrogenación de aceites, se prepara previamente una suspensión para mezclar el catalizador con el aceite, ambos entran a la alimentación y son dirigidos hacia un intercambiador de calor donde se aumenta su temperatura. Posteriormente se le adiciona hidrógeno y la suspensión pasa al reactor donde se lleva a cabo la reacción de hidrogenación. Cabe mencionar que, por ser una reacción exotérmica, se usa un refrigerante en dicho reactor para controlar la temperatura durante el proceso (Ajzenberg, 2002).

Una vez llevada a cabo la reacción, la mezcla se enfría y es filtrada para recuperar el catalizador presente, el cual puede ser utilizado en ciclos posteriores de hidrogenación (Ajzenberg, 2002).

Los principales objetivos de la hidrogenación de aceites son (Ajzenberg, 2002):

- Modificar la composición de las grasas y aceites, así como sus propiedades físicas y químicas.
- Disminuir la insaturación de los ácidos grasos.
- Mejorar la resistencia de los aceites a la oxidación atmosférica.
- Producir grasas con propiedades físicas determinadas que cumplan necesidades concretas para su uso posterior.

### **Caso: Hidrogenación de nitrógeno**

La hidrogenación de nitrógeno es un proceso que se lleva a cabo en la refinación de petróleo, y está destinado a **reducir el porcentaje de nitrógeno** en las fracciones de petróleo (Riñones, 2018).

En su estado natural, los hidrocarburos contenidos en el petróleo crudo están mezclados con otros elementos como azufre, nitrógeno, oxígeno y metales pesados que son nocivos en el proceso de refinación y en la calidad de sus productos, por lo que se eliminan para sacar el máximo provecho de los hidrocarburos (Instituto Mexicano del Petróleo, 2019). Los compuestos que contienen nitrógeno en el petróleo se clasifican de acuerdo con la **Figura 225**.

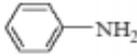
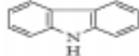
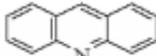
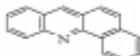
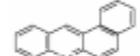
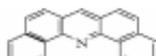
| Compuesto                                   | Fórmula         | Estructura   |
|---|-----------------|--|
| <b>Compuestos no heterocíclicos</b>         |                 |  |
| Anilina                                     | $C_6H_5NH_2$    |    |
| Pentilamina                                 | $C_5H_{11}NH_2$ |    |
| <b>Compuestos heterocíclicos no básicos</b> |                 |  |
| Pirrol                                      | $C_4H_5N$       |   |
| Indol                                       | $C_8H_7N$       |   |
| Carbasol                                    | $C_{12}H_9N$    |    |
| <b>Compuestos heterocíclicos básicos</b>    |                 |  |
| Piridina                                    | $C_5H_5N$       |   |
| Quinolina                                   | $C_9H_7N$       |   |
| Indolina                                    | $C_8H_9N$       |    |
| Acridina                                    | $C_{13}H_9N$    |   |
| Benz(a)acridina                             | $C_{17}H_{11}N$ |  |
| Benz(a) acridina                            | $C_{17}H_{11}N$ |  |
| Diben(c,h)acridina                          | $C_{21}H_{13}N$ |  |

Figura 225. Compuestos representativos de nitrógeno contenidos en el petróleo (Rodríguez, 2004).

Algunas reacciones de hidrogenación de nitrógeno se muestran en la **Figura 226** donde se obtienen hidrocarburos y amoníaco ( $NH_3$ ) como subproducto (Riñones, 2018).

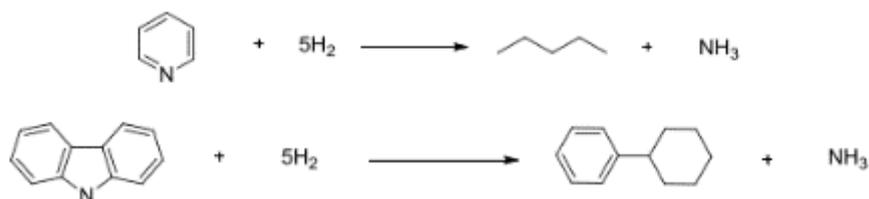


Figura 226. Reacciones de hidrogenación de nitrógeno (Riñones, 2018).

El objetivo de este proceso es reducir la cantidad de nitrógeno tanto como sea posible, y para que esta reacción se pueda llevar a cabo, es necesaria la presencia de una corriente de  $H_2$  de alta pureza y un catalizador para aumentar la velocidad de reacción (Riñones, 2018).

## 2.22 Deshidrogenación

La deshidrogenación es el proceso en el cual el hidrógeno es removido de un compuesto orgánico para transformar, por ejemplo, compuestos saturados en insaturados. Este proceso es utilizado para producir aldehídos y cetonas por deshidrogenación de alcoholes (**Figura 227**). Otros productos principales obtenidos de la deshidrogenación son **acetona**, **ciclohexanona** (usada en la fabricación de PVC), **metiletilcetona** (usada en la fabricación de adhesivos industriales y como solvente de pinturas, barnices y esmaltes) y **estireno**, el cual es usado para producir diversos tipos de polímeros (Speight, 2017).

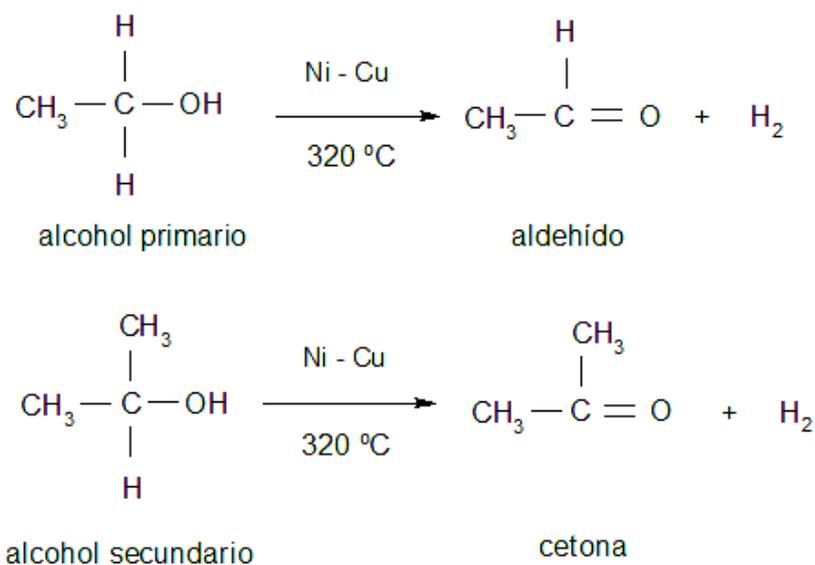


Figura 227. Deshidrogenación de alcoholes

### Caso: Deshidrogenación de ácidos grasos

Como los ácidos grasos no son moléculas muy reactivas, para ser metabolizados se activan mediante la unión de coenzima A (CoA) que produce la forma activada de acil graso CoA .

El primer paso en la degradación de derivados grasos de acil coenzima A antes de su oxidación es una deshidrogenación, que cataliza la acil-CoA deshidrogenasa, que elimina dos átomos de hidrógeno de los carbonos  $\alpha$  y  $\beta$  para dar como resultado una acil-CoA trans aB insaturada (enol-CoA), como se muestra en la **Figura 228**.

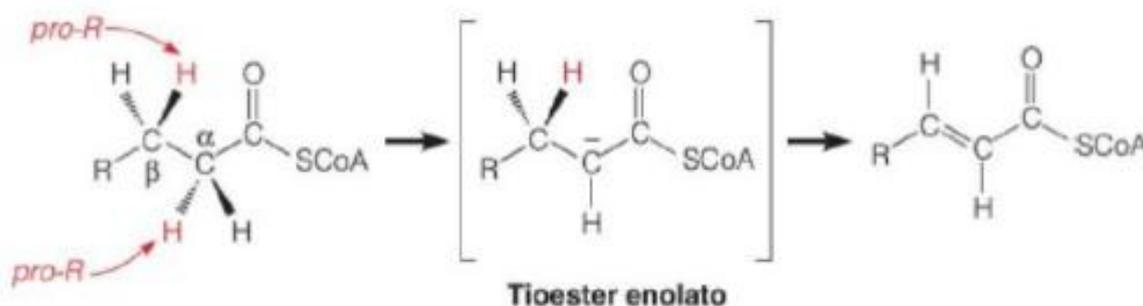


Figura 228. Deshidrogenación de ácidos grasos usando acil-CoA deshidrogenasa como catalizador

La deshidrogenación es un proceso ampliamente usado que suele aplicarse a los subproductos de diferentes procesos industriales. Por ejemplo, la industria del aceite de oliva produce grandes cantidades de residuos conocidos como subproductos de la aceituna, tales como (Uribe, et al., 2014):

- a. **Tortas de aceituna:** Consisten en la pulpa, piel, hueso y agua de aceituna.
- b. **Agua residual de la almazara:** Es una mezcla ácida de agua y compuestos orgánicos (azúcares, grasas, ácidos volátiles, polifenoles y fibras) y compuestos inorgánicos (sales de potasio y fosfatos).

La torta de aceituna tiene una gran concentración de materia orgánica con una carga contaminante elevada que no puede ser manejada fácilmente, y debido a su alto contenido de agua, debe concentrarse antes de su posterior procesamiento. Además, contiene cantidades importantes de compuestos bioactivos valiosos que pueden recuperarse para posibles aplicaciones en las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética, como los polifenoles, que tienen propiedades antioxidantes y antiinflamatorias. Del total de estos compuestos contenidos en el aceite, el 98% se queda en la torta (Uribe, et al., 2014).

## 2.23 Polimerización

El término **polímero** se refiere a un grupo unitario de átomos o moléculas con una distribución característica, y están formados por cadenas de moléculas cuyos pesos moleculares (suma de las masas atómicas de cada molécula) promedio de 10 000 a más de 1 millón de [g/mol]. Los polímeros se forman al unir muchas unidades mediante un enlace químico y así formar **macromoléculas** (Askeland, 2016).

La **polimerización** es un proceso mediante el cual pequeñas moléculas llamadas **monómeros** se unen químicamente para formar moléculas gigantes, y por lo general comienza con la producción de largas cadenas en las que los átomos están fuertemente unidos mediante un **enlace covalente**. Casi todos los polímeros son orgánicos, es decir, su base es **carbono**, pero también pueden ser inorgánicos como las siliconas basadas en redes Si-O (Askeland, 2016).

### Plásticos

Los **plásticos** son materiales compuestos principalmente de polímeros de origen natural y modificado, o hechos de forma artificial que contienen fibras, rellenos, pigmentos y otros materiales que mejoran sus propiedades. Tienen infinidad de aplicaciones tanto en la vida cotidiana como en diferentes industrias, pues están presentes en prácticamente todos los productos que usamos: prendas de vestir, juguetes, enseres domésticos, pinturas, neumáticos para automóviles, materiales biomédicos, componentes electrónicos, etc. (Askeland, 2016), como se muestra en la **Figura 229**:



*Figura 229. Ejemplos de productos hechos a base de polímeros*

## Clasificación de los polímeros

Una forma muy común de clasificar a los polímeros en ingeniería es de acuerdo con su comportamiento mecánico y térmico. Así, los polímeros pueden ser termoplásticos, termofijos y elastómeros:

### Termoplásticos

Están formados de cadenas largas que se producen al unir monómeros. Por lo general se comportan de manera **plástica y dúctil** y pueden ser amorfos o cristalinos. Además, si se calientan pueden ablandarse y fundirse y se reciclan con facilidad (Askeland, 2016).

Los productos termoplásticos incluyen artículos moldeados y extruidos, fibras, películas, hojas, materiales de empaque, pinturas y barnices y generalmente las materias primas utilizadas para estos productos vienen en forma de **polvos o pelets** (Groover, 2007).

Los principales termoplásticos son (Groover, 2007):

- a) *Acetal (polioximetileno)*: Presenta mucha rigidez, resistencia al desgaste y tenacidad. Tiene un alto punto de fusión, poca absorción de la humedad y es insoluble en solventes comunes a temperatura ambiente. Con este material se elaboran componentes automotrices como manijas de puertas, carcasas de bombas y componentes de maquinaria.
- b) *Acrílicos*: El acrílico más importante es el **polimetilmetacrilato (PMMA)**, el cual es un polímero amorfo con una gran transparencia, pero poca resistencia a rayaduras. Se usan en la fabricación de luces traseras de automóviles, ventanas de aviones, ceras para pisos, fibras para textiles, entre otros.
- c) *Celulosa ( $C_6H_{10}O_5$ )*: Es un polímero carbohidratado que ocurre de forma común en la naturaleza, pero cuando se disuelve y se precipita durante el procesamiento químico, el polímero resultante se denomina **celulosa regenerada**. Cuando se produce como fibra para ropa, se conoce como **rayón**; cuando se produce como película delgada se conoce como **celofán**, material muy usado para empacar.

De igual forma, cuando se combina con distintos componentes puede formar plásticos como **acetato de celulosa (CA)**, producido en forma de hojas (para envolturas), película (para fotografía) y distintas piezas moldeadas.

- d) *Poliamidas*: Son uniones de amidas (CO-NH), siendo el principal de esta familia el **nylon**, el cual es fuerte, elástico, inflexible, resistente a la abrasión y auto lubricante, además de conservar sus propiedades a altas temperaturas. La mayoría de sus aplicaciones son en fibras para tapetes, ropa y cuerdas de neumáticos.
- e) *Policarbonato*: Es de los termoplásticos más resistentes al calor, es transparente y muy resistente. Sus principales aplicaciones son en piezas moldeadas para maquinaria, carcasas, impulsores de bombas, cascos de seguridad y en ventanas y parabrisas.
- f) *Poliéster*: Es una familia de polímeros formada por uniones características de éster (CO-O) y pueden ser termoplásticos o termofijos. De los poliésteres termoplásticos, un ejemplo es el **tereftalato de polietileno (PET)**, cuya aplicación principal son los **contenedores para bebidas moldeados por soplado**, películas fotográficas, además de ser usado como fibra para telas, las

cuales tienen una baja absorción a la humedad y buena recuperación a la deformación.

- g) *Polietileno (PE)*: Tiene un bajo costo y es fácil de procesar. Se encuentra disponible en **polietileno de baja densidad (LPDE) y polietileno de alta densidad (HDPE)**. El LPDE tiene aplicaciones que incluyen hojas, películas y aislamiento de alambres. El HDPE es más rígido y fuerte y tiene un punto de fusión más alto. Se emplea para producir botellas, tubos y enseres domésticos.
- h) *Polipropileno (PP)*: Es un plástico especialmente importante para el **moldeo por inyección**. Es el más ligero de todos los plásticos y tiene una alta resistencia. Algunas de sus aplicaciones son en piezas para automóviles y enseres domésticos, productos de fibra para alfombras y bisagras.
- i) *Poliestireno (PS)*: Es transparente, se colorea con facilidad, y se moldea con rapidez, pero es muy frágil y a temperaturas elevadas se degrada, además de que varios solventes lo disuelven.
- j) *Cloruro de polivinilo (PVC)*: Es un polímero muy versátil puesto que es posible obtener PVC rígido y flexible. Una de sus principales aplicaciones es la **fabricación de tubos rígidos utilizados para construcción y sistemas de agua, drenaje e irrigación**, sin embargo, también es usado para el aislamiento de alambres y cables, empaques de comida y juguetes.

## Termofijos

Están constituidos por cadenas largas de moléculas fuertemente unidas por enlaces cruzados y entrelazados para formar estructuras tridimensionales. Este tipo de polímeros es muy resistente, pero más frágil que los termoplásticos. No se funden al calentarlos, sino que comienzan a descomponerse, por lo que no pueden ser reprocesados con facilidad y su reciclaje es difícil (Askeland, 2016). Los principales son (Groover, 2007):

- a) *Poliéster*: Los poliésteres se emplean en plásticos reforzados para la fabricación de tubos, tanques, cascos de lanchas, piezas de carrocerías automotrices y paneles para construcción. Una clase importante de poliésteres termofijos son las **resinas alquídicas**, empleados como bases de pinturas y barnices.
- b) *Poliuretano*: Pertenecen al grupo del **uretano**, pues tienen en común su estructura (NHCOO) y la característica de poder ser termoplásticos, termofijos o elastómeros. Su principal aplicación es en espumas, las cuales pueden ser elastoméricas y rígidas, que se emplean como material de relleno en paneles huecos para la construcción y en las paredes de refrigeradores.
- c) *Resinas epóxicas*: Se basan en un grupo químico llamado epóxidos y sus aplicaciones incluyen recubrimientos de superficies, pisos industriales, compuestos de fibra de vidrio reforzada y adhesivos.
- d) *Silicones*: Son polímeros inorgánicos y semi- inorgánicos que se distinguen por la unión repetitiva de **siloxano** (-Si-O-) en su estructura molecular, formando polisiloxanos. Son polímeros notables ya que tienen buena resistencia al calor y son repelentes al agua, aunque su resistencia mecánica no es tan alta.

## Elastómeros

Tienen una deformación elástica superior al 200%. Sus cadenas poliméricas tienen forma de moléculas en espiral y también reciben el nombre de **cauchos** (Askeland, 2016). El **caucho natural** es un derivado del látex, sustancia lechosa producida por varias plantas, principalmente por el árbol del hule, y se extrae por métodos como coagulación y secado que eliminan el agua. El caucho natural crudo (sin vulcanizar) es pegajoso en agua caliente, rígido y frágil en agua fría, por lo que para lograr que sea un elastómero útil, debe vulcanizarse. El efecto químico de la vulcanización es el aumento de la resistencia y rigidez, manteniendo la elasticidad (Groover, 2007).

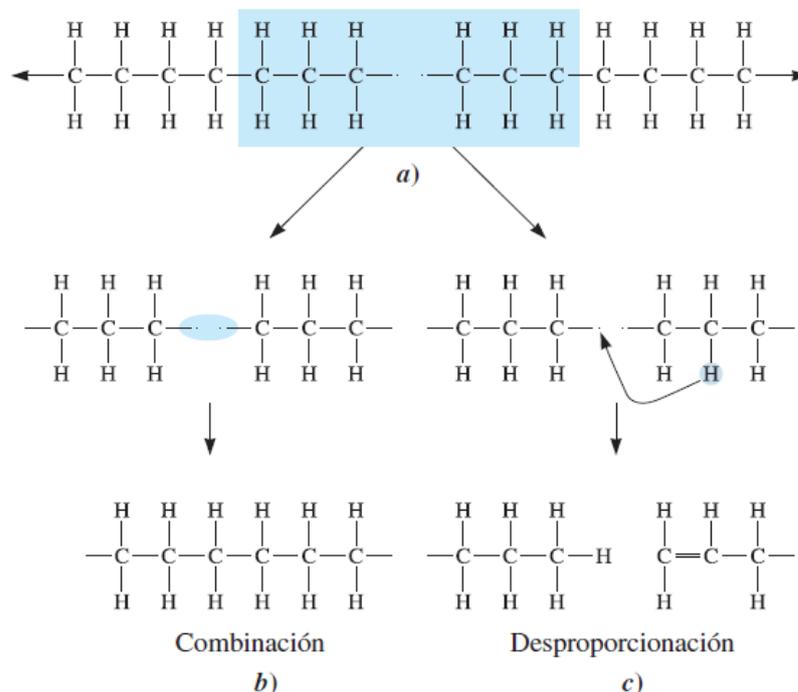
Por otro lado, el **caucho sintético** fue desarrollado ampliamente durante la Primera Guerra Mundial, pues al no tener acceso al caucho natural se inventó un sustituto a base de metil, aunque no tuvo mucho éxito. Sin embargo, se siguieron desarrollando hasta crear cauchos útiles, como el caucho de butadieno (polibutadieno), el cual está compuesto de caucho natural y estireno y se emplea para producir llantas de autos, con alta resistencia al desgarre y a la tensión, así como facilidad de procesamiento.

## Tipos de polimerización

Las dos principales maneras de crear un polímero son:

- 1) Polimerización por adición:** Como su nombre lo indica, en este tipo de polimerización se van añadiendo unidades para producir las cadenas poliméricas. Un ejemplo de este tipo de polimerización es la formación de **polietileno (PE)** a partir de moléculas de etileno, pues al añadir más unidades, la cadena va creciendo. En este caso la unidad o monómero es el **etileno** (gas) (Askeland, 2016).

En la **Figura 230** se ilustra la polimerización por adición del polietileno:



*Figura 230. Polimerización por adición del polietileno (Askeland, 2016).*

En este proceso ocurre lo que los extremos activos de las dos cadenas de polietileno se acercan entre sí, combinándose para formar una cadena larga. Después se reordena un átomo de hidrógeno y se crea un enlace covalente doble por desproporción que causa la terminación de las dos cadenas (Askeland, 2016).

**2) Polimerización por condensación:** Se forma una molécula relativamente pequeña como agua, etanol, metanol, etc. como resultado de esta reacción y puede incluir diferentes monómeros como moléculas de inicio. Un ejemplo de esta reacción es la polimerización de dimetiltereftalato y del etilenglicol, usado como refrigerante en los radiadores de automóviles (Askeland, 2016).

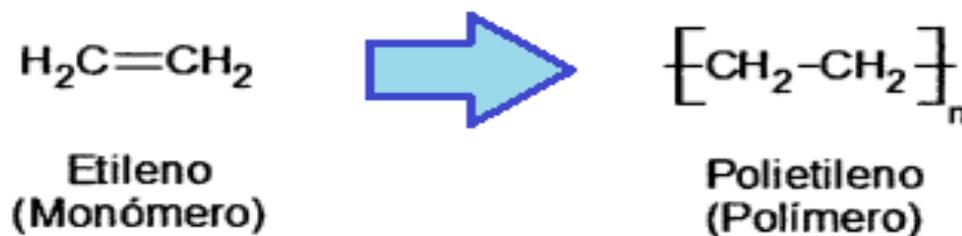
### Caso: Polietileno de alta densidad

Los polímeros a base de etileno de alta densidad provienen de hidrocarburos simples, que son átomos de carbono e hidrógeno con dobles enlaces en los carbonos. Este material tiene una gran importancia dentro de cualquier industria, pues hoy en día prácticamente cualquier sector tiene productos fabricados de este material. A pesar de sus excelentes propiedades, su obtención resultaba muy compleja, y fue por ello que en 1953 K. Ziegler desarrolló en Alemania un proceso de polimerización de etileno a una presión muy cercana a la atmosférica y utilizando catalizadores de alquil-aluminio y similares. Un año después desarrolla el método "Phillips", donde utiliza catalizadores de óxidos metálicos (Arriaga, 2007).

Ambos procesos proporcionan polímeros a bajas presiones y temperaturas, teniendo como resultado cambios en su estructura, lo cual se ve reflejado en el aumento de su densidad, dureza y mayores temperaturas de ablandamiento (Arriaga, 2007).

### Composición y obtención del etileno

El etileno es un gas compuesto por dos átomos de carbono unidos por un doble enlace, en los cuales, en cada uno se presentan dos átomos de hidrógeno (Arriaga, 2007) En la **Figura 231** se muestra la estructura y composición del etileno y el polietileno.



*Figura 231. Estructura del etileno y el polietileno. Adaptado de (Arriaga, 2007).*

El etileno es incoloro y tiene un olor y sabor dulce, es ligeramente soluble en agua y alcohol y se obtiene a partir del petróleo crudo o del gas que lo acompaña en los yacimientos mediante destilación (Arriaga, 2007).

### Producción de polietileno de alta densidad

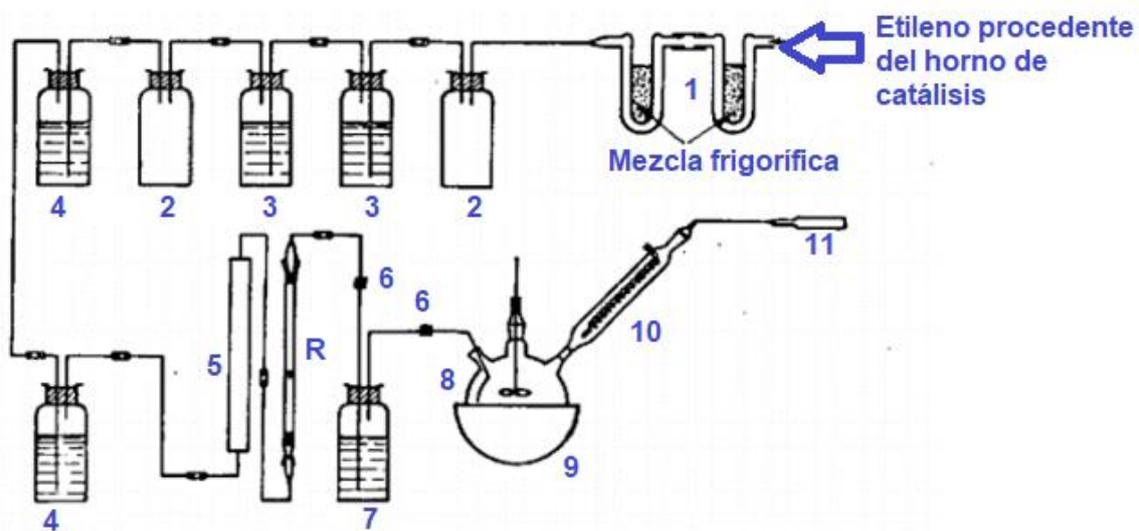
Para la producción del polietileno de alta densidad se usan sistemas de polimerización de baja presión, donde se sustituyen a las presiones altas por catalizadores Ziegler-Natta, que son compuestos organometálicos de aluminio y titanio. El proceso se lleva a presiones entre 1 y 100 [ $\text{kg}/\text{cm}^2$ ] y temperaturas de 25 a 170 [ $^{\circ}\text{C}$ ] (Arriaga, 2007).

La polimerización del etileno de alta densidad puede ser de dos tipos: uno de ellos es la **polimerización en suspensión**, la cual se lleva a cabo mediante la mezcla de etileno e hidrocarburos disolventes en un catalizador para después separar el polímero del hidrocarburo disolvente. Esto sucede a temperaturas entre 80 y 170 [ $^{\circ}\text{C}$ ] y presiones de 5 a 15 [ $\text{kg}/\text{cm}^2$ ] (Arriaga, 2007).

El segundo tipo de polimerización de etileno es en **fase gaseosa**, donde hay una alimentación directa del etileno de alta pureza (99.8%) y el catalizador en polvo (cromo modificado con sílice). Esta alimentación es continua y el polietileno es desalojado intermitentemente del reactor a través de una cámara con sello para gases. Esto sucede a temperaturas de 25 a 100 [°C] y presiones de 1 y 100 [kg/cm<sup>2</sup>] (Arriaga, 2007).

En la **Figura 232** se muestran las fases de la polimerización de etileno a presión atmosférica (en fase gaseosa). El etileno, seguido de un catalizador, se hace pasar por traps (1) frascos de seguridad y lavadores (2- 4) y torres de desecación (5), mientras se va midiendo el gasto másico con un rotámetro (R) y se controla su flujo con válvulas de seguridad (6) (García M. I., 2022).

La reacción de polimerización se lleva a cabo en un matraz provisto con un agitador (8) mientras se aumenta su temperatura con un calentador (9). Una de las bocas del matraz lleva hacia un refrigerante dentro de un tubo de vidrio (10) que conecta a otro tubo con cloruro cálcico (11) (García M. I., 2022).



*Figura 232. Etapas de la polimerización de gas etileno. Adaptado de (García M. I., 2022).*

Previo al proceso, el monómero es preparado y purificado mediante deshidratación catalítica llevada a cabo en un horno en donde también se usan catalizadores y refrigerantes para los gases (García M. I., 2022).

Algunas aplicaciones del polietileno de alta densidad son las siguientes (Arriaga, 2007):

- Bolsas para mercancía y basura
- Botellas
- Cajas
- Envases para detergentes y limpiadores
- Frascos para productos cosméticos
- Recubrimientos de sobres para correo
- Aislante de cables y alambres
- Contenedores de aceite y gasolina
- Tanques para agua
- Tubos y mangueras

## 2.24 Hidrólisis

La hidrólisis es una reacción química en donde se añade agua para romper los enlaces de una sustancia. Los principales tipos de hidrólisis son los siguientes (Phillips, 2019):

- a) **Hidrólisis de sales:** Es el tipo más común de hidrólisis y ocurre cuando la sal de un ácido o base débil se disuelve en un líquido. Cuando esto ocurre, el agua se ioniza espontáneamente en aniones de hidróxido y cationes de hidronio, como se muestra en la **Figura 233**.

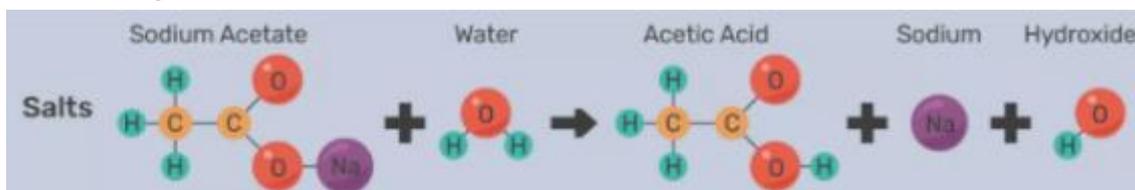


Figura 233. Hidrólisis de sales. Adaptado de (Phillips, 2019).

- b) **Hidrólisis de ácidos:** En esta reacción la molécula de agua cede un protón y puede actuar como ácido o base (**Figura 234**). El ejemplo más común de este tipo de hidrólisis es la **saponificación** (formación de jabón).

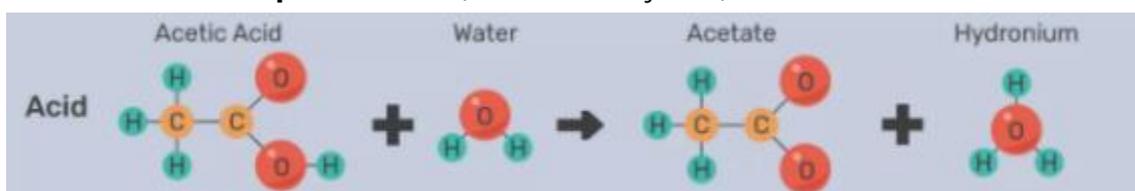


Figura 234. Hidrólisis de ácidos. Adaptado de (Phillips, 2019).

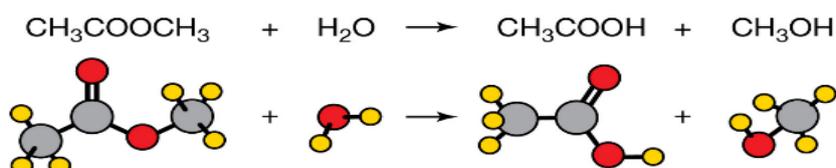
- c) **Hidrólisis de bases:** Es una reacción similar a la hidrólisis para la disociación de bases, donde a menudo es amoníaco el que se disocia en agua (**Figura 235**).



Figura 235. Hidrólisis de bases. Adaptado de (Phillips, 2019).

En las reacciones de hidrólisis donde se involucran enlaces de ésteres, como el que encontramos entre dos aminoácidos en una proteína, la molécula se divide. El producto resultante es la división de la molécula de agua en un hidróxido OH y un ión de hidrógeno H<sup>+</sup> que forman un grupo hidroxilo y otro que se convierte en ácido carboxílico con la adición del protón de hidrógeno restante, como se observa en la **Figura 236** (Phillips, 2019).

### Hidrólisis de éster



© 2012 Encyclopædia Britannica, Inc.

Figura 236. Hidrólisis de un éster (Britannica, The Editors of Encyclopaedia, 2021).

La hidrólisis involucra varias etapas, de las cuales la más lenta es la formación de un enlace covalente entre el átomo de oxígeno de la molécula de agua y el átomo de carbono del éster. Las etapas siguientes son más rápidas, y el enlace carbono-oxígeno del éster se rompe y los iones de hidrógeno se desprenden de la molécula de agua original y se unen a la nueva molécula de alcohol. Un rasgo característico de la hidrólisis de ésteres y de la mayoría de compuestos orgánicos es que una tercera sustancia, generalmente un ácido o una base, aumenta la velocidad de la reacción (Britannica, The Editors of Encyclopaedia , 2021).

En el proceso bioquímico de la digestión, las enzimas secretadas por el tracto digestivo actúan como catalizadores de la hidrólisis de moléculas complejas para convertirlas en otras que el cuerpo pueda asimilar. Las proteínas, por ejemplo, se descomponen en aminoácidos, las grasas en ácidos grasos y glicerol, y los almidones y azúcares complejos en glucosa y azúcares simples (Britannica, The Editors of Encyclopaedia , 2021).

### Caso: Saponificación

La saponificación o **hidrólisis de éster en medio básico** es un proceso químico en el cual un elemento graso reacciona con una base o álcali fuertes para generar **sales de sodio o potasio** derivadas de los ácidos grasos y **glicerina** (García G. , 2019). En la **Figura 237** se muestra la reacción de saponificación:

Scheme 1. Saponification reaction.

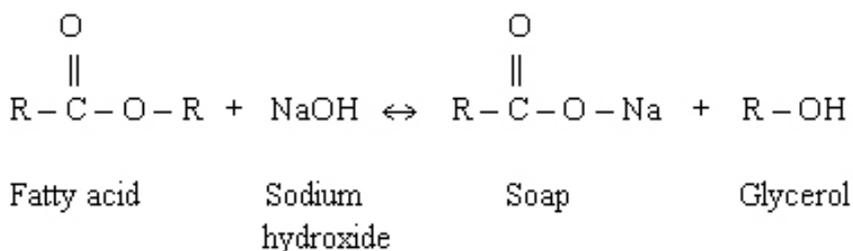


Figura 237. Reacción de saponificación (Estrela, et al., 2002).

### Configuración de Planta

Previo a la saponificación, las grasas y aceites vegetales usados reciben un tratamiento previo, que es la decoloración o blanqueo y desodorización de la materia grasa. La configuración de planta para el proceso de saponificación se muestra en la **Figura 238** (Flores, 2017).

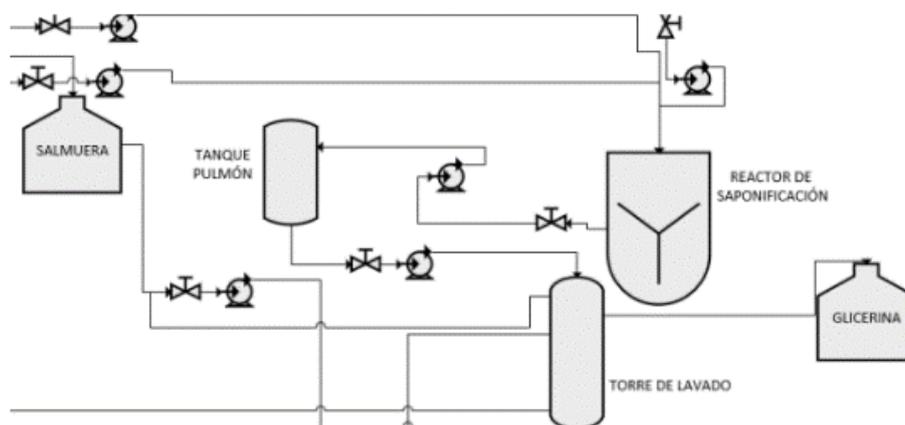


Figura 238. Diagrama del proceso de saponificación (Flores, 2017)

Después de este tratamiento, la materia prima pasa al **reactor de saponificación (Figura 239)**, llevándose a cabo la reacción a presión atmosférica y una temperatura de entre 80 y 90 [°C] (Flores, 2017).



*Figura 239. Reactor de saponificación*

Una vez finalizada la reacción, se obtiene una pasta jabonosa con glicerina que se hace pasar por una columna de lavado con el objetivo de separar el jabón y la glicerina, además de eliminar impurezas mediante la adición en contracorriente de cierta cantidad de salmuera (Flores, 2017).

A continuación, se deja reposar y se separa la mezcla por decantación. El jabón se aglomera en forma de grumos y asciende a la superficie, mientras que la glicerina y la salmuera se mantienen en la parte inferior del tanque. En esta misma torre de lavado, como la mostrada en la **Figura 240**, se recupera la glicerina obtenida y se separa la salmuera<sup>11</sup> (Flores, 2017).



*Figura 240. Torre de lavado para el proceso de saponificación (Flores, 2017).*

<sup>11</sup> Solución con alta concentración de sales

La salmuera obtenida se reincorpora al proceso de producción, mientras que la glicerina resultante del proceso se comercializa como subproducto después de su purificación (Flores, 2017). En la **Figura 241** se muestran los productos resultantes de la saponificación: jabón y glicerina.



**a) Jabón**



**b) Glicerina**

*Figura 241. Productos de la saponificación: jabón y glicerina*

### 3. Diferentes tipos de procesos, diagramas y equipos más comunes en la industria de procesos

#### 3.1 Clasificación de los diferentes tipos de diagramas

Los diagramas de procesos industriales son una representación gráfica de las etapas o secuencia de actividades de los procesos de transformación de la materia prima. Estas herramientas nos permiten comprender, revisar e identificar cada una de las etapas del proceso y son un apoyo para su cálculo y diseño (Subsecretaría de Alimentos y Bebidas, Alimentos Argentinos, 2021).

A partir de estos diagramas, se pueden realizar análisis más profundos como balances de materia y energía, comparaciones entre alternativas tecnológicas y de estructura de costos, así como el análisis de seguridad y puntos críticos, lo que permite identificar los problemas y áreas de mejora del proceso (Subsecretaría de Alimentos y Bebidas, Alimentos Argentinos, 2021).

Existen diferentes tipos de diagramas con los que se puede representar un proceso industrial (Sutton, 2010):

##### a) Diagrama de bloques:

Los diagramas de bloques brindan una vista general de los procesos, en donde cada paso o etapa se representa en bloques unidos por flechas que indican el flujo del proceso. En general, se utilizan para capacitar a personas que no están familiarizadas con el proceso y para realizar estudios de seguridad, ya que proporcionan información de los parámetros generales de cada etapa como tasas de flujo y temperatura. En la **Figura 242** se muestra un diagrama de bloques, en donde ambas entradas son purificadas al entrar a la unidad, se mezclan y pasan a la sección de reacción. El producto resultante de esa etapa pasa a una operación de separación y posteriormente a una purificación, de donde se obtiene el producto objetivo y subproductos (Sutton, 2010).

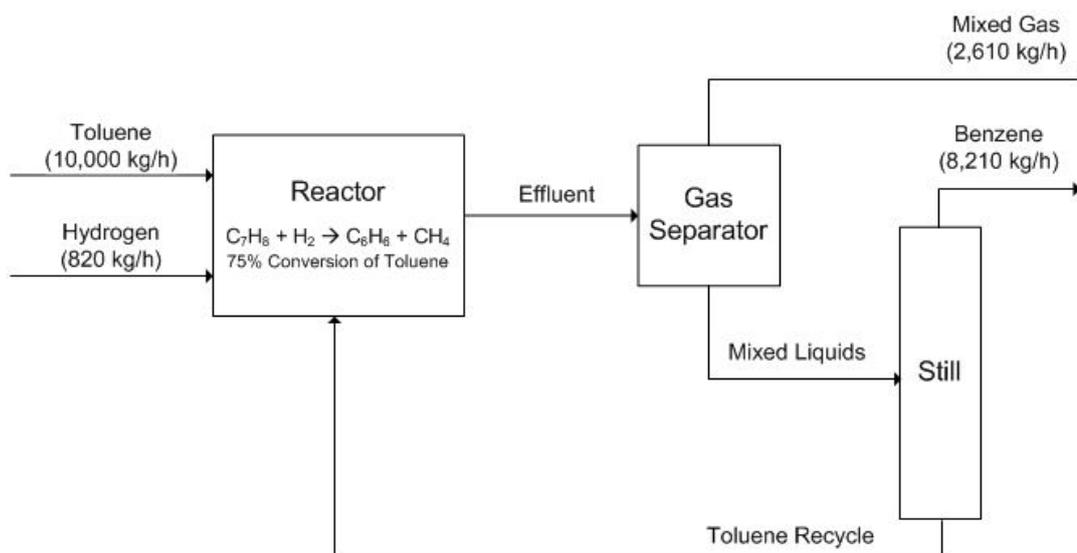


Figura 242. Diagrama de bloques (Romanov, 2022).

**b) Diagrama de flujo de proceso:**

Este tipo de diagrama contiene información significativa a lo largo del flujo del proceso como balances de materia y energía, tasas de flujo, composiciones químicas, temperaturas, presiones, viscosidades, entre otros, lo que proporciona un balance de materia completo de la unidad, como se muestra en la **Figura 243** (Sutton, 2010).

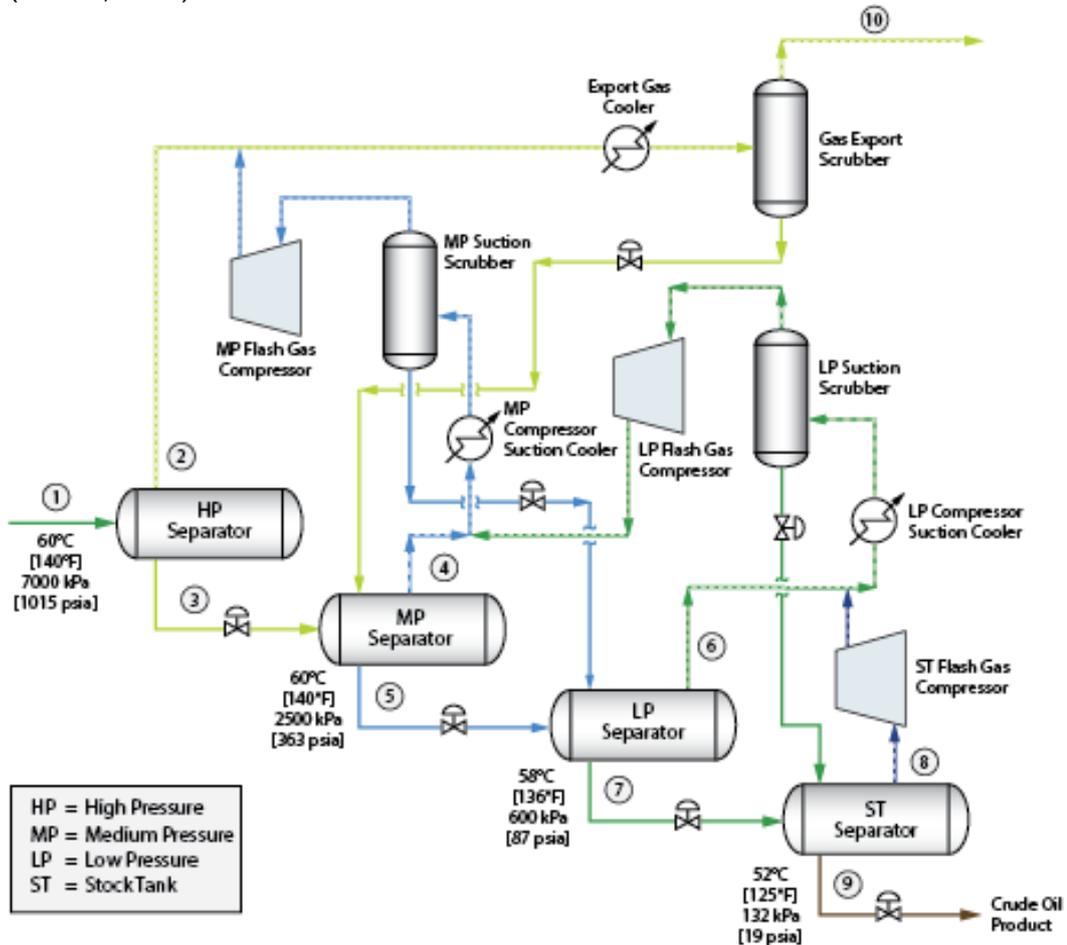


Figura 243. Diagrama de flujo de proceso (Zimmerman, 2022).

**c) Diagrama de tuberías e instrumentación**

Proporcionan la información necesaria para comenzar a planificar la construcción de la planta, así como para análisis de seguridad, pues muestran todas las líneas del proceso en una unidad (**Figura 244**), tienen información como (Sutton, 2010):

- Nombre, número y dimensiones de los equipos
- Especificaciones y tamaño de tuberías
- Válvulas
- Instrumentos de medición
- Sistemas de paro de emergencia
- Materiales de construcción
- Tasas de flujo, temperaturas y presiones
- Distancias entre equipos
- Sistemas de ventilación y drenaje

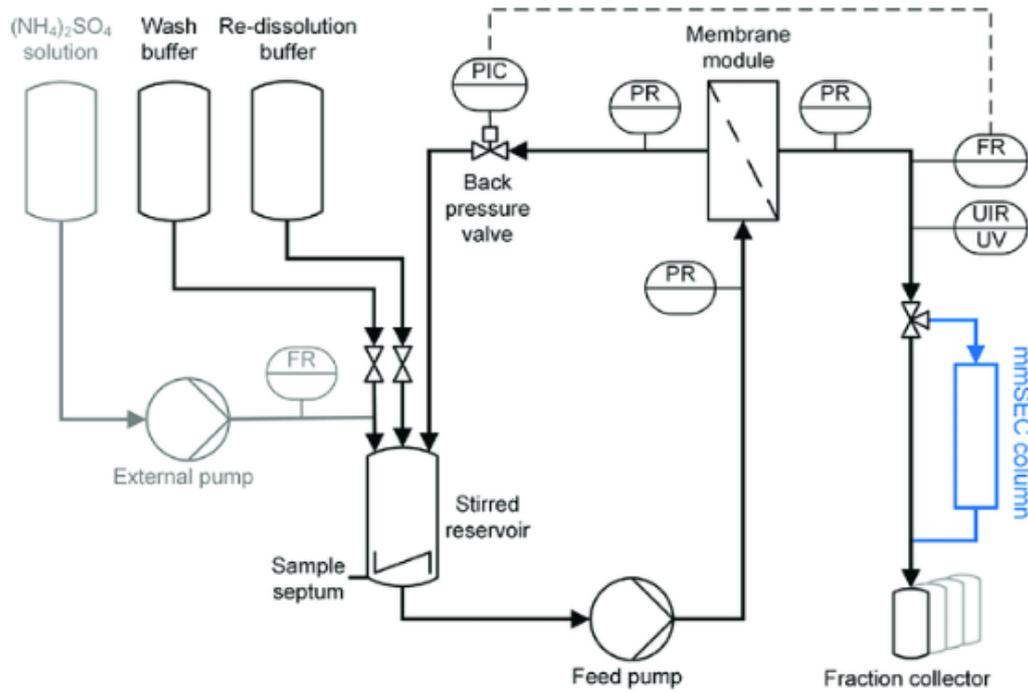


Figura 244. Diagrama de tuberías e instrumentación (Hillebrandt, Vormittag, Bluthardt, & Dietrich, 2020).

**d) Diagrama isométrico:**

En este tipo de diagrama se representan las tuberías y equipos de un proceso utilizando una proyección isométrica, la cual es una proyección axonométrica ortogonal de un objeto tridimensional inclinado con respecto al plano del cuadro de manera que sus ejes de coordenadas forman ángulos iguales con el plano del cuadro y las figuras están representadas oblicua o perpendicularmente al plano (Ching, 2016). En la **Figura 245** se muestra un ejemplo de este tipo de diagrama:

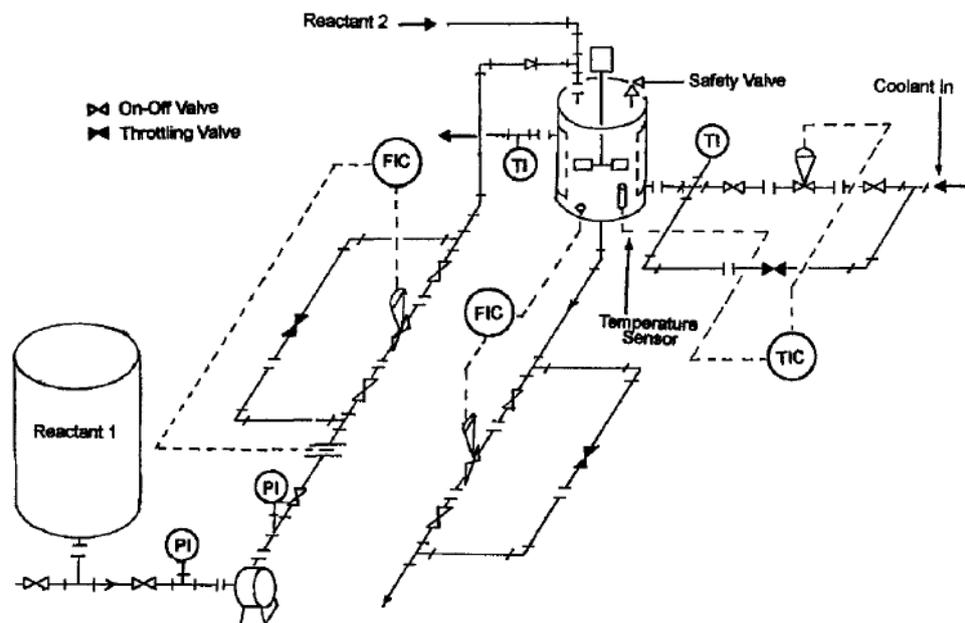


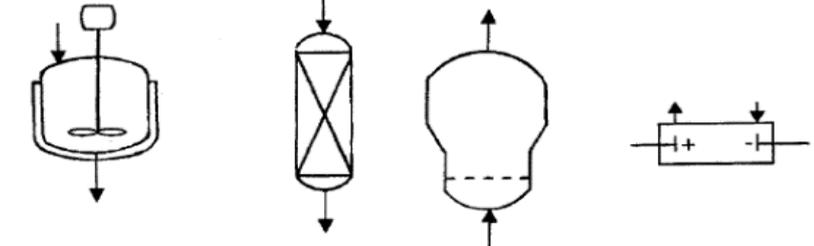
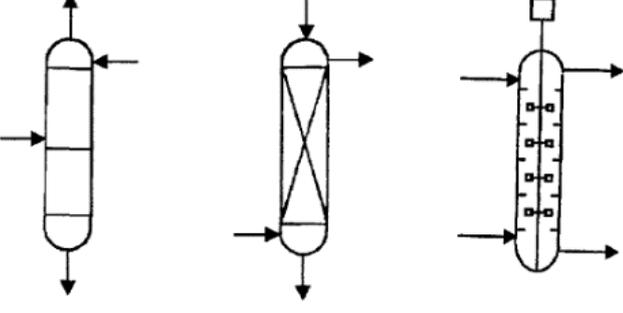
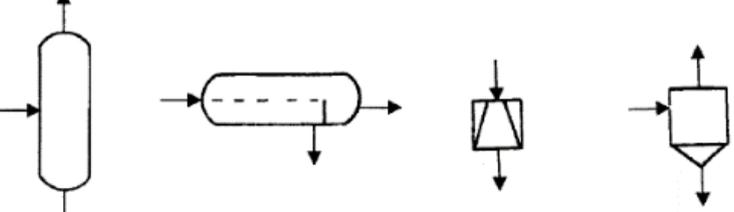
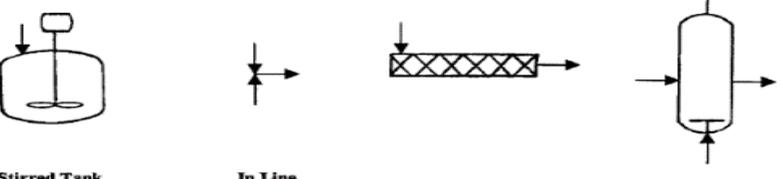
Figura 245. Diagrama isométrico (Silla, 2003).

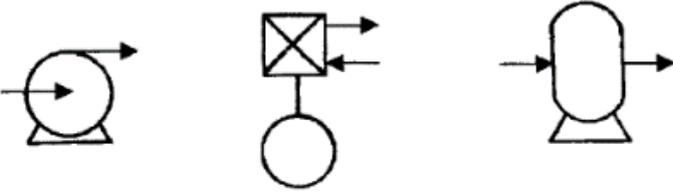
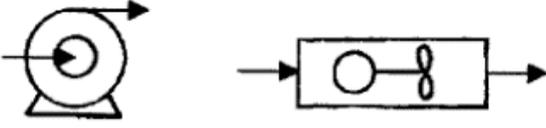
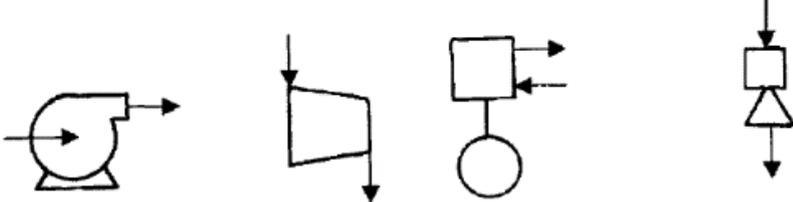
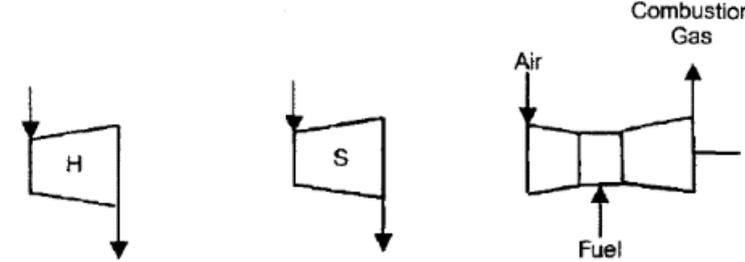
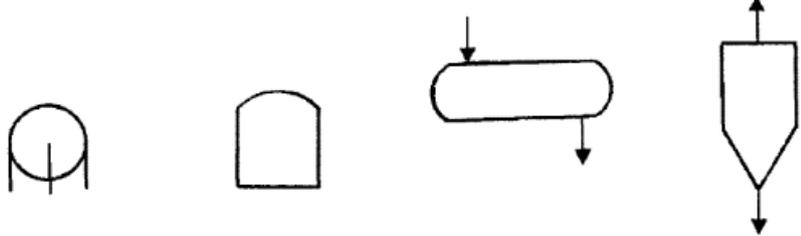


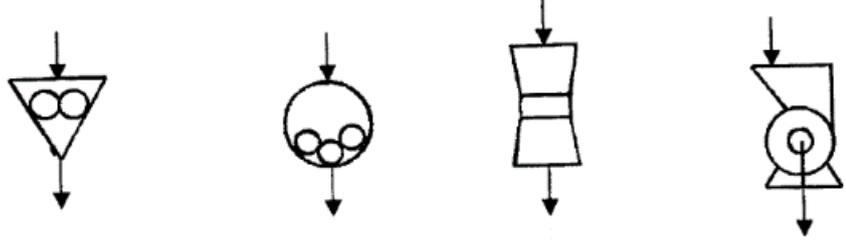
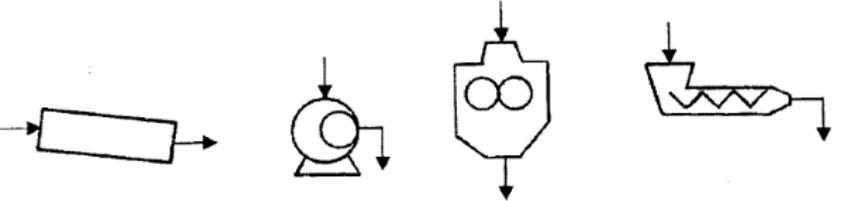
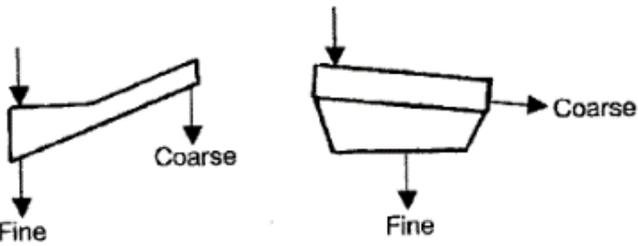
### 3.2 Simbología para diagramas de proceso

En la siguiente tabla, se muestran los principales símbolos utilizados para diagramas de proceso:

Tabla 11. Símbolos utilizados en diagramas de proceso (Silla, 2003).

| Clasificación                     | Símbolos   |
|-----------------------------------|--|
| Reactores                         |  <p style="text-align: center;"> <span data-bbox="550 734 662 757">Stirred Tank</span> <span data-bbox="790 734 901 757">Packed Bed</span> <span data-bbox="965 734 1077 757">Fluid Bed</span> <span data-bbox="1173 734 1300 757">Electrochemical</span> </p>   |
| Separadores de componentes        |  <p style="text-align: center;"> <span data-bbox="518 1153 646 1198">Fractionator<br/>(Tray Column)</span> <span data-bbox="742 1153 869 1198">Absorber<br/>(Packed Column)</span> <span data-bbox="949 1153 1157 1198">Liquid-Liquid Extractor<br/>(York-Schiebel Column)</span> </p>  |
| Separadores de fases              |  <p style="text-align: center;"> <span data-bbox="550 1489 646 1512">Gas-Liquid</span> <span data-bbox="726 1489 869 1534">Liquid-Liquid<br/>(Settler or Decanter)</span> <span data-bbox="981 1489 1077 1534">Liquid-Solid<br/>(Centrifuge)</span> <span data-bbox="1204 1489 1300 1534">Gas-Solid<br/>(Cyclone)</span> </p>                                |
| Mezcladores de fase o componentes |  <p style="text-align: center;"> <span data-bbox="550 1758 662 1803">Stirred Tank<br/>(Liquid-Liquid)</span> <span data-bbox="758 1758 869 1803">In Line<br/>(Liquid-Liquid)<br/>(Gas-Liquid)</span> <span data-bbox="965 1758 1093 1803">Solid-Solid<br/>(Ribbon Blender)</span> <span data-bbox="1204 1758 1300 1803">Gas-Liquid<br/>(Sparger)</span> </p> |

|  |  |
|--|--|
| <p>Transferencia de materia y energía (bombas)</p>       |  <p><b>Centrifugal</b>      <b>Reciprocating</b>      <b>Rotary</b></p>  |
| <p>Transferencia de materia y energía (ventiladores)</p> |  <p><b>Centrifugal</b>      <b>Axial</b></p>   |
| <p>Transferencia de materia y energía (compresores)</p>  |  <p><b>Centrifugal</b>      <b>Axial</b>      <b>Reciprocating</b>      <b>Ejector</b></p>   |
| <p>Turbinas</p>  |  <p><b>Hydraulic Turbine</b>      <b>Steam Turbine</b>      <b>Gas Turbine</b></p>   |
| <p>Intercambiadores de calor</p>                         |  <p><b>Interchanger</b>      <b>Cooler</b>      <b>Heater</b>      <b>Heater or Cooler</b>      <b>Furnace</b></p>                       |
| <p>Almacenamiento</p>                                    |  <p><b>Sphere</b><br/>(Liquid or Gas)      <b>Tank</b><br/>(Liquid)      <b>Accumulator</b><br/>(Liquid)      <b>Bin</b><br/>(Solid)</p> |

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| <p>Reductores de tamaño</p> |  <p><b>Roll Crusher</b>      <b>Ball Mill</b>      <b>Gyratory Crusher</b>      <b>Hammer Mill</b></p> |
| <p>Aglomeradores</p>        |  <p><b>Drum</b>      <b>Pellet Mill</b>      <b>Roll Press</b>      <b>Extruder</b></p>                |
| <p>Tamices</p>              |  <p><b>Rake Classifier</b>      <b>Screen</b></p>   |

Para ver otros símbolos de proceso utilizados, consultar el **Anexo B**.

## Conclusiones

La integración de las unidades temáticas propuestas en este material didáctico tendrá un impacto directo en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la asignatura de Procesos Industriales, pues permitirá al estudiante conocer los retos que enfrentan las industrias en el país hoy en día. Así mismo, será un apoyo para que el docente desarrolle propuestas didácticas que apoyen sus actividades y promuevan la creación de recursos.

El capítulo correspondiente a *Procesos y operaciones unitarias de la industria de procesos* planteado supone una adición a las unidades que conforman el programa de la asignatura de Procesos Industriales, con la cual el estudiante podrá analizar los principales procesos llevados a cabo en la industria y ser capaz de proponer soluciones a los principales problemas nacionales e internacionales, con un enfoque hacia el cuidado de medio ambiente.

## Anexos

### Anexo A. Panorama nacional e internacional de la asignatura de procesos industriales en la licenciatura de Ingeniería industrial

Dentro de las universidades públicas en el país que imparten la carrera de Ingeniería Industrial y la asignatura de Procesos Industriales se encuentran el **Instituto Politécnico Nacional (IPN)**, donde esta asignatura lleva por nombre *Plantas y procesos industriales* y corresponde al quinto semestre de la carrera (Instituto Politécnico Nacional, 2022).

En la **Universidad Autónoma Metropolitana (UAM)**, esta asignatura se llama *Procesos físicos industriales* y su objetivo es que el alumno aprenda a interpretar y elaborar diagramas de flujo de proceso e identificar los procesos básicos físicos en procesos industriales. Las unidades temáticas son (Universidad Autónoma Metropolitana, 2022):

- Introducción a los procesos industriales
- Procesos básicos físicos, variables de operación, equipos y aplicaciones
- Balance de materiales en los procesos básicos con integración en los procesos industriales
- Bombas, tuberías y accesorios e Intercambiadores de calor, balance de energía y coeficiente de transferencia de calor

La bibliografía recomendada es la siguiente (Universidad Autónoma Metropolitana, 2022):

- Geankoplis, C.J., "Procesos de transporte y operaciones unitarias", CECSA, 4ta edición, México, 2009.
- Felder, R., Rousseau, R., "Principios elementales de los procesos químicos", Limusa Wiley, 3ra. Edición, México, 2006.
- Tegeder, F., Mayer, L., "Métodos de la industria química" Parte I Inorgánica, Parte II Orgánica, Reverté. México, 1991.
- Ulrich, G.D., "Diseño y economía de los procesos en Ingeniería Química", McGrawHill, México, 1992.
- Mott, R.L., "Mecánica de fluidos aplicada", Prentice Hall-Hispanoamericana, 4ta. Edición, México, 1996.
- Cengel, Y.A., "Transferencia de calor y masa", Mc GrawHill, 3ra. Edición, México 2017.

La **Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP)**, dentro de su oferta académica, también tiene la carrera de Ingeniería en Procesos y Gestión Industrial donde se imparte la asignatura *Introducción a procesos* en el primer semestre de su plan de estudios (Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 2022).

En el ámbito internacional, la **Universidad Nacional de la Plata** en Argentina cuenta con la asignatura *Industrias* en el séptimo semestre de la carrera de Ingeniería Industrial, cuyo programa abarca las principales operaciones y procesos unitarios, tales como (Universidad Nacional de la Plata, 2018):

- Reducción de tamaño
- Transporte de sólidos, líquidos y gases
- Aumento de tamaño
- Transmisión de calor
- Evaporación
- Absorción
- Mezcla y agitación

- Adsorción
- Cristalización
- Destilación
- Extracción líquido-líquido y sólido-líquido
- Oxidación
- Halogenación
- Nitración
- Hidrogenación
- Sulfonación
- Fermentación

En Colombia, la **Universidad Distrital Francisco José Caldas**, dentro del plan de estudios de Ingeniería Industrial, imparte la asignatura *Procesos químicos y bioquímicos* en el cuarto semestre, la cual contiene los siguientes temas (Universidad Distrital Francisco José Caldas, 2021):

- Introducción
- Conceptos básicos de operación unitaria
- Diagramas de flujo
- Balances de materia en operación de mezclado, filtración y decantación
- Balances de materia en operaciones de evaporación y destilación
- Balances de materia en sistemas con recirculación y reflujo
- Balance de materia en sistemas con reacción química y bioquímica
- Operaciones con sólidos-reducción de tamaño
- Operaciones de transferencia de calor
- Mecanismos de transferencia de calor (convección, conducción y radiación)
- Operaciones de secado
- Curvas de destilación
- Balance de energía con reacción química (energía de reacción, formación, combustión)
- Exposiciones de procesos químicos y bioquímicos

La bibliografía recomendada es (Universidad Distrital Francisco José Caldas, 2021):

- Gooding, N., "Balance de energía"
- Gooding, N., "Balance de materia"
- Himmeblau, D., "Balance de materia y energía"
- Himmeblau, D., "Introducción a los cálculos en ingeniería"
- Felder, R., "Principios básicos de los procesos químicos"
- McCabe, W., "Operaciones unitarias en ingeniería química"

En Alemania, la **Universidad de Ciencias Aplicadas Rhein-Waal** también tiene dentro de su oferta académica la carrera de Ingeniería Industrial. Una de las asignaturas optativas en cuarto semestre es *Fundamentos de ingeniería de proceso*, cuyo contenido temático es el siguiente (Hochschule Rhein-Waal, 2015):

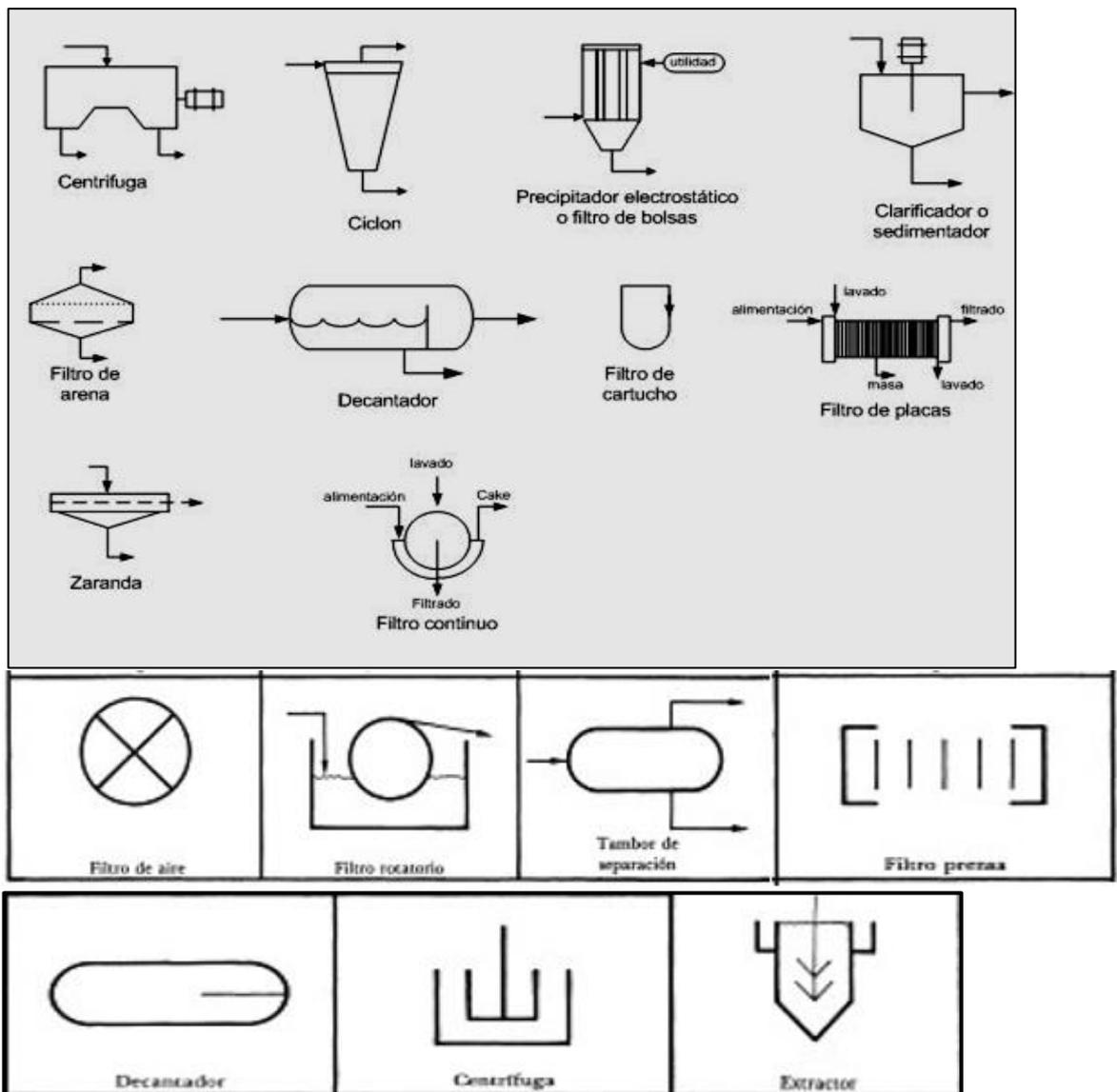
- Diagramas de proceso (diagrama de bloques, diagrama de flujo de proceso, diagrama de instrumentación y control)
- Análisis dimensional y Similitud
- Ingeniería de procesos mecánicos: Operaciones que involucran partículas sólidas (reducción de tamaño, separaciones mecánicas, análisis granulométrico)
- Mecánica de fluidos
- Ingeniería de procesos térmicos (transferencia de calor por conducción y convección, evaporación de múltiple efecto)

Bibliografía recomendada por la universidad:

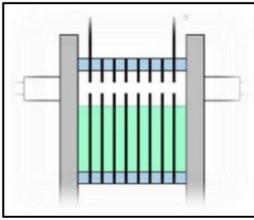
- Warren L. McCabe, Julian Smith, Peter Harriot: Unit Operations of Chemical Engineering, 7th edition.
- Ullmann's Chemical Engineering and Plant Design Wiley-VCH, 2004, ISBN 978-3-52-731111-8, 2 vols.
- Robin M. Smith: Chemical Process: Design and Integration.
- K.S.N. Raju: Fluid Mechanics, Heat Transfer, and Mass Transfer Chemical Engineering Practice John Wiley & Sons, 2011
- Merle C. Potter, David C. Wiggert, Bassem H. Ramadan: Mechanics of fluids Fourth edition.

## Anexo B. Otros símbolos de proceso

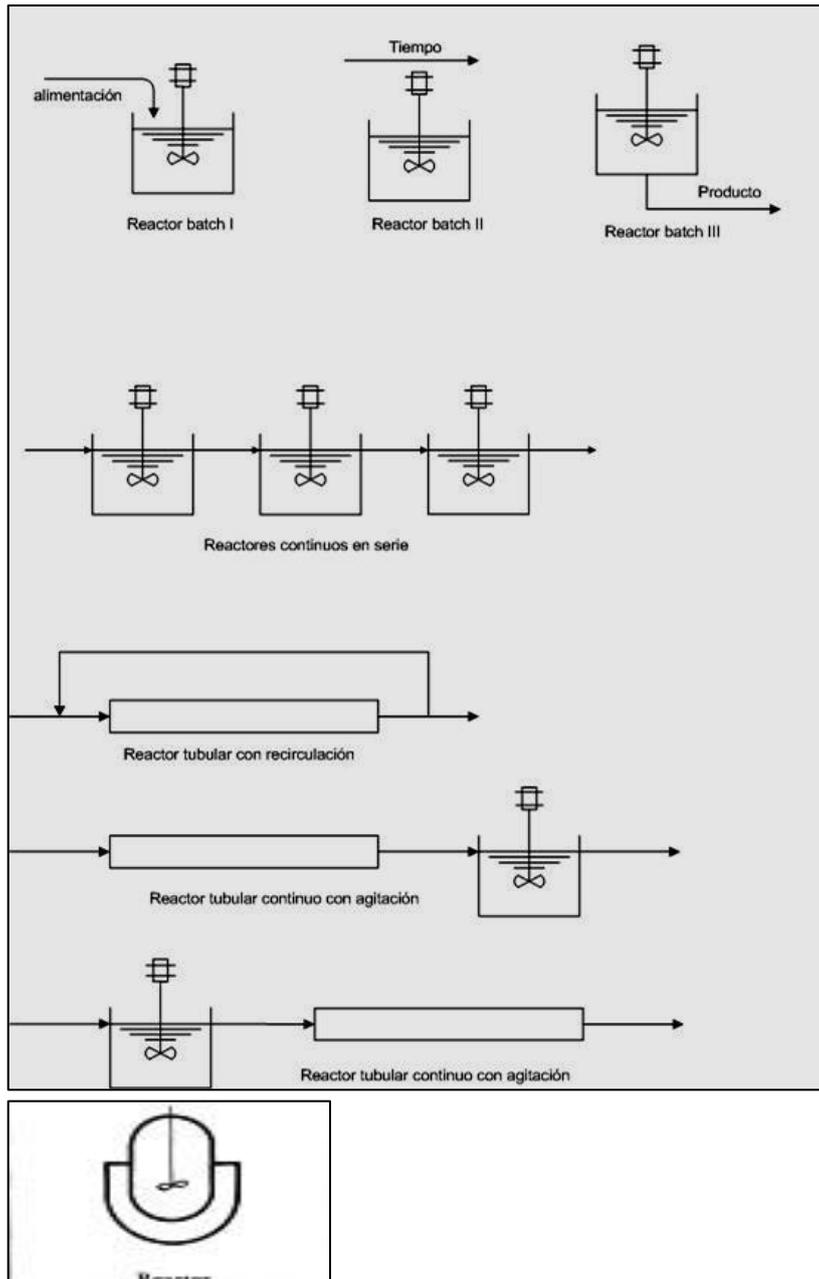
### 1. Separadores



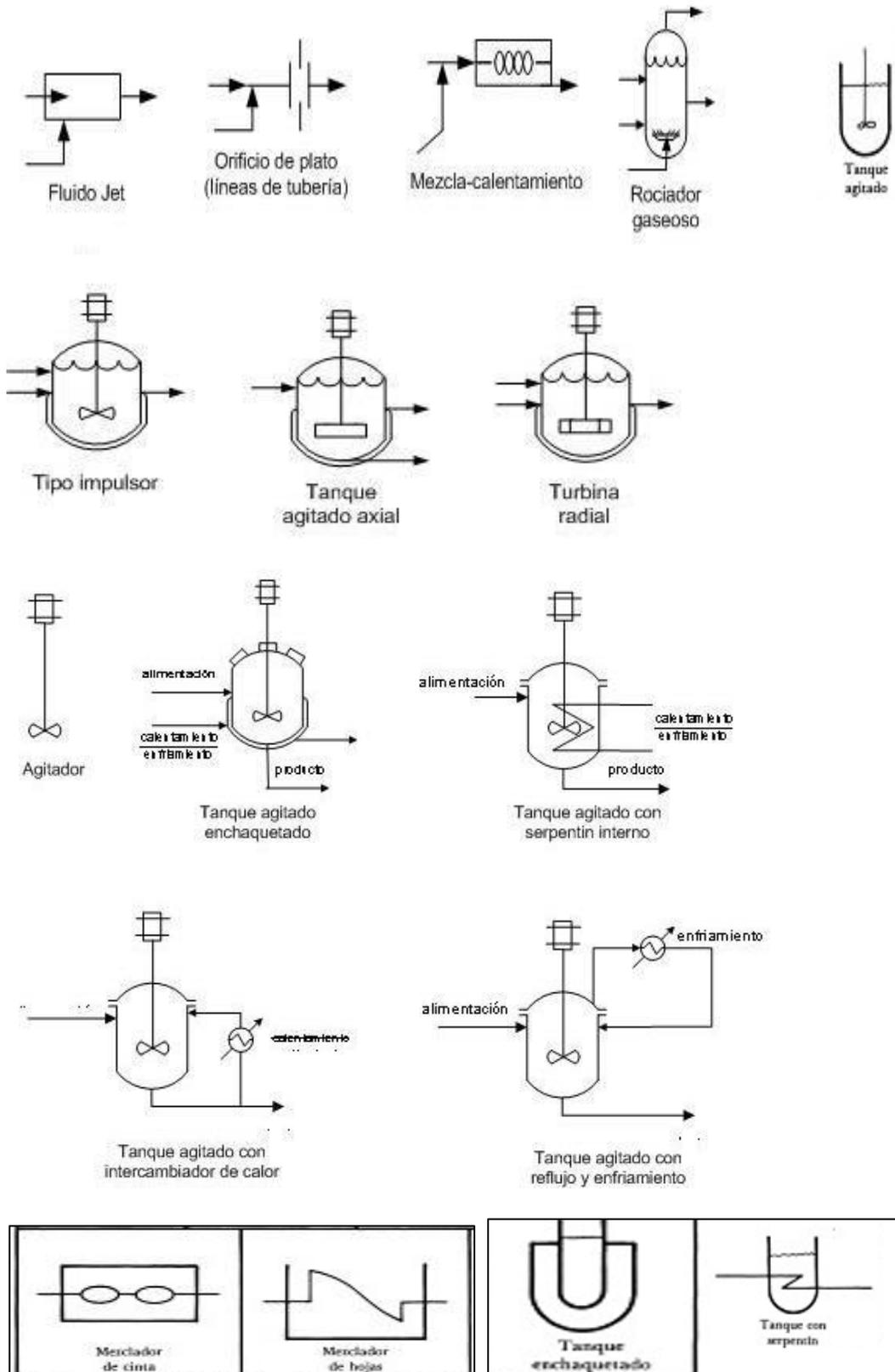
## 2. Electrólisis



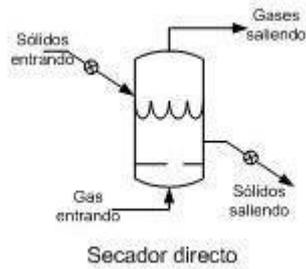
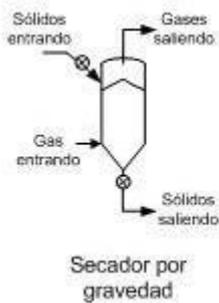
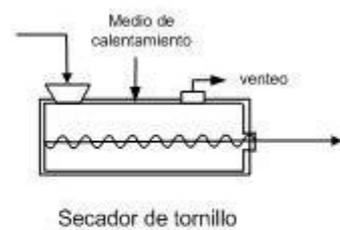
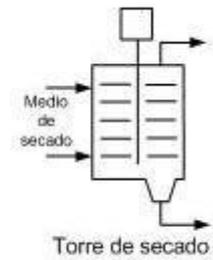
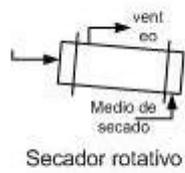
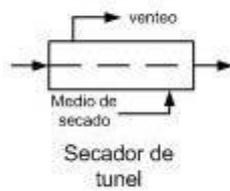
## 3. Reactores

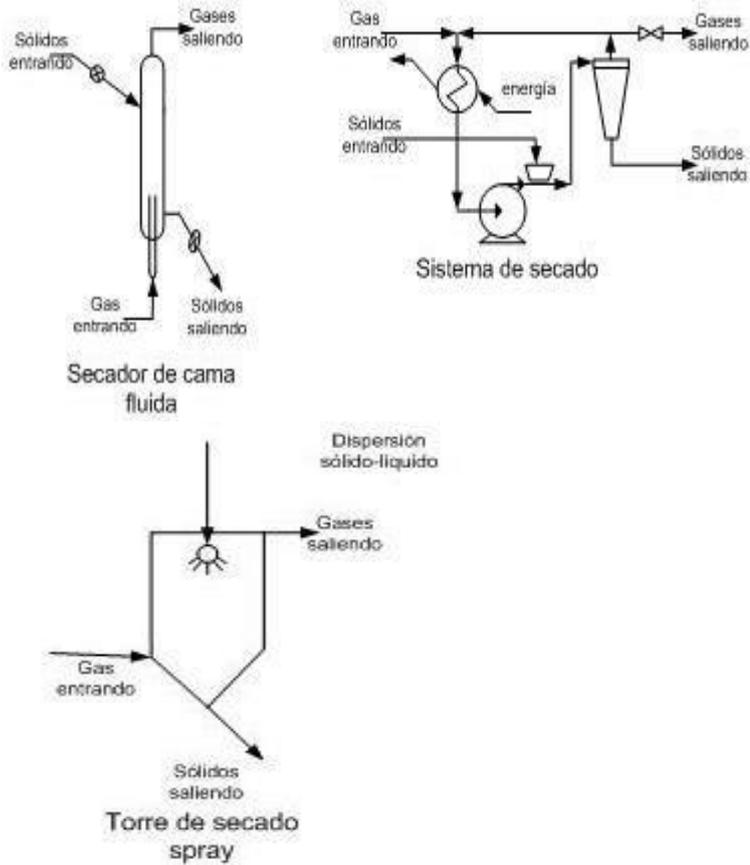


#### 4. Mezcladores

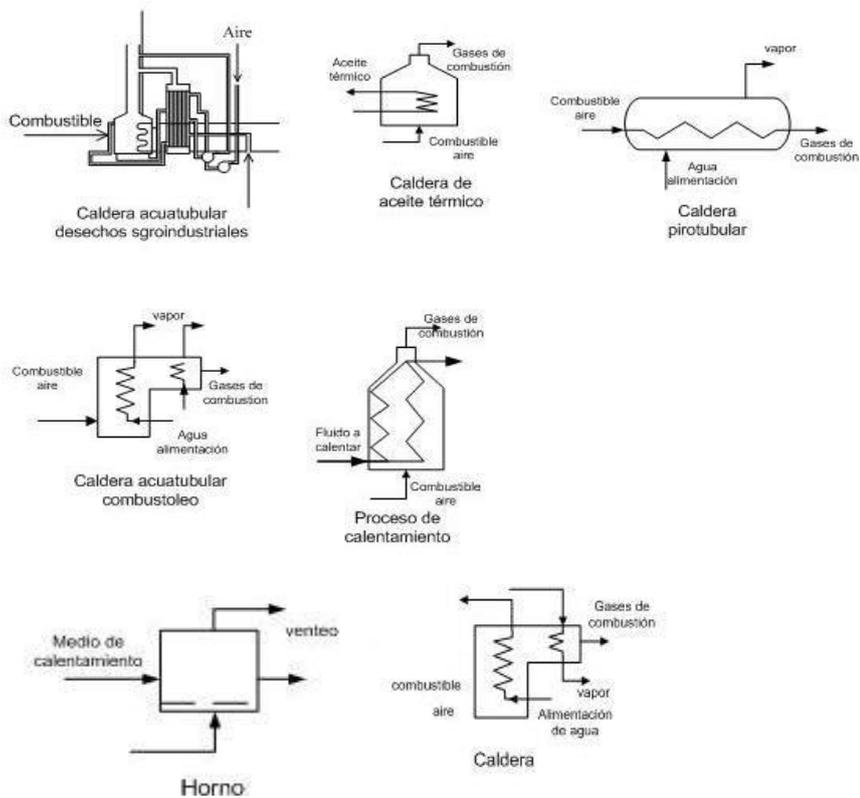


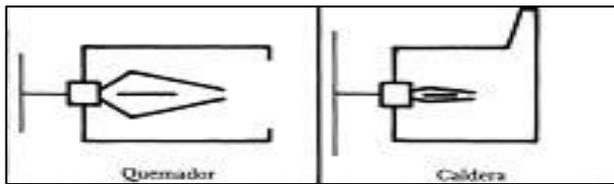
## 5. Secadores



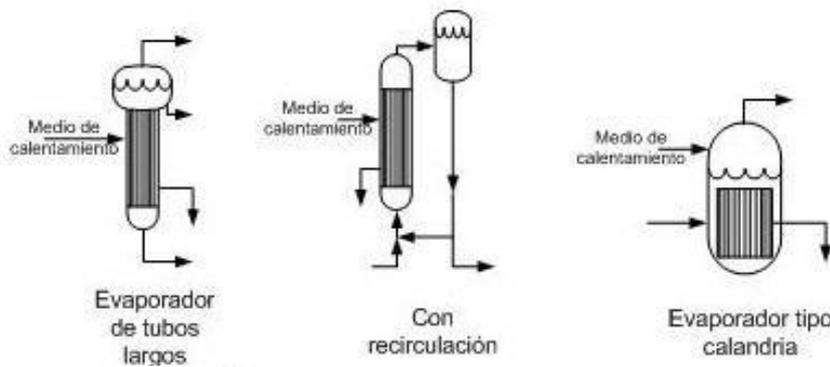
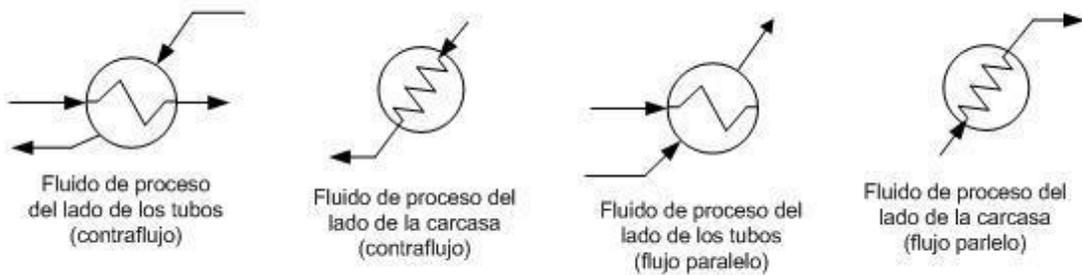


## 6. Hornos y calderas

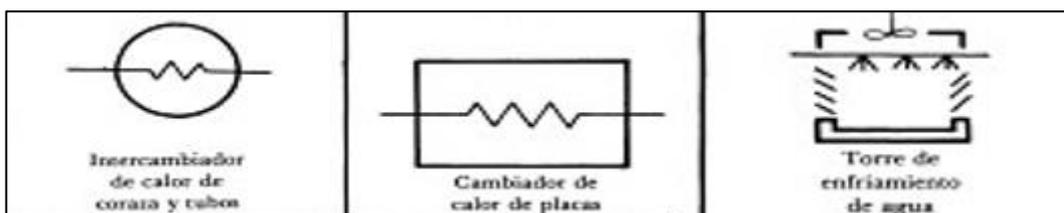




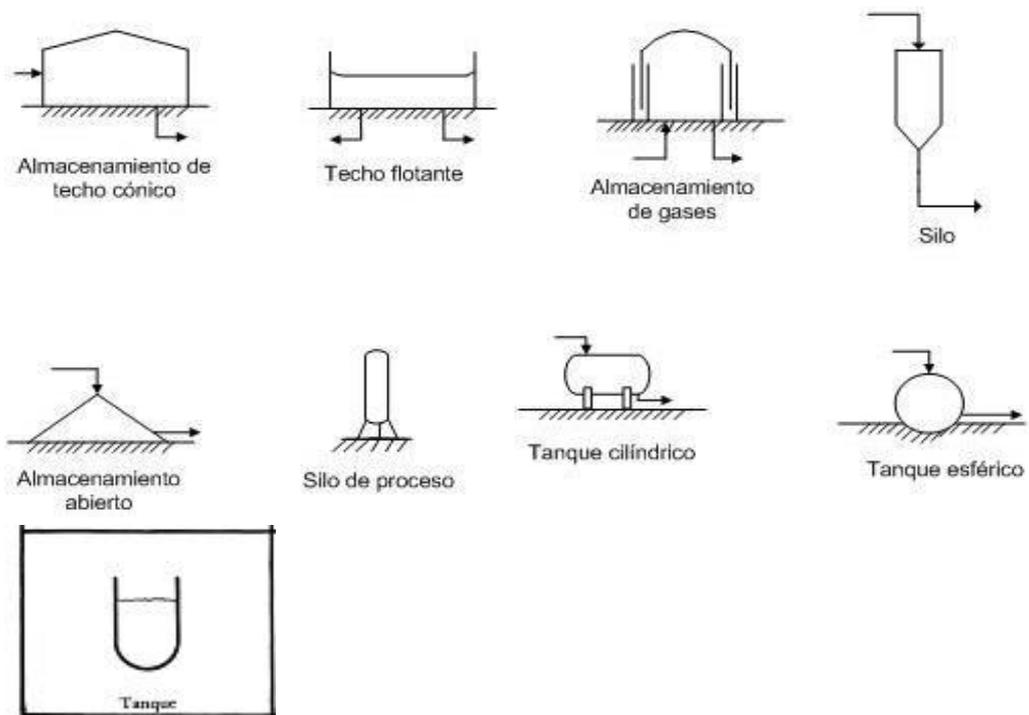
7. Intercambiadores de calor



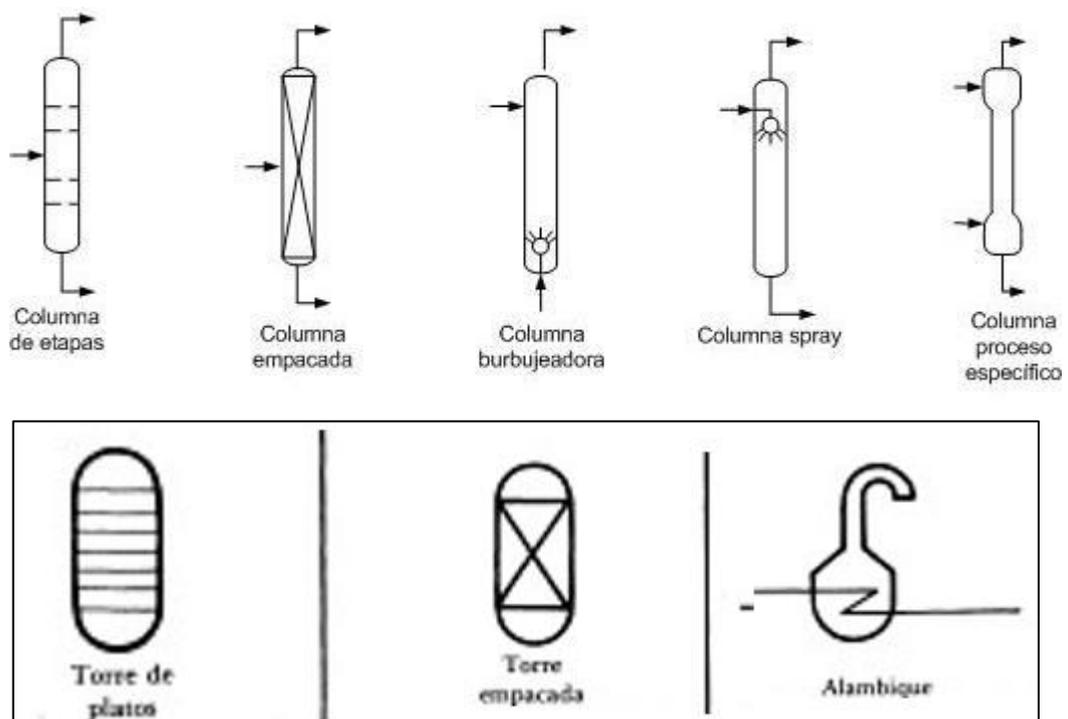
Evaporador



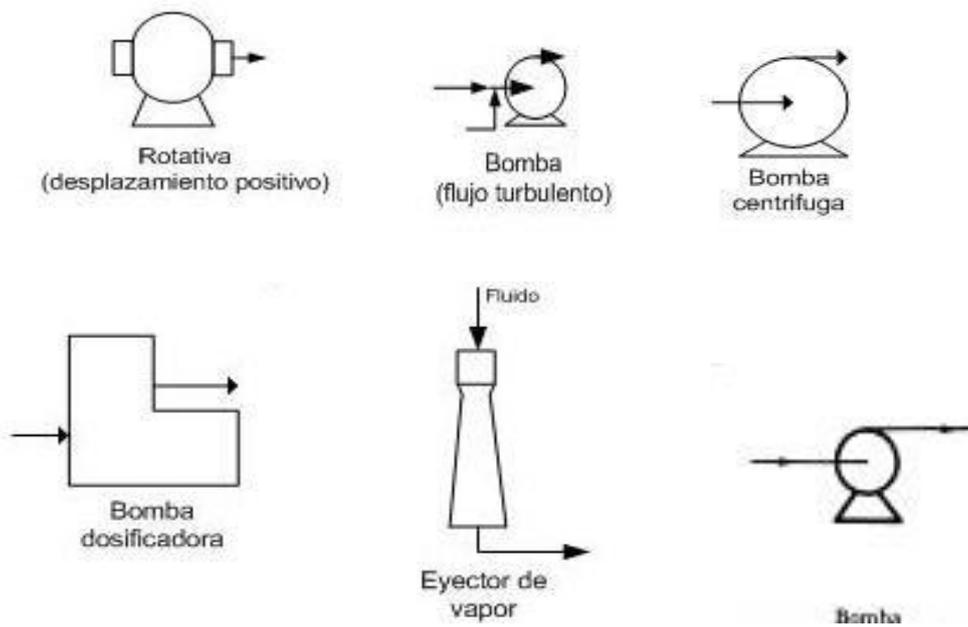
## 8. Almacenamiento



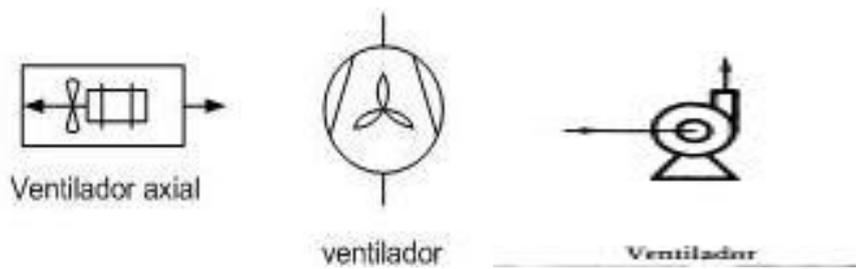
## 9. Columnas



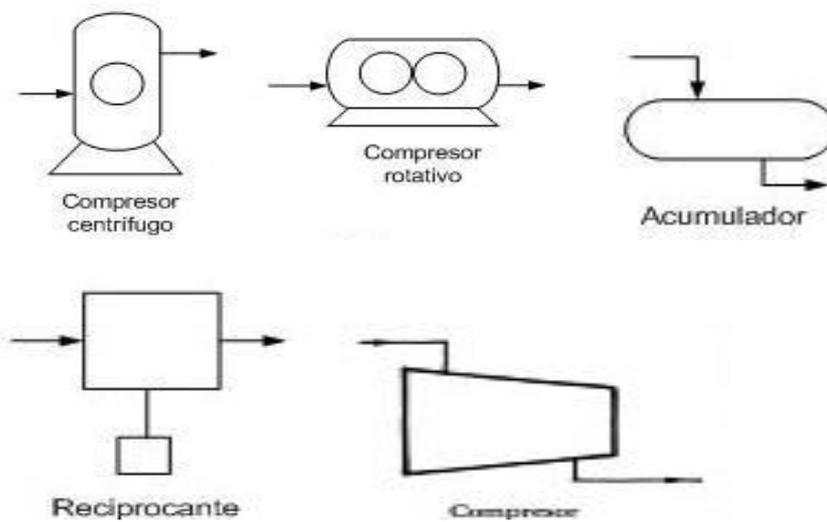
## 10. Bombas



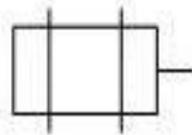
## 11. Ventiladores



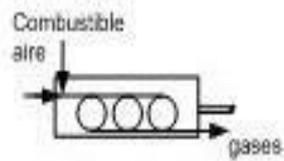
## 12. Compresores



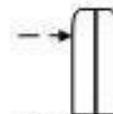
### 13. Transformación de energía



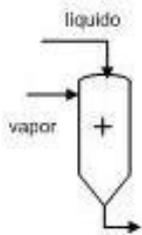
Motor eléctrico o generador



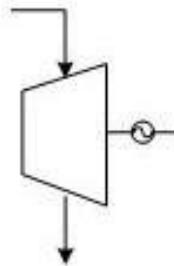
Maquina de combustión interna



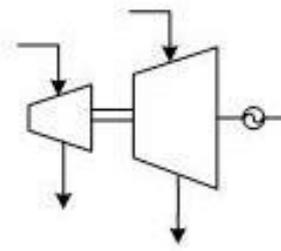
Subestación eléctrica



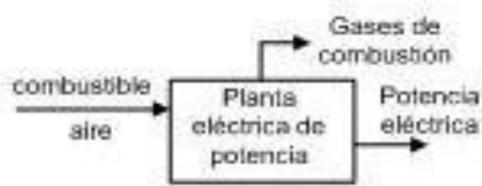
Energía del fluido



Turbogenerador 1



Turbogenerador 2



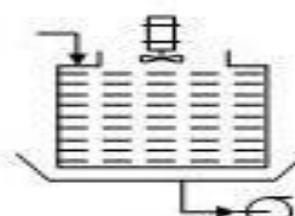
Planta eléctrica de potencia



Unidad de refrigeración

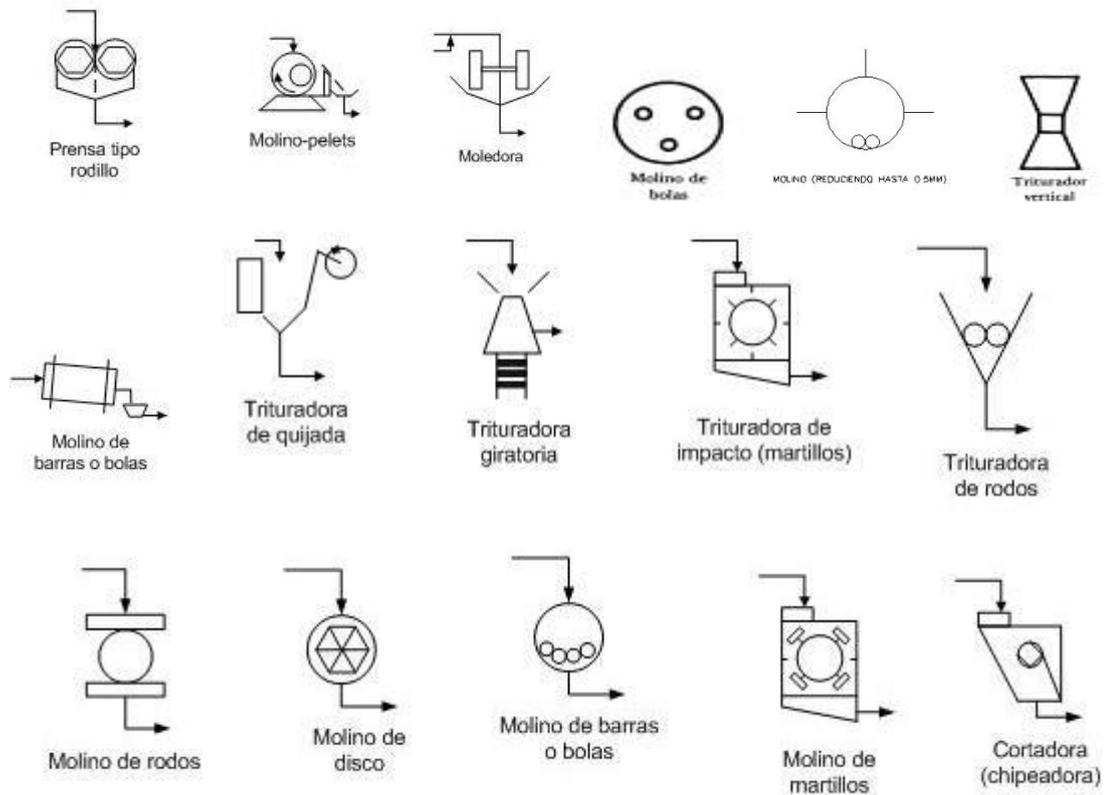


Acondicionamiento de aire en planta

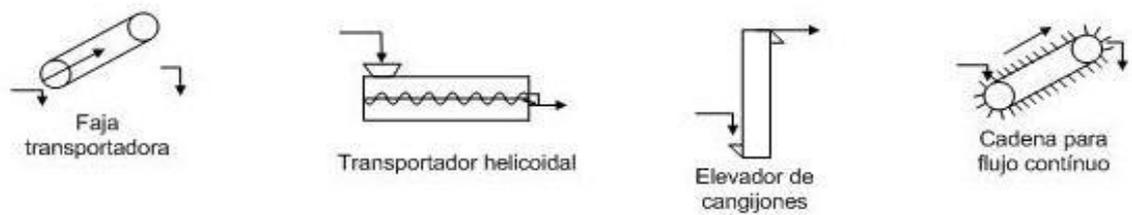


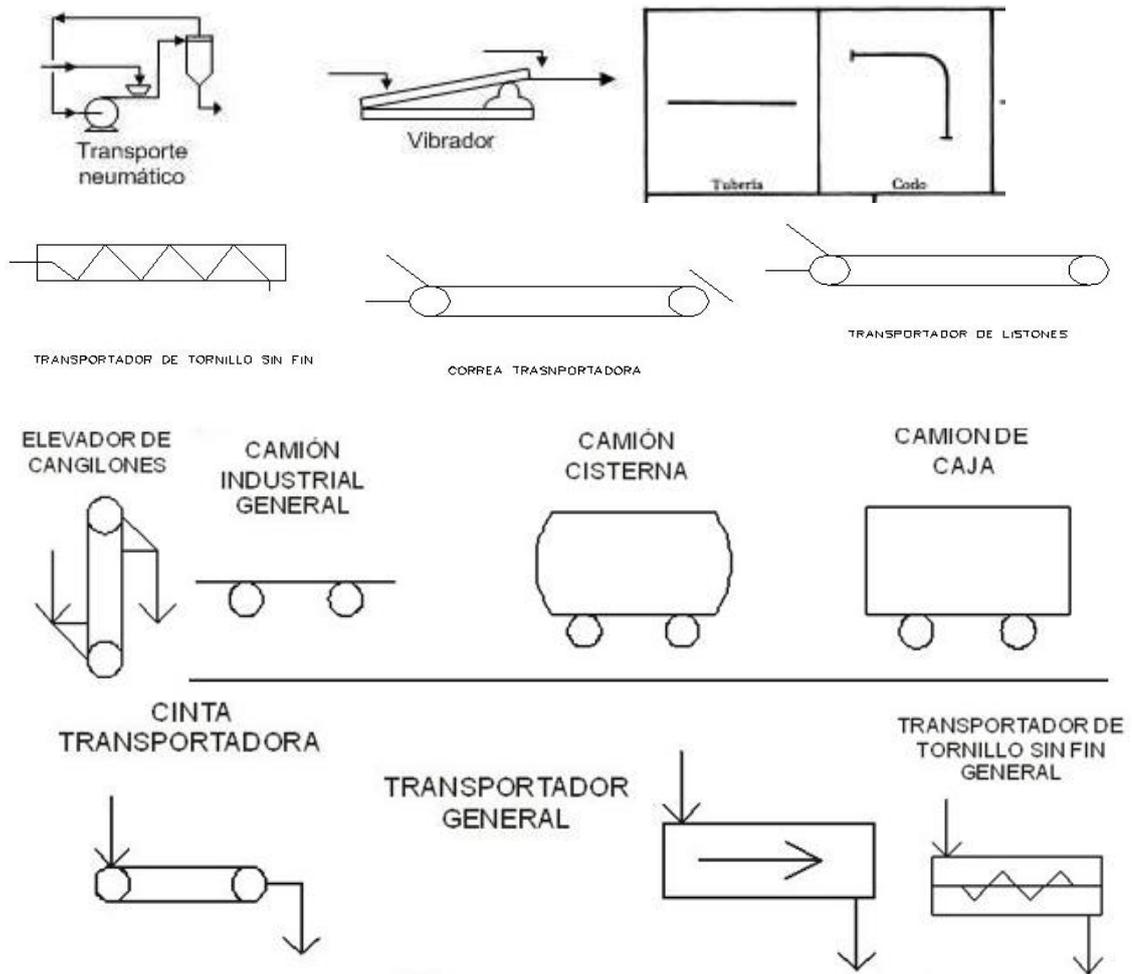
Torre de enfriamiento

## 14. Trituración y molienda

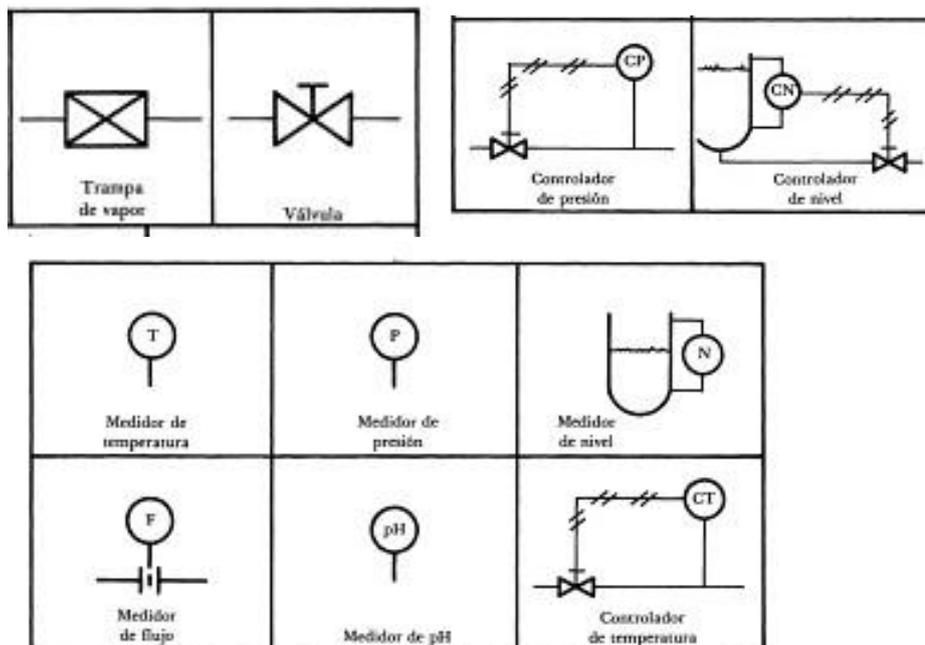


## 15. Transportadores





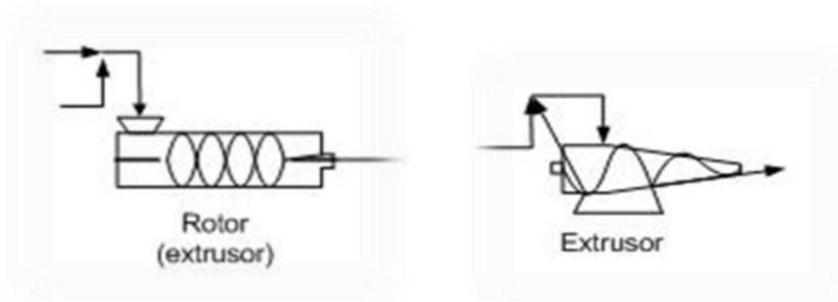
## 16. Medidores y controladores de temperatura, presión, nivel y flujo



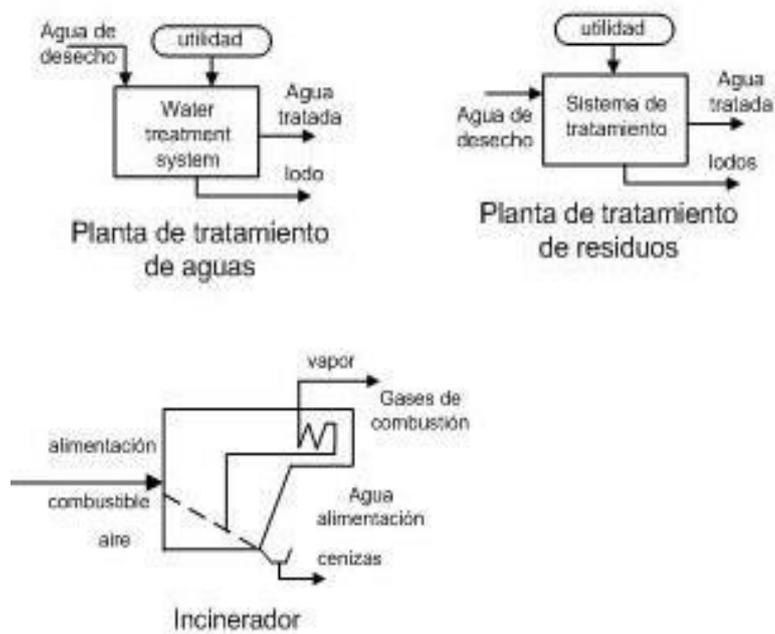
## 17. Aglomeración



## 18. Extrusores



## 19. Plantas de tratamiento



# Referencias

(s.f.).

- 3M. (2021). *Protección y seguridad industrial. Selección del respirador*. Obtenido de [https://www.3m.com.mx/3M/es\\_MX/epp-la/centro-proteccion-respiratoria/como-seleccionar-respiradores/](https://www.3m.com.mx/3M/es_MX/epp-la/centro-proteccion-respiratoria/como-seleccionar-respiradores/)
- 911 Metallurgist. (2018). *Procesamiento de Mercurio*. Obtenido de <https://www.911metallurgist.com/metallurgia/procesamiento-mercurio/>
- 911 Metallurgist. (2020). *Mineral Jig Concentrator*. Obtenido de <https://www.911metallurgist.com/mineral-jig-concentrator/>
- Abraham , C., & Casillas, D. (Abril de 2014). *Elaboración de un video para la operación unitaria de granulación*. Obtenido de [https://www.zaragoza.unam.mx/wp-content/Portal2015/Licenciaturas/qfb/tesis/tesis\\_abraham\\_resendiz.pdf](https://www.zaragoza.unam.mx/wp-content/Portal2015/Licenciaturas/qfb/tesis/tesis_abraham_resendiz.pdf)
- Afoakwa, E. O. (2014). *Cocoa Production and Processing Technology*. New York: CRC Press.
- Aguilera, E. N., Ortiz, J. M., & Sánchez, M. E. (2013). *Adsorbentes para la deshidratación de gas húmedo dulce: avances y tendencias*. Obtenido de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2224-61852013000100007](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852013000100007)
- Ajzenberg, N. (2002). *Introducción a la hidrogenación de aceite y su implementación en un proceso supercrítico: caso del aceite de girasol*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/26523810\\_Introduccion\\_a\\_la\\_hidrogenacion\\_de\\_aceite\\_y\\_su\\_implementacion\\_en\\_un\\_proceso\\_supercritico\\_Caso\\_del\\_aceite\\_de\\_girasol](https://www.researchgate.net/publication/26523810_Introduccion_a_la_hidrogenacion_de_aceite_y_su_implementacion_en_un_proceso_supercritico_Caso_del_aceite_de_girasol)
- Allende, P. P. (2004). *Bibliotecas UDLAP*. Obtenido de Universidad de las Américas Puebla: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/mca/perez\\_a\\_p/](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/mca/perez_a_p/)
- Alvarado, J., Terán, K., Vargas, D., & Bautista, A. L. (2020). *Clinoptilolita natural mexicana tratada con plata para remover DDD en agua*. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1665-14562020000300146](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-14562020000300146)
- American Galvanizers Association. (2022). *Galvanizing Process*. Obtenido de <https://galvanizeit.org/inspection-course/galvanizing-process#:~:text=Hot%2Ddip%20galvanizing%20is%20the,steel%20and%20the%20molt en%20zinc.>
- Angurell, I., Casamitjana, N., Caubet, A., Dinarés, I., Llor, N., Muñoz-Torrero, D., . . . Velasco, E. (2011). *Filtración. Operaciones básicas en el laboratorio de Química*. Retrieved from Universidad de Barcelona: [http://www.ub.edu/oblq/oblq%20castellano/filtracio\\_grav.html](http://www.ub.edu/oblq/oblq%20castellano/filtracio_grav.html)
- Anreotti Impianti. (2021). *Extracción por solvente*. Obtenido de <https://www.andreottiimpianti.com/es/tecnologia/extraccion-por-solvente>
- Antala Speciality Chemicals. (2017). *Clasificación y tipos de adhesivos industriales*. Obtenido de <https://www.antala.es/clasificacion-adhesivos-industriales/>
- Antala Speciality Chemicals. (2022). *Adhesivos y Sellantes*. Obtenido de <https://www.antala.es/categoria/adhesivos-sellantes/>
- Arjomandzadegan, M., Rafiee, P., & Moraveji, M. (2014). *Efficacy evaluation and kinetic study of biosorption of nickel and zinc by bacteria isolated from stressed conditions in a*

- bubble column*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/266948470\\_Efficacy\\_evaluation\\_and\\_kinetic\\_study\\_of\\_biosorption\\_of\\_nickel\\_and\\_zinc\\_by\\_bacteria\\_isolated\\_from\\_stressed\\_conditions\\_in\\_a\\_bubble\\_column](https://www.researchgate.net/publication/266948470_Efficacy_evaluation_and_kinetic_study_of_biosorption_of_nickel_and_zinc_by_bacteria_isolated_from_stressed_conditions_in_a_bubble_column)
- Arriaga, E. (2007). *Simulación del proceso de producción de polietileno de alta densidad mediante el proceso slurry*. Obtenido de <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/452/1/Erik%20Arriaga%20Blanco.pdf>
- Arrozúa. (2017). *Cultivo del arroz*. Obtenido de <https://www.arrozua.com/ciclo-del-cultivo-del-arroz/>
- Askeland, D. W. (2016). *Ciencia e ingeniería de materiales*. Cengage Learning.
- Asociación Española de Desalación y Reutilización AEDyR. (6 de Octubre de 2020). *Aplicaciones en Industrias de la Ósmosis Inversa*. Obtenido de <https://aedyr.com/aplicaciones-industrias-tratamiento-agua-osmosis-inversa/>
- Asociación Española de Desalación y Reutilización AEDyR. (2019). *¿Cómo funciona una planta desaladora de agua de mar por ósmosis inversa?* Obtenido de <https://aedyr.com/como-funciona-planta-desaladora-agua-mar-osmosis-inversa/>
- Asociación Española de Desalación y Reutilización AEDyR. (2019). *¿Qué es la salmuera?* Obtenido de <https://aedyr.com/que-es-salmuera/>
- Asociación Española de Desalación y Reutilización AEDyR. (2020). *Aplicaciones en Industrias de la Ósmosis Inversa*. Obtenido de <https://aedyr.com/aplicaciones-industrias-tratamiento-agua-osmosis-inversa/>
- Asociación Nacional de Fabricantes de Cajas y Empaques de Cartón Corrugado y Fibra Sólida. (2019). *Producción de cartón corrugado*. Obtenido de <https://anfec.org.mx/produccion-de-carton-corrugado/#:~:text=El%20cart%C3%B3n%20corrugado%20se%20corta,para%20fabricar%20una%20caja%20corrugada.>
- Aspiradores industriales. (13 de Julio de 2018). *Transporte neumático: una nueva gama para el movimiento de polvos, gránulos y sólidos*. Obtenido de <https://www.delfinvacuums.com/es/news/transporte-neumatico-una-nueva-gama-para-el-movimiento-de-polvos-granulos-y-solidos>
- Bachiller. (2020). *Mezcladores de sólidos y polvos para las industrias alimentaria, cosmética, farmacéutica y química*. Obtenido de <https://bachiller.com/es/mezcladores-de-solidos-y-polvos/>
- Bachiller. (2020). *Molienda fina de productos líquidos y semisólidos*. Obtenido de <https://bachiller.com/es/molino-coloidal/#aplicaciones>
- Bachiller. (2020). *Secador al vacío horizontal de paletas con diseño sanitario*. Obtenido de <https://bachiller.com/es/secador-horizontal-de-paletas-sanidry/#aplicaciones>
- Bachiller. (2020). *Secadores al vacío para las industrias química, química fina, farmacéutica, cosmética y alimentaria*. Obtenido de <https://bachiller.com/es/secadores-al-vacio/>
- Bagó Ecuador. (2012). *Cómo se hacen los comprimidos - Laboratorios Bagó*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=239QezFvrNo>
- Bandoni, A. (2003). *Los Recursos Vegetales Aromáticos en Latinoamérica. Su aprovechamiento industrial para la producción de aromas y sabores*. Universidad de Buenos Aires.
- Bariši, V., Mirela Kopjar, A. J., Flanjak, I., Ackar, Đ., Milicevi, B., Šubaric, D., . . . Babic, J. (2019). *The Chemistry behind Chocolate Production*. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1420-3049/24/17/3163>

- BEKO Technologies. (2022). *Sterile Air*. Obtenido de <https://www.beko-technologies.com/en/en/solutions/applications/sterile-air/#:~:text=sterile%20compressed%20air%20can%20be,be%20free%20of%20propagating%20germs>.
- Benavides, L., López, L., Salamanca, L., & Zuluaga, N. (Noviembre de 2013). *Trabajo de equipos de operaciones con sólidos en filtración*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/ivanramma/filtracion-3>
- Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. (2022). *Licenciatura en Ingeniería en Procesos y Gestión Industrial*. Obtenido de <https://des.buap.mx/?q=content/oferta-educativa-0>
- Bernedo, C. (2019). *Transporte hidráulico de sólidos*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/carlosbernedoflores/transporte-hidraulico-desolidos>
- Biasca, R. E. (1997). *Movimiento y almacenamiento de materiales*. Centro Argentino de Dirigentes de Producción.
- Bowen, R. (2021). *Osmosis, tonicity and hydrostatic pressure*. Obtenido de <http://www.vivo.colostate.edu/hbooks/pathphys/topics/osmosis.html>
- Bowen, R. (2021). *Osmosis, tonicity and hydrostatic pressure*. Obtenido de <http://www.vivo.colostate.edu/hbooks/pathphys/topics/osmosis.html>
- Braga, S. C., Oliveira, L. F., Hashimoto, J. C., Gama, M. R., Efraim, P., Poppi, R. J., & Augusto, F. (2018). *Study of volatile profile in cocoa nibs, cocoa liquor and chocolate on production process using GC × GC-QMS*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/pbidi.unam.mx:2443/science/article/pii/S0026265X18304041?via%3Dihub>
- Brajovik, F. (2020). *Centrifugación: Métodos y usos prácticos en laboratorio*. Obtenido de Cromtek: <https://www.cromtek.cl/category/centrifugacion/>
- Britannica, The Editors of Encyclopaedia. (2021). *Soap and detergent*. Obtenido de <https://www.britannica.com/science/soap/Continuous-soapmaking-the-hydrolyzer-process>
- Britannica, The Editors of Encyclopaedia. (2021). *Hydrolysis*. Obtenido de <https://www.britannica.com/science/hydrolysis>
- Britannica, The Editors of Encyclopaedia. (2017). *Hydrogenation*. Obtenido de <https://www.britannica.com/science/hydrogenation>
- Britannica, The Editors of Encyclopaedia. (2022). *Distillation*. Obtenido de <https://www.britannica.com/science/distillation#ref27766>
- Britannica, The Editors of Encyclopedia. (6 de Mayo de 2020). *Fermentation*. Obtenido de <https://www.britannica.com/science/fermentation>
- Brito, H., Vallejo, S., Puente, C., & Marluxul, L. (2016). *Design and construction of a lyophilizer for the drying of sugar beet (Beta vulgaris var. Saccharifera)*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/314808506\\_DESIGN\\_AND\\_CONSTRUCTION\\_OF\\_A\\_LYOPHYLIZER\\_FOR\\_THE\\_DRYING\\_OF\\_SUGAR\\_BEET\\_Beta\\_vulgaris\\_var\\_Saccharifera](https://www.researchgate.net/publication/314808506_DESIGN_AND_CONSTRUCTION_OF_A_LYOPHYLIZER_FOR_THE_DRYING_OF_SUGAR_BEET_Beta_vulgaris_var_Saccharifera)
- Brulls, A., & Johan, M. (2007). *Método para monitorizar un proceso de liofilización*. Obtenido de <https://patentados.com/2007/metodo-para-monitorizar-un-proceso>
- Bruni, M. S. (2018). *Sedimentation (centralised) Sustainable Sanitation and Water Management*. Obtenido de [https://sswm.info/water-nutrient-cycle/water-purification/hardwares/semi-centralised-drinking-water-treatments/sedimentation-\(centralised\)](https://sswm.info/water-nutrient-cycle/water-purification/hardwares/semi-centralised-drinking-water-treatments/sedimentation-(centralised))

- Buehler, E. (2012). *Enzymes: The Little Molecules That Bake Bread*. Obtenido de <https://blogs.scientificamerican.com/guest-blog/enzymes-the-little-molecules-that-bake-bread/>
- Buflovak PK Hebel Process Solutions LLC. (2017). *Evaporador de circulación forzada*. Obtenido de <http://www.buflovak.es/productos/soluciones-de-evaporaci%3%b3n-distilaci%3%b3n-y-separaci%3%b3n/evaporador-de-circulaci%3%b3n-forzada/>
- Buflovak PK Hebel Process Solutions LLC. (2017). *Evaporador de Película Descendente*. Obtenido de <http://www.buflovak.es/productos/soluciones-de-evaporaci%3%b3n-distilaci%3%b3n-y-separaci%3%b3n/evaporador-de-pel%3%adcula-descendente/>
- Bühler. (2022). *Arroz y paddy*. Obtenido de <https://www.buhlergroup.com/content/buhlergroup/global/es/industries/Rice-and-Paddy.html>
- Bühler Group. (2022). *Drum sieve*. Obtenido de <https://assetcdn.buhlergroup.com/asset/874601345621/5e7fc951eb81450bac580e1852105a05>
- Bühler Group. (2022). *Top Husk. Huller and Husk Separator DRHE/DRSD*. Obtenido de <https://assetcdn.buhlergroup.com/asset/874601345621/6143a5c8a2e9487c90b20f70aba2f308>
- Bühler Group. (2022). *Top White. WhitenerBSPB*. Obtenido de <https://assetcdn.buhlergroup.com/asset/874601345621/7e74655f1af94665b88aa5dbca538e6c>
- Burguess, J., Marten, M., & Taylor, R. (1990). *Under de Microscope: A Hidden World Revealed*. . Press Syndicate of the University of Cambridge.
- Cámara Nacional del Cemento. (2021). *¿Qué es el cemento?* Obtenido de <https://canacem.org.mx/que-es-el-cemento/>
- Cámara Nacional del Cemento. (2021). *Proceso de producción*. Obtenido de <https://canacem.org.mx/proceso-de-produccion/>
- Cámara Nacional del Cemento. (2021). *Reporte de fabricación*. Obtenido de <https://canacem.org.mx/reporte-de-fabricacion/>
- Cámara Nacional del Cemento. (2022). *Reporte de fabricación. Cemento y productos a base de cemento*. Obtenido de <https://canacem.org.mx/reporte-de-fabricacion/>
- Canal Once. (2016). *Jabón de tocador y de lavandería*. Obtenido de YouTube: [https://www.youtube.com/watch?v=M1dtf3qm\\_fw](https://www.youtube.com/watch?v=M1dtf3qm_fw)
- Canal Once. (2019). *Fábrica de jabón "La Corona"*. Obtenido de YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=eOcSDzoKI9Q>
- Candia, L. Á. (2017). *Uso potencial de biorreactores para la producción de lacasas de hongos basidiomicetos*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/327420213\\_Potential\\_use\\_of\\_bioreactors\\_for\\_laccases\\_production\\_of\\_basidiomycete\\_fungi](https://www.researchgate.net/publication/327420213_Potential_use_of_bioreactors_for_laccases_production_of_basidiomycete_fungi)
- Carbotecnica. (12 de Abril de 2021). *Filtros de discos*. Obtenido de <https://www.carbotecnica.info/aprendizaje/filtracion-de-agua-liquidos/que-son-los-filtros-de-discos/>
- Casillas, D. A. (2014). *Elaboración de un video para la operación unitaria de granulación*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Castro, J. (2013). *Evaluación de los suministros de mercurio primario y secundario en México*. Obtenido de <http://www.cec.org/files/documents/publications/11208-assessment-primary-and-secondary-mercury-supplies-in-mexico-es.pdf>

- Celis, S. (2020). *Filtros de mangas: Su utilización en plantas de acopio y plantas procesadoras de grano*. Obtenido de <https://www.engormix.com/balanceados/articulos/filtros-mangas-utilizacion-plantas-t44775.htm>
- CEMEX México. (2021). *Tipos de cemento*. Obtenido de <https://www.cemexmexico.com/productos/cemento>
- Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria. (Septiembre de 2020). *La producción y el comercio del cacao y principales derivados en México*. Obtenido de [http://www.cedrssa.gob.mx/files/b/13/27produccion\\_comercio\\_cacao.pdf](http://www.cedrssa.gob.mx/files/b/13/27produccion_comercio_cacao.pdf)
- Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria. (2020). *La producción y el comercio del cacao y principales derivados en México*. Obtenido de [http://www.cedrssa.gob.mx/files/b/13/27produccion\\_comercio\\_cacao.pdf](http://www.cedrssa.gob.mx/files/b/13/27produccion_comercio_cacao.pdf)
- Centro Europeo de Posgrado CEUPE. (2021). *¿En qué se basa la fermentación de los alimentos?* Obtenido de <https://www.ceupe.com/blog/tipos-de-fermentacion-de-los-alimentos.html#:~:text=La%20fermentación%20láctica%20es%20el,Mesófilos>.
- Cerveceros de México. (2020). *¿Cuáles son los principales pasos del proceso para elaborar cerveza?* Obtenido de <https://cervecerosdemexico.com/2020/10/01/cuales-son-los-principales-pasos-del-proceso-para-elaborar-cerveza/>
- Cerveceros de México. (2020). *¿Qué características aporta el lúpulo a la cerveza?* Obtenido de <https://cervecerosdemexico.com/2020/09/23/que-caracteristicas-aporta-el-lupulo-a-la-cerveza/>
- Cerveceros de México. (2020). *El largo camino de la cebada para llegar a la cerveza*. Obtenido de <https://cervecerosdemexico.com/2020/12/03/el-largo-camino-de-la-cebada-para-llegar-a-la-cerveza/>
- Cerveceros de México. (2022). *Los 9 pasos para producir una cerveza*. Obtenido de <https://cervecerosdemexico.com/2022/02/25/los-9-pasos-para-producir-una-cerveza/>
- Chang, R. G. (2013). *Química*. McGraw Hill.
- Charcoal Machine. (2021). *Coal ball briquette machine*. Obtenido de <https://www.charcoal-machines.com/coal-ball-briquette-machine-2.html>
- Chauhan, M. K. (Enero de 2019). *Life cycle energy usage and GHG emissions study of a sugar mill in India*. Obtenido de [http://www.eemj.icpm.tuiasi.ro/pdfs/vol18/full/no1/8\\_596\\_Chauhan\\_14.pdf](http://www.eemj.icpm.tuiasi.ro/pdfs/vol18/full/no1/8_596_Chauhan_14.pdf)
- Chávez, K. (4 de Marzo de 2015). *Tipos y equipos de evaporadores*. Obtenido de [https://es.slideshare.net/krinashavz/tipos-y-equipos-de-evaporadores?next\\_slideshow=1](https://es.slideshare.net/krinashavz/tipos-y-equipos-de-evaporadores?next_slideshow=1)
- Chemical and Process Engineering. (2021). *Absorption Vs Adsorption*. Obtenido de <https://www.arhse.com/absorption-vs-adsorption/>
- Chicza. (2020). *Origen del chicle*. Obtenido de <https://chicza.com/como-se-hace-chicza/>
- Ching, F. D. (2016). *Manual de dibujo arquitectónico*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Codols Technology. (2014). *Winkworth explica el proceso de fabricación de la goma de mascar*. Obtenido de <https://www.codols.com/blog/2014-07-13/38/winkworth-explica-el-proceso-de-fabricacion-de-la-goma-de-mascar>
- Codols Technology. (2022). *Coolvacuum, tecnología de liofilización*. Obtenido de <https://www.codols.com/blog/2017-09-21/120/coolvacuum-tecnologia-de-liofilizacion>
- Colina, L. (2021). *Filtración*. Obtenido de <http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/mlci/filtracion.pdf>

- Condorchem Envitech. (2021). *Tratamiento de aguas residuales: tipos de membranas de filtración y posibles configuraciones*. Obtenido de <https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-de-aguas-residuales-tipos-de-membranas-de-filtracion-y-posibles-configuraciones/>
- Confectionery Production. (2014). *Gum Processing*. Obtenido de <https://www.confectioneryproduction.com/feature/11265/gum-processing/>
- Consejo Regulador del Tequila. (2019). *Proceso de Elaboración de Tequila*. Obtenido de <https://www.crt.org.mx/index.php/es/el-tequila-3/elaboracion-normativa/63-proceso-de-elaboracion-de-tequila>
- Consejo Regulador del Tequila. (2019). *Proceso de Elaboración del Tequila*. Obtenido de <https://www.crt.org.mx/index.php/es/el-tequila-3/elaboracion-normativa/63-proceso-de-elaboracion-de-tequila>
- Copper recycle . (2022). *Spray tower*. Obtenido de <https://copper-recycle.com/recycling-machines/auxiliary-equipment/spray-tower.html#:~:text=Working%20Principle%20of%20Spray%20Tower,and%20discharge%20into%20the%20atmosphere.>
- Corrales, L. C., Antolinez, D. M., Bohórquez, J. A., & Corredor, A. M. (2015). *Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta* . Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/316651049\\_Bacterias\\_anaerobias\\_procesos\\_que\\_realizan\\_y\\_contribuyen\\_a\\_la\\_sostenibilidad\\_de\\_la\\_vida\\_en\\_el\\_planeta](https://www.researchgate.net/publication/316651049_Bacterias_anaerobias_procesos_que_realizan_y_contribuyen_a_la_sostenibilidad_de_la_vida_en_el_planeta)
- Curi, A., Granda, W. J., Lima, H. M., & Sousa, W. T. (2006). *Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros*. Obtenido de [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-07642006000600017](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642006000600017)
- Dasan, Y., Abdullah, M., & A.H.Bhat. (2014). *Effects of Reflux Ratio and Feed Conditions for the Purification of Bioethanol In A Continuous Distillation Column*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/301433897\\_Effects\\_of\\_reflux\\_ratio\\_and\\_feed\\_conditions\\_for\\_the\\_purification\\_of\\_bioethanol\\_in\\_a\\_continuous\\_distillation\\_column#:~:text=The%20analyses%20showed%20that%20both,mole%20fraction%20of%20desired%20product.](https://www.researchgate.net/publication/301433897_Effects_of_reflux_ratio_and_feed_conditions_for_the_purification_of_bioethanol_in_a_continuous_distillation_column#:~:text=The%20analyses%20showed%20that%20both,mole%20fraction%20of%20desired%20product.)
- Data México . (2021). *Fabricación de Productos de Cartón y Papel*. Obtenido de [https://datamexico.org/es/profile/industry/converted-paper-product-manufacturing#:~:text=Acerca%20de%20Fabricaci%C3%B3n%20de%20Productos%20de%20Cart%C3%B3n%20y%20Papel&text=Seg%C3%BAn%20datos%20del%20Censo%20Econ%C3%B3mico,Le%C3%B3n%20\(%2427%2C622M%20MX\).](https://datamexico.org/es/profile/industry/converted-paper-product-manufacturing#:~:text=Acerca%20de%20Fabricaci%C3%B3n%20de%20Productos%20de%20Cart%C3%B3n%20y%20Papel&text=Seg%C3%BAn%20datos%20del%20Censo%20Econ%C3%B3mico,Le%C3%B3n%20(%2427%2C622M%20MX).)
- Data México. (2021). *Curtido y Acabado de Cuero y Piel*. Obtenido de <https://datamexico.org/es/profile/industry/leather-and-hide-tanning-and-finishing>
- Data México. (2021). *Fabricación de Pinturas, Recubrimientos y Adhesivos*. Obtenido de <https://datamexico.org/es/profile/industry/paint-coating-and-adhesive-manufacturing#production>
- Data MÉXICO. (2021). *Fabricación de Productos Farmacéuticos*. Obtenido de <https://datamexico.org/es/profile/industry/pharmaceutical-and-medicine-manufacturing>
- Data México. (2022). *Acerca de Fabricación de Jabones, Limpiadores y Preparaciones de Tocador*. Obtenido de <https://datamexico.org/es/profile/industry/soap-cleaning-compound-and-toilet-preparation-manufacturing#:~:text=Seg%C3%BAn%20datos%20del%20Censo%20Econ%C3%B3mic>

o%202019%2C%20se%20totalizaron%201%2C661%20unidades,fue%20de%20%24156%2C671M%20MX.

- DELANI Cacao & Chocolate Machinery. (2019). Obtenido de <https://delanitrading.com/categoria-producto/maquinas-para-procesar-cacao/>
- Deshmukh, G., & Manyar, H. (2020). *Production Pathways of Acetic Acid and Its Versatile Applications in the Food Industry*. Obtenido de <https://www.intechopen.com/chapters/72179>
- Dewey, J. (2022). Glycerol. *Salem Press Encyclopedia of Health*.
- Diario Oficial de la Federación. (2002). *NORMA Oficial Mexicana NOM-186-SSA1/SCFI-2002, Productos y servicios. Cacao, productos y derivados. I Cacao. II Chocolate. III Derivados. Especificaciones sanitarias. Denominación comercial*. Obtenido de [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=717815&fecha=08/11/2002](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=717815&fecha=08/11/2002)
- Diario Oficial de la Federación. (13 de Diciembre de 2012). *NORMA Oficial Mexicana NOM-006-SCFI-2012, Bebidas alcohólicas-Tequila-Especificaciones*. Obtenido de [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5282165&fecha=13/12/2012](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5282165&fecha=13/12/2012)
- Diario Oficial de la Federación. (2012). *NORMA Oficial Mexicana NOM-006-SCFI-2012, Bebidas alcohólicas-Tequila-Especificaciones*. Obtenido de [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5282165&fecha=13/12/2012](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5282165&fecha=13/12/2012)
- Discovery UK. (2020). *Bubblegum. How it's made*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=2kttVyakHN4>
- DMH United Steel Industry. (2018). *La diferencia entre la tubería de acero negro y la tubería de acero galvanizado*. Obtenido de <https://www.united-steel.com/mes/newsshow/262.html>
- Dudamel, W., & Rivero, T. (2015). *Adsorción de la materia orgánica natural del agua para reducir la formación de trihalometanos*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/310672188\\_ADSORCION\\_DE\\_LA\\_MATERIA\\_ORGANICA\\_NATURAL\\_DEL\\_AGUA\\_PARA\\_REDUCIR\\_LA\\_FORMACION\\_DE\\_TRIHALOMETANOS\\_ADSORPTION\\_OF\\_WATER'S\\_NATURAL\\_ORGANIC\\_MATTER\\_FOR\\_REDUCING\\_TRIHALOMETHANES'\\_FORMATION](https://www.researchgate.net/publication/310672188_ADSORCION_DE_LA_MATERIA_ORGANICA_NATURAL_DEL_AGUA_PARA_REDUCIR_LA_FORMACION_DE_TRIHALOMETANOS_ADSORPTION_OF_WATER'S_NATURAL_ORGANIC_MATTER_FOR_REDUCING_TRIHALOMETHANES'_FORMATION)
- Dynamic Air Conveying Systems. (2022). *Sistema continuo por vacío en fase densa*. Obtenido de <https://www.dynamicaire.com/es/systems/hdv6000.html>
- EIC Ingenieros Consultores. (2015). *Transporte hidráulico de pulpas, concentrados y relaves*. Obtenido de <http://www.eicingenieros.cl/index.php/project/transporte-hidraulico-de-pulpas-concentrados-y-relaves/>
- El Economista. (11 de Junio de 2018). *Planta desaladora de Ensenada entra en operación*. págs. <https://www.eleconomista.com.mx/estados/Planta-desaladora-de-Ensenada-entra-en-operacion-20180611-0161.html>.
- Enbatec soluciones de embalaje. (2022). *Proceso de producción del cartón corrugado*. Obtenido de <https://enbatec.es/proceso-de-fabricacion-del-carton-corrugado>
- Enciso, A. (2007). *Chicle, el blanco jugo de la selva*. Obtenido de La Jornada: <https://www.jornada.com.mx/2007/01/18/index.php?section=sociedad&article=052n1soc>
- Environmental Protection Agency. (1999). *Zeolita: Un adsorbente versátil de contaminantes del aire*. Obtenido de <https://www3.epa.gov/ttnecat1/cica/files/zeolits2.pdf>
- EPA. (1996). *Ammonium Sulfate*. Obtenido de [https://www.epa.gov/sites/production/files/2020-09/documents/final\\_background\\_document\\_for\\_ammonium\\_sulfate\\_section\\_8.4.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2020-09/documents/final_background_document_for_ammonium_sulfate_section_8.4.pdf)

- EPA. (2019). *Purificadores de Aire. Un resumen técnico*. Obtenido de [https://espanol.epa.gov/sites/default/files/2021-05/documents/spanish\\_-\\_residential\\_air\\_cleaners.pdf?VersionId=3x9nM5h\\_U1LSykXuNKQH5wmNs9p8vkSx](https://espanol.epa.gov/sites/default/files/2021-05/documents/spanish_-_residential_air_cleaners.pdf?VersionId=3x9nM5h_U1LSykXuNKQH5wmNs9p8vkSx)
- EPA. (2021). *Technical Overview of Volatile Organic Compounds*. Obtenido de <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/technical-overview-volatile-organic-compounds>
- Equipo Ferros Planes. (31 de Mayo de 2018). *Proceso de zincado: ¿Qué es y qué ventajas tiene?*. Obtenido de <https://ferrosplanes.com/proceso-de-zincado-que-es-y-que-ventajas-tiene/>
- Erlwein, S., Tapia, J. R., & Pegueros, A. V. (2022). *Proceso de elaboración del pulque, su importancia económica y concepción social en Apan, Hidalgo*. Obtenido de <https://www.enah.edu.mx/publicaciones/documentos/32.pdf>
- Escolar, M. (2015). *Cómo se fabrica un medicamento*. Obtenido de <https://cinfasalud.cinfa.com/p/como-se-fabrica-un-medicamento/>
- Estrela, C., Estrela, C., Barbin, E., Spanó, J. C., Marchessan, M., & Pécora, J. (2002). *Mecanismo de acción del hipoclorito de sodio*. Retrieved from [http://www.forp.usp.br/bdj/bdj13\(2\)/v13n2a07/v13n2a07.html](http://www.forp.usp.br/bdj/bdj13(2)/v13n2a07/v13n2a07.html)
- European Commission. (2003). *Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on Best Available Techniques for the Manufacture of Organic Fine Chemicals*. Obtenido de [https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-03/superseded\\_lvoC\\_bref\\_0203.pdf](https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-03/superseded_lvoC_bref_0203.pdf)
- European Commission. (2006). *Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on Best Available Techniques for the Manufacture of Organic Fine Chemicals*. Obtenido de [https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/ofc\\_bref\\_0806.pdf](https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/ofc_bref_0806.pdf)
- European Commission. (2014). *Best Available Techniques Reference Document for the Production of Chlor-alkali*. Obtenido de [https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/CAK\\_BREF\\_102014.pdf](https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/CAK_BREF_102014.pdf)
- Eyjolfsson, R. (2015). *Design and manufacture of pharmaceutical tablets*. Amsterdam: Academic Press.
- Fabricando. (2021). *Cómo se hace el chicle natural*. Obtenido de [https://www.youtube.com/watch?v=UiU\\_M0blg8M](https://www.youtube.com/watch?v=UiU_M0blg8M)
- Facultad de Ingeniería, UNAM. (2015). *Plan de Estudios de la Licenciatura en Ingeniería Industrial*. Obtenido de [https://www.ingenieria.unam.mx/programas\\_academicos/licenciatura/Industrial/2016/asignaturas\\_industrial\\_2016.pdf](https://www.ingenieria.unam.mx/programas_academicos/licenciatura/Industrial/2016/asignaturas_industrial_2016.pdf)
- Facultad de Química UNAM. (2011). *Filtración. Procesos de separación. Laboratorio de Ingeniería Química*. Obtenido de <http://depa.fquim.unam.mx/procesos/PDF/ProcesosI.pdf>
- Facultad de Química, UNAM. (2007). *Química Analítica Instrumental II, Técnicas cromatográficas*. Obtenido de [http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/M.Cromatograficos\\_6700.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/M.Cromatograficos_6700.pdf)
- Ferreira, M. T., Masip, Y., Barcelos, R. J., Yanes, J. P., & Vilalta, G. (2017). Comparative study of the power consumption in two different configurations of medium-length slurry pumping systems. *Revista científica de Ingeniería Mecánica*.

- Fierro, J. L. (2011). *El hidrógeno: metodologías de producción*. Obtenido de [https://www.fgcsic.es/lychnos/es\\_es/articulos/hidrogeno\\_metodologias\\_de\\_produccion](https://www.fgcsic.es/lychnos/es_es/articulos/hidrogeno_metodologias_de_produccion)
- Flores, M. (2017). *Ingeniería básica de una planta de producción de jabón sólido*. Obtenido de <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/91407/fichero/TFG+MARTA+FLORES%252FTFG+1617+MARTA+FLORES+RODRIGUEZ.pdf>
- Flottweg. (2022). *Centrifugas de discos Flottweg*. Obtenido de <https://www.flottweg.com/es/la-gama-de-productos/centrifuga-de-discos/>
- Flottweg. (2022). *Centrifugas industriales para la clarificación y la producción de cerveza*. Obtenido de <https://www.flottweg.com/es/aplicaciones/bebidas/cerveza-vision-general/#:~:text=Las%20centr%C3%ADfugas%20decanter%20separan%20la,partir%20del%20excedente%20de%20levadura.>
- Flottweg. (2022). *Procesamiento de suero lácteo*. Obtenido de <https://www.flottweg.com/es/aplicaciones/quimica-farmaceutica-alimentos/suerolacteo/>
- Flujo de fluidos: interacción sólido-fluido*. (Noviembre de 2021). Obtenido de <https://fjarabo.webs.ull.es/Practics/Oba/ObaFiles/Affluid.pdf>
- Froztec. (2018). *¿Cómo opera un intercambiador de calor Alfa Laval?* Obtenido de <https://blog.froztec.com/como-opera-un-intercambiador-de-calor-alfa-laval-alfanova>
- Fundación por los Derechos Humanos y de la Naturaleza. (2014). *El ciclo del mercurio*. Obtenido de <https://twitter.com/fudena/status/466621412623806464>
- García, A., & Rojas, A. (2006). *Comparación de los floculantes Chemadd A-41, 42, y 43 de la firma Chematek, el IP-600 de la firma Zar Cia y el Percol, versión canadiense del Magnaflor R-155*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/4455/445543751006.pdf>
- García, F. (2021). *Papel de la fermentación en la fabricación del pan*. Obtenido de [http://oa.upm.es/8006/1/Olmedo\\_170.pdf](http://oa.upm.es/8006/1/Olmedo_170.pdf)
- García, G. (2019). *Preparación de nanodispersiones de uso farmacéutico por difusión o reacción de saponificación usando el principio del tubo Venturi*. Obtenido de [https://repositorio.unam.mx/contenidos/preparacion-de-nanodispersiones-de-uso-farmaceutico-por-difusion-o-reaccion-de-saponificacion-usando-el-principio-d-3536718?c=BOwPwY&d=false&q=\\*&i=2&v=1&t=search\\_0&as=0](https://repositorio.unam.mx/contenidos/preparacion-de-nanodispersiones-de-uso-farmaceutico-por-difusion-o-reaccion-de-saponificacion-usando-el-principio-d-3536718?c=BOwPwY&d=false&q=*&i=2&v=1&t=search_0&as=0)
- García, M. I. (2022). *Polimerización de etileno y esencia de trementina con un sistema catalítico tipo Ziegler*. Obtenido de <https://digitum.um.es/digitum/bitstream/10201/4784/1/Polimerizaci%C3%B3n%20de%20etileno%20y%20esencia%20de%20trementina%20con%20un%20sistema%20catal%C3%ADtico%20tipo%20Ziegler.pdf>
- GCP Applied Technologies. (2020). *Medición de la ventilación del molino de bolas*. Obtenido de <https://gcpat.mx/es-la/about/news/blog/measuring-ball-mill-ventilation>
- Geankoplis, J. G. (1993). *Transport Processes and Unit Operations*. USA: Prentice-Hall International.
- Gomes, R. J., Borges, M. d., Rosa, M. d., Castro-Gómez, R. J., & Spinosa, W. A. (2018). *Acetic Acid Bacteria in the Food Industry: Systematics, Characteristics and Applications*. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6117990/>
- González, A. C. (2012). Obtenido de Donan planta de biodiesel a la Facultad de Ingeniería de la UNAM: [https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2012\\_670.html](https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2012_670.html)
- Granger, J. (1950). *Unit Operations*. USA: CBS Publishers & Distributors.

- Grauer, A., Grunberg, K., & Zardo, S. (2015). *Puesta a punto de un protocolo de liofilización para la creación de bancos bacterianos*. Obtenido de <http://fciencias.ugr.es/practicadocentes/wp-content/uploads/guiones/SecadoPorLiofilizacion.pdf>
- Groover, M. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. McGraw Hill.
- Grupo Gaherma. Mantenimiento e Ingeniería. (2020). *Mantenimiento de Filtro de Mangas*. Obtenido de <https://www.gaherma.com/mantenimiento-de-filtros-de-mangas/>
- Guaymas, O., Palacios, M., & Villalba, M. L. (2020). *Breve Fundamento de Técnicas de Purificación y Caracterización de Sólidos*. Obtenido de UNLP: [https://www.ing.unlp.edu.ar/catedras/U0904/descargar.php?secc=0&id=U0904&id\\_inc=46504](https://www.ing.unlp.edu.ar/catedras/U0904/descargar.php?secc=0&id=U0904&id_inc=46504)
- Gunt Hamburg. (2021). *Ingeniería de procesos térmicos - Extracción*. Obtenido de [https://www.gunt.de/images/download/extraction\\_spanish.pdf](https://www.gunt.de/images/download/extraction_spanish.pdf)
- Gunt Hamburg. (2022). *Ingeniería de las Operaciones Básicas Mecánicas*. Obtenido de [https://www.gunt.de/images/download/mixing\\_agglomeration\\_spanish.pdf](https://www.gunt.de/images/download/mixing_agglomeration_spanish.pdf)
- Gusek, J., & Fattore, G. (2015). *Mitigación del drenaje ácido de mina con la aplicación superficial del efluente del reactor bioquímico*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/286259677\\_Mitigacion\\_del\\_drenaje\\_acido\\_de\\_mina\\_con\\_la\\_aplicacion\\_superficial\\_del\\_efluente\\_del\\_reactor\\_bioquimico](https://www.researchgate.net/publication/286259677_Mitigacion_del_drenaje_acido_de_mina_con_la_aplicacion_superficial_del_efluente_del_reactor_bioquimico)
- Gutiérrez, R. (2013). *Extracción del Aceite de copal y su aplicación en productos cosméticos*. Obtenido de <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/16950/25-1-16602.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- HATCO Systems. (2018). Obtenido de <http://hatcosystems.com/product-details/falling-film-evaporators/>
- HATCO Systems. (2018). *Rising Film Evaporator*. Obtenido de <http://hatcosystems.com/product-details/rising-film-evaporator/>
- Helmenstine, A. M. (2020). *Saponification definition and reaction*. Obtenido de <https://www.thoughtco.com/definition-of-saponification-605959>
- Hendricks, D. W. (2006). *Fundamentals of Water Treatment Unit Processes: Physical, Chemical and Biological*. IWA Publishing.
- Hernández, F. (2022). *Notas de clase*.
- Hidroquivir S.L. (2019). *Ósmosis inversa - Diagrama de flujo*. Obtenido de <https://hidroquivir.com/osmosis-inversa-diagrama-de-flujo/>
- Hillebrandt, N., Vormittag, P., Bluthardt, N., & Dietrich, A. (2020). *Integrated Process for Capture and Purification of Virus-Like Particles: Enhancing Process Performance by Cross-Flow Filtration*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/341621139\\_Integrated\\_Process\\_for\\_Capture\\_and\\_Purification\\_of\\_Virus-Like\\_Particles\\_Enhancing\\_Process\\_Performance\\_by\\_Cross-Flow\\_Filtration](https://www.researchgate.net/publication/341621139_Integrated_Process_for_Capture_and_Purification_of_Virus-Like_Particles_Enhancing_Process_Performance_by_Cross-Flow_Filtration)
- Hiziroglu, S. (2016). *Basics of Paper Manufacturing*. Obtenido de <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/basics-of-paper-manufacturing.html>
- Hochschule Rhein-Waal. (2015). *Module description of the study course: "Industrial Engineering B. Sc."*. Obtenido de [https://www.hochschule-rhein-waal.de/sites/default/files/documents/2015/06/22/rev\\_3\\_moduldescription\\_industrial\\_engineering\\_28052015\\_0.pdf](https://www.hochschule-rhein-waal.de/sites/default/files/documents/2015/06/22/rev_3_moduldescription_industrial_engineering_28052015_0.pdf)
- Holcim México. (2021). *Proceso del cemento*. Obtenido de <https://www.holcim.com.mx/proceso-del-cemento>

- Holmen Paper. (2021). *Paper production - from logs to chips at Holmen Paper Braviken mill*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=HZLsDPKgCUk>
- Holmen Paper. (2022). *The third step of paper production: From pulp to paper*. Obtenido de <https://www.holmen.com/en/paper/insights/paper-academy/paper-production/from-pulp-to-paper/>
- Housecroft, C. E., & Sharpe, A. G. (2006). *Química Inorgánica*. Madrid: Pearson Educación.
- Huerta, S. (2021). *Centrifugación*. Obtenido de <http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/sho/Centrifugacion-PIS.pdf>
- HVAC. (2022). *The basics of chillers*. Obtenido de <https://www.hvacinvestigators.com/webinars/the-basics-of-chillers-how-they-work-where-theyre-used-and-common-problems/>
- Ibarz, A., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2005). *Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos*. Madrid-Barcelona-México: Ediciones Mundi-Prensa.
- IDE Technologies. (2018). *Manejo de salmuera*. Obtenido de [https://www.ide-tech.com/es/solutions/desalinizacion/brine-management/?data=item\\_1](https://www.ide-tech.com/es/solutions/desalinizacion/brine-management/?data=item_1)
- Incertis, D. B. (Sin fecha). *Grasas animales para la elaboración de biodiesel*. Obtenido de [https://www.aepro.com/files/congresos/2002barcelona/ciip02\\_1338\\_1345.2011.pdf](https://www.aepro.com/files/congresos/2002barcelona/ciip02_1338_1345.2011.pdf)
- Incertis, D., Bolta, A., & Pascual, A. (2022). *Grasas animales para la elaboración de biodiesel*. Obtenido de [https://www.aepro.com/files/congresos/2002barcelona/ciip02\\_1338\\_1345.2011.pdf](https://www.aepro.com/files/congresos/2002barcelona/ciip02_1338_1345.2011.pdf)
- INEGI. (2020). *Directorio de empresas y establecimientos. México*. . Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/temas/directorio/>
- INEGI, Cámara Nacional de la Industria de la Cerveza y de la Malta. (2020). *Colección de estudios sectoriales y regionales. Conociendo la industria de la cerveza*. Obtenido de [https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/702825198428.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825198428.pdf)
- Ingeniería Química. (2019). *¿Cuál es el proceso de producción del jabón?* Obtenido de <https://www.ingenieriaquimica.net/articulos/435-cual-es-el-proceso-de-produccion-del-jabon>
- Ingeniería Química. (2021). *Proceso industrial de elaboración de aceite vegetal*. Obtenido de <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2021/04/proceso-industrial-de-elaboracion-de.html>
- Ingeniería y Maquinaria para el Jabón S.L. (2022). *Planta de secado para jabón*. Obtenido de <https://soap-machinery.com/es/planta-de-secado/#:~:text=El%20secado%20es%20una%20etapa,en%20la%20l%C3%ADnea%20e%20acabado.>
- Instituto Mexicano del Petróleo. (2013). *El IMP crea herramienta útil para cualquier procesos de recuperación de azufre*. Obtenido de <https://www.gob.mx/imp/prensa/el-imp-crea-herramienta-util-para-cualquier-procesos-de-recuperacion-de-azufre>
- Instituto Mexicano del Petróleo. (26 de Agosto de 2019). *El IMP, clave en los procesos de hidrotratamiento en las refinerías*. Obtenido de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/487985/Gaceta-224-3.pdf>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2007). *Peligro y riesgo de los residuos*. Obtenido de [http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/139/peligro\\_y\\_riesgo.html](http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/139/peligro_y_riesgo.html)
- Instituto Politécnico Nacional. (2022). *Ingeniería Industrial, Mapa Curricular 2022*. Obtenido de [https://www.sites.upiicsa.ipn.mx/uteycv/expoprofesiografica/ing\\_industrial.html](https://www.sites.upiicsa.ipn.mx/uteycv/expoprofesiografica/ing_industrial.html)

- Intercol. (2022). *Alcohol polivinílico*. Obtenido de <https://adhesive.intercol.eu/es/producten-2/koudlijmen/polyvinylalcohol/index.html#:~:text=El%20alcohol%20polivin%C3%ADlico%20forma%20una,muchos%20aceites%2C%20grasas%20y%20solventes.>
- Jenkins, S. (2017). *Facts at your fingertips: Agglomeration and Granulation*. Obtenido de <https://www.chemengonline.com/agglomeration-and-granulation/>
- JLS International. (2018). *Secador de estantes al vacío Buflovak*. Obtenido de <https://www.jls-europe.de/es/products/dryer/vacuum-shelf-dryer.html>
- Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M., Smakhtin, V., & Kang, S. (2019). *The state of desalination and brine production: A global outlook*. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/329476006\\_The\\_state\\_of\\_desalination\\_and\\_brine\\_production\\_A\\_global\\_outlook](https://www.researchgate.net/publication/329476006_The_state_of_desalination_and_brine_production_A_global_outlook)
- Junco, J. (2019). *Filtro de Mangas, Monitoreo Ambiental*. Obtenido de <https://www.monitoreoambiental.com/filtro-de-mangas/>
- Kühtz, S., Zhou, C., Albino, V., & Yazan, D. M. (2010). *Energy use in two Italian and Chinese tile manufacturers: A comparison using an enterprise input–output model*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/223881053\\_Energy\\_use\\_in\\_two\\_Italian\\_and\\_Chinese\\_tile\\_manufacturers\\_A\\_comparison\\_using\\_an\\_enterprise\\_input-output\\_model](https://www.researchgate.net/publication/223881053_Energy_use_in_two_Italian_and_Chinese_tile_manufacturers_A_comparison_using_an_enterprise_input-output_model)
- Lanza, B. (2013). *Abnormal fermentations in table-olive processing: microbial origin and sensory evaluation*. Obtenido de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3650464/>
- Lenntech. (2021). *Filtro de bolsa*. Obtenido de <https://www.lenntech.es/filtro-de-bolsa.htm>
- Lindley. (1997). *An Economic & Environmental Analysis of Chlor Alkali Production*. Obtenido de [http://www.geocities.ws/rosenberg\\_rd/tema2-3-2-a.pdf](http://www.geocities.ws/rosenberg_rd/tema2-3-2-a.pdf)
- Llanes, J. L., Cárdenas, L. Z., & Ones, O. P. (2015). *Evaluación del proceso de producción de detergente en polvo a partir de la simulación*. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v15n28/v15n28a13.pdf>
- López, M. (21 de Marzo de 2015). *Ciencia en la cocina*. Obtenido de <https://scientiablog.com/2015/03/21/ciencia-en-la-cocina-xii-bocata-de-chorizo/>
- López, M. (2015). *Ciencia en la cocina*. Obtenido de <https://scientiablog.com/2015/03/21/ciencia-en-la-cocina-xii-bocata-de-chorizo/>
- Lorenzo-Acosta, Y. (2006). *Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120664002.pdf>
- Madusanka, S. (2021). *Department of Chemical and Process Engineer*. Obtenido de <https://www.chemistryscl.com/industrial/soap-production-manufacturing-process-saponification/index.php>
- Magritep. (13 de Julio de 2020). *YouTube*. Obtenido de Máquina trituradora de agave, nopal y mezcal: <https://www.youtube.com/watch?v=2Tquxiqxsxs>
- Magritep. (2020). *YouTube*. Obtenido de Máquina trituradora de agave, nopal y mezcal: <https://www.youtube.com/watch?v=2Tquxiqxsxs>
- Maicas, S. (2020). *The Role of Yeasts in Fermentation Processes*. Obtenido de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7466055/>
- Marcilla, A. (1998). *Introducción a las Operaciones de Separación. Cálculo por etapas de equilibrio*. Publicaciones Universidad de Alicante.

- Marketizer. Information and Business by the second. (25 de Octubre de 2016). *Los tipos de mezcladores*. Obtenido de <https://www.marketizer.com/articulos/los-tipos-de-mezcladores-16423.htm>
- Martínez, J. A. (Enero de 2018). *Contaminación y remediación de suelos en Colombia: aplicación a la minería de oro*. Obtenido de ResearchGate: [https://www.researchgate.net/publication/337432986\\_Contaminacion\\_y\\_remediacion\\_de\\_suelos\\_en\\_Colombia\\_aplicacion\\_a\\_la\\_mineria\\_de\\_oro](https://www.researchgate.net/publication/337432986_Contaminacion_y_remediacion_de_suelos_en_Colombia_aplicacion_a_la_mineria_de_oro)
- Martínez, V. (2010). *Implementación de bioprocesos continuos estables para la producción de hidrógeno por fermentación oscura*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/280091758\\_Implementacion\\_de\\_bioprocesos\\_continuos\\_estables\\_para\\_la\\_produccion\\_de\\_hidrogeno\\_por\\_fermentacion\\_oscura](https://www.researchgate.net/publication/280091758_Implementacion_de_bioprocesos_continuos_estables_para_la_produccion_de_hidrogeno_por_fermentacion_oscura)
- Massó, A. (2017). *Oxidación selectiva de propano y etano empleando catalizadores basados en multicomponentes*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=156934>
- Maza, L. L., Cárdenas, L. Z., & Ones, O. P. (2019). *Análisis de componentes principales aplicado a la fermentación alcohólica*. Obtenido de [http://scielo.iics.una.py/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2409-87522019000200011#:~:text=La%20fermentaci%C3%B3n%20alcoh%C3%B3lica%20es%20un,%2C%20cepa%20utilizada%2C%20entre%20otros.](http://scielo.iics.una.py/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2409-87522019000200011#:~:text=La%20fermentaci%C3%B3n%20alcoh%C3%B3lica%20es%20un,%2C%20cepa%20utilizada%2C%20entre%20otros.)
- McCabe, W. S. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. México: McGraw Hill .
- Mech Tech Process Engineers. (2022). *Hydrogenation*. Obtenido de <https://www.mectech.co.in/hydrogenation-plant>
- Meer, T. v., Minow, B., Lagrange, B., Krumbein, F., & Rolin, F. (2015). *Filtración con tierra de diatomea*. Obtenido de <https://docplayer.es/53964714-Filtracion-con-tierra-diatomea.html>
- Mercagarden. (2022). *Tierra de diatomeas, un aliado para nuestro huerto*. Obtenido de <https://mercagarden.com/tareas-del-huerto/tierra-de-diatomeas-un-aliado-para-nuestro-huerto.html>
- Mettler Toledo AutoChem. (2017). *YouTube*. Obtenido de Introduction to Crystallization and Precipitation: <https://www.youtube.com/watch?v=noQwqUQ5S6s&t=207s>
- Ministerio del Ambiente de Ecuador. (2011). *Estudio de potenciales impactos ambientales y vulnerabilidad relacionada con las sustancias químicas y tratamiento de desechos peligrosos en el sector productivo de Ecuador*. Obtenido de La industria de los cueros (a base de sales de cromo, con agentes vegetales): <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/03/PART2.pdf>
- Ministerio del Ambiente de Ecuador. (2011). *Estudio de potenciales impactos ambientales y vulnerabilidad relacionada con las sustancias químicas y tratamiento de desechos peligrosos en el sector productivo del Ecuador*. Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/03/PART3.pdf>
- Minow, B., Lagrange, B., Krumbein, F., Rollin, F., & van der Meer, T. (2014). Retrieved from Diatomaceous Earth Filtration: [https://www.researchgate.net/publication/291439683\\_Robust\\_and\\_convenient\\_single-use\\_processing\\_The\\_superior\\_strength\\_and\\_flexibility\\_of\\_flexsafe\\_bags](https://www.researchgate.net/publication/291439683_Robust_and_convenient_single-use_processing_The_superior_strength_and_flexibility_of_flexsafe_bags)
- Miranda , R., Balea, A., Sánchez de la Blanca, E., & Carrillo , I. (2008). *Identification of Recalcitrant Stickies and Their Sources in Newsprint Production*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/50221418\\_Identification\\_of\\_Recalcitrant\\_Stickies\\_and\\_Their\\_Sources\\_in\\_Newsprint\\_Production](https://www.researchgate.net/publication/50221418_Identification_of_Recalcitrant_Stickies_and_Their_Sources_in_Newsprint_Production)

- Miranda, J. (2014). *Intercambiador de calor de tubos y coraza*. Obtenido de YouTube: [https://www.youtube.com/watch?v=7dXxcmkUS\\_c](https://www.youtube.com/watch?v=7dXxcmkUS_c)
- Molinari, L. (2021). *¿Qué es un éster metílico de ácido graso?* Obtenido de <http://panarmix.com/que-es-un-ester-metilico/>
- Montenegro, D. (2011). *Diseño de una planta a escala piloto para la recuperación con carbón activado de oro lixiviado en soluciones cianuradas*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/257308533\\_DISENO\\_DE\\_UNA\\_PLANTA\\_A\\_ESCALA\\_PILOTO\\_PARA\\_LA\\_RECUPERACION\\_CON\\_CARBON\\_ACTIVADO\\_DE\\_ORO\\_LIXIVIADO\\_EN\\_SOLUCIONES\\_CIANURADAS](https://www.researchgate.net/publication/257308533_DISENO_DE_UNA_PLANTA_A_ESCALA_PILOTO_PARA_LA_RECUPERACION_CON_CARBON_ACTIVADO_DE_ORO_LIXIVIADO_EN_SOLUCIONES_CIANURADAS)
- Montero, R. A. (2002). *Estudio de la transesterificación de aceite vegetal con metanol*. Obtenido de <https://burjcdigital.urjc.es/bitstream/handle/10115/686/PFC%20ALISEDA%20MONTERO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Montes, M. J. (2014). *"Pulque limpio"/"Pulque sucio": disputas en torno a la legitimidad y la producción social del valor*. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/rcan/v50n2/v50n2a03.pdf>
- Mundo Cuervo. (2020). *El jimador y su estilo de vida*. Obtenido de <https://www.mundocuervo.com/esp/blog/2018-07/el-jimador-y-su-estilo-de-vida>
- Myerson, A. S. (2002). *Handbook of Industrial Crystallization*. Butterworth-Heinemann.
- Nanobusiness. Información e innovación. (2020). *Área superficial específica*. Obtenido de <https://nanobusiness.com.br/es/servicios/ensaios-analises-tecnicas/area-superficial-especifica-bet/>
- Navas, J. J. (2020). *Metabolismo de la glucosa en la fermentación alcohólica*. Obtenido de [https://pintabeer.com/es/ciencia-y-tecnologia/metabolismo-de-la-glucosa-en-la-fermentacion-alcoholica/#Formacion\\_de\\_etanol\\_y\\_dioxido\\_de\\_carbono\\_a\\_partir\\_del\\_piruvato](https://pintabeer.com/es/ciencia-y-tecnologia/metabolismo-de-la-glucosa-en-la-fermentacion-alcoholica/#Formacion_de_etanol_y_dioxido_de_carbono_a_partir_del_piruvato)
- Navas, M. B. (2018). *Estudio de catalizadores sólidos heterogéneos en la transesterificación de triglicéridos para obtener biodiesel de segunda generación*. Obtenido de [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/68026/Documento\\_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/68026/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Neidigh, S. (1966). *Introduction to the Theoretical and Practical Principles of Pneumatic Conveying*. Obtenido de Neuero Corporation: <http://calliope.dem.uniud.it/CLASS/IMP-CHIM/nuero.pdf>
- Nestlé. (2022). *Cómo se fabrica el chocolate*. Obtenido de <https://nestlefamilyclub.es/articulo/como-se-fabrica-el-chocolate#>
- Nguyen, C. V., Nguyen, A. V., Doi, A., Dinh, E., Nguyen, T. V., Ejtemaei, M., & Osborne, D. (2021). *Advanced solid-liquid separation for dewatering fine coal tailings by combining chemical reagents and solid bowl centrifugation*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com.pbidi.unam.mx:2443/science/article/pii/S1383586620326459?via%3Dihub>
- Noguera, B. (2020). Obtenido de <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/10/fabricacion-jabon-proceso-industrial.html#Fabricacion-industrial-del-jabon>
- Noguera, B. (2020). *¿Qué es la saponificación?* Obtenido de Ingeniería Química: <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/07/saponificacion.html>
- Novak, D., & Jakubczyk, E. (2020). *The Freeze-Drying of Foods—The Characteristic of the Process Course and the Effect of its Parameters on the Physical Properties of Food*

- Materials*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2304-8158/9/10/1488/pdf#:~:text=Abstract%3A%20Freeze%2Ddrying%2C%20also,high%20quality%20food%20and%20pharmaceuticals>.
- Observatorio de la Energía, Tecnología e Infraestructura para el Desarrollo OETEC,. (21 de Octubre de 2019). *La gran mayoría de plantas biodiesel están paradas, trabajan a pérdida o están directamente concursadas*. Obtenido de <https://www.oetec.org/nota.php?id=4212&area=18>
- OMS. (2008). *Mercurio. Evaluación de la carga de morbilidad ambiental a nivel nacional y local*. Obtenido de [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/78130/9789243596570\\_spa.pdf;jsessionid=393F4DF3781F60E00066197CB731BDB5?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/78130/9789243596570_spa.pdf;jsessionid=393F4DF3781F60E00066197CB731BDB5?sequence=1)
- Orellana, J. (2005). *Tratamiento de las aguas. Ingeniería Sanitaria UTN-FRRO*. . Obtenido de [https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/ing\\_sanitaria/Ingenieria\\_Sanitaria\\_A4\\_Capitulo\\_06\\_Tratamiento\\_de\\_Aguas.pdf](https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/ing_sanitaria/Ingenieria_Sanitaria_A4_Capitulo_06_Tratamiento_de_Aguas.pdf)
- Ortiz, A. (2017). *Aglomeración de micropartículas de óxido de aluminio mediante curado de resina epóxica*. Obtenido de [https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/24367/1/Ortiz%20V%c3%a9lez%20Alejandra%202017%20DC%20en%20IQ\\_locked.pdf](https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/24367/1/Ortiz%20V%c3%a9lez%20Alejandra%202017%20DC%20en%20IQ_locked.pdf)
- Ortiz, J. C. (2011). *Análisis de sistemas catalíticos empleados en la obtención de biodiesel a partir de aceite de jatropha curcas*. Retrieved from <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/378/1/Juan%20Carlos%20Ortiz%20Rodriguez.pdf>
- Ortuño, M. F. (2006). *Manual práctico de aceites esenciales, aromas y perfumes*. España: AIYANA Ediciones.
- P. Gutiérrez, T. S. (2013). *Diseño del proceso de endulzamiento de gas natural. Simulación y comparación*. Obtenido de [http://www.aaiq.org.ar/SCongresos/docs/04\\_025/papers/05f/05f\\_1423\\_589.pdf](http://www.aaiq.org.ar/SCongresos/docs/04_025/papers/05f/05f_1423_589.pdf)
- Pack-EU. (2022). *Mezcladores de tornillo sinfín para productos en polvo*. Obtenido de <https://www.pack-eu.es/produkt/mezcladores-de-tornillo-sinfin-para-productos-en-polvo/>
- Panarmix. (2021). *¿Qué es un éster metílico de ácido graso?* Obtenido de <http://panarmix.com/que-es-un-ester-metilico/>
- Parikh, D. M. (2013). *Handbook of Pharmaceutical Granulation Technology*. CRC Press.
- PCC Group. (2020). *Adhesivos*. Obtenido de <https://www.products.pcc.eu/es/k/adhesivos-2/#:~:text=La%20producci%C3%B3n%20de%20este%20adhesivo,se%20privado%20as%C3%AD%20del%20an%C3%A1lisis>.
- PDG. (2018). *Cacao Harvesting & Processing: A Step By Step Explanation*. Obtenido de <https://perfectdailygrind.com/2018/02/step-step-explanation-cacao-harvesting-processing/>
- Peláez, R. (2016). *Diseño de un proceso catalítico para la obención de dimetil éter a partir de gas de síntesis en una sola etapa*. Obtenido de [https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/39154/TFM\\_RaquelPelaezFernandez.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/39154/TFM_RaquelPelaezFernandez.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Perkel, J. (2004). *The Ultracentrifuge. The Scientist*.
- Perry, R. (1997). *Perry's chemical engineers' handbook*. USA: McGraw Hill.
- Petrucchi, R. H. (2011). *Química General, principios y aplicaciones modernas*. Madrid, España.

- Phillips, T. (2019). *An explanation of the process of hydrolysis*. Obtenido de <https://www.thoughtco.com/what-is-hydrolysis-375589>
- Ponce, P. (2016). *¿Qué son las chaquetas o camisas que vemos en los tanques de acero inoxidable?* Obtenido de The Big Wine Theory: <https://thebigwinetheory.com/2016/08/22/que-son-las-chaquetas-o-camisas-que-vemos-en-los-tanques-de-acero-inoxidable/>
- Portal Académico CCH. (2017). Obtenido de <https://e1.portalacademico.cch.unam.mx/alumno/quimica1/unidad1/mezclas/disoluciones>
- Portal Académico CCH. (2017). *Definición de las mezclas*. Obtenido de <https://e1.portalacademico.cch.unam.mx/alumno/quimica1/unidad1/mezclas/definicion>
- Portal Académico CCH. (2017). *Mezclas heterogéneas*. Obtenido de <https://e1.portalacademico.cch.unam.mx/alumno/quimica1/unidad1/mezclas/mezclas/heterogeneas>
- Powder Process. (2021). *Roller presses: An overview*. Obtenido de [https://powderprocess.net/Pharma/Roll\\_Compaction.html](https://powderprocess.net/Pharma/Roll_Compaction.html)
- Pramparo, M. d. (2013). *Simulación del proceso de hidrogenación de aceite de maíz*. Obtenido de <https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/download/841/791#:~:text=Industrialmente%20la%20hidrogenaci%C3%B3n%20se%20lle>
- Prieve, D. (2018). *Unit Operations of Chemical Engineering*. Carnegie Mellon University.
- Procuraduría Federal del Consumidor. (2018). *La cerveza: más allá de la fermentación*. Obtenido de <https://www.gob.mx/profeco/documentos/la-cerveza-mas-alla-de-la-fermentacion?state=published>
- Puerta, G. I. (2010). *Fundamentos del proceso de fermentación en el beneficio del café*. Obtenido de <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt0402.pdf>
- Qi, N., Liao, S., Abuzeid, A. M., Li, J., Wu, C., Lv, M., . . . Li, G. (2020). *Effect of different floatation solutions on E. tenella oocyst purification and optimization of centrifugation conditions for improved recovery of oocysts and sporocysts*. Retrieved from <https://www-sciencedirect-com.pbidi.unam.mx:2443/science/article/pii/S0014489419302735?via%3Dihub>
- Ramírez, L. S. (25 de Enero de 2017). *Metabolismo de lípidos*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/LauraSofiaRamirez/metabolismo-de-lipidos-71382773>
- Rase, H. F. (2000). *Ingeniería de proyectos para plantas de proceso*. México: Continental.
- Revista Tecnológica Hules y Plásticos de México. (2021). Obtenido de <https://www.hulesyplasticosdemexico.com.mx/Los-Pol%EDmeros-en-la-fabricaci%F3n-de-chicles.htm>
- Riñones, F. (Julio de 2018). *Unidad de hidrotratamiento de la refinería de Repsol de A. Coruña*. Obtenido de <https://docs.google.com/document/d/1xqqSdBF6qPqmgprC0fRipsJ0IZYX1m0vGTXLVKrx7kl/edit>
- Rodas, A. (Mayo de 2012). *Análisis de parámetros microbiológicos y físico-químicos de un aceite esencial de romero obtenido por medio de la destilación por arrastre de vapor*. Obtenido de <http://biblio3.url.edu.gt/Tesis/2012/02/13/Rodas-Melisa.pdf>

- Rodríguez, J. A. (10 de Julio de 2004). *Hidrogenólisis e hidrotratamiento de residuos de vacío de petróleo tipo Maya*. Obtenido de [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/leip/rodriguez\\_m\\_ja/](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/rodriguez_m_ja/)
- Romanov, V. (2022). *Introduction to Function Block Programming in RSLogix 5000*. Obtenido de <https://www.solisplc.com/tutorials/function-block-programming>
- Romo, A. (2022). *El átomo de carbono, los hidrocarburos, otras moléculas orgánicas, su posible existencia en la tierra primitiva y en otros cuerpos celestes*. Obtenido de <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/51/htm/quimica.htm>
- Rondón, M., Díaz, Y., Fernández, E., & Tabio, D. (2017). *Obtención de biodiesel a partir de aceites de origen vegetal, "Moringa oleifera"*. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/317237316\\_Obtencion\\_de\\_biodiesel\\_a\\_partir\\_de\\_aceites\\_de\\_origen\\_vegetal\\_Moringa\\_oleifera](https://www.researchgate.net/publication/317237316_Obtencion_de_biodiesel_a_partir_de_aceites_de_origen_vegetal_Moringa_oleifera)
- Rotoplas. (2020). *Purificador de Ósmosis Inversa*. Obtenido de <https://rotoplas.com.mx/productos/purificacion/purificador-de-osmosis-inversa/>
- Rotoplas. (Sin fecha). *Purificador de Ósmosis Inversa*. Obtenido de <https://rotoplas.com.mx/productos/purificacion/purificador-de-osmosis-inversa/>
- Rye, C. W. (2016). *Metabolism without Oxygen*. Retrieved from <https://openstax.org/books/biology/pages/7-5-metabolism-without-oxygen>
- SACOME. (2019). *Intercambiadores de calor de doble tubo*. Obtenido de <https://www.sacome.com/intercambiadores-calor-doble-tubo/#:~:text=Intercambiador%20de%20calor%20industrial%20de,lodos%20y%20purnes%2C%20entre%20otros>
- Sáez, Á. S. (Junio de 2015). *Diseño de una planta de aminas para tratamiento de la corriente de hidrocarburos gaseosa procedente del reactor catalítico de lecho fluidizado (FCC) en refinería*. Obtenido de <https://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/17764/b37297661.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- SAGARPA. (2017). *Arroz mexicano*. Obtenido de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256423/B\\_sico-Arroz.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256423/B_sico-Arroz.pdf)
- SAGARPA. (2017). *Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. Cebada Grano Mexicana*. Obtenido de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257069/Potencial-Cebada.pdf>
- SaintyCo Pharma Process & Packaging. (2022). *A Definitive Guide to Fluid Bed Granulation Process*. Obtenido de <https://www.saintytec.com/fluid-bed-granulation-process/>
- SaintyCo Pharma Process & Packaging. (2022). *Wet Granulation The Ultimate Guide for Beginners and Professionals*. Obtenido de <https://www.saintytec.com/wet-granulation-the-ultimate-guide-for-beginners-and-professionals/>
- Salazar, J. A. (Abril de 2015). *Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales*. Obtenido de Revista Tecnología en Marcha: <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v28n3/0379-3982-tem-28-03-00127.pdf>
- Salazar-Jiménez, J. (2015). *Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales*. Obtenido de <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v28n3/0379-3982-tem-28-03-00127.pdf>
- Salcedo, R., Chibante, V., & Soro, I. (2007). *Laboratory, pilot and industrial-scale validation of numerically optimized reverse-flow gas cyclones*. Obtenido de [https://www.advancedcyclonesystems.com/client/files/0000000001/2007pt2\\_288.pdf](https://www.advancedcyclonesystems.com/client/files/0000000001/2007pt2_288.pdf)

- Salinas, E., Rivera, I., Carrillo, R., Patiño, F., Hernández, J., & Hernández, L. (2004). *Mejora del proceso de cianuración de oro y plata, mediante la preoxidación de minerales sulfurosos con ozono*. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0583-76932004000400021](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0583-76932004000400021)
- Sánchez, M. A. (2013). *Obtención de alcoholes grasos insaturados mediante hidrogenación selectiva de ácidos y ésteres en catalizadores de Ru-Sn y Ru-Ge soportados*. Obtenido de <https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8443/bitstream/handle/11185/640/tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=n>
- Schwartz, J. J. (2020). *Chromatography. Salem Press Encyclopedia of Science*.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (13 de Septiembre de 2017). *Celebremos el Día Internacional del Chocolate*. Obtenido de <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/celebremos-el-dia-internacional-del-chocolate>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2015). *Arroz, la blanca joya de la gastronomía*. Obtenido de <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/arroz-la-blanca-joya-de-la-gastronomia#:~:text=El%20arroz%20es%20uno%20de,destacan%20el%20calcio%20y%20hierro>.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019). *La magia detrás de la producción del pulque*. Obtenido de <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/la-magia-detras-de-la-produccion-del-pulque>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019). *Producción de cerveza en México: una historia para celebrar*. Obtenido de <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/produccion-de-cerveza-en-mexico-una-historia-para-celebrar?idiom=es>
- Secretaría de Economía. (2013). *Industria Farmacéutica*. Obtenido de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62881/130820\\_DS\\_Farmaceutica\\_ESP.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62881/130820_DS_Farmaceutica_ESP.pdf)
- Secretaría de Economía. (Diciembre de 2017). *Perfil de Mercado de la Diatomita*. Obtenido de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/287797/Perfil\\_Diatomita\\_2017.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/287797/Perfil_Diatomita_2017.pdf)
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2016). *Producción sustentable de chicle en Campeche*. Obtenido de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/produccion-sustentable-de-chicle-en-campeche?idiom=es#:~:text=Inicia%20temporada%20de%20producci%C3%B3n%20de,para%20la%20producci%C3%B3n%20del%20chicle>.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2020). *Guía para la elaboración de la cédula de operación anual. Industria Química*. Obtenido de [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/retc/guias/g\\_qumc.pdf](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/retc/guias/g_qumc.pdf)
- Sela, G. (28 de Septiembre de 2018). *El carbón activado en tratamiento de aguas*. Obtenido de <https://croipaia.com/es/blog/carbon-activado-en-tratamiento-de-aguas/>
- SEMARNAT. (2007). *Manual para la evaluación técnica y normativa de la LAU*. Ciudad de México.
- Senol, A., & Aydin, A. (2005). *Solid-liquid extraction of caffeine from tea waste using battery type extractor: Process optimization*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com.pbidi.unam.mx:2443/science/article/pii/S0260877405003055?via%3Dihub>

- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2018). *Maguey pulquero: el estado de Hidalgo destacó en 2017 con 69.6% de la producción nacional*. Obtenido de <https://www.gob.mx/siap/articulos/maguey-pulquero?idiom=es>
- Shahabi, M. P., McHugh, A., Anda, M., & Ho, G. (2013). *Environmental life cycle assessment of seawater reverse osmosis desalination plant powered by renewable energy*. Obtenido de <https://www-sciencedirect-com.pbidi.unam.mx:2443/science/article/pii/S0960148113006289?via%3Dihub>
- Sherwin, P. (2012). *Typical Industrial Applications for Chillers*. Obtenido de <https://www.process-cooling.com/articles/86731-typical-industrial-applications-for-chillers>
- Sierra, P. (2019). *Desarrollo de una sopa instantánea a partir de una variedad de cubio (Tropaleum tuberosum)*. Obtenido de [https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1267&context=ing\\_alimentos](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1267&context=ing_alimentos)
- Silla, H. (2003). *Chemical Process Engineering*. USA: Stevens Institute of Technology.
- Skogestad, S., & Morari, M. (1988). *Understanding the Dynamic Behavior of Distillation Columns*. Pasadena, California: California Institute of Technology.
- Sölken, W. (2008). *Distillation Column Internals*. Obtenido de Explore the World of Piping: [http://www.wermac.org/equipment/distillation\\_part2.html](http://www.wermac.org/equipment/distillation_part2.html)
- Sosa, P. (2007). *Conceptos base de la química*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Speight, J. G. (2017). *Environmental Organic Chemistry for Engineers*. United Kingdom: Butterworth-Heinemann. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/dehydrogenation>
- Spraying Systems Co. (2022). *Spray Dry Nozzles*. Obtenido de [https://www.spray.com/es-mx/-/media/dam/industrial/usa/sales-material/product-market-bulletin/b695b\\_spraydry\\_bulletin.pdf](https://www.spray.com/es-mx/-/media/dam/industrial/usa/sales-material/product-market-bulletin/b695b_spraydry_bulletin.pdf)
- SPX Flow. (2015). *Separación en la industria láctea*. Obtenido de [https://www.spxflow.com/assets/pdf/SS\\_Separation\\_Dairy\\_101\\_03\\_04\\_2015\\_ES.pdf](https://www.spxflow.com/assets/pdf/SS_Separation_Dairy_101_03_04_2015_ES.pdf)
- Statista Research Department. (21 de Octubre de 2021). *México: producción de tequila 1995-2020*. Obtenido de <https://es.statista.com/estadisticas/1092130/produccion-tequila-mexico/>
- Statista Research Department. (2021). *México: producción de tequila 1995-2020*. Obtenido de <https://es.statista.com/estadisticas/1092130/produccion-tequila-mexico/>
- Stea, M. (2019). *Ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S): estructura, propiedades, usos, importancia*. Obtenido de <https://www.lifeder.com/acido-sulfhidrico/>
- Steel Horse Leather. (2021). *Leather Tanning: The Tanning Process Explained*. Obtenido de <https://steelhorseleather.com/blogs/the-journal/leather-tanning-process-explained>
- Stewart, G. G., & Priest, F. G. (2006). *Handbook of Brewing*. Florida: CRC Press.
- Subsecretaría de Alimentos y Bebidas, Alimentos Argentinos. (2021). *Diagramas Industriales*. Obtenido de <http://www.alimentosargentinos.gob.ar/HomeAlimentos/Diagramas%20Industriales/>
- Sutton, I. S. (2010). *Operational Integrity Management*. William Andrew.
- Taichang Transmission Machinery. (2021). *Disc Chippers: The Ultimate Guide*. Obtenido de <https://www.tcpel.com/disc-chippers-ultimate-guide/>

- Tama Aernova. (2021). *Principio de funcionamiento de filtros de mangas y cartuchos*. Obtenido de <https://www.tamaaernova.com/es/blog/detail/operation-principle-of-baghouse-and-cartridges-filters.html>
- Tecfilter. (2021). *Los principios de filtrado del aire*. Obtenido de <https://www.tecfilter.com/boletin-los-principios-del-filtrado-del-aire/>
- Tecnoética . (20 de Septiembre de 2012). *Fermentación*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/TECNOETICA/FERMENTACION-14360962>
- Tequila Sauza. (2021). *Cómo se hace el tequila*. Obtenido de <https://www.casasauza.com/fabricacion-tequila#pillar1>
- Tertre, C. (Noviembre de 2021). *Optimización del sistema de filtración y estabilidad coloidal para una cervecera multiproducto de tamaño medio*. Obtenido de <https://zaguan.unizar.es/record/6459/files/TAZ-PFC-2011-605.pdf>
- The Editors of Encyclopaedia Britannica. (Febrero de 2012). *Hydrogenation*. Obtenido de 24: <https://www.britannica.com/science/hydrogenation>
- The Engineering Mindset. (2017). *Conceptos básicos sobre enfriadores: cómo funcionan*. Obtenido de YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=0rzQhSXVq60>
- The Maltsters' Association of Great Britain. (2022). *How Malt is Made*. Obtenido de <https://www.ukmalt.com/uk-malting-industry/how-malt-is-made/>
- TIMSA-Técnica e Ingeniería de Mezclas. (2022). *Agitadores industriales*. Obtenido de <https://www.timsa.com/agitadores-industriales/>
- Tipos De. (13 de Diciembre de 2016). *Tipos de diagramas*. Obtenido de <https://www.tiposde.com/diagramas.html>
- Titilayo, A. (2021). *Gas absorption (packed column and tray towers)*. Obtenido de [https://pages.mtu.edu/~fmorriso/cm3120/TitilayoAkinseye\\_2021\\_gas%20absorption.pdf](https://pages.mtu.edu/~fmorriso/cm3120/TitilayoAkinseye_2021_gas%20absorption.pdf)
- Tojo, R., Leis, R., Barros, J., & Prado, M. (2006). *Productos lácteos fermentados, Asociación Española de Pediatría*. Obtenido de <https://www.analesdepediatria.org/es-productos-lacteos-fermentados-articulo-13092366>
- Toth, A. J. (2020). *Modelling and Optimisation of Multi-Stage Flash Distillation and Reverse Osmosis for Desalination of Saline Process Wastewater Sources*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/344432429\\_Modelling\\_and\\_Optimisation\\_of\\_Multi-Stage\\_Flash\\_Distillation\\_and\\_Reverse\\_Osmosis\\_for\\_Desalination\\_of\\_Saline\\_Process\\_Wastewater\\_Sources](https://www.researchgate.net/publication/344432429_Modelling_and_Optimisation_of_Multi-Stage_Flash_Distillation_and_Reverse_Osmosis_for_Desalination_of_Saline_Process_Wastewater_Sources)
- TP Laboratorio Químico. (2022). *¿Qué es la centrifugación?* Obtenido de <https://www.tplaboratorioquimico.com/laboratorio-quimico/procedimientos-basicos-de-laboratorio/centrifugacion.html>
- Transporte de sólidos*. (2015). Obtenido de [http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/08\\_Apunte%20TteSolidos.pdf](http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/08_Apunte%20TteSolidos.pdf)
- Transporte neumático: una nueva gama para el movimiento de polvos, gránulos y sólidos*. (Julio de 2018). Obtenido de <https://www.delfinvacuums.com/es/news/transporte-neumatico-una-nueva-gama-para-el-movimiento-de-polvos-grAnulos-y-sOidos>
- Turatti Group Food Processing Machinery. (2022). *Eco Dryer/ Túnel de secado en continuo*. Obtenido de <https://home.turatti.com/es/macchina/eco-dryer/#:~:text=El%20t%C3%BAnel%20de%20secado%20de,de%20la%20fase%20de%20lavado.&text=Con%20el%20fin%20de%20reducir,un%20sistema%20de%20refrigeraci%C3%B3n%20dedicado.>

- U.S. Environmental Protection Agency. (1993). *Hydrochloric Acid Production*. Obtenido de [https://www.epa.gov/sites/production/files/2020-09/documents/final\\_background\\_document\\_for\\_hydrochloric\\_acid\\_section\\_8.6.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2020-09/documents/final_background_document_for_hydrochloric_acid_section_8.6.pdf)
- Ubach, A. (2020). *Vacunas y liofilización*. Obtenido de <https://comserpharma.com/vacunas-y-liofilizacion/>
- Universidad Autónoma Metropolitana. (2022). *Programa de estudios. Procesos Físicos Industriales*. Obtenido de <https://dcbi.azc.uam.mx/media/Licenciaturas/Industrial/PlanesProgEstudio/TBP/1137019.pdf>
- Universidad de Almería. (2009). *Ingeniería Química*. Obtenido de [https://w3.ual.es/portales/ingenieriaquimica/ing\\_quimica\\_def.html](https://w3.ual.es/portales/ingenieriaquimica/ing_quimica_def.html)
- Universidad de Granada. (Sin fecha). *Secado por liofilización*. Obtenido de <http://fciencias.ugr.es/practicadocentes/wp-content/uploads/guiones/SecadoPorLiofilizacion.pdf>
- Universidad de Palermo. (2022). *Plan de Estudios - Ingeniería Industrial*. Obtenido de [https://www.palermo.edu/ingenieria/ingenieria\\_industrial/plan\\_estudio.html#](https://www.palermo.edu/ingenieria/ingenieria_industrial/plan_estudio.html#)
- Universidad Distrital Francisco José Caldas. (2021). *Plan de Estudios-Ingeniería Industrial*. Obtenido de [http://ingenieria.udistrital.edu.co/web/15plan\\_estudios.html](http://ingenieria.udistrital.edu.co/web/15plan_estudios.html)
- Universidad Nacional de la Plata. (2018). *Planilla de actividades curriculares - Ingeniería Industrial*. Obtenido de <https://www.ing.unlp.edu.ar/sitio/academica/asignaturas/index.php>
- Universidad Politécnica de Cartagena. (2005). *Proyecto Fin de Carrera. Dsiseño de una Columna de DME*. Obtenido de <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/137/Anexo+5+diagramas+de+proceso.pdf?sequence=4>
- Universidad Politécnica de Cartagena. (Noviembre de 2021). *Tecnología mineralúrgica*. Obtenido de <https://ocw.bib.upct.es>
- UNLP, U. N. (2020). *Química Orgánica I. Extracción*. Obtenido de <https://www.ing.unlp.edu.ar/catedras/index.php>
- UPM - The Biofore Company. (2022). *How do we make pulp?* Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=UwJGizHtWXo>
- Uribe, E., Lemus, R., Pasten, A., Astudillo, S., Vega-Gálvez, A., Puente-Díaz, L., & Di Scala, K. (2014). *Dehydrated olive-waste cake as a source of high value- added bioproduct: Drying kinetics, physicochemical properties and bioactive compounds*. Retrieved from [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-58392014000300007](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-58392014000300007)
- Valiente, A. (2010). *Absorción*. Obtenido de <https://docplayer.es/72750591-Absorcion-antonio-valiente-barderas-facultad-de-quimica-unam-c-u-mexico-d-f.html>
- van Loveren, C. (2013). *Toothpastes*. Amsterdam: Karger.
- Vázquez, H., & Dacosta, O. (2007). *Fermentación alcohólica*. Obtenido de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-77432007000400004](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432007000400004)
- Vecina, P. (12 de Abril de 2015). *Números de oxidación del carbono*. Obtenido de Vecina del Picasso : <https://vecinadelpicasso.wordpress.com/2015/04/12/numeros-de-oxidacion-del-carbono/>
- Voidarou, C., Antoniadou, M., Rozos, G., Tzora, A., Skoufos, I., Varzakas, T., . . . Bezirtzoglou, E. (2020). *Fermentative Foods: Microbiology, Biochemistry, Potential Human Health*

- Benefits and Public Health Issues*. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2304-8158/10/1/69/pdf>
- Voidarou, C., Antoniadou, M., Rozos, G., Tzora, A., Skoufos, I., Varzakas, T., . . . Bezirtzoglou, E. (2020). *Fermentative Foods: Microbiology, Biochemistry, Potential Human Health Benefits and Public Health Issues*. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/348049944\\_Fermentative\\_Foods\\_Microbiology\\_Biochemistry\\_Potential\\_Human\\_Health\\_Benefits\\_and\\_Public\\_Health\\_Issues](https://www.researchgate.net/publication/348049944_Fermentative_Foods_Microbiology_Biochemistry_Potential_Human_Health_Benefits_and_Public_Health_Issues)
- Vos, V. (2017). *Reporte Informativo. El Oro: peligrosamente precioso*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/profile/Vincent\\_Vos/publication/321808548\\_Reporte\\_Informativo\\_El\\_Oro\\_Peligrosamente\\_Precioso/links/5a32ff99458515afb667d19b/Reporte-Informativo-El-Oro-Peligrosamente-Precioso.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Vincent_Vos/publication/321808548_Reporte_Informativo_El_Oro_Peligrosamente_Precioso/links/5a32ff99458515afb667d19b/Reporte-Informativo-El-Oro-Peligrosamente-Precioso.pdf)
- Wanamei. (2022). *¿Cómo funciona la retorta Anamei?* Obtenido de <https://wanamei.files.wordpress.com/2015/06/triptico-page-2.pdf>
- Wang, L., Yang, Z., Ma, L., Peng, C., Chen, E., & Li, Y. (2021). *Treatment of CS<sub>2</sub> in waste gas from rubber refining by gas cyclone-liquid jet separator*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/pbidi.unam.mx:2443/science/article/pii/S1383586621010339?via%3Dihub>
- Water Station. (Sin fecha). *Ósmosis inversa: ventajas y desventajas*. Obtenido de <https://waterstation.mx/agua-y-salud/osmosis-inversa-ventajas-y-desventajas/>
- Will, K. K. (2019). *Make Your Own Soap*. Obtenido de <https://search-ebSCOhost-com.pbidi.unam.mx:2443/login.aspx?direct=true&db=edsgsc&AN=edsgcl.571514957&lang=es&site=eds-live>
- Yamane, O., Correa, F., & Takako, R. (2000). *Method for the manufacture of toothpaste*. Obtenido de <https://patents.google.com/patent/US6149894A/en>
- Zanbak, C. (2012). *Heap leaching technique in mining. Euromines- The European Association of Mining Industries, Metal Ores & Industrial Minerals*. Obtenido de <http://www.euromines.org/files/mining-europe/mining-techniques/batforheapleaching-feb2013-c.zanbak-euromines.pdf>
- Zimmerman, A. (2022). *Process Flow Diagrams*. Obtenido de <https://www.behance.net/gallery/25241231/Process-Flow-Diagrams>

## Material audiovisual

- **Reducción de tamaño. Agave.** Magritep. (13 de Julio de 2020). YouTube. Obtenido de Máquina trituradora de agave, nopal y mezcal: <https://www.youtube.com/watch?v=2Tquxiqsxhs>
- **Cristalización.** Mettler Toledo AutoChem. (2017). YouTube. Obtenido de Introduction to Crystallization and Precipitation: <https://www.youtube.com/watch?v=noQwqUQ5S6s&t=207s>
- **Ósmosis inversa.** Econssa Chile S.A. (2018). YouTube. Obtenido de Planta desalinizadora de agua de mar Atacama: <https://www.youtube.com/watch?v=NrEbjqPOAk8>
- **Intercambiador de calor.** Miranda, J. (2014). Intercambiador de calor de tubos y coraza. Obtenido de YouTube: [https://www.youtube.com/watch?v=7dXxcmkUS\\_c](https://www.youtube.com/watch?v=7dXxcmkUS_c)
- **Chiller.** The Engineering Mindset. (2017). Conceptos básicos sobre enfriadores: cómo funcionan. Obtenido de YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=0rzQhSXVq60>