

3.3) CONTAMINACIÓN DEL SUELO

3.3.1) Principales características del suelo:

El suelo constituye el soporte material y la fuente de alimentos para el desarrollo de los seres vivos que habitan en él. El suelo es una mezcla variable de partículas minerales, material orgánico, agua y aire. Se origina debido a la desintegración física de las rocas subyacentes, en un proceso de erosión muy lento, disgregándose en pequeños fragmentos. Los cambios de temperatura y pH ayudan al desarrollo de este proceso dinámico, cuyo resultado final es la liberación de los diferentes nutrientes requeridos para el crecimiento de las plantas y otros organismos que habitan allí.

Los residuos orgánicos generados por la actividad viviente se van mezclando con los componentes originales del suelo, incrementando el contenido orgánico de éste. Un suelo maduro se forma después de cientos de años en que los diferentes procesos físicos, químicos y biológicos logran un contenido de materia orgánica significativo, mezclado con las finas partículas provenientes de la roca madre. Los espacios entre las partículas están llenos de agua y gases. La porosidad y la textura del suelo son características fundamentales y determinan la disponibilidad de nutrientes para las plantas y animales del suelo.

Una composición típica del suelo, muestra un contenido de sólidos de aproximadamente 50% en volumen, mientras que el resto es una mezcla de agua y aire. Lejos de tener una estructura homogénea, existe un perfil vertical de composición química y estructura física que, en forma simplificada, puede considerarse compuesto por:

- En la zona superior, de un espesor que en general es de unos pocos centímetros, se encuentra la mayor fracción de materia orgánica (llamado *horizonte A*). Consta de los restos de plantas y otros organismos que están siendo lentamente degradados a materia orgánica finamente dividida, en un proceso de formación de *humus*, a través de la acción de microorganismos saprófitos (bacterias y hongos) y de artrópodos. Su espesor es de unos pocos centímetros, usualmente en el rango de 5 a 25 cm, con un contenido de carbono orgánico entre 1 y 6%. En suelos maduros, este horizonte presenta estratos que reflejan diferentes grados de progreso en el proceso de degradación de los organismos muertos.
- Bajo la capa superior se encuentra el *horizonte B* o *subsuelo*, formado por los productos de las alteraciones de las rocas, además de material orgánico y mineral que lixivia desde la zona superficial. Además, se encuentran compuestos inorgánicos que se han derivado de la descomposición de la materia orgánica. Su espesor está en el rango 30 a 100 cm.
- La capa más profunda, llamada *horizonte C*, está formada por material disgregado procedente del fondo rocoso, con un alto contenido mineral. En

muchos casos esta materia madre pudo haber sido transportada desde otros sitios por gravedad (depósitos coluviales), por las aguas (depósitos aluviales), por glaciares (depósitos glaciales) o por vientos (depósitos eólicos). Los suelos transportados suelen ser muy fértiles, como lo demuestran las ricas tierras agrícolas en las zonas de delta de los grandes ríos. Su espesor puede llegar hasta unos 30 m de profundidad.

El espesor y las características de cada horizonte, dependen de las condiciones climáticas y de las distintas situaciones topográficas. En las praderas, la formación de humus es rápida, mientras que la mineralización es lenta, ya que los pastos tienen una vida muy corta, acumulándose grandes cantidades de materia orgánica que se pudre y humifica con rapidez. En los bosques, en cambio, las hojas y raíces se degradan con mayor lentitud, pero la mineralización es más rápida, por lo que la capa de humus es delgada.

Los suelos con pendientes pronunciadas, tienden a tener horizontes A y B muy delgados debido a la erosión. Por su parte, en las tierras con mal drenaje, el agua lixivia con rapidez los materiales y los lleva a capas más profundas, donde precipitan formando una capa dura de mineral impenetrable para las raíces de las plantas, para los animales o el agua.

En promedio, el agua constituye alrededor de 20 a 30% en volumen de la composición del suelo y se encuentra ligada a las partículas que están en la zona superior del suelo, o bien como agua libre en las zonas inferiores (es decir, agua subterránea). Se debe tener presente que el contenido de agua del suelo puede variar significativamente desde una condición casi seca hasta la saturación, dependiendo de las condiciones climáticas. Por otra parte, el aire contenido en el suelo se encuentra en pequeños poros existentes en los horizontes A y B, con un significativo contenido de CO_2 y alrededor de 15% de O_2 , producto de la actividad respiratoria de los microorganismos del suelo. Una parte importante del CO_2 generado se disuelve en el agua del suelo, acidificándola; ello contribuye a la disolución de algunos carbonatos presentes en el subsuelo, principalmente, CaCO_3 . En los horizontes más profundos, la ausencia de O_2 favorece el desarrollo de los procesos anaerobios que generan CH_4 , H_2S , CO_2 y ácidos orgánicos.

Las partículas inorgánicas del suelo, principalmente aquellas de unos pocos μm , presentan una gran área superficial para adsorber agua y nutrientes. Generalmente, las partículas más pequeñas están compuestas por arcillas (es decir, óxidos de silicio y aluminio hidratados). Los iones metálicos, como el Ca^{+2} , K^+ , Na^+ , Mg^{+2} y otros iones esenciales, que están presentes en las partículas del suelo, son liberados cuando se encuentran presentes iones H^+ , en un proceso de intercambio iónico que es muy importante en el suministro de iones para las plantas. Los principales minerales que componen el suelo son silicatos que provienen de la disgregación de las rocas ígneas y metamórficas. Otros minerales que también se encuentran en grandes proporciones son los óxidos de hierro, óxidos de manganeso, titanio, aluminio, zinc, etc., y los carbonatos (principalmente de calcio).

La materia orgánica del suelo consiste de plantas parcialmente degradadas, organismos microscópicos y humus, resultante de la acción de hongos y bacterias sobre los materiales lignocelulósicos.

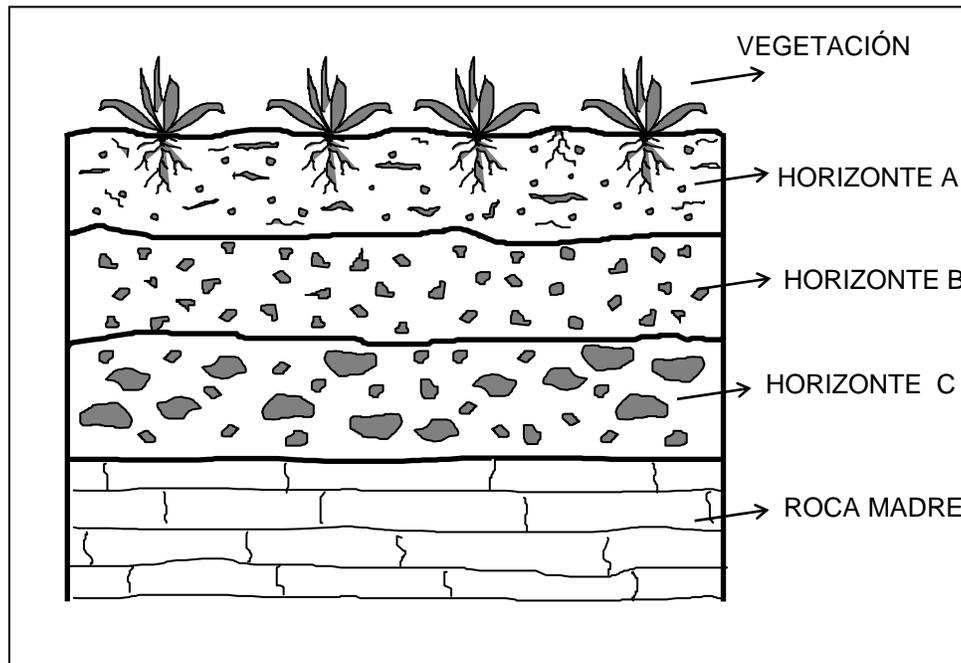


FIGURA 3.12: PERFIL ESQUEMÁTICO DE UN SUELO

Erosión de suelos

La erosión es un proceso natural donde la acción del viento, el agua y otros agentes meteóricos, tiende a modificar el relieve estructural y, finalmente, a destruirlo. El agente principal de erosión es el agua corriente, debido a su alta capacidad como solvente, como medio para transporte de material de energía.

Los factores que condicionan la erosión son:

- El clima, ya que determina las cantidades de agua que circulan por el suelo, así como los regímenes de viento.
- Las condiciones estructurales de un terreno, que fijan las pendientes e influyen sobre la dirección de escurrimiento del agua.
- La naturaleza de las rocas sobre las que ejerce la acción, el agua y el aire.

La erosión del suelo genera una reducción de su capacidad productiva potencial, ya que se elimina el soporte que permite la supervivencia de las comunidades bióticas terrestres. Generalmente, los suelos comienzan a erosionarse debido a la eliminación de su cubierta vegetal protectora, como resultado de procesos naturales o acciones humanas (incendios forestales, tala abusiva, deforestación intencional, pastoreo abusivo, agotamiento y abandono de tierras agrícolas, actividades industriales y mineras, etc.). La recuperación de un suelo erosionado, es difícil y lenta, requiriendo cientos o miles de años para que se formen unos pocos centímetros de suelo. En este sentido, la reforestación intensiva de áreas erosionadas ha demostrado ser muy efectiva para detener los procesos erosivos y recuperar terrenos improductivos.

TABLA 3.9: TIPOS DE SUELOS DE ACUERDO A SUS CARACTERÍSTICAS

TIPO DE SUELO	CARACTERÍSTICAS
Podzol	Abundante material vegetal en el horizonte A, arenoso y ácido, con alto predominio de humus (color oscuro). El horizonte B es rico en material coloidal, que son arrastrados hacia las zonas profundas. Característico de climas fríos y húmedos.
Chernozen	El horizonte A es rico en humus y en óxidos de fierro (color pardo-amarillo). El horizonte B contiene carbonato de calcio. Característico de regiones húmedas con veranos cálidos.
Lateritas	El horizonte A es casi inexistente, mientras que el horizonte B tiene un alto contenido de óxidos de fierro y alumina (color rojizo). Característico de regiones tropicales de clima cálido y húmedo.
Suelos desérticos	El horizonte A es de color gris claro. El horizonte B contiene depósitos de carbonato de calcio. Característico de regiones con clima desértico.

TABLA 3.10: CAPACIDAD DE USO DEL SUELO(*)

CLASE DE SUELO	CARACTERÍSTICAS Y USO RECOMENDADO
I	Suelos profundos, fáciles de trabajar, casi planos; sin escurrimiento superficial; sin riesgos para cultivos. Se requiere uso de fertilizantes, cubiertas de residuos y rotación de cultivos para mantener la fertilidad y estructura del suelo.
II	Suelos productivos de pendientes y profundidad moderadas; ocasional escurrimiento superficial; pueden requerir drenaje; moderado riesgo de daños cuando son cultivados; uso de rotaciones; prácticas especiales de cultivos para controlar erosión.
III	Suelos de moderada fertilidad sobre pendientes moderadas, sujetos a erosión más severa; sujetos a severos riesgos de daños por lo que se debe mantener una adecuada cobertura vegetal.
IV	Buenos suelos de pendientes fuertes, sujetos a severa erosión; severos riesgos de daños por lo que deben ser cultivados sólo ocasionalmente
V	Tierras muy pedregosas para cultivos; sujetas a erosión suave con manejo apropiado; podrían ser usadas para praderas o forestal, pero el pastoreo debe ser regulado para prevenir que la cobertura vegetal sea destruida.
VI	Suelos delgados sobre pendientes fuertes; uso de pastoreo o forestal; pastoreo debe ser regulado. Si la cobertura forestal es destruida, el uso debe ser restringido hasta que sea restablecida.
VII	Pendientes fuertes, suelos erosionables y delgados; también incluye tierras pantanosas; severo riesgo de daños cuando es usada para pastoreo o forestal; se debe aplicar manejo forestal o pastoril estricto.
VIII	Pendientes muy fuertes; reserva para vida silvestre, recreación limitada y conservación de cuencas hidrográficas.

(*) *Sistema del U.S. Department of Agriculture (EEUU)*

3.3.2) Contaminación de Suelos

Los residuos depositados o abandonados en el suelo presentan diferentes características físicas y químicas. Más aún, los residuos se pueden encontrar ubicados sobre la superficie del suelo o enterrados bajo tierra. Una vez depositados en el suelo, los residuos están sujetos a transformaciones, debido a los procesos físicos, químicos y biológicos naturales, lo que puede facilitar su transporte, dependiendo de las características de los contaminantes primarios y secundarios, y de las características geoquímicas del medio.

A continuación se describen algunos de los principales contaminantes primarios del suelo, derivados de la actividad humana.

- **Residuos Orgánicos Biodegradables**

Incluyen una amplia gama de residuos derivados de la actividad doméstica o de actividades similares donde no se generen compuestos tóxicos. Contienen restos de alimentos y otros materiales de origen animal y vegetal. Los compuestos sólidos biodegradables pueden sufrir degradación anaeróbica, debido a la acción de microorganismos, bajo condiciones de pH, temperatura y humedad adecuadas, generando compuestos volátiles, líquidos orgánicos e inorgánicos y humus.

- **Residuos Peligrosos**

Frecuentemente, provienen de fuentes industriales, hospitales, laboratorios químicos y bioquímicos, agrícolas y forestales. Incluyen compuestos sólidos, líquidos y gaseosos (presentes en contenedores) desechados en el suelo, cuya composición química, forma de disposición y concentración constituyen un peligro para la salud y seguridad de las personas y, además, representan un potencial de daño ambiental significativo. El rango de compuestos orgánicos e inorgánicos que caen dentro de esta categoría es amplísimo, y entre estos se encuentran, solventes orgánicos, biocidas, compuestos aromáticos, compuestos halogenados, metales pesados, hidrocarburos, cianuros inorgánicos, isocianatos, agentes patógenos y otros agentes biológicamente activos, etc.. Los peligros asociados a estos residuos se deben a sus propiedades químicas, físicas y biológicas, que les confieren características de toxicidad, inflamabilidad, corrosividad y reactividad. En los países industrializados existe una estricta legislación para controlar la disposición de estos residuos.

- **Residuos Estables:**

Generalmente, se originan a partir de obras de demolición, reparación y construcción de viviendas y caminos, en la actividad doméstica, en oficinas, comercio, y en algunas actividades industriales. Incluyen todos aquellos materiales, sólidos y líquidos, que presentan una alta estabilidad física y química, bajo las condiciones ambientales normales, tales como: desechos cerámicos, ladrillos, madera, vidrios, mortero, restos de cables eléctricos, restos de estructuras, papeles, cartones, plásticos, etc..

3.3.3) Transporte de los Contaminantes en el Suelo

Por sí mismo, el suelo no es un vector importante de dispersión de contaminantes, pero en combinación con la acción del aire y del agua puede constituir un importante foco de emisión de contaminación.

La movilidad y destino final de los compuestos del suelo depende de varios factores, entre los cuales destacan; la existencia, profundidad y dirección de escurrimiento de la napa freática, la porosidad, la temperatura, la capacidad de adsorción e intercambio iónico de las partículas del suelo, el contenido de agua y aire, y la presencia de organismos vivos.

Si el residuo sólido se mantiene en fase sólida y pasa a formar parte integral de la matriz del suelo, su movilidad será similar a la del resto de las partículas del suelo. Sin embargo, aquellos contaminante primarios y secundarios que estén en fase líquida o que sean volátiles bajo las condiciones ambientales, podrán ser transportados fácilmente por el agua y el aire:

- Los contaminantes solubles en agua presentes en el suelo son transportados superficialmente por las aguas lluvia hacia los ríos, lagos y el mar, o se infiltran hacia el interior del suelo hasta, eventualmente, contaminar un acuífero subterráneo. Por ejemplo, los compuestos orgánicos de bajo peso molecular (ácidos, alcoholes, aldehídos), generados por la actividad anaeróbica sobre residuos orgánicos biodegradables, son lixiviados por las aguas lluvia, constituyendo un importante foco de contaminación acuática.
- Aquellos contaminantes que sean volátiles, tales como hidrocarburos, compuestos orgánicos aromáticos, mercaptanos, aminas volátiles, NH_3 , H_2S y CH_4 , pueden ser transferidos al aire y transportados hacia otros lugares. La volatilización es favorecida por condiciones de alta temperatura y fuertes vientos. Generalmente, los compuestos volátiles son contaminantes secundarios derivados de la actividad biológica en el suelo o de procesos químicos de fotooxidación.

El transporte de los contaminantes en el aire y en medio fluvial ya fue descrito en secciones anteriores, por lo que no será revisado aquí. A continuación, se entregan antecedentes generales sobre el transporte de los contaminantes disueltos en los acuíferos subterráneos.

• Transporte Vía Aguas Subterráneas

Las aguas subterráneas son la mayor reserva de agua continental y una importante fuente de agua para consumo humano. Se originan debido a la infiltración directa de las lluvias, o bien a partir de las aguas de lagos y ríos que escurren a través de grietas y poros de las rocas, hasta alcanzar un nivel impermeable. La acumulación de aguas subterráneas es altamente dependiente de las características geológicas (por ejemplo, rocas porosas o fracturadas que

contienen agua) y se pueden distinguir diferentes tipos de acuíferos :

Acuíferos libres: consiste en una zona permeable saturada de agua, basada sobre un estrato impermeable. Sobre dicha zona existe una zona permeable no saturada de agua, donde los poros y grietas contienen agua y aire. El agua en la superficie del acuífero está a presión atmosférica.

Acuíferos confinados: la roca permeable saturada de agua queda confinada entre dos capas impermeables, de modo que la presión del agua en la superficie del acuífero es mayor que la atmosférica.

El transporte de contaminantes en las aguas subterráneas depende de las condiciones de flujo del sistema. El flujo volumétrico de agua subterránea, F , a través de un área transversal A , se puede modelar de acuerdo a la ley de Darcy:

$$F = K A \frac{dh}{dx}$$

donde K es la conductividad hidráulica (o coeficiente de conductividad) y dh/dx es el gradiente hidráulico. La conductividad hidráulica puede variar en varios órdenes de magnitud para diferentes tipos de materiales; algunos valores ilustrativos de K se presentan a continuación:

MATERIAL	K (m/día)
Arcilla	0,0004
Arena	40
Pedregoso	4.000
Caliza densa	0,04
Granito, cuarzo	0,0004

La velocidad a la cual se transporta un contaminante disuelto en un acuífero, v , se puede estimar en base a la relación de Darcy, tomando en consideración la porosidad del medio (Φ , fracción de volumen de poros respecto del volumen total):

$$v = \frac{F}{A \Phi}$$

Sin embargo, en la realidad puede existir una significativa dispersión, debido a la tortuosidad del medio poroso y a los efectos de la adsorción del contaminante con la superficie de las partículas del suelo. Estos fenómenos son difíciles de modelar, debido a su gran complejidad y a la naturaleza altamente heterogénea del suelo.

3.4) TOXICIDAD

*¿Existe en la Naturaleza alguna sustancia que no sea venenosa?
Todas las sustancias son un veneno, y sólo su dosis determina que no lo sean.*

Desde que Paracelsus, a comienzos del siglo XVI, escribió su célebre frase, mucho hemos aprendido acerca de los efectos adversos sobre la salud, derivados de la presencia de compuestos químicos en el ambiente. Las plantas y animales venenosos han sido conocidos (y utilizados) por los seres humanos desde comienzos de nuestra Historia.

En términos simples, la toxicidad se puede definir como un término utilizado para describir el efecto dañino de un compuesto químico sobre un mecanismo biológico. El estudio de estos efectos cae dentro del campo de la toxicología. En la actualidad, la toxicología es una disciplina donde convergen principios de la fisiología, la farmacología, la bioquímica, la biología molecular, la epidemiología y los fenómenos de transporte. Más aún, su aplicación al estudio de los efectos sobre los ecosistemas naturales ha dado origen a la ecotoxicología.

En esta sección, revisaremos algunos de los conceptos básicos que los ingenieros deben conocer, en el contexto de la ingeniería ambiental.

Cuando un agente químico ingresa al organismo, éste puede generar una respuesta tóxica que se manifiesta fisiológicamente de muchas formas: desde un dolor de cabeza, mareo y vómito, hasta convulsiones y muerte. Tal respuesta depende, entre otros factores, de la naturaleza química del compuesto, de la ruta de ingestión, del tiempo de exposición, de la dosis efectiva, del individuo y de los órganos afectados.

Existen tres vías de ingestión a través de las cuales los contaminantes pueden tener acceso al organismo humano (ver Figura 3.13):

- Vía oral: a través del tracto gastrointestinal (alimentos, bebidas).
- Vía respiratoria: a través del tracto respiratorio.
- Vía dérmica: a través del contacto con la piel u otras superficies externas (ej.: los ojos).

El ingreso de un contaminante al cuerpo humano es seguido por un conjunto de procesos altamente complejos, donde éste se absorbe, se distribuye, se almacena, se degrada y/o se elimina. Para producir algún efecto tóxico, el agente químico o alguno de sus productos de transformación, debe alcanzar un órgano con un nivel de concentración y un tiempo de exposición tales que puedan afectar su funcionamiento.

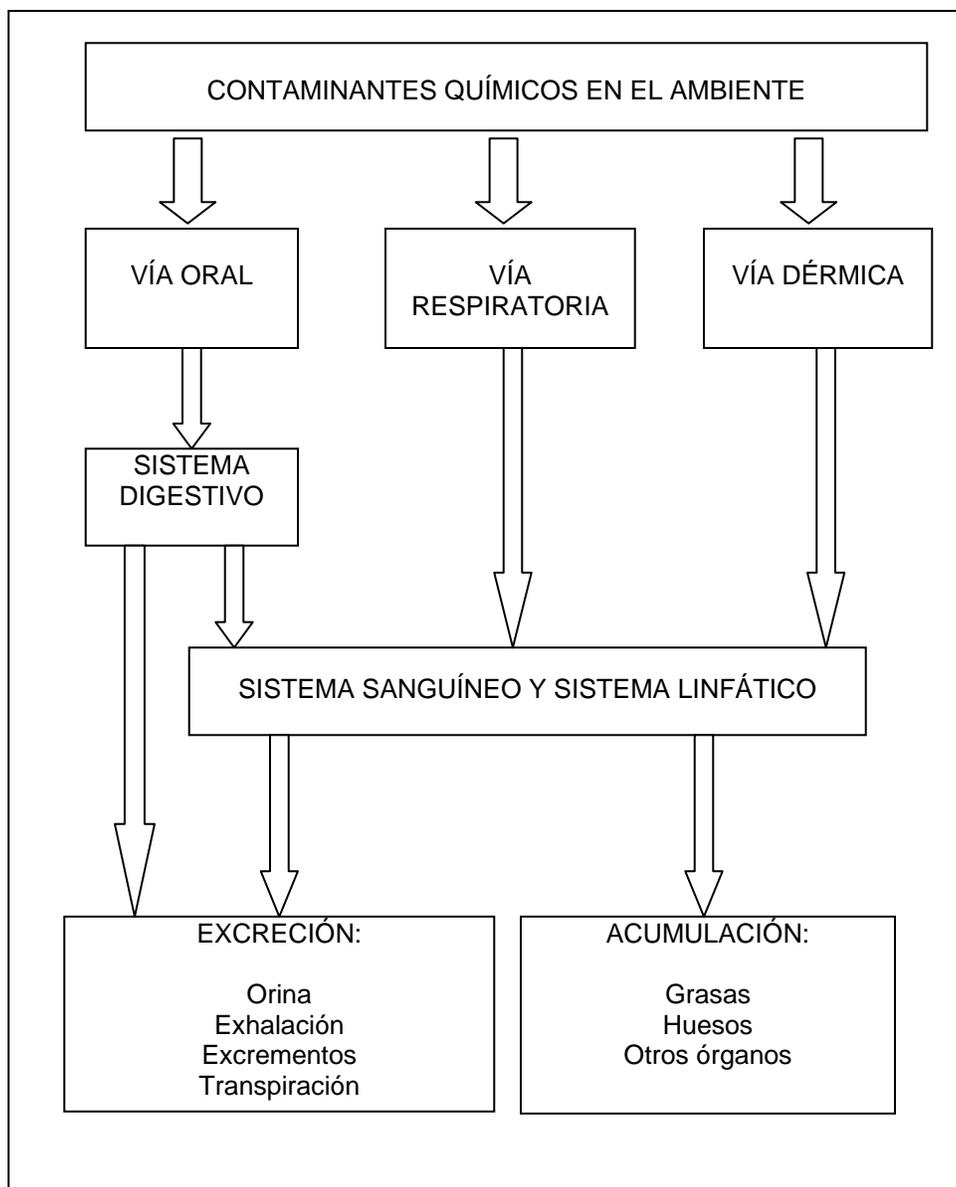


FIGURA 3.13: DESTINO DE LOS CONTAMINANTES EN EL SER HUMANO

El hígado es un órgano particularmente vulnerable a los agentes tóxicos, ya que su principal función es metabolizar las sustancias que ingresan al organismo. Cabe mencionar además, que éste recibe la mayor parte del flujo sanguíneo. Los agentes químicos que afectan el funcionamiento del hígado se denominan hepatoxinas, e incluyen un gran número de compuestos orgánicos e inorgánicos (ej.: tetracloruro de carbono, cloroformo, tricloroetileno, arsénico, manganeso, drogas, pesticidas, etc.). El riñón es otro órgano expuesto al ataque tóxico, ya que actúa como filtro sanguíneo. Algunos agentes hemotóxicos, tales como el monóxido de carbono y los nitratos, afectan la capacidad de transporte de oxígeno en los glóbulos rojos de la sangre; otros agentes, por ejemplo el benceno, pueden afectar la capacidad de cicatrización de la sangre.

Los mecanismos y la secuencia de acciones específicas que resultan en un efecto tóxico, son muy complejos y, en la mayoría de los casos, no se conocen totalmente. Existe consenso de que el agente tóxico interactúa con una molécula o grupo de moléculas (receptoras) de una célula del órgano afectado, alterando drásticamente su función. Generalmente, el receptor es una enzima o algún componente de la membrana celular o molécula intracelular (ej.: ADN).

3.4.1) Absorción y distribución en el cuerpo

Existen múltiples vías a través de las cuales los contaminantes se distribuyen a través del organismo. Una vez que el agente químico ha ingresado al cuerpo, puede ser absorbido en el sistema sanguíneo, a través de las células que cubren el tracto gastrointestinal, o los alvéolos pulmonares, o los diferentes estratos de la piel, mediante procesos similares a los que regulan el ingreso del oxígeno, y de los compuestos y elementos vitales. La absorción celular puede ocurrir, principalmente, a través de dos mecanismos alternativos:

- **Difusión simple:** Los compuestos ingresan por difusión molecular, debido a un gradiente de potencial químico (concentración), a través de la membrana celular. La velocidad de difusión depende del grado de ionización del compuesto y de su solubilidad en agua y en lípidos, entre otros. Las solubilidades en lípido y en agua entregan una medida de la facilidad con que el agente químico se distribuirá entre los tejidos grasos y en el sistema sanguíneo/linfático. En la práctica, se utiliza como parámetro el coeficiente de partición entre octanol y agua. La composición de la pared celular varía dependiendo de las funciones de cada célula y, por lo tanto, algunas de ellas permiten la fácil absorción de un compuesto polar, mientras que otras son más afines a compuestos no polares.
- **Transporte activo:** Es un mecanismo de transporte a través de la membrana celular, con mayores niveles de selectividad. Generalmente, involucra reacciones químicas complejas entre el compuesto y moléculas presentes en la membrana de la célula. Este tipo de mecanismos permite, por ejemplo, absorber selectivamente los azúcares y otros compuestos nutritivos. Además, algunos contaminantes son eliminados mediante esta clase de mecanismos.

a) Almacenamiento

Una vez que los agentes tóxicos llegan a la corriente sanguínea, estos se pueden transportar a través de todo el cuerpo. Así, los compuestos se distribuyen parcialmente en diferentes órganos y tejidos, en distintas proporciones. En este sentido, la polaridad y la afinidad entre la estructura química del contaminante y el tejido juegan un papel determinante. Por ejemplo, en el caso de aquellos compuestos altamente solubles en lípidos, existe una mayor tendencia a almacenarse en zonas donde existe materia grasa.

Los lugares de almacenamiento de agentes tóxicos más importantes son:

- Materia grasa, en el caso de contaminantes lipofílicos (ej.: compuestos organoclorados).
- Plasma sanguíneo, en el caso de contaminantes afines a las proteínas de la sangre (ej.: mercurio).
- Huesos (ej.: plomo, radio, flúor).
- Riñones (ej.: cadmio).

En muchos casos, los compuestos almacenados pueden ser liberados hacia el resto del organismo, debido a cambios drásticos. Por ejemplo, el cambio de dieta, el estrés, el ejercicio físico intenso, y otras actividades que consumen grasas, podrían inducir una rápida liberación del contaminante almacenado en lípidos, produciendo una reacción tóxica.

b) Biotransformación

Cuando un contaminante llega a un órgano y no se almacena allí, pueden ocurrir dos eventos:

- **Biotransformación:** En el caso de órganos ricos en enzimas, el contaminante es metabolizado, generando subproductos, algunos de los cuales pueden ser más tóxicos que el contaminante original.
- **Ataque tóxico:** El agente químico forma un complejo con un receptor que deriva en la acción tóxica.

c) Eliminación

El contaminante o alguno de los subproductos de su metabolización, pueden ser eliminados a través de la orina, la bilis, los excrementos, las secreciones o la exhalación.

El efecto combinado de los procesos que tienen lugar una vez que el agente tóxico es ingerido tiene como resultado neto una disminución gradual de su concentración en el organismo. El estudio de la velocidad de estos procesos, se denomina toxicocinética, y es un importante componente de la toxicología.

En general, un modelo toxicocinético se puede expresar como:

$$[C] = [C]_0 - \int_0^t r_C dt$$

donde r_C representa la velocidad neta de eliminación del contaminante, $[C]_0$ y $[C]$ son las concentraciones del contaminante a tiempo $t = 0$ y $t = t$, respectivamente, expresadas en mg o moles por unidad de volumen (litro de sangre) o por unidad de peso del individuo (kg).

La velocidad r_C se basa en expresiones de pseudo-reacciones de orden cero, primer orden o segundo orden. Por ejemplo, el metabolismo del etanol se puede aproximar a una reacción de orden cero, mientras que la velocidad de eliminación de metil mercurio generalmente se modela como un proceso de primer orden.

Los modelos toxicocinéticos representan un enorme desafío, ya que se enfrentan a la enorme complejidad del funcionamiento del cuerpo humano.

3.4.2) Clasificación de las respuestas tóxicas

La respuesta tóxica de los compuestos se puede clasificar *de acuerdo a su efecto tóxico final*:

- **Efecto genotóxico:** Incluye a todas aquellas sustancias químicas que pueden producir alteraciones del ADN o de los cromosomas. Ello puede producir cáncer en las células somáticas (células de tejidos y órganos, no involucradas en la reproducción), o cambios hereditarios (por efectos en las células reproductoras). Estos efectos se ilustran en la Figura 3.14.
- **Efectos no genotóxicos:** Incluye todos los otros efectos que no tengan relación con cambios en el DNA o en los cromosomas.

Los compuestos que producen cáncer se denominan **cancerígenos**, mientras que los que producen mutaciones se denominan **mutagénicos**. Aquellos compuestos tóxicos que tienen efectos adversos sobre el proceso de reproducción, desde la concepción hasta el nacimiento, se denominan **teratogénicos** (cuando afectan al embrión dentro de sus 3 primeros meses de vida) y **fetogénicos** (cuando afectan el desarrollo del feto en las últimas fases del embarazo).

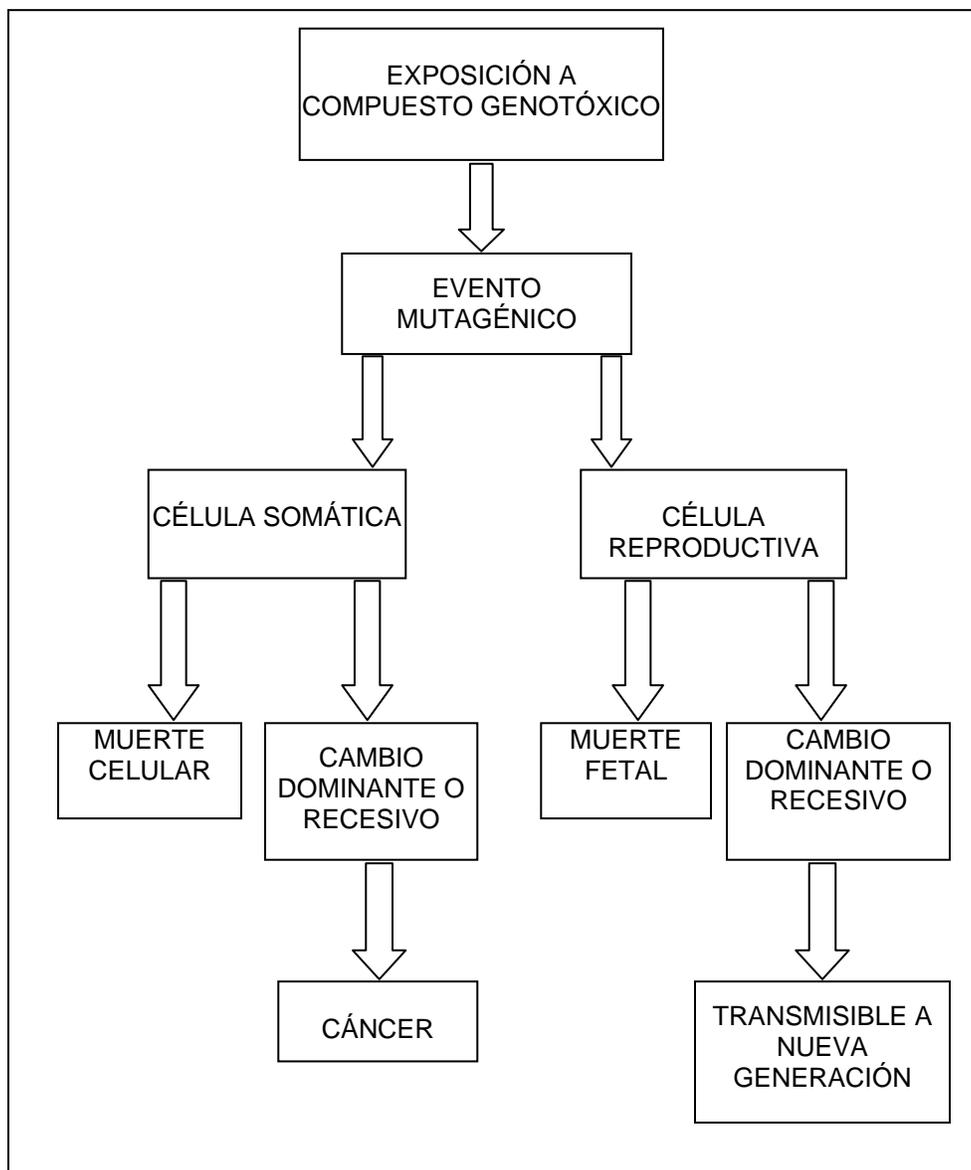


FIGURA 3.14: EFECTOS GENOTÓXICOS

Generalmente, los compuestos químicos cancerígenos también presentan efectos no cancerígenos, dependiendo de la dosis, tiempo de exposición y ruta de ingestión. Por ejemplo:

- *El arsénico* puede producir cáncer pulmonar, pero también produce daño hepático, fibrosis pulmonar y daño neurológico.
- *El plomo* produce tumores en el riñón, mientras que también es responsable de anemia, hipertensión, daño al cerebro y al riñón, etc.
- *El benceno* produce leucemia y afecta al feto en las mujeres embarazadas; también produce mareos, dolores de cabeza y anemia.
- *El cromo* es responsable de cáncer pulmonar, mientras que también produce bronquitis, y daño al hígado y al riñón.
- Los *hidrocarburos* aromáticos policíclicos son reconocidos cancerígenos (pulmón, estómago, piel), y también producen dermatitis y daño hepático.

La EPA norteamericana ha clasificado los compuestos cancerígenos en 5 grupos (A a E), de acuerdo a la evidencia epidemiológica acerca de su efecto cancerígeno. Así, las sustancias del Grupo A, son aquellas acerca de las cuales existe suficiente evidencia de que producen cáncer. Los grupos B y C incluyen compuestos para los cuales la evidencia aún no es concluyente, mientras que D y E corresponden a aquellas sustancias para las cuales no hay evidencia adecuada.

Una de las formas más utilizadas para clasificar los efectos tóxicos, se basa en el tiempo de respuesta de la manifestación del efecto:

- **Toxicidad aguda o inmediata:** Se refiere a una acción tóxica que se manifiesta inmediatamente después de una exposición única. Por ejemplo, una dosis letal de dioxina puede resultar en muerte dentro de unos pocos minutos.
- **Toxicidad crónica o retardada:** El efecto tóxico se manifiesta después de un período de latencia muy largo.

En este contexto, se utiliza el siguiente criterio para clasificar el período de exposición en los seres humanos:

- Exposición aguda: 1 día
- Exposición sub-aguda: 10 días
- Exposición sub-crónica: 2 semanas a 7 años
- Exposición crónica: sobre 7 años

En muchos casos, el efecto agudo puede ser reversible; sin embargo, es necesario señalar que una exposición aguda puede generar efectos toxicológicos retardados o enfermedades crónicas. Por ejemplo, una exposición aguda a un compuesto tóxico que afecte el sistema nervioso central genera en la mayoría de los casos, un daño irreversible, debido a la baja o nula capacidad de regeneración de dichos tejidos.

3.4.3) Modelos Dosis-Respuesta

En general, mientras mayor sea la dosis, más severa será la respuesta tóxica. Ello se debe a que, a mayores dosis y tiempos de exposición, mayor será el número de complejos formados entre el agente tóxico y el receptor.

Los estudios toxicológicos permiten correlacionar la respuesta tóxica con la dosis y tiempo de exposición. La respuesta tóxica no sólo depende de la dosis y tiempo de exposición, sino que de las características de salud y de la historia de cada individuo de la población evaluada, de su sexo, de su edad, etc.. Dada la fuerte naturaleza aleatoria del fenómeno, los modelos dosis-respuesta deben ser utilizados con cautela, ya que dependen fuertemente de la calidad estadística de los datos.

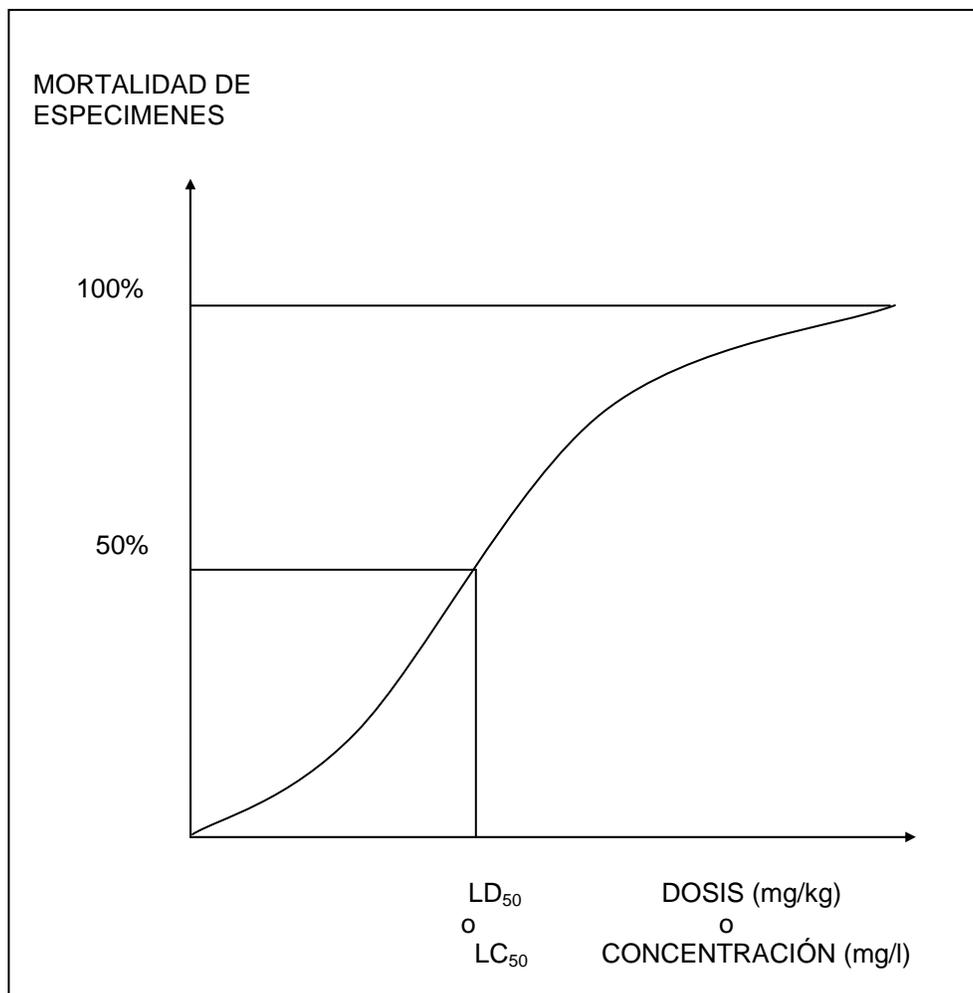
Existen muchos estudios basados en datos epidemiológicos, donde se mide la respuesta en seres humanos expuestos a los agentes químicos estudiados. Desgraciadamente, resulta difícil controlar totalmente las condiciones de tales ensayos, y los resultados están sujetos a un alto nivel de incertidumbre. Generalmente, se utilizan datos obtenidos a partir de experimentos controlados, con diversos tipos de animales (pequeños mamíferos, peces, crustáceos, etc.). La selección del organismo para efectuar los estudios de toxicidad es un paso crítico, ya que se requiere un organismo que permita establecer una conexión con los efectos tóxicos sobre el ser humano. Generalmente, se utilizan primates, ratas, conejos, ratones y conejillos de indias.

La típica relación entre dosis y respuesta para estudios sobre toxicidad aguda se ilustra en la Figura 3.15. Los estudios para determinar la relación dosis–respuesta requieren primeramente seleccionar la respuesta tóxica que se desea evaluar. Por ejemplo:

- Porcentaje de mortalidad.
- Numero de órganos seleccionados dañados.
- Numero de tumores cancerosos.
- Contenido de biomarcador (compuesto generado por acción del agente tóxico).

La dosis de agente tóxico se expresa, normalmente, como mg por unidad de peso del espécimen (mg/kg). Generalmente, los estudios de toxicidad aguda consideran un tiempo de exposición de 4 días. En el caso de peces o crustáceos, la dosis es muy difícil de estimar, por lo que se reemplaza por la concentración de contaminante en el medio acuático utilizado para el ensayo. Típicamente,

exponen muestras poblacionales a diferentes dosis (o concentraciones), durante el tiempo de duración del ensayo. Al final de éste, se determina la dosis (LD_{50}) (o concentración, LC_{50}) a la cual ocurre una mortalidad de 50% de los especímenes ensayados, previo descuento de la mortalidad natural en un medio carente del agente tóxico (i.e. control).



**FIGURA 3.15: RELACIÓN DOSIS – RESPUESTA .
ENSAYOS DE TOXICIDAD AGUDA.**

La tabla siguiente muestra datos típicos de LD₅₀ realizados con ratas, durante un tiempo de exposición de 4 días:

TABLA 3.11: TOXICIDAD AGUDA. VÍA ORAL EN RATAS. LD₅₀

SUBSTANCIA	LD ₅₀ (mg/kg)
Etanol	13.000
Sal común	3.800
Aspirina	1.500
Lindano	100-300
Fluoruro de sodio	200
DDT	110
Nicotina	50-60
Arseniato de sodio	40
Paratión	2
Dioxina (TCDD)	0,02-0,05

Los efectos tóxicos varían significativamente entre diferentes especies, incluso para tamaños, edades y pesos equivalentes. A modo de ejemplo, la toxicidad de la dioxina evaluada utilizando 3 especies diferentes:

TABLA 3.12: TOXICIDAD AGUDA DE LA DIOXINA (TCDD). VÍA ORAL UTILIZANDO ESPECIES DIFERENTES. LD₅₀.

ESPÉCIMEN	LD ₅₀ (mg/kg)
Conejillo de indias	0,001
Rata Long-Evans	0,03
Rata Han/Wistar	> 3

Los valores de dosis letal asociada a una sustancia permiten clasificar su toxicidad aguda de acuerdo a los siguientes criterios:

No tóxica:	Mayor que 15.000 (mg/kg)
Levemente tóxica:	5.000-15.000 (mg/kg)
Moderadamente tóxica:	500-5,000 (mg/kg)
Muy tóxica:	50-500 (mg/kg)
Extremadamente tóxica:	5-50 (mg/kg)
Super tóxico:	Menor que 5 (mg/kg)

En la actualidad, se utiliza un conjunto de otros ensayos para evaluar efectos más específicos sobre funciones metabólicas y aspectos toxicocinéticos.

En el caso de compuestos no cancerígenos, es importante señalar que existe un umbral bajo el cual los efectos tóxicos no son observables. Cuando el agente tóxico ataca una célula, puede que su nivel de concentración sea muy bajo, y sólo algunas unidades enzimáticas sean afectadas, sin que ello tenga consecuencias para el funcionamiento de toda la estructura. Más aún, puede que el daño causado sea reparable por parte de los mecanismos existentes en el organismo afectado. Sin embargo, cuando una fracción significativa de unidades es afectada,

el efecto tóxico se manifestará en el organismo. Por ejemplo, el tetracloruro de carbono produce daño en los tejidos del hígado; sin embargo, si dicho ataque es limitado las células hepáticas pueden seguir funcionando satisfactoriamente, hasta que eventualmente, sean reparadas. Si dicho ataque es más severo, debido a mayores dosis de tetracloruro de carbono, el hígado presenta serias deficiencias, y se pueden producir daños irreversibles. Es importante, por lo tanto, mantener las dosis de sustancias tóxicas por debajo de sus valores umbral. Existen recomendaciones basadas en estudios toxicológicos que establecen dosis diarias aceptables para diferentes sustancias cuyo efecto tóxico es reconocido. Estos valores incluyen un factor de seguridad de 100, para compensar por las incertidumbres asociadas a la sensibilidad individual y a las diferencias entre el ser humano y las especies ensayadas.

Existen numerosas bases de datos sobre indicadores toxicológicos, publicadas y actualizadas periódicamente por la OMS, la Food and Agricultural Organization (FAO) y la EPA norteamericana, entre otros. Se recomienda consultar la base de datos IRIS (Integrated Risk Information System).

En el caso de compuestos cancerígenos, se ha desarrollado diferentes modelos matemáticos que relacionan la probabilidad de ocurrencia de cáncer y la dosis crónica diaria (DCD). Esta última se expresa como (mg/kg/día), es decir, como cantidad de contaminante ingerido diariamente por unidad de peso del individuo. La DCD representa un valor promedio diario que cubre todo el ciclo de vida del individuo.

El cáncer se define como una masa de tejido anormal, cuyo crecimiento excede el de los tejidos normales y persiste, aún cuando el estímulo que generó tal cambio haya cesado. En otras palabras, el cáncer es una enfermedad caracterizada por una anomalía celular, en la cual una célula normal se altera y divide sin ningún control. La diferencia más importante entre un tumor benigno y uno maligno, radica en que éste último invade las estructuras cercanas y se propaga a sitios más distantes (metástasis).

Un modelo altamente simplificado supone una relación lineal entre la probabilidad (P_C) de adquirir cáncer durante el ciclo de vida, y la DCD:

$$P_C = f_P \times DCD$$

donde el factor de proporcionalidad, f_P , se denomina *factor de potencia*, y depende tanto del tipo de agente tóxico, como de la vía de ingestión. La Tabla 3.13 muestra algunos valores de factor de potencia, para compuestos cancerígenos reconocidos.

Acumulación en la Cadena Trófica

Es importante considerar la distribución de un contaminante vertido al ambiente, a lo largo de la cadena trófica. Tal como se mencionó en secciones anteriores, algunos contaminantes son persistentes, y tienden a acumularse en los tejidos de las diferentes especies. Un contaminante que se bioacumula puede incrementar

su concentración en los tejidos a medida que es transferido a los niveles más altos de la cadena trófica. Este proceso, llamado biomagnificación, es muy importante en aquellos casos donde el ser humano está al final de la cadena alimenticia.

La biomagnificación dependerá de la capacidad de metabolización y/o excreción de las especies que componen la cadena alimenticia. En general, los resultados reportados sobre biomagnificación muestran una alta variabilidad, ya que dependen de la cadena trófica específica del ecosistema en estudio.

La Tabla 3.14 muestra algunos valores publicados por EPA, para la bioconcentración en especies marinas para diferentes compuestos presentes en el medio. La concentración en los organismos superiores $[C]_M$, se puede estimar a partir de estos factores de bioconcentración, f_{BC} , y de la concentración del agente tóxico en el medio acuático $[C]_A$:

$$[C]_M = f_{BC} [C]_A$$

TABLA 3.13: FACTOR DE POTENCIA

CONTAMINANTES	VIA ORAL (mg/kg/día)⁻¹	VIA RESPIRATORIA (mg/kg/día)⁻¹
Arsénico	1,75	50
Benceno	0,029	0,029
Benzopireno	11,50	6,11
Cloroformo	0,006	0,08
DDT	0,34	-
Dieldrin	30	-
Hexacloroetano	0,014	-
Cloruro de metileno	0,0075	
Níquel	-	1,19
PCB	7,70	-
Dioxina	1,56 x10 ⁵	-
Tetracloroetileno	0,05	1-3 x10 ⁻³
Cloruro de Vinilo	2,3	0,3
Tricloroetileno	0,011	0,013

TABLA 3.14: FACTORES DE BIOCONCENTRACIÓN EN AGUA

CONTAMINANTE	FACTOR (l/kg)
Aldrin	28
Arsénico	44
Benceno	5
Cadmio	80
Clordano	14000
Cloroformo	4
Cromo	16
Cobre	200
DDT	54000
Dieldrin	4800
Niquel	47
PCB	100000
Dioxina	5000
Tricloroetileno	11
Cloruro de Vinilo	1,2

BIBLIOGRAFÍA

Cotton W.R., Pielke R.A.. "Human Impacts on Weather and Climate". Cambridge University Press (1995).

De Nevers N., "Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire". McGraw-Hill, México (1998)

Doménech X. "Química Atmosférica: Origen y Efectos de la Contaminación", Miraguano Ediciones, Madrid (1991).

Doménech X., "Química Ambiental: el Impacto Ambiental de los Residuos". Miraguano Ediciones, Madrid (1994).

Erickson.J., "El efecto invernadero", McGraw Hill, Madrid (1992).

Fawell J., Hunt S., "Environmental Toxicology: Organic Pollutants", Ellis Horwood Ltd. Chichester (1989).

Fergusson J.E., "The Heavy Elements: Chemistry, Environmental Impact and Health effects", Pergamon Press, Oxford (1990).

Freedman B., "Environmental Ecology: The Ecological Effects of Pollution, Disturbance, and other Stresses". 2ª ed.. Academic Press. San Diego (1995).

Harper D. "Eutrophication of Freshwaters: Principles, Problems, and Restoration". Chapman & Hall. (1992)

Houghton J. "Global Warming: The Complete Briefing". 2ª ed. Cambridge University Press. (1997)

Masters G.M., "Introduction to Environmental Engineering and Science", 2ª ed., Prentice-Hall Inc., London (1998)

Moriarty F., "Ecotoxicología: El estudio de contaminantes en ecosistemas", Ed. Academia S.L., León España. (1985).

Molina M.J., Rowland F.S., "Stratospheric sink for CFMs: Chlorine atom catalysed destruction of ozone", Nature, 248, pp 810-812, (1974).

Vide J.M., "Fundamentos de Climatología Analítica", Editorial Síntesis, Madrid (1991).

CAPÍTULO 4

ASPECTOS AMBIENTALES DE LA INDUSTRIA DE PROCESOS

El objetivo de este capítulo es entregar una visión general de la actividad productiva, con vistas a identificar sus aspectos ambientales más relevantes, y las alternativas existentes para mitigar aquellos efectos no deseados. Primeramente, a modo de referencia, se presenta una breve descripción histórica del desarrollo de la actividad productiva. A continuación, se revisan los recursos materiales y energéticos utilizados en la actividad humana y los tipos de residuos generados. Finalmente, se presentan los diferentes procesos industriales relevantes para la realidad nacional, poniendo énfasis en los requerimientos materiales y energéticos, los tipos de transformaciones utilizadas y la naturaleza de los residuos.

4.1) UN POCO DE HISTORIA

Para escribir la historia del desarrollo de la actividad productiva, se debe comenzar por el principio. Los avances científicos de estas últimas décadas, permiten suponer que:

- La Tierra se formó hace 4.500.000.000 de años.
- Los primeros rasgos de vida aparecieron hace aproximadamente 2.000.000.000 de años.
- El *Homo erectus* ya habitaba la Tierra hace más de 2.000.000 de años.
- Existe evidencia de entierros funerarios que tuvieron lugar hace 50.000 años.
- Los registros escritos más antiguos datan de hace menos de 4.000 años.

Tenemos cierto conocimiento de lo que han sido los últimos 4.000 años de historia (al menos, de aquellas regiones donde han quedado registros arqueológicos interpretables). Sin embargo, para conocer el desarrollo histórico de la evolución de la sociedad humana, de sus tecnologías y modos de producción en los largos cientos de miles de años de evolución, tenemos que basarnos en los restos fosilizados, dispersos y deteriorados, de huesos humanos y sus pertenencias básicas, de alfarería y piedra.

En un largo proceso evolutivo de millones de años, nuestro ancestro se irguió en sus dos extremidades inferiores, y liberó así sus extremidades superiores para otros usos. El pulgar fue capaz de tocar los otros dedos de la mano, permitiendo realizar actos de precisión. Sus ojos tuvieron la capacidad para apreciar la tridimensionalidad del entorno y adquirir el sentido de profundidad.

Su cerebro fue creciendo de tamaño, desarrollando áreas de memoria y asociación, cada vez más poderosas y sofisticadas. Generó un lenguaje que fue adquiriendo mayor complejidad y capacidad de abstracción. Acumuló una experiencia básica sobre el concepto del peligro y del miedo. El progreso se aseguró en profundos

cambios genéticos, y también en la capacidad para comunicar los conocimientos adquiridos de una generación a otra.

En sus inicios, los seres humanos eran recolectores, cuya supervivencia dependía de la existencia local de agua, animales de caza, peces, aves y frutos. Debían emigrar constantemente en busca de agua y alimentos, por causa del clima, cataclismos u otros eventos naturales, amenazas de otros grupos humanos o bestias, u otros factores que afectaban la disponibilidad de los elementos vitales. Transcurrieron decenas de miles de años en los que se fueron desarrollando diferentes aspectos de la sociedad humana, de los que se pueden mencionar (no necesariamente en orden cronológico):

- La comunicación y la cooperación social dieron origen a la división del trabajo.
- Se descubrió el uso del fuego. Su control permitió iluminar la noche y las cavernas, protegerse del frío, cocer los alimentos y la arcilla, ahuyentar las bestias; (La caverna iluminada y tibia, protegió a nuestros ancestros del frío y de las fieras; al mismo tiempo, parece haber creado el entorno apropiado para las primeras expresiones místicas, sobre la vida y la muerte).
- Se desarrollaron mejores herramientas de piedra, madera y hueso, más sofisticadas en su forma y en su función. Se descubrió la palanca y la rueda, para transportar materiales de construcción, alimentos y materias primas diversas.
- Se identificaron los ciclos climáticos. Se identificó el ciclo reproductivo de las especies animales y vegetales. Se desarrolló la actividad de crianza de animales y aves. La domesticación también dio origen a una mejor capacidad de transporte al contar con animales de carga y tiro. Se descubrió la agricultura. La crianza y la agricultura fueron generando una mayor independencia de la caza y la recolección, dando origen a un modo de vida más sedentario.
- Se desarrollaron estructuras sociales más sofisticadas, con una base cultural y mística más elaborada (¿habremos comenzado a enterrar nuestros muertos con la esperanza de que dicha cimiento daría origen a otro ser humano, tal como ocurre con una planta?).
- Se descubrieron los metales (bronce, hierro). Ello dio origen a herramientas más elaboradas y durables; a armas más letales. La guerra parece estar presente en la base de nuestra Historia: la territorialidad existe tanto en las bestias como en el hombre, la lucha por los recursos escasos (tales como cotos de caza y fuentes de agua), la rapiña, la motivación de capturar esclavos para sacrificios a las deidades, como mano de obra para el transporte, las obras civiles y la actividad productiva...
- Se formaron los primeros complejos urbanos: conglomerados habitacionales, estatales, religiosos, militares, productivos, en torno a las fuentes de agua y a la producción de alimentos.
- El cielo nocturno, con sus estrellas y su luna, con sus movimientos cíclicos, se transformó en el reloj, el calendario y la brújula.

- Se inventó la escritura. La importancia de este hecho puede ser homologada a la importancia del fuego y de la rueda. Permitió la continuidad en el tiempo de conocimientos, normas y principios, hechos, leyendas y mitos, técnicas, etc..

El mundo de hace 2.000 años ya mostraba en forma incipiente, en todos los Continentes, los elementos tecnológicos, políticos y filosóficos que caracterizarían el desarrollo social hasta los tiempos modernos. Se habían desarrollado a cabalidad las técnicas básicas de irrigación; los procesos de fermentación para bebidas alcohólicas, para la producción de fermentados de leche (queso, yoghurt) y granos, para la preservación de alimentos; los hornos para metalurgia y alfarería; los conceptos para obras civiles; los ingenios mecánicos para el transporte marítimo y terrestre, etc.. Estas tecnologías se mantuvieron casi sin alteración hasta fines del siglo XVII.

Sin embargo, la acumulación de avances en el conocimiento, los contactos crecientes entre las sociedades de Oriente y Occidente, la ruptura de los marcos restrictivos al libre pensamiento, entre otros factores, generaron un caldo de cultivo que daría origen a un cambio tan radical y acelerado, que en menos de dos siglos modificó la faz de la Humanidad. Este proceso revolucionario, que comienza a desencadenarse principalmente en Europa y que rápidamente se expande por todo el mundo, es demasiado complejo para ser cubierto en un texto de esta naturaleza.

Muchas de las innovaciones tecnológicas se basaron en principios que ya habían sido identificados siglos atrás, cuya aplicación productiva fue motivada, en gran medida, por las poderosas fuerzas del desarrollo económico capitalista. Los principales hitos tecnológicos que tuvieron lugar desde entonces se enumeran a continuación:

- La Revolución Industrial nace formalmente con la aplicación industrial del motor a vapor en la segunda mitad del siglo XVIII. Sin embargo, ello es fruto de un largo proceso de acumulación de conocimientos en diferentes áreas de la física aplicada (ej.: mecánica, termodinámica). En 1705, los mecánicos ingleses Newcomen y Savery construyen la primera máquina a vapor para aplicaciones prácticas. A mediados de ese siglo, J. Watt perfeccionó dicho ingenio logrando su total introducción al ámbito industrial¹. El descubrimiento del motor a vapor cambia radicalmente la capacidad para generar energía mecánica. Con anterioridad, las principales fuentes energéticas para mover ingenios mecánicos tales como vehículos, telares y molinos, provenían de fuente animal, hídrica o eólica. Con el advenimiento del motor a vapor, se incrementó la potencia disponible, así como la flexibilidad de uso (ej.: ya no se dependería de la existencia de un río caudaloso para instalar un molino o un telar). El motor a vapor significó una demanda acelerada de combustible,

¹ Watt introdujo el condensador para una mejor utilización del calor; un sistema para mejorar la distribución del vapor a ambos lados del pistón; un sistema articulado para unir el vástago del pistón, mediante un movimiento rectilíneo, a un balancín del que cada extremidad describe un arco de círculo; un volante para dar uniformidad al movimiento de la máquina; un regulador de bolas, para compensar las desigualdades en la producción de vapor.

carbón y leña, principalmente. Durante los siglos XVIII y XIX, aquellos países que experimentaron el mayor desarrollo industrial, fueron también víctimas de la depredación de sus bosques para alimentar los ineficientes motores a vapor.

- La pujante industria textil europea, haciendo uso de los motores a vapor, fue uno de los sectores que dinamizó los desarrollos en otras áreas. La demanda de algodón, carbón, madera, minerales, tinturas, lubricantes y otros insumos, se incrementó exponencialmente.
- La agricultura tampoco estuvo ajena a los nuevos cambios: la introducción de fertilizantes y sistemas de bombeo hidráulico de mayor potencia, permitieron incrementar la productividad agrícola y suplir así la demanda creciente de la nueva población obrera de los grandes centros industriales.
- Así también, se incrementaron las necesidades de transporte y comunicación. El ferrocarril no sólo facilitó el transporte terrestre de grandes tonelajes de carga, sino que también generó un brutal incremento de la producción siderúrgica a gran escala, con la consiguiente demanda por minerales de hierro, caliza, madera y carbón. Y también llegó el telégrafo y, más tarde, llegaría el teléfono...
- La división del trabajo se extremó, incrementándose los niveles de productividad en todas las áreas de la industria manufacturera. El modo de producción feudal había dado paso a un capitalismo pujante, que exigía acceso a nuevos mercados, fuentes de materias primas y energía. Un modo de producción basado en la competencia, que exigía innovaciones tecnológicas.
- Los grandes avances científicos que comenzaron a cristalizar durante el siglo XIX, dieron lugar a las aplicaciones del motor de combustión interna y a la electricidad. Ambos hicieron posibles nuevos desarrollos en el transporte, las comunicaciones y en todos los sectores de la industria de manufacturas. El motor de combustión interna, dio origen rápidamente a una demanda de combustibles apropiados a las necesidades de dicho ingenio. Una gran variedad de combustibles orgánicos (líquidos y gaseosos) obtenidos a partir de procesos de fermentación, fueron utilizados en diferentes diseños. El motor de combustión interna encontró primero aplicaciones en sistemas estacionarios, en reemplazo del viejo motor a vapor. Luego, comenzó a aplicarse en sistemas móviles para el transporte de carga y personas. A comienzos del siglo XX, la industria automotriz se establece como la nueva industria de punta, que tiene un gran efecto dinamizador sobre el sector combustibles, siderúrgico y químico. Bajo este alero, la industria del petróleo comienza a florecer, en conjunto con la industria del caucho.
- Por su parte, el desarrollo de ingenios eléctricos, abre un abanico de posibilidades de aplicación industrial y en comunicaciones. A pesar de que el descubrimiento de los fenómenos eléctricos y magnéticos data de hace más de 2.000 años, sus aplicaciones productivas nacen durante el siglo XIX. Físicos e inventores como Coulomb, Galvani, Volta, Oersted, Ampère, Faraday, Ohm y muchos otros, sentaron las bases para una aplicación masiva de tales principios en todas las esferas del sistema productivo: la batería, el telégrafo, el dínamo, el motor eléctrico.

A fines del siglo XIX, la industria eléctrica estaba establecida, produciendo en gran escala sistemas para la generación y la utilización de la corriente eléctrica. Esto acelera el desarrollo de la industria del cobre, elemento que se impone como el conductor eléctrico preferido desde los primeros momentos. Junto a los conductores, también se desarrolla la producción de materiales aislantes, primero de origen natural y, posteriormente, de origen sintético.

- No es difícil imaginar que la demanda por materiales cada vez más sofisticados, con propiedades físicas y químicas específicas, sirvió de fuerza motriz al desarrollo de la industria química. Durante las primeras décadas del siglo XX, se consolida la industria química orgánica. El petróleo trae consigo una amplísima disponibilidad de compuestos, que sirven de base para la síntesis de nuevos materiales, culminando en la producción de polímeros sintéticos: nace así la industria del plástico.

- Es indudable que, junto a las fuerzas motrices puramente económicas, los desarrollos de la ciencia y la tecnología del siglo XX han sido motivados por los requerimientos militares de las grandes potencias. Junto a la competencia económica, se desarrolló también una carrera armamentista en Europa, EEUU y Japón, que data desde fines del siglo XIX. La necesidad de controlar nuevos mercados y fuentes de materias primas preferenciales, sumada a los conflictos potenciados por los grandes cambios políticos y económicos del último siglo, incrementaron la agresividad de los nuevos y viejos imperios. Ya en el siglo XIX, la demanda por explosivos cada vez más poderosos (para ser justos, ¡también con aplicación en minería y obras civiles mayores!) aceleró el desarrollo de la industria química. A partir de la primera guerra mundial, se produjo una carrera generalizada por explosivos y gases venenosos de mayor potencia letal, sistemas de comunicaciones de mayor alcance, armas más efectivas, vehículos más poderosos, aviones, etc. En las proximidades de la segunda guerra mundial, se había logrado espectaculares avances en aviación, transporte terrestre y marítimo, cohetes, explosivos y comunicaciones. Durante dicha guerra, el esfuerzo científico-tecnológico se orientó totalmente hacia las aplicaciones militares, logrando en menos de 6 años innovaciones que tendrían repercusiones por el resto del siglo XX. A fines de 1945, había tenido su nacimiento oficial la Era Atómica, la Era del Petróleo, la Era de la Química, la Era de la Cohetería, la Era del Jet, la Era de la Electrónica, la Era de la Computación, la Era de la Guerra Fría.....

Lo que viene después es historia conocida y nos trae rápidamente al mundo de hoy, de comienzos del siglo XXI, el mundo donde la ciencia ficción de hace algunas décadas se transforma en realidad².

Hoy, los avances científicos y tecnológicos han permitido cristalizar la ficción de los

² Es interesante constatar que, a pesar de estos avances tecnológicos y científicos, persisten algunos procesos que se vienen utilizando desde los tiempos primitivos. La industria alimenticia actual se basa en los mismos principios de preservación y procesamiento establecidos en la antigüedad; este sector industrial sigue siendo uno de los más importantes en todos los países. Una parte significativa de nuestros procesos de generación de energía se basa en la combustión de compuestos orgánicos (ya sea de origen renovable o fósil) para obtener energía calórica....

vuelos espaciales a lugares remotos, los microcircuitos integrados están presentes en cada ámbito de la vida y la ingeniería genética ha roto las barreras naturales. Estamos en pleno apogeo de la revolución informática y las comunicaciones, venciendo las barreras del espacio y del tiempo, multiplicando en varios órdenes de magnitud el volumen de información accesible por cada individuo. Ya son realidad establecida los megamercados, la globalización, y la apertura de grandes regiones al comercio mundial, procesos los cuales Chile ha estado estrechamente ligado.

La rápida urbanización y crecimiento de las ciudades durante la última mitad del siglo XX ha cambiado la faz de la Tierra. La magnitud de este proceso va de la mano con el crecimiento dramático de la población mundial y el incremento de la capacidad de producción industrial. Estos conglomerados urbano-industriales requieren de energía y materiales para su funcionamiento, llegando a consumir 1.000 veces más que un área rural de la misma extensión. Una ciudad industrial moderna puede requerir, diariamente, un equivalente per cápita de alimentos generados por 2.000 m² de terreno agrícola, el papel y otros productos forestales de 1.000 m² de bosques y 5 m³ de agua. Como subproducto de esta actividad, se emiten a la atmósfera grandes cantidades de material particulado, SO₂, NO_x y otros gases, y grandes volúmenes de residuos sólidos y líquidos. Las ciudades modernas “viven” del medio rural ya que dependen de éste como fuente de alimentos y otros materiales orgánicos. A su vez, la ciudad exporta bienes, servicios y desechos, generándose una compleja interrelación entre las diferentes comunidades de una región.

Así, la materia y la energía fluyen constantemente de una zona a otra, en forma creciente, de la mano del “progreso” económico. Existe, por lo tanto, una imperiosa necesidad de armonizar el desarrollo industrial, urbano y rural para hacer posible un crecimiento sustentable, sin hundirnos en el abismo de un planeta estéril incapaz de sostener la vida humana. Es una tarea titánica que se enfrenta a la gran inercia de las fuerzas económicas, pero que debe ser encarada globalmente para que las próximas generaciones puedan disfrutar de un planeta saludable. En tal sentido, debemos recordar que la Agenda 21, acordada por las principales naciones en la Cumbre de Rio de Janeiro de 1992, nos entrega los lineamientos estratégicos para darle sustentabilidad al desarrollo de la Humanidad.

Para comprender mejor la dimensión ambiental de los procesos productivos, a continuación se revisa brevemente los tipos de recursos materiales y energéticos utilizados en la actividad humana.

4.2) REQUERIMIENTOS MATERIALES Y ENERGÉTICOS

4.2.1) Materias Primas Básicas

En general, las materias primas se pueden clasificar como renovables y no renovables.

a) Materias Primas Renovables

Son aquellas cuya regeneración puede ser lograda en un plazo relativamente breve, e incluye todas aquellas materias primas de origen vegetal o animal, no fosilizadas. Estas se obtienen, principalmente, de la explotación de recursos agropecuarios, forestales y marinos, siendo utilizadas directamente como fuente de alimentos o como combustible y materia prima industrial.

Todos estos recursos se obtienen directa o indirectamente a partir de la energía solar, que sustenta la actividad fotosintética primaria. La creciente expansión de la población y del sector productivo, ha obligado a aumentar el rendimiento por unidad de superficie, incorporando energía y materiales adicionales. Las prácticas modernas de producción agrícola y forestal requieren de un adecuado suministro de agua y de nutrientes limitantes (principalmente, nitrógeno, fósforo y potasio), así como de un efectivo control de plagas, enfermedades y otros agentes biológicos destructores. Más aún, se requiere de maquinaria y vehículos pesados que demandan materiales y energía para su fabricación y funcionamiento. Ello puede representar un considerable gasto energético adicional, que debe ser suministrado por fuentes no renovables (ej.: combustibles fósiles, materias primas no renovables). Por ejemplo, estimaciones hechas en EEUU, demuestran que en 1970, la energía adicional utilizada en ese país en la explotación agrícola, fue del orden de 640×10^9 kWh, lo que equivale al poder calorífico de 76 millones de toneladas de carbón. Más del 60% de la energía consumida por el sector agrario correspondió a combustible para tractores y maquinarias, y a energía para la fabricación de fertilizantes químicos. Estos valores no incluyen la energía utilizada en el procesamiento industrial de los productos agrícolas, ni en su preservación y consumo.

Desde el punto de vista de la sustentabilidad del desarrollo, interesa mantener una tasa de explotación no mayor que la tasa de regeneración del recurso. En el caso de los recursos de origen forestal y agrícola, es importante tomar en consideración la reducción en la productividad del suelo debido a técnicas de explotación inadecuadas, tal como se discute más adelante. En relación a los recursos marinos, resulta más difícil determinar el balance entre tasa de explotación y tasa de regeneración. Esto es altamente relevante, dados los grandes tonelajes de explotación forestal y marina que se realizan en Chile, por lo que se debe mantener una continua observación de los balances de biomasa, un monitoreo efectivo del "stock" de recursos disponibles y de la evolución de la productividad natural.

b) Materias Primas No Renovables

Se definen como aquellas cuya tasa de regeneración natural es demasiado lenta (es decir, en la escala de los ciclos geológicos). Aquí se pueden distinguir materias primas de origen fósil y de origen mineral.

Las primeras incluyen aquellos materiales de origen orgánico que, con el transcurso del tiempo y las altas presiones y temperaturas del subsuelo, han sufrido transformaciones físicas y químicas. Las más importantes en este rubro son el petróleo, el gas natural y el carbón mineral. Las materias primas minerales incluyen todos aquellos compuestos minerales de uso industrial (ej.: mineral de cobre, hierro, nitratos, carbonatos, sulfatos, etc.).

La explotación de estos recursos no renovables debe hacerse tomando en consideración el "stock" disponible. Sin embargo, la velocidad de consumo de estos materiales está estrictamente determinada por factores económicos y tecnológicos.

Las transformaciones químicas que acompañan a la explotación industrial de los recursos fósiles y minerales aceleran los flujos de estos materiales a través de los ciclos geoquímicos. Por ejemplo, los átomos de S y N que se encuentran en los compuestos fosilizados son oxidados y emitidos a la atmósfera como SO_2 y NO_x , cuando estos recursos son utilizados como combustibles. La explotación de minerales sulfurados constituye otra fuente importante de SO_2 de origen antrópico.

4.2.2) Requerimientos Energéticos

La historia de la civilización está estrechamente ligada a la disponibilidad de fuentes de energía. Las sociedades primitivas (preneolíticas) de recolectores y cazadores vivieron como parte de las cadenas tróficas en ecosistemas naturales, alcanzando su máxima densidad de población en aquellas regiones donde existía un subsidio energético adicional, tal como en las zonas costeras y en las riberas de los ríos. Al aparecer la agricultura y la acuicultura, la capacidad de producción aumentó en forma significativa, una vez que los seres humanos aprendieron a incorporar nuevas formas de energía a los procesos naturales de producción de alimentos.

Durante siglos, la madera y otros productos fotosintéticos constituyeron la principal fuente de energía, junto con la energía hidráulica, animal y humana, sustentadas a su vez por la energía solar. Más tarde se incorporaron los combustibles fósiles, las máquinas de combustión interna y, durante el último siglo, la energía eléctrica y nuclear.

Se ha logrado tener acceso a fuentes de energía altamente concentradas, que han abierto las puertas a una capacidad de producción jamás soñada hace menos de medio siglo atrás. En esta sección se revisan brevemente las diferentes fuentes de energía disponibles para consumo industrial.

Fuentes Energéticas para Uso Industrial

Típicamente, los procesos industriales modernos utilizan tres formas energéticas básicas: energía calórica, energía mecánica y energía eléctrica.

a) Energía Calórica

La mayoría de los procesos industriales requieren de temperaturas mayores que la temperatura ambiente, llegando en muchos casos a varios centenares de grados. La energía calórica se utiliza a escala industrial para aumentar la temperatura de los materiales y, como consecuencia de esto, producir cambios físicos y/o químicos de interés. Se necesita energía calórica en procesos de cocción, secado, evaporación, concentración, tostación, fundición, destilación, pirólisis, etc. También se utiliza energía calórica para producir energía mecánica y eléctrica.

La energía calórica para uso industrial puede provenir de varias fuentes:

- De la energía solar directa.
- De la combustión de material orgánico (ej.: carbón, leña, gas, petróleo y derivados).
- De una corriente de fluido caliente (ej.: vapor de agua, gas).
- De la energía geotérmica.

La combustión de un material orgánico representa la fuente de energía calórica más importante en la actualidad. Al quemar el combustible se genera dióxido de carbono y agua. Esta reacción es exotérmica y el calor liberado dependerá del nivel de oxidación del carbono. Si el combustible contiene, además, azufre y/o nitrógeno, éstos se oxidan formando óxidos de azufre (SO_2) y/o nitrógeno (NO_x), respectivamente. En caso de que el proceso de combustión no sea completo, se generan compuestos intermedios, tales como CO, alquitranes, mercaptanos y otros compuestos orgánicos volátiles. Cuando el combustible contiene minerales (ej.: sodio, hierro, calcio), se forma un residuo sólido (ceniza) que está compuesto, principalmente, de los óxidos de los minerales respectivos. Las cenizas finas escapan, normalmente, con los gases de combustión en forma de material particulado.

En los procesos industriales, el calor liberado por la reacción de combustión se puede utilizar directamente, como por ejemplo, en el caso de un horno con calentamiento directo. El calor liberado por la llama o el alto contenido calórico de los gases provenientes de la combustión se utiliza para llevar a cabo el calentamiento deseado. Alternativamente, el calor de combustión puede ser utilizado para calentar un fluido (ej.: agua) en una caldera y utilizarlo como agente calórico. La gran mayoría de las aplicaciones de este tipo utiliza vapor de agua como agente calórico. En muchas industrias, se aprovecha líneas de fluido caliente que requieren ser enfriadas, para calentar corrientes que necesitan aumentar su temperatura. En el caso de la generación de energía eléctrica a partir de combustión (es decir, termoeléctrica), el proceso consiste en calentar vapor de agua a alta presión, que se utiliza en una turbina para generar electricidad.

La energía solar es la principal fuente de energía calórica existente en la Naturaleza. Esta fuente de energía calórica es "renovable" y la superficie de la Tierra recibe alrededor de 340 W/m^2 ; lo que representa un impresionante potencial energético. La energía calórica solar, sumada a la presencia de gases invernadero, permite mantener las condiciones térmicas en la superficie terrestre apropiadas para la vida, y es la fuente primaria del movimiento de las grandes masas de agua y aire en la Tierra. Más aún, la energía solar es el sostén fundamental de la actividad fotosintética, a partir de la cual se generan todos los recursos orgánicos de la Tierra. Sin embargo, el uso directo de la energía solar para proveer energía calórica a escala industrial, no es significativo a nivel global, comparado con la magnitud de estos procesos naturales. La utilización productiva directa de la energía solar se da en el secado de productos alimenticios, en procesos de evaporación y cristalización, y en el calentamiento de agua de procesos utilizando colectores solares.

b) Energía Mecánica

La energía mecánica se requiere para el transporte y transformación física de las materias primas. El transporte de materias primas dentro del circuito productivo constituye un importante consumo de energía mecánica. Todas las instalaciones industriales poseen bombas y/o compresores, para aumentar la presión de los fluidos e impulsarlos a través de los diferentes ductos. A su vez, donde se utilice materias primas sólidas, se encontrará correas transportadoras u otros vehículos para su transporte.

Normalmente, los procesos que utilizan materias primas sólidas requieren de operaciones para reducción de tamaño u otra forma de procesamiento mecánico. Esto se puede ilustrar para el caso de la producción de astillas a partir de troncos; el desfibrado mecánico de astillas de madera; las operaciones de molienda en la industria minera; la producción de harina a partir de trigo, etc.. Todas estas operaciones se caracterizan por su alta demanda de energía mecánica.

La energía mecánica puede provenir de diferentes fuentes, como por ejemplo:

- La tracción animal.
- La energía cinética de un cauce natural de agua o del viento.
- Los motores a vapor, de combustión interna, o eléctricos; estos últimos son las fuentes más utilizadas en la industria moderna.

c) Energía Eléctrica

En Chile, el sector generador de energía eléctrica está constituido por un conjunto de centrales hidroeléctricas y termoeléctricas a lo largo del país, destinado a satisfacer la demanda eléctrica del sector industrial y doméstico. El año 1997 se produjo cerca de 30 millones de MWh, lo que representa un consumo per cápita del orden de 4,5 KWh/persona/día. El incremento anual de la demanda en la última década es del orden de 1-2 millones de MWh, siguiendo estrechamente el incremento del PIB. Como referencia, cabe señalar que una central hidroeléctrica de 400 MW puede generar un máximo de 3,5 millones de MWh/año, operando continuamente a plena

capacidad; es decir, estaríamos requiriendo una nueva central cada 3 años.

Otras fuentes de energía incluyen los combustibles derivados del petróleo (gasolina, kerosene, gas licuado), gas natural, carbón (mineral y vegetal) y leña. En 1997, ellos generaron del orden de 60 millones de MWh, de los cuales casi el 50% se debe a la combustión de derivados del petróleo. La creciente importación de gas natural permite proyectar un fuerte incremento de su contribución a la generación de energía en el país.

De acuerdo a datos de 1997, la mayor parte de los combustibles del petróleo se consumen en transporte (51%) y en el sector industrial y minero (23%). El 70% del consumo de leña corresponde al sector doméstico, mientras que la industria consume el 24% (principalmente, la industria forestal).

La energía eléctrica se consume industrialmente en iluminación, motores eléctricos y calefactores. La energía eléctrica se puede obtener a partir de varias fuentes primarias:

- A partir de la energía potencial hidráulica (es decir, hidroeléctrica).
- A partir de la energía química de combustibles fósiles (es decir, termoeléctrica).
- A partir de la energía nuclear.
- A partir de la energía solar (celdas fotovoltaicas).

En muchos casos, la energía eléctrica es producida en las mismas plantas industriales, utilizando sistemas de cogeneración. Por ejemplo, los residuos de la industria forestal pueden ser utilizados como combustible en plantas termoeléctricas, generándose alrededor de 400 kWh por tonelada de residuos.

4.3) FUENTES Y TIPOS DE RESIDUOS

Los residuos se pueden clasificar según su estado físico en residuos sólidos, líquidos y gaseosos. Dichos residuos se generan en todos los ámbitos de la actividad humana, tanto doméstica como industrial. A continuación se revisan brevemente las principales características de los residuos.

4.3.1) Residuos Sólidos

Los residuos sólidos se generan tanto en la actividad doméstica como industrial, y constituyen un problema ambiental crítico en la sociedad industrial moderna.

Residuos Sólidos de Origen Doméstico

Aquellos residuos generados por la actividad doméstica constituyen uno de los principales problemas ambientales de las grandes ciudades. La tasa diaria de generación de residuos sólidos urbanos (RSU) está en el rango 0,5-1,5 kg/habitante, dependiendo del nivel de desarrollo económico y del grado de urbanización. En

general, a mayor nivel económico y mayor urbanización, se tiende a generar una mayor cantidad de RSU por habitantes. La Tabla siguiente muestra los rangos de composición típica:

TABLA 4.1: COMPOSICIÓN TÍPICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

COMPONENTE	% EN PESO, BASE HÚMEDA
Material orgánico	40-50
Papeles y cartones	15-22
Escorias, cenizas y lozas	4-6
Plásticos	10-15
Textiles	4-6
Metales	2-3
Vidrios	1-3
Otros	6-7

Residuos Sólidos de Origen Industrial

Por su parte, los residuos sólidos de origen industrial (RSI), pueden generarse a partir de diferentes fuentes, que reflejaran directamente la naturaleza de los materiales utilizados y de los productos derivados del procesamiento:

<ul style="list-style-type: none"> • Cenizas y escorias de los sistemas de combustión para generación de vapor de procesos. Sus características químicas dependen del tipo de combustible y de las condiciones de combustión.
<ul style="list-style-type: none"> • Sólidos secundarios generados por los sistemas de tratamiento de efluentes (ej.: lodos de sedimentación, lodos biológicos) y/o de gases (ej.: cenizas y polvos de los filtros, precipitadores electrostáticos o ciclones).
<ul style="list-style-type: none"> • Insumos químicos gastados no reutilizables (ej. catalizadores agotados, solventes gastados).
<ul style="list-style-type: none"> • Envases y otros contenedores de materias primas, insumos y equipos. Sus características dependen del tipo de contenedor y de la naturaleza de los compuestos almacenados.
<ul style="list-style-type: none"> • Materiales residuales de las operaciones de mantención (ej. aceites, grasas y solventes gastados, partes de equipos dañadas, aislantes, escombros, chatarra)
<ul style="list-style-type: none"> • Materias primas no utilizables, debido a que no poseen características compatibles con el proceso (ie. fuera de especificación) o que no han sido utilizadas debido a problemas con las operaciones (ie. Pérdidas de proceso).
<ul style="list-style-type: none"> • Partes no utilizables de las materias primas (ej.: cortezas, huesos, vísceras).
<ul style="list-style-type: none"> • Materiales intermedios y productos fuera de especificación, sin valor comercial, generados debido a problemas operacionales u otras razones.
<ul style="list-style-type: none"> • Residuos de actividades de construcción, generados durante la construcción e instalación de nuevas facilidades, modificaciones a las instalaciones existentes, etc.

La tasa de generación de RSI varía ampliamente según el tipo de actividad, con valores típicos en el rango 0,01-0,1(ton RSI/ton producto). En las últimas décadas, se ha puesto mucho énfasis en la gestión racional de los residuos sólidos, ya que se puede lograr una significativa reducción de los volúmenes generados. Tal como se menciona en el Capítulo 5, se puede minimizar las pérdidas de material sólido mediante una cuidadosa gestión, manteniendo una segregación inteligente de los residuos, para su posterior reutilización y revalorización. Más aún, una adecuada gestión de producción puede ayudar a minimizar las pérdidas debidas a materias primas y productos finales fuera de especificación. La recuperación de recursos potenciales durante el proceso de manufactura es una opción factible en muchas actividades industriales, sin que para ello se requieran grandes montos de inversión.

La Tabla 4.2 muestra factores de generación de RSI típicos, para algunos sectores industriales relevantes.

TABLA 4.2: FACTORES DE GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS INDUSTRIALES

ACTIVIDAD INDUSTRIAL	FACTOR DE GENERACIÓN (ton. RSI / ton. Producto)	TIPOS DE RESIDUOS SOLIDOS
Industria de productos lácteos	0,005 – 0,01	Lodos de tratamiento de efluentes y gases. Productos sólidos y envases fuera de especificación. Filtros y telas gastados, residuos de mantención..
Matanza de ganado y procesamiento de carne	0,03 – 0,20	Lodos de tratamiento de efluentes. Cenizas de caldera. Estiercol. Restos de vísceras, huesos, piel, pezuñas.
Industria de recursos marinos: a) Conserveras b) Harina y aceite de pescado	0,02 – 0,05 0,005 – 0,01	Lodos de tratamiento de efluentes. Cenizas de caldera. Vísceras y otros restos de pez no procesables. Envases y productos fuera de especificación. Lodos aceitosos.
Industria de productos forestales: a) Aserraderos y tableros b) Pulpa y papel	0,05 – 0,30 0,02 – 0,06	Lodos de tratamiento de efluentes y gases. Aserrín, cenizas, residuos contaminados con biocidas, productos fuera de especificación, residuos del sistema de recuperación de reactivos.

4.3.2) Residuos Líquidos

El agua es uno de los principales constituyentes en los procesos tanto naturales como industriales. Es un poderoso solvente, y como tal, un vehículo de transferencia de

una amplísima gama de compuestos orgánicos e inorgánicos solubles. A su vez, las propiedades termodinámicas del agua la transforman en un excelente agente térmico para transportar energía calórica de una parte a otra del proceso.

El uso doméstico e industrial de agua resulta en la generación de residuos líquidos, cuya composición y volumen dependen del tipo de uso, de la naturaleza de los procesos, del nivel tecnológico, de los materiales utilizados y de la gestión de producción.

Residuos Líquidos de Origen Doméstico

Tal como se muestra en la Tabla 4.3, los residuos líquidos derivados de la actividad doméstica, están constituidos principalmente por las aguas generadas por las actividades de lavado (ropa, utensilios, alimentos, personas) y las aguas sanitarias (fecales). La tasa de generación diaria de residuos líquidos domésticos está en el rango 0,1-0,4 (m³/persona).

TABLA 4.3: COMPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS

COMPOSICIÓN	CONCENTRACIÓN (KG/M ³)	TASA DE GENERACIÓN TÍPICA (G/HAB./DÍA)
DBO ₅	0,10-0,40	18-50
DQO	0,25-1,00	40-115
Sólidos suspendidos	0,10-0,35	18-50
Nitrógeno total	0,02-0,08	5-13
Fósforo	0,01-0,02	0,4-2
Grasas	0,05-0,15	10-25
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	10 ⁶ - 10 ⁹	-

Residuos Líquidos de Origen Industrial

Por su parte, las aguas residuales generadas en la actividad industrial (RIL) incluyen:

- Aguas de enfriamiento
- Aguas de procesos
- Aguas de lavado de equipos
- Aguas servidas

Constituyen un enorme volumen y los efluentes de una planta de tamaño mediano pueden equivaler en volumen a los generados por una gran ciudad. Por ejemplo, una planta celulósica, cuya capacidad de producción es de 1.000 ton pulpa/día y que consume 70 m³ agua/ton pulpa, genera descargas equivalentes a una ciudad de alrededor de 300.000 habitantes.

La composición de las aguas residuales industriales es altamente dependiente del tipo de procesos y de la naturaleza de los materiales utilizados. Más adelante en este capítulo se revisa los residuos líquidos generados en algunas actividades de interés.

4.3.3) Residuos Gaseosos

La contaminación atmosférica reviste gran importancia, debido a su enorme impacto directo sobre la salud humana. Cada persona adulta respira 15-28 m³/día de aire y posee una superficie alveolar en sus pulmones de alrededor de 65 m². La mayoría de los contaminantes presentes en el aire puede encontrar fácilmente su camino hacia la sangre, debido a que la transferencia de materia a través de la pared de los capilares pulmonares es muy poco selectiva.

Los contaminantes atmosféricos más comunes incluyen: materiales particulados, aerosoles, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos, ozono, oxidantes fotoquímicos, dióxido de carbono, monóxido de carbono, ruido, radiaciones, etc.. Las principales fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos se pueden clasificar en Fuentes Fijas y Fuente Móviles.

- **Fuentes Fijas**

Son aquellas que operan en un punto fijo, es decir, el foco de emisión no se desplaza en forma autónoma en el tiempo (chimeneas industriales y domésticas, calderas, hornos, etc.). Los procesos de combustión típicos de las grandes urbes se pueden clasificar de acuerdo a su objetivo en:

- Sistemas los destinados a la producción de energía calórica con fines domésticos.
- Sistemas utilizados para fines industriales.

Las instalaciones de los primeros se caracterizan por su pequeña potencia y su gran dispersión geográfica dentro del casco urbano. Los segundos, por el contrario, se encuentran concentrados en pequeñas zonas bien definidas. Los combustibles empleados en estas instalaciones pueden presentarse en los tres estados físicos conocidos. Dentro de los más usados están: madera, carbón, gas licuado, petróleo, kerosene y gas natural. La combustión de estas sustancias produce diversos contaminantes en muy diferentes proporciones, tal como se resume en la Tabla 4.4.

Las fuentes fijas se pueden clasificar de acuerdo a la envergadura y distribución espacial de las emisiones:

Fuentes Fijas Puntuales: Son aquellas que generan emisiones gaseosas en forma más o menos continua, a través de una chimenea o punto de descarga concentrado, con flujos significativos (ej.: mayores de 1000 m³/día).

Fuentes Fijas Difusas: Son aquellas que generan emisiones en bajas cantidades, distribuidas espacialmente (ej.: purgas de gases a través de válvulas de alivio).

- **Fuentes Móviles**

Son las que pueden desplazarse en forma autónoma, emitiendo contaminantes en su trayectoria (automóviles, trenes, camiones, buses, aviones, barcos, etc.). La mayor parte de los sistemas de transporte actual, obtienen su energía por medio de la combustión de diversos productos, lo que origina diferentes compuestos que son emitidos a la atmósfera. Los motores de combustión interna, constituyen una de las principales fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos, tales como monóxido de carbono, hidrocarburos, aldehidos, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, partículas en suspensión (humos), plomo y derivados. La proporción en que se emiten estos contaminantes depende de una serie de factores, entre ellos: tipo de motor, combustible usado, y estado de mantención del vehículo.

TABLA 4.4: FACTORES DE EMISIÓN TÍPICOS PARA CALDERAS INDUSTRIALES, SIN DEPURACIÓN DE GASES

COMBUSTIBLE	MP	SO₂	NO_x	CO	COT³
Gas natural en calderas industriales (kg/10 ⁶ m ³)	20-80	10	8.800	640	28
Residuos de madera en calderas industriales (kg/ton)	7	0,04	0,2-1	1-7	0,1
Residuos de madera en calefactores domésticos (kg/ton)	17	0,2	1,3	126	115
Fuel oil N°6 (1% S) en calderas industriales. (kg/ton)	2	20	0,02	s.i.	0,2
Carbón bituminoso (kg/ton)	8	19	s.i.	1	s.i.

4.4) TIPOS DE PROCESOS Y TECNOLOGÍAS

Estos tópicos son parte de la ingeniería de procesos y constituyen temas altamente especializados. Por lo tanto, aquí sólo se enumerarán los aspectos básicos, a modo de referencia para aquellos lectores sin formación de ingeniería. En primer lugar, se describen aquellas operaciones que son comunes a una amplia gama de procesos industriales. En seguida, se revisan brevemente algunas actividades industriales relevantes a la economía nacional (ej.: Industrias de alimentos, petróleo, forestal, minera).

4.4.1) Operaciones Unitarias Típicas de la Industria de Procesos

Los procesos industriales incluyen un amplio rango de operaciones, tales como:

- Almacenamiento y transporte de materiales.
- Lavado de materiales y equipos.
- Reducción de tamaño (en el caso de sólidos).
- Procesos de separación de componentes.

³ COT : carbono orgánico total

- Procesos térmicos.
- Reacciones químicas y procesamiento biológico.
- Procesos de generación energética, etc..

Por simplicidad, aquí sólo se enumeran las principales operaciones unitarias, y se clasifican de acuerdo a su naturaleza y al papel que juegan en los procesos industriales.

a) Operaciones para el Transporte de Materiales

Aquí se incluye todos aquellos equipos que se utilizan para el transporte de sólidos, líquidos y gases, dentro de una planta industrial. Para el transporte de sólidos se utilizan preferentemente sistemas de correas transportadoras, camiones tolva, carros u otros vehículos, transporte hidráulico, etc. Las industrias forestal, minera y pesquera utilizan materias primas sólidas y el transporte de éstas constituye un importante costo energético.

Los líquidos son transportados a través de cañerías y canales, por gravedad, o a través del uso de bombas. Por su parte, los gases son impulsados utilizando sopladores y compresores, los que permiten incrementar su presión.

Los materiales se almacenan en recipientes abiertos o cerrados, cuyos materiales y especificaciones dependen de la naturaleza de los compuestos a almacenar y de las condiciones de presión y temperatura. Toda planta industrial posee contenedores para sólidos, y estanques para almacenar líquidos y gases.

Los residuos derivados de estas operaciones incluyen: gases de combustión generados por los motores de combustión interna de los sistemas de impulsión, pérdidas de materiales transportados y envases residuales.

b) Lavado de Materiales y Equipos

Esta operación es trivial desde el punto de vista operacional. Normalmente, se requiere lavar materias primas (ej.: en la agro-industria) y equipos, para mantener condiciones de higiene apropiadas. Esta operación constituye una de las principales fuentes de aguas residuales de origen industrial. La composición química de las aguas de lavado refleja directamente la naturaleza de los materiales afectados por dicha operación.

c) Reducción de Tamaño

Esta operación es muy común en las industrias mineras, forestales y de alimentos. Se requiere reducir el tamaño de la materia prima original, hasta dimensiones que hagan posible su procesamiento posterior. El costo energético de estas operaciones es bastante alto. Se utilizan chancadoras, molinos, cuchillos, sierras, desfibradores y otros sistemas mecánicos para cumplir el objetivo de reducción de tamaño.

Los residuos sólidos que se generan corresponden a pérdidas de los materiales

procesados. En el caso de las operaciones de reducción de tamaño en presencia de agua, se generan residuos líquidos con un alto contenido de materiales solubilizados.

d) Procesos de Separación

Generalmente, los procesos industriales requieren la separación de uno o más compuestos. Estos procesos de separación dependen de las características físicas y químicas de los compuestos a separar, aprovechando diferencias en tamaño, solubilidad, volatilidad, carga electrostática, densidad, etc. Algunos ejemplos se ilustran a continuación:

- **Separaciones líquido-líquido:** Si se desea separar dos o más compuestos líquidos, cuyas volatilidades son diferentes, lo más apropiado es utilizar un proceso de destilación. En este sistema, se calienta la mezcla líquida en una columna de destilación y se recoge las diferentes fracciones de acuerdo a su punto de ebullición. Los procesos de refinación del petróleo se basan en separaciones utilizando sistemas de destilación. Si los compuestos líquidos de interés presentan diferente solubilidad frente a un solvente externo, se puede utilizar un proceso de extracción por solvente. En el caso de mezclas de líquidos inmiscibles, es posible utilizar centrifugación para lograr su separación.
- **Separaciones de Compuestos en Fase Gas:** En el caso de mezclas de gases, éstos se pueden separar utilizando las diferencias en afinidad por un adsorbente (es decir, adsorción) o por un líquido (es decir, absorción).
- **Separaciones Líquido-Sólido:** Es muy común encontrar una corriente líquida que contiene material sólido. Para separar el sólido del líquido, se pueden utilizar diferentes procesos, dependiendo de las características físicas del sólido. Si el sólido es de alta densidad, puede usarse un proceso de sedimentación. Por otra parte, si el sólido es de menor densidad que el líquido, se puede utilizar un sistema de flotación. Otros sistemas de separación sólido-líquido de amplio uso industrial se basan en la filtración y en la centrifugación.
- **Separaciones Sólido-Sólido:** En estos sistemas se aprovechan las diferencias de densidad, tamaño o propiedades magnéticas, entre las diferentes fracciones sólidas que se desea separar.

e) Procesos Térmicos

En todas las operaciones industriales se requiere calentar y/o enfriar líquidos, gases y/o sólidos. Para ello, se utilizan equipos que permiten transferir el calor de un medio a otro. Una operación común consiste en transferir calor de un fluido a otro, utilizando un intercambiador de calor. El objetivo de dicha transferencia de calor puede ser: aumentar la temperatura de un material, secar un sólido, evaporar un líquido, enfriar un fluido, condensar un vapor, congelar un líquido, etc..

Normalmente, los procesos de calentamiento se realizan utilizando vapor de agua, gases calientes de combustión, aceites calientes, radiación, u otros medios. En el

caso de las operaciones de enfriamiento, el medio más utilizado es agua; también se utiliza aire para enfriar grandes volúmenes de agua de procesos. Es frecuente encontrar también sistemas de combustión para generar energía calórica, tales como hornos y calderas.

Debido al alto costo de los combustibles, los diseños modernos incorporan conceptos de integración energética. En su forma más simple, dicha integración consiste en utilizar aquellas corrientes de proceso que se encuentran a alta temperatura y que requieren enfriamiento, como medio para calentar aquellas líneas que se encuentran a baja temperatura y que requieren de calentamiento.

Los residuos producidos por estas operaciones incluyen, principalmente, los gases de combustión derivados de los sistemas de generación de energía calórica y las aguas de enfriamiento.

f) Reacciones Químicas y Biológicas

Estos procesos de transformación se realizan en reactores. Existen diferentes configuraciones y diseños. Ellos pueden ser operados continuamente (con entrada de reactivos y salida simultánea de productos) o en forma intermitente (carga de reactivos, reacción, y descarga una vez que se complete el proceso).

Generalmente, los reactores poseen sistemas de mezclado para mantener un buen contacto entre los distintos compuestos. En caso de existir procesos exotérmicos, será necesario implementar intercambiadores de calor para mantener el nivel de temperatura y evitar el sobrecalentamiento.

Los procesos químicos cubren amplios rangos de temperatura y presión. En el caso de los reactores utilizados en la metalurgia del cobre y del acero, ellos involucran procesos de oxidación y/o reducción a altas temperaturas. Por su parte, los procesos que utilizan agentes biológicos (es decir, microorganismos, enzimas) se llevan a cabo a temperaturas menores de 50°C y a presión cercana a la atmosférica.

Los reactores químicos son frecuentes en la industria química, petroquímica y metalúrgica. Los reactores biológicos se encuentran en las aplicaciones biotecnológicas (ej.: producción de queso, yoghurt, cerveza, penicilina y otros procesos de fermentación). Su aplicación de mayor escala a nivel mundial es en el tratamiento biológico de efluentes.

4.5) ACTIVIDADES INDUSTRIALES

4.5.1) Industria de Alimentos

La industria alimenticia está constituida por aquellas actividades de origen agrícola, pecuario, y marino, que sirven para generar productos de consumo humano y animal. Este tipo de industria cubre una amplia gama de rubros; los

principales se mencionan a continuación:

- Frutos y Vegetales
- Productos lácteos
- Carnes
- Avícolas
- Granos
- Azúcar
- Productos Marinos
- Aceites y Grasas comestibles
- Cervecería, Destilería, Vinícola
- Bebidas Gaseosas, Jugos
- Extractos, Saborizantes
- Alimentos especiales: Bebés, Dietéticos
- Alimentos preparados.
- Alimentos congelados

En Chile, estas industrias están orientadas tanto al mercado interno como externo. Durante la última década del siglo XX, las exportaciones agropecuarias han sido del orden de US\$ 1.100 millones anuales, lo que constituye una importante fuente de divisas por exportación de productos básicos y derivados (ej.: vinos), y representa el 10% del Producto Bruto Interno. Sus productos principales incluyen: trigo, cebada, arroz, papas, remolacha, maíz, oleaginosas y frutos diversos. Además, existe una actividad ganadera y avícola limitada, destinada a satisfacer necesidades de consumo interno.

Uno de los principales rubros de la industria de alimentos lo constituye la actividad pesquera, la que se ha incrementado significativamente en las últimas décadas, con un desarrollo acelerado en la producción de harina de pescado, conservas y congelados. Una fracción significativa de su producción se orienta al mercado externo (principalmente, harina de pescado). A fines del siglo XX, las exportaciones anuales del sector pesquero alcanzaron alrededor de US\$ 1.400 millones, representando el 11% de las exportaciones nacionales. En el contexto mundial, Chile ocupa el 5° lugar del ranking de desembarque (6% de la producción mundial), con alrededor de 5–7 millones de toneladas. Cabe destacar que el desembarque total promedio de la VIII Región de Chile desde 1994 hasta 1998 es de alrededor de 4 millones de toneladas por año, equivalente a una producción de harina de pescado de 700.000 toneladas.

Es necesario destacar que en la industria de alimentos, se incluye una amplia diversidad de materias primas, productos, niveles de procesamiento y tecnologías. La demanda de productos alimenticios de gran calidad, que mantengan la composición nutritiva y las características organolépticas de la materia prima original, han conducido a mejoras en los métodos de procesamiento.

Residuos de la Industria de Alimentos

La composición y el volumen de los residuos generados por la industria de alimentos dependen tanto del tipo de materias primas, como de las técnicas de

procesamiento utilizadas. En general, se producen grandes cantidades de residuos sólidos y líquidos, la mayoría de los cuales son biodegradables. Los residuos gaseosos corresponden a gases de combustión generados en los hornos y calderas. En algunos casos, se generan compuestos volátiles odoríferos (ej.: aminas y mercaptanos), derivados de la descomposición de proteínas u otros compuestos de origen biológico.

Este tipo de industria consume grandes cantidades de agua, principalmente, en las operaciones de lavado, tanto de equipos como de materias primas y productos. Es importante destacar que la actividad agropecuaria genera bastantes residuos, principalmente sólidos, que pueden ser utilizados como combustibles o forraje. Se ha constatado que los residuos sólidos pueden llegar a constituir más del 50% del peso de las materias primas originales.

A continuación se revisa brevemente algunas industrias alimenticias relevantes.

a) Generación de Productos Lácteos

La industria de lácteos involucra una variedad de productos finales que van desde la leche pasteurizada a productos más elaborados como quesos, leche en polvo, leche condensada, yoghurt, helados, etc., en la que se utiliza diferentes insumos, tales como azúcar, frutas, jugos de frutas, nueces, etc. Esto produce residuos con diferentes características dependiendo del producto final deseado. El nivel de procesamiento también es dependiente del producto final, no obstante, existen operaciones básicas involucradas en el procesamiento de estos productos:

- recepción
- almacenamiento en tanques refrigerados
- clarificación
- separación
- pasteurización

De éstas, la operación más importante en la producción de lácteos es la **pasteurización**, la cual permite eliminar los organismos patógenos causantes de enfermedades e inactivar enzimas, mediante tratamiento térmico. El método más común de pasteurización, es el calentamiento a 73°C durante 16 segundos aproximadamente, seguido de un enfriamiento rápido. El producto pasteurizado se debe mantener bajo refrigeración hasta que sea utilizado, ya que este método no destruye todas las bacterias presentes. Si se requiere una mayor duración del producto, es necesario realizar una **esterilización**. Este método elimina completamente todos los microorganismos patógenos y no patógenos, mediante la exposición a temperaturas superiores a 105°C. La Figura 4.1 ilustra los procesos de producción de leche pasteurizada y queso.

Residuos de la industria de productos lácteos.

Los residuos líquidos son el principal problema en la industria de productos lácteos, debido a su alta carga orgánica y grandes volúmenes generados. En la

Tabla 4.5 se presenta una caracterización de los efluentes de los principales tipos de industrias lácteas. Los parámetros característicos presentados en dicha tabla son altamente dependientes de la tecnología utilizada y del manejo interno de las aguas.

En general, los residuos líquidos poseen una composición adecuada para el desarrollo de los microorganismos, por lo que se pueden tratar eficientemente mediante sistemas biológicos, logrando reducir la concentración de material orgánico disuelto en 70-95%. Además, estos efluentes contienen materiales biodegradables de valor comercial potencial, tales como, proteínas, grasas y azúcares.

El control de estos efluentes debe orientarse al uso eficiente de las aguas, sobre todo las de lavado de equipos. Es importante realizar una segregación de las líneas residuales, que permita reciclar y reprocessar aquellas que ofrecen un potencial para la generación de sub-productos. Por ejemplo, durante la producción de quesos, se genera un suero que posee una carga contaminante elevada, por lo tanto, es recomendable su recuperación y posterior procesamiento, para obtener sub-productos de valor comercial, tales como: sustituto de alimento animal, grasas lácteas (mantequillas, cremas), concentrado proteico o etanol (ver la Figura 4.2).

TABLA 4.5: PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA DE PRODUCTOS LÁCTEOS

TIPO DE EFLUENTES	FLUJO (m ³ /TON PROD.)	DBO ₅ (KG./TON PROD.)	SÓLIDOS SUSPENDIDOS (KG./TON PROD.)
Lechería	0,1 – 9	0,1 – 17	0,1 - 3
Mantequilla	0,8 – 6	0,2 - 2	0,4 - 2
Helados	0,5 – 7	0,7 – 21	0,2 - 2
Leche condensada	0,8 – 7	0,2 – 13	0,2 - 2
Queso	0,2 – 5	0,3 - 4	0,1 - 0,3
Suero seco	0,5 – 7	0,1 – 57	0,2 - 0,6
Yoghurt	0,5 - 8	0,1- 8	0,2 - 11
OTROS COMPONENTES DE IMPORTANCIA AMBIENTAL			
Nitrógeno (mg/l)		1 - 180	
Fósforo como PO ₄ (mg/l)		9 - 210	
Cloruros (mg/l)		46 -1900	
Temperatura (°C)		8 - 46	
pH		4 - 12	

Los residuos sólidos generados por este tipo de industrias son de menor importancia en cantidad y calidad. Proviene fundamentalmente de las operaciones de envasado y empaçado (ej.: cajas, envases plásticos, bolsas

plásticas, botellas etc.).

Los residuos gaseosos provienen de las calderas, requeridas para generar el vapor utilizado en las operaciones de pasteurización y secado. La composición de los gases de combustión depende del tipo de combustible utilizado.

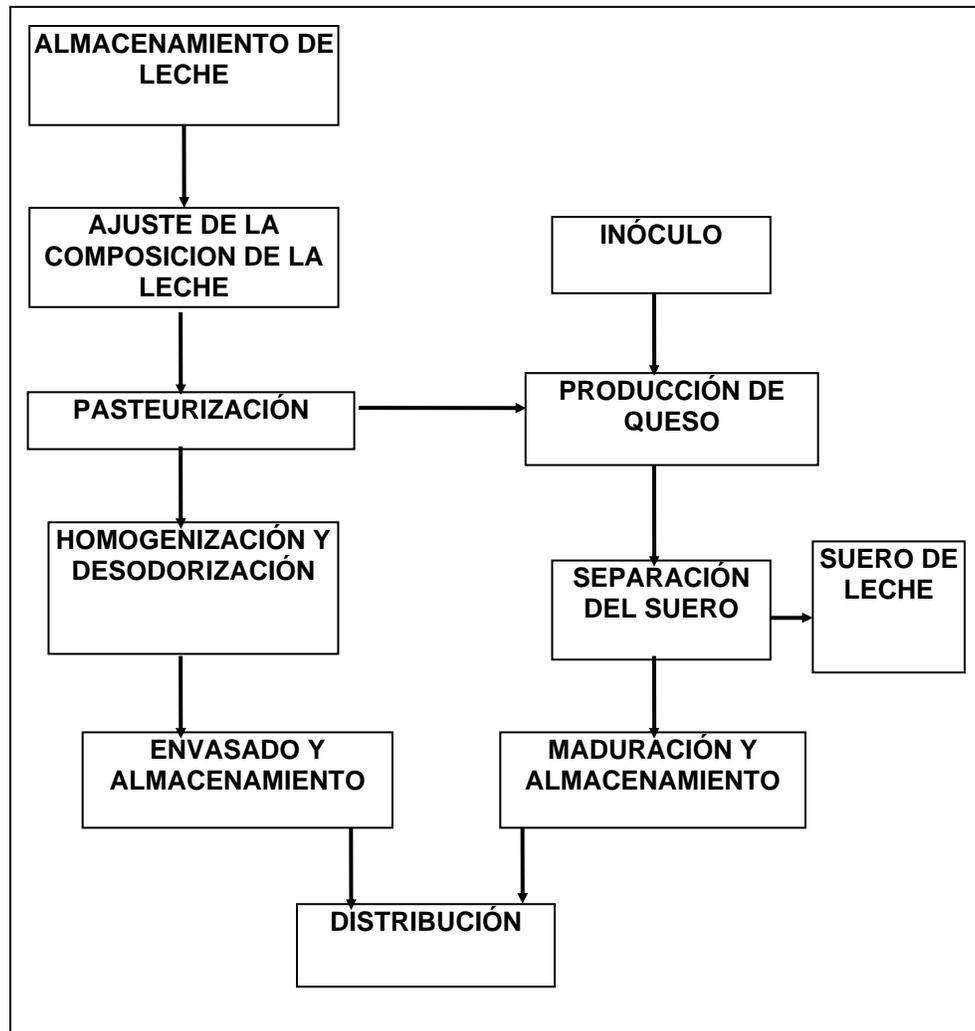


FIGURA 4.1: PRODUCCIÓN DE LECHE Y QUESO

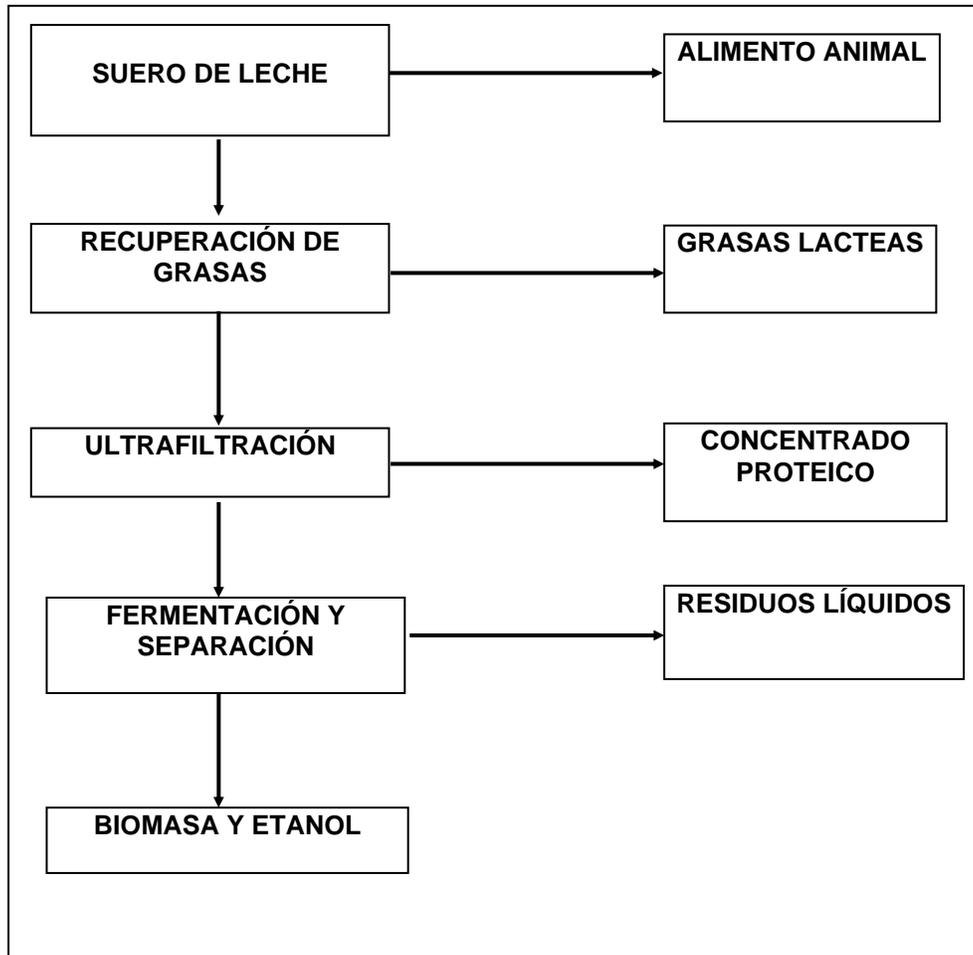


FIGURA 4.2: PROCESAMIENTO DEL SUERO DE LA LECHE

b) Procesamiento de Carnes

El procesamiento de carnes involucra variadas actividades, que van desde un matadero a una planta de procesamientos de productos más elaborados. Este rubro incluye una amplia gama de productos, tales como: simples cortes de carne para venta directa, carne envasada, cecinas, tocinos, hamburguesas, concentrados, etc.. En estas tareas se emplean distintas operaciones, entre las que se destacan el corte, desvicerado, deshuesado, molienda, cocción etc.. En la Figura 4.3 se muestra un esquema del procesamiento de la carne.

Residuos de la industria de procesamiento de carne

El principal problema ambiental para este tipo de industria lo conforman los residuos líquidos, los cuales provienen fundamentalmente de las aguas de sangre (Tabla 4.6). Por lo tanto, se hace necesario realizar un adecuado manejo de estas aguas, de modo que se facilite su recuperación y reprocesamiento. Existen varias opciones de reprocesamiento de la sangre:

- Secado y venta como alimento animal.
- Coagulación de las proteínas de la sangre por calentamiento.
- Procesamiento para preparaciones farmacéuticas, etc.

Las aguas de sangre, pueden ser evaporadas y concentradas para alimento animal o enviadas a una planta de tratamiento de residuos líquidos, antes de su disposición final. La elección de una u otra alternativa va a depender del mercado existente y de la factibilidad técnica y económica de tales opciones.

TABLA 4.6: RANGOS DE COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS DE DESECHOS DE LA INDUSTRIA DE PROCESAMIENTO DE CARNE

	MATADEROS	PROCESAMIENTO
Flujo (m ³ /ton m.p.)	1,3 – 14,6	2,0 - 20,3
DBO ₅ (kg/ton m.p.)	1,5 – 18,8	2,3 - 30,5
Sól. Susp. (kg/ton m.p.)	0,6 – 20,5	0,6 - 22,5
Grasas (kg/ton m.p.)	0,2 – 16,8	0,8 - 27,0
Nitrógeno (kg/ton m.p.)	0,2 - 2,1	0,04 - 2,7
Cloro (kg/ton m.p.)	0,01- 7,9	0,5 - 36,7
Fósforo (kg/ton m.p.)	0,01 – 1,2	0,03-0,63

Con respecto a los residuos sólidos generados por esta actividad, estos son altamente dependientes del tipo de procesamiento al que es sometida la materia prima y a la existencia de un mercado para el cuero, huesos, interiores, sangre, y otros subproductos potenciales. En el caso de los mataderos, la mayor parte de los residuos generados están constituidos por estiércol de los animales (84%), puesto que existe un aprovechamiento intensivo de pezuñas, cueros, huesos, etc.

c) Procesamiento de Recursos Marinos

Producción de Harina de Pescado

La elaboración de harina de pescado utiliza diferentes especies de pescado, dependiendo de su disponibilidad. También se utilizan antioxidantes para estabilizar el producto final. Junto a la producción de harina se obtiene el aceite de pescado, el que se vende como subproducto.

El proceso de elaboración de harina de pescado consta de cuatro etapas principales:

a) **Pesca y descarga de la materia prima:** Los peces son extraídos en alta mar y transportados al puerto en barcos de diferentes tonelajes. La pesca se descarga utilizando bombas hidráulicas o de vacío. El agua utilizada para el bombeo (5 y 2 m³/ton pesca, en el caso de bombeo hidráulico y de vacío, respectivamente) se vierte directamente al mar, luego de separar los peces en una criba. El agua de descarga contiene una significativa cantidad de sólidos suspendidos y material orgánico disuelto.

b) **Cocción:** La cocción tiene por finalidad coagular las proteínas presentes, con lo que se libera gran cantidad del agua retenida, así como también los depósitos de lípidos del tejido muscular del pescado. La calefacción se realiza mediante una línea de vapor en contracorriente, con un flujo distribuido a lo largo del cocedor. El control de temperatura es importante, pues ésta influye en la viscosidad del aceite y luego, en la facilidad de eliminación de este último.

c) **Prensado:** En la prensa, al pescado cocido se le extrae casi por completo el líquido que aún contiene, el cual está compuesto por agua y aceite. Los productos obtenidos aquí son: Licor de Prensa y la Torta Prensada. El licor se pasa a través de intercambiadores de calor, con la finalidad de alcanzar una temperatura óptima para la separación en los decantadores. El licor del Decantador se vuelve a calentar y se alimenta a las centrifugas, donde se separan el aceite del agua de cola. El agua de cola es llevada hacia los evaporadores para concentrarla y pasarla a secado. Este líquido es rico en proteínas, por lo cual se adiciona a la etapa de prensado para mejorar las características de la harina.

d) **Secado:** En esta etapa se procesan en forma conjunta los sólidos provenientes de la prensa, del decantador y el concentrado adicionado, los cuales pasan por una etapa anterior de desmenuzado. La humedad de la torta de prensa (45 - 60%) se reduce a un 10% o menos, con el propósito de inactivar la actividad microbiana, facilitar la manipulación y conseguir economías por concepto de almacenamiento y transporte (reducción de un 40% en peso).

Siguiendo la etapa de secado, se agrega un antioxidante, que tiene la finalidad de evitar la descomposición del aceite que aún contiene producto e inhibir la reacción de las grasas de la harina con el oxígeno, la cual es altamente exotérmica.

Elaboración de Conservas

En la fabricación de conservas de recursos marinos se utiliza variadas materias primas, desde mariscos a diferentes tipos de pescado. Generalmente, este tipo de empresas están integradas a las plantas elaboradoras de harina de pescado, en la cual se procesan todos los residuos de pescado generados en la industria conservera. En estas últimas, se procesa la pesca más fresca y de mejor calidad.

El proceso de elaboración de conservas de pescado consta fundamentalmente de cinco etapas principales:

a) **Pesca y descarga de materia prima:** Esta etapa es similar al caso de la producción de harina de pescado.

b) **Corte y desvicerado:** El pescado se recibe desde los pozos de almacenamiento, en los cuales se mantiene con hielo para conservar la frescura. Luego va hacia la mesa de corte, donde son eliminados la cabeza, cola y vísceras, y el pescado que no cumple con las exigencias de calidad, los cuales son enviados a la planta de harina. El corte se realiza con cuchillos mecánicos o en forma manual. El desvicerado se realiza mediante un sistema de succión especial, el cual limpia completamente el pescado en su interior. En seguida, pasa a la mesa de empaque, donde el pescado es envasado en tarros metálicos previamente lavados.

c) **Cocción:** Esta se realiza en una cámara con vapor durante 30 minutos, después de los cuales, los tarros se invierten y drenan. Esta cocción tiene como objetivo eliminar el aceite y grasas, y sacar el agua contenida en el pescado.

d) **Dosificación:** En esta etapa, al pescado se le adiciona el líquido de cobertura, generalmente salsa de tomates concentrada o aceite. Luego, los envases son sellados en forma mecánica.

e) **Esterilización:** Este proceso se realiza en una autoclave, en la cual los tarros son tratados a 116°C. Desde aquí, los tarros salen calientes y se dejan enfriar para luego etiquetarlos y almacenarlos en bodega.

Residuos de la industria de procesamiento de recursos marinos

Los residuos líquidos generados por las actividades involucradas en el procesamiento de los recursos marinos provienen fundamentalmente de:

- Las aguas utilizadas en el transporte hidráulico de la pesca desde el barco a la unidad de descarga. Estas contienen restos de pescado (ej.: tejidos, escamas, sangre, etc.) que se generan durante la operación, los cuales varían según la calidad de la materia prima y las características del sistema de descarga.
- Los efluentes del proceso de producción de harina de pescado son generados principalmente en las operaciones de limpieza de la planta.
- Los efluentes del procesamiento de la pesca para producción de conservas y

congelados.

La Tabla 4.7 muestra las características de las aguas residuales de los distintos procesamientos de recursos marinos y de las líneas segregadas de la producción de harina de pescado. En el caso de la producción de harina de pescado se generan 30 – 50 kg DQO/ton de harina y 4 – 8 kg de grasas residuales/ ton de harina.

La industria de harina de pescado moderna genera una cantidad relativamente pequeña de residuos sólidos. Ello se debe al alto grado de aprovechamiento integral de todo el material orgánico. El mayor problema de contaminación por sólidos lo constituye la descarga de pescado desde las bodegas de los barcos de captura. Debido a la naturaleza de la operación de descarga, una fracción de la materia prima puede sufrir deterioro y ser devuelta al mar junto con el agua utilizada para realizar la descarga. En el caso de las bombas hidráulicas, el deterioro es mayor, llegándose a perder entre un 10 a un 15% de la carga original; para el caso de las bombas de vacío, la pérdida se reduce a menos de 3%. La recuperación de sólidos en las operaciones de descarga permite disminuir significativamente los residuos y aumentar la eficiencia de utilización de la materia prima. Otros residuos sólidos de las plantas comprenden las cenizas de caldera, en aquellos casos donde se utiliza carbón mineral para suplir los requerimientos energéticos del proceso.

Los residuos gaseosos provienen de los gases de combustión de los sistemas de generación de vapor para cocción y secado. Además, son frecuentes las emisiones de compuestos orgánicos volátiles odoríferos (aminas) y H₂S, derivadas de la descomposición biológica y térmica de las proteínas de pescado durante el almacenamiento en las bodegas de los barcos y de la planta industrial..

TABLA 4.7: COMPOSICIÓN TÍPICA DE AGUAS RESIDUALES EN LA INDUSTRIA DE RECURSOS MARINOS

RUBRO	DBO (kg/m³)	Sólidos Suspendidos (kg/m³)	Grasas y aceites (kg/m³)
Pescado Trozado	0,4-1,1	0,1-0,5	0,1-0,9
Procesamiento de langosta	1	0,2	0,3
Procesamiento de jaivas y cangrejos	0,7	0,3	0,3
Harina de Pescado:			
Agua de sangre	120-250	12-15	2,7-3
Agua de cola	160-200	15-66	0,3-1,2

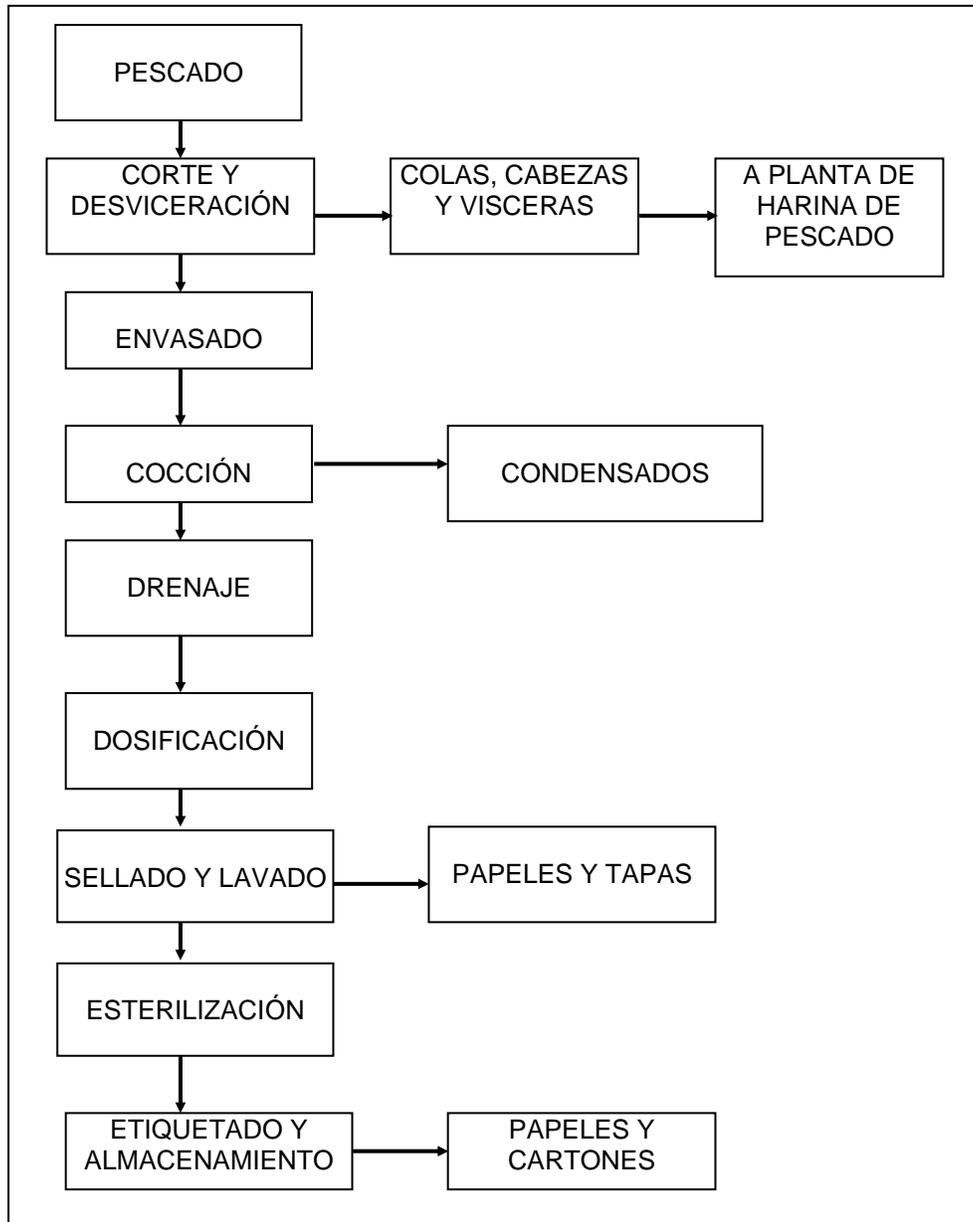


FIGURA 4.4: ELABORACIÓN DE CONSERVAS

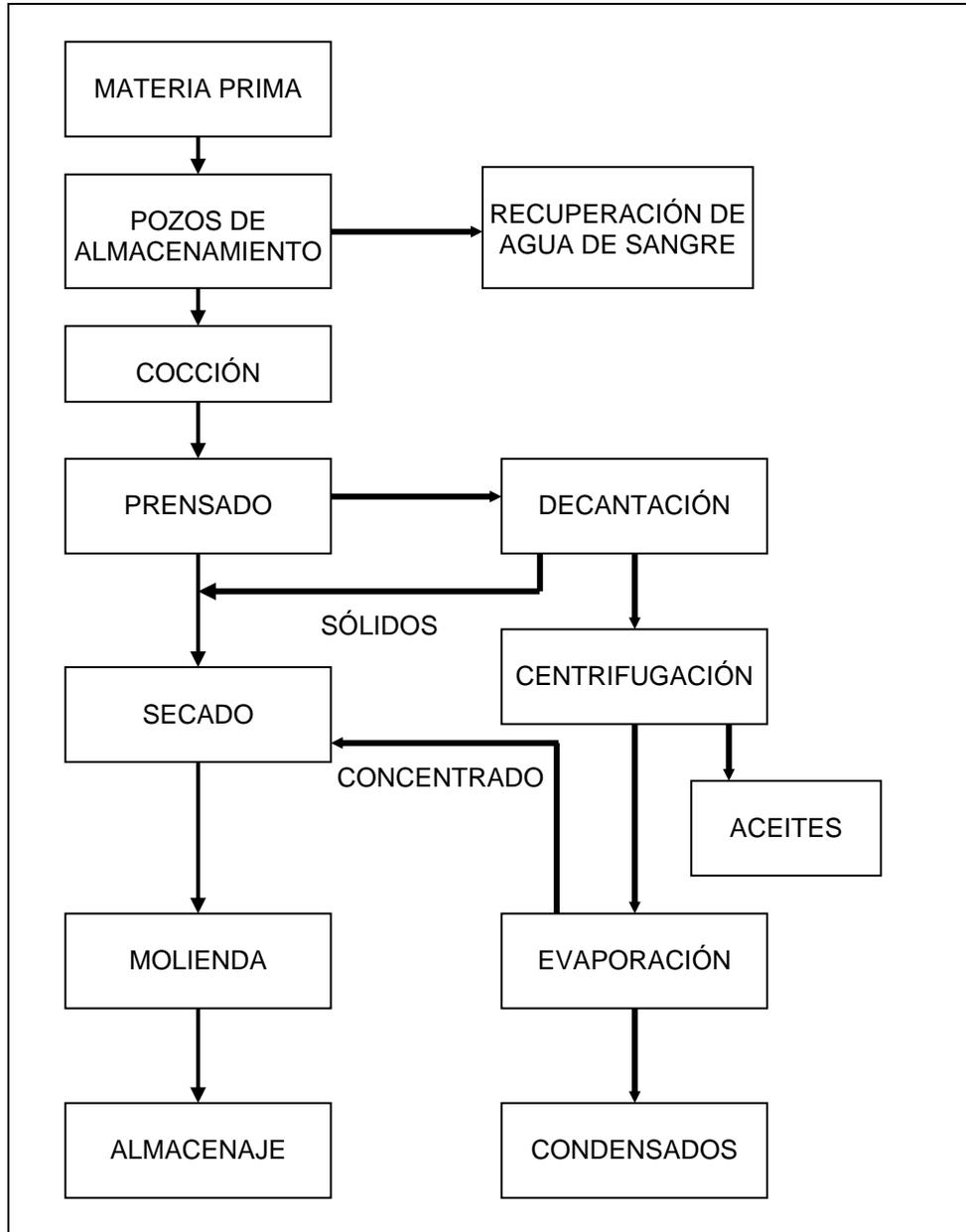


FIGURA 4.5: ELABORACIÓN DE HARINA Y ACEITE DE PESCADO

4.5.2) Industria de Productos Forestales

La actividad forestal es uno de los sectores productivos que ha mostrado un alto dinamismo desde los años setenta. En Chile, a comienzos del 2000, el consumo anual de materia prima forestal es del orden de 10.000.000 toneladas de madera y los retornos por exportaciones ascienden a US\$ 1.200.000.000 por año. Se produce anualmente cerca de 2.500.000 toneladas de celulosa, papeles y cartones; además, se exporta alrededor de 3.500.000 ton. de madera aserrada. En Chile existen alrededor de 1.400.000 hectáreas plantadas con pino radiata, de un total de 1.700.000 hectáreas de plantaciones (incluyendo además, eucalipto y otras especies). Las plantaciones anuales han ido incrementando, llegando a cerca de 120.000 hectáreas plantadas/año en la actualidad. Esto se suma a una reserva de 7.500.000 hectáreas de bosques nativos. Se estima que los terrenos forestales productivos o indirectamente productivos llegarían a alrededor de 34.000.000 hectáreas.

a) Industria de Aserrío

Esta actividad industrial, incluye el aserrado de madera y su procesamiento físico para transformarla en madera dimensionada y/o elaborada, la cual es incorporada en forma de partes o piezas en diversos bienes de consumo final.

Las operaciones básicas involucran diferentes tipos de cortes utilizando sierras, para generar el producto en las dimensiones requeridas. Dependiendo del grado de elaboración del producto final, se incluyen operaciones de pulimiento, cepillado, secado y/o impregnación. En el caso de procesadoras con secado incluido, se utiliza parte de la materia prima residual como combustible.

Se genera desechos de madera tales como: aserrín, corteza, viruta, despuntes, etc. En los últimos años, se ha implementado procesos que permiten un mejor aprovechamiento del recurso forestal, maximizando la producción de los productos principales y reutilizando los desechos en usos alternativos. Los residuos se pueden usar como combustible, internamente en planta, o como subproducto para el mercado local. La mayoría de las plantas procesadoras de gran tamaño están utilizando dichos recursos en reemplazo de los combustibles convencionales. Por otra parte, el aserrín es utilizado como materia prima en la industria de tableros de partículas, aún cuando dicha utilización representa una fracción muy pequeña del total generado. Los trozos residuales de mayor tamaño (ej.: tapas) tienen salida en las plantas astilladoras y en las empresas productoras de pulpa celulósica.

El consumo de agua ocurre principalmente en el riego de la materia prima, para evitar el ataque de hongos y prevenir la ocurrencia de incendios. El agua residual puede arrastrar compuestos solubles de la corteza.

En el caso de aquellos aserraderos donde se trata la madera con aditivos biocidas, se generan aguas residuales con alto contenido de materiales tóxicos (normalmente, de tipo organoclorado) y aserrín contaminado con dichos compuestos. Estos residuos peligrosos deben ser tratados con mucho cuidado, ya que pueden afectar la salud de las personas y contaminar los cuerpos de agua. Igual consideración se debe tener

con los contenedores de los biocidas, una vez que estos se consumen.

b) Industria de Celulosa y Papel

Estas industrias utilizan trozos provenientes del raleo, trozos no aprovechables en aserraderos y astillas de la industria de astillados. En Chile, las principales materias primas para la producción de celulosa son el pino radiata (fibra larga) y el Eucalipto (fibra corta). La madera presenta una estructura fibrosa que contiene, principalmente, celulosa, lignina y hemicelulosas. En el caso del pino, la celulosa y la lignina corresponden al 43% y 29% del peso total, respectivamente; mientras que en el eucalipto, el contenido es de 43% y 22%, respectivamente. El proceso de producción de celulosa consiste en remover la lignina y la hemicelulosa, en forma selectiva, utilizando compuestos químicos que permiten disolver estos constituyentes de la madera original. En Chile se utiliza principalmente el proceso "kraft", que permite recuperar los reactivos, obteniéndose además, una completa integración energética. A continuación se describe en forma esquemática las principales operaciones que caracterizan la producción de celulosa kraft blanca en plantas modernas, ilustradas en la Figura 4.6. Además, en el Capítulo 10 se presentan los resultados de los flujos de materiales y energía a través de todas las actividades asociadas a la producción de celulosa kraft blanca.

Preparación madera: Los trozos de madera son descortezados y luego reducidos a astillas, que son transportadas a través de correas al reactor donde se realiza la cocción.

Cocción: Las astillas se ponen en contacto con una solución de hidróxido de sodio y sulfuro de sodio, llamada licor blanco. Esta operación se lleva a cabo a alta temperatura (160°C-180°C) y presión, lo que permite disolver gran parte de la lignina que une a las fibras de madera. Luego, el sólido se somete a un exhaustivo lavado y filtrado. Como resultado se obtiene una pulpa de fibras ricas en celulosa (pulpa cruda) y un residuo líquido ("licor negro") rico en compuestos orgánicos disueltos y reactivos del proceso.

Recuperación de Reactivos y Energía: El licor negro posee un alto valor energético, ya que contiene compuestos orgánicos disueltos que equivalen a más del 50% del peso de la madera procesada y la casi totalidad de los reactivos utilizados en el proceso de cocción. Este licor negro se concentra y se quema en una caldera de recuperación, donde se obtiene energía calórica y un fundido inorgánico de carbonato de sodio (Na_2CO_3) y sulfuro sódico (Na_2S). Estas sales se disuelven y se hacen reaccionar con CaO para generar el licor blanco, el cual se reutiliza en la cocción. La energía calórica liberada por la combustión es utilizada para producir vapor y energía eléctrica.

Deslignificación con Oxígeno: La pulpa cruda contiene lignina residual, la que debe ser eliminada a través de oxidación química. En la última década se ha establecido el tratamiento con oxígeno como una primera etapa en la purificación química de la celulosa. La pulpa cruda se hace reaccionar con una corriente gaseosa de oxígeno puro, logrando eliminar casi el 50% de la lignina residual. El líquido residual de este proceso se mezcla con el licor negro y se envía a la

unidad de recuperación de reactivos y energía.

Blanqueo: El tratamiento anterior no es suficiente para eliminar la totalidad de la lignina residual presente en la fibra celulósica. Para ello se requiere la acción de agentes oxidantes más selectivos hacia la lignina. En la actualidad, se utiliza una secuencia de blanqueo en base a dióxido de cloro (ClO_2) como agente oxidante, en varias etapas sucesivas (D), que incluye etapas de extracción (E) y lavados intermedios. El líquido residual de estas operaciones no se puede enviar a la unidad de recuperación de reactivos, ya que la presencia de cloro podría tener efectos corrosivos desastrosos en la caldera de recuperación. Dichos residuos líquidos deben ser tratados adecuadamente, pues poseen material orgánico disuelto y compuestos organoclorados, derivados de la acción del ClO_2 sobre la lignina.

Tratamiento de Residuos Gaseosos: Los gases residuales provienen principalmente de la caldera de recuperación, de la caldera de biomasa (que se utiliza para generar vapor y electricidad a partir de los desechos de madera no pulpables) y del horno de cal (que regenera el CaO). Estos gases contienen, principalmente, material particulado y SO_2 . Para su depuración se utiliza precipitadores electrostáticos y absorbedores. Además, se generan mercaptanos y otros compuestos azufrados (medidos como TRS, sulfuros reducidos totales) en el proceso de cocción y en el sistema de recuperación de reactivos, los que son fuente del mal olor característico. Estos últimos deberán ser recolectados en su fuente e incinerados. En la actualidad, las plantas modernas emiten alrededor de 1-2 (kg SO_2 /ton pulpa) y 0,5 (kg TRS/ton pulpa).

Tratamiento de Residuos Líquidos: Los líquidos residuales provienen, principalmente, de la secuencia de blanqueo y líquidos generados en el lavado de equipos y derrames de pulpa. Se generan 30-90 m^3 de residuos líquidos/ton pulpa, que contienen sólidos suspendidos (fibras), material orgánico disuelto generado en la secuencia de blanqueo, reactivos de blanqueo y otros. La presencia de compuestos altamente coloreados y compuestos organoclorados (medidos como AOX), demanda un sistema de tratamiento de gran capacidad depurativa. Generalmente, se incluyen sistemas para eliminar sólidos suspendidos, tales como sedimentadores o flotadores por aire disuelto; además, se requiere de un eficiente sistema de tratamiento secundario para la eliminación de material orgánico disuelto. Los residuos líquidos tratados, generados por una planta de celulosa moderna, contienen alrededor de 0,2-0,5 (kg AOX/ton pulpa) y 20-50 (kg DQO/ton pulpa).

Tratamiento de Residuos Sólidos: Los residuos sólidos de madera derivados de las operaciones y otros residuos sólidos combustibles, tales como los lodos generados en la planta de tratamiento de residuos líquidos, se pueden quemar en una caldera de poder, a alta temperatura, para generar vapor y energía eléctrica. Como residuo final se obtienen cenizas estables que deben ser dispuestas en un vertedero controlado. Se generan residuos sólidos en el rango 0,02 – 0,06 kg RSI / ton pulpa.

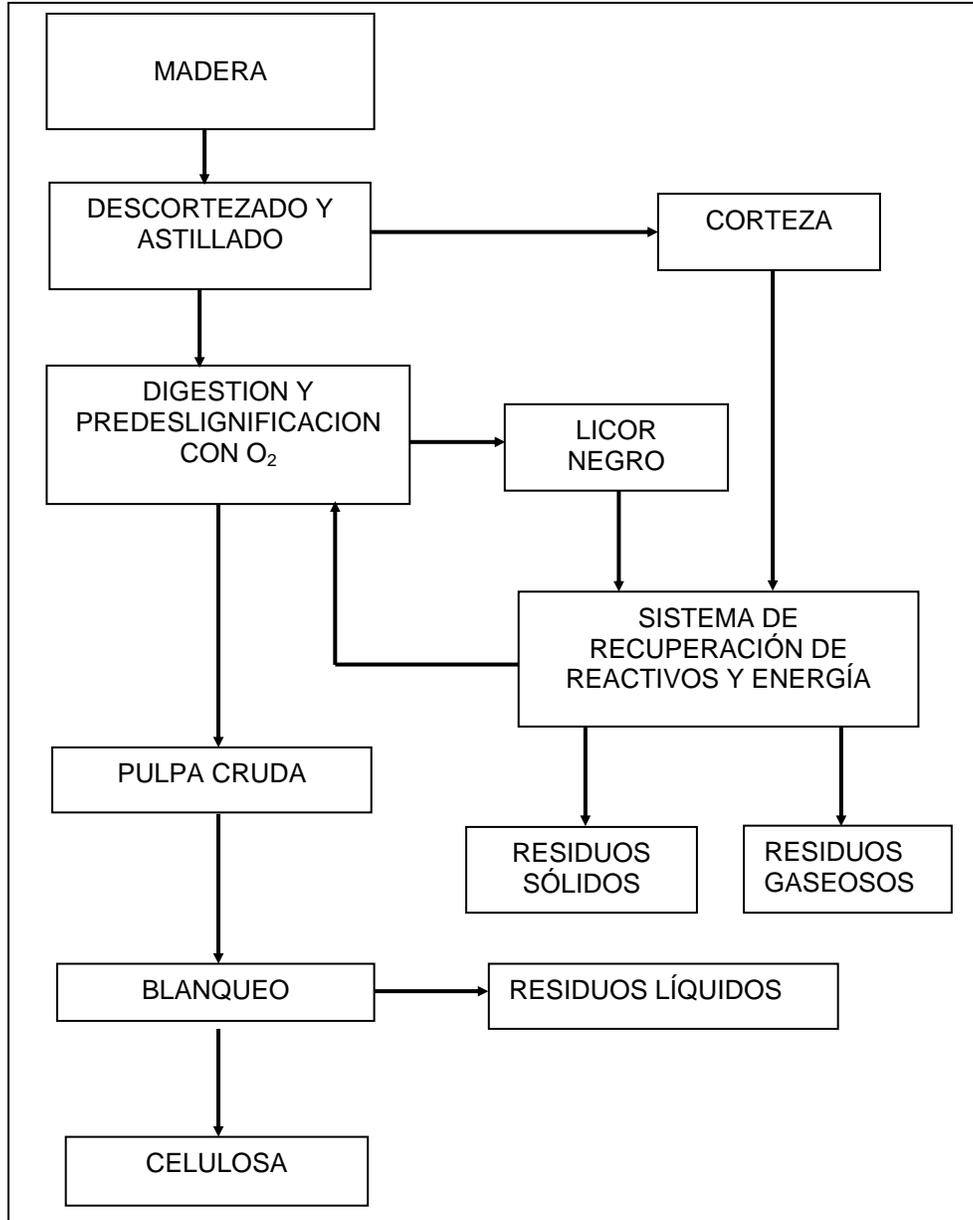


FIGURA 4.6: PRODUCCIÓN DE CELULOSA BLANCA. PROCESO KRAFT

4.5.3) Refinación de Petróleo

En Chile, la industria de refinación del petróleo procesa cerca 11 millones de m³ de crudo al año, dando origen a un rango de combustibles (gasolina, kerosene, diesel, fuel oil). Además, se produce compuestos orgánicos (ej.: etileno) para la producción de polímeros sintéticos. En los últimos años, se ha desarrollado la producción de metanol a partir de gas natural.

La materia prima básica de una refinería es el petróleo crudo y su composición química es muy variable, dependiendo de su origen. Los productos obtenidos normalmente incluyen:

- Gas de refinería (fuel gas).
- Etileno.
- Gas licuado (propano (C₃H₈) o butano (C₄H₁₀)).
- Parafina (kerosene).
- Gasolinas (nafta).
- Petróleo diesel (diesel oil).
- Petróleo combustible (fuel oil).

El proceso de refinación o separación de las diferentes fracciones de petróleo crudo en productos combustibles, se basa en las diferencias entre las temperaturas de ebullición de los distintos componentes. La Figura 4.7 muestra esquemáticamente el proceso de refinación de crudo: en una primera etapa, el petróleo es calentado a altas temperaturas y separado en una torre de destilación, a presión atmosférica, obteniéndose por el tope de la torre gases livianos (fuel gas), gas licuado (LPG), gasolina liviana (nafta liviana), gasolina pesada (nafta pesada), parafina (kerosene), petróleo diesel (diesel oil) y gas oil. Por el fondo de dicha torre se obtiene crudo reducido, que pasa a una torre de vacío, en la que se obtiene gas oil liviano y pesado (LCGO y HCGO) y un residuo o fondo de vacío (pitch). Las diferentes fracciones se tratan en distintas unidades donde se hidrogenan, se someten a ruptura térmica catalítica y se separan en diferentes tipos de productos.

Una refinería genera residuos sólidos, líquidos y gaseosos. Los sólidos residuales incluyen:

- Los catalizadores agotados, proveniente del *cracking* catalítico. Este sólido es inocuo, representa un volumen bajo, y se puede utilizar como material de relleno.
- Las "borras" de los estanques de almacenamiento. Estos son lodos, correspondientes a hidrocarburos pesados que van quedando depositados al fondo de los estanques de almacenamiento de combustibles.

Los residuos líquidos incluyen aguas provenientes de:

- Aguas de enfriamiento.
- Aguas de proceso (del patio de bombas, drenaje de estanques, aguas ácidas de desorción, aguas aceitosas de zona de procesos y laboratorio).

Los efluentes deben ser tratados, utilizando sistemas de tratamiento primario (para retirar los sólidos, grasas, aceites e hidrocarburos residuales) y secundario (para

eliminación de los compuestos orgánicos disueltos). La Tabla 4.8 resume los valores típicos de residuos líquidos de refinería.

En el caso de los residuos gaseosos, la mayor parte de ellos proviene de la combustión de los hidrocarburos en los diferentes hornos y antorchas. Uno de los principales contaminantes gaseosos es el SO₂, que se genera debido a la oxidación de los compuestos azufrados presentes. La cantidad de SO₂ depende del contenido de azufre del crudo y de las especificaciones de los productos combustibles, así como de la eficiencia de los procesos de recuperación para la generación de sulfidrato de sodio o azufre elemental.

TABLA 4.8: RESIDUOS LÍQUIDOS REFINERÍA

RESIDUOS LÍQUIDOS	
RIL de Proceso:	1,3 m ³ /m ³ crudo
Agua de Refrigeración:	24 m ³ /m ³ crudo
COMPOSICIÓN TÍPICA EFLUENTE FINAL COMBINADO	
Temperatura	28°C
pH	7-8
DBO ₅	0,10 kg/m ³ crudo
DQO	0,40 kg/m ³ crudo
TSS	3,0 kg/m ³ crudo
Aceites	0,05 kg/m ³ crudo
Fenoles	0,002 kg/m ³ crudo
Amonio	0,05 kg/m ³ crudo
Sulfuros	0,01 kg/m ³ crudo

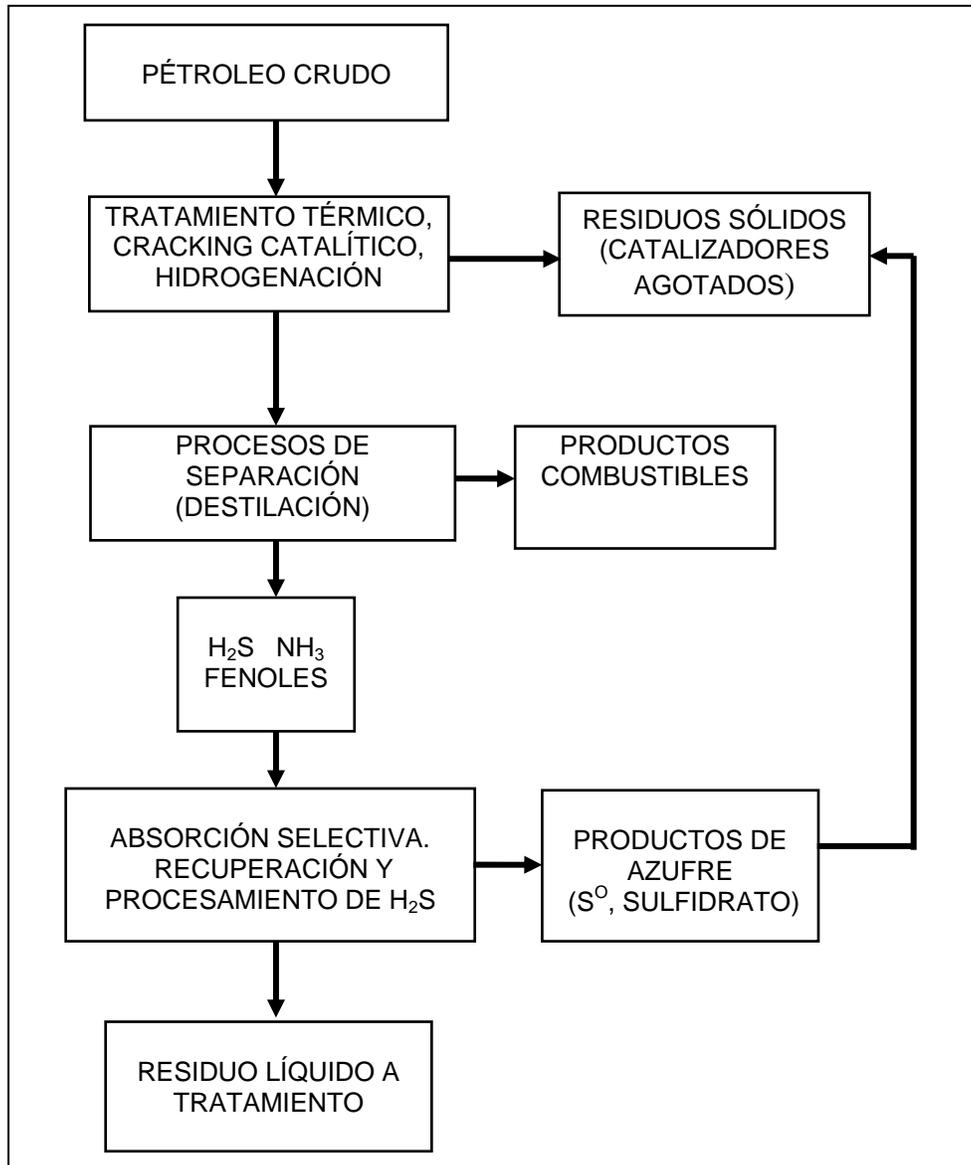


FIGURA 4.7: REFINACIÓN DEL PÉTROLEO

4.5.4) La Industria del Cobre

En los últimos años, la producción de cobre ha aumentado significativamente y se proyecta una producción de alrededor de 4 millones de toneladas anuales.

Los yacimientos de cobre se pueden clasificar en minerales oxidados y minerales sulfurados. Los óxidos de cobre, tales como la cuprita (Cu_2O) la malaquita ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$) y la crisocola ($\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), se encuentran generalmente en las capas superficiales. Por otra parte, los minerales sulfurados, como por ejemplo la calcocita (Cu_2S), la calcopirita (CuFeS_2), la covelita (CuS) y la bornita (Cu_5FeS_4), están presentes en las capas más profundas.

Los tipos de procesos, así como los residuos que se generan, dependen en gran medida del tipo de mineral procesado y del producto deseado. La mayor parte del cobre se extrae de minerales sulfurados.

Los óxidos son solubles en medio ácido y su procesamiento incluye, principalmente, operaciones hidrometalúrgicas. En el caso de los minerales oxidados, una de las innovaciones con mayor éxito en las últimas tres décadas ha sido la utilización del proceso SX-EW (lixiviación ácida, seguida de extracción con solvente y posterior *electrowinning*). Este proceso permite una adecuada recuperación de los reactivos. A su vez, el ácido sulfúrico utilizado en la lixiviación es un sub-producto de la electrólisis del cobre. Este proceso ha sido aplicado a minerales sulfurados, previo tratamiento para transformarlo en un compuesto soluble en ácido. Desgraciadamente, las opciones hidrometalúrgicas para el procesamiento de minerales de cobre dificultan la recuperación del oro, ya que éste permanece en el residuo sólido generado por la lixiviación ácida. Para disolverlo es necesario tratar el sólido con cianuro en medio alcalino, lo cual implica costos adicionales y nuevos requerimientos de control ambiental asociados a la utilización del cianuro.

Los minerales sulfurados insolubles en ácido son procesados por vías pirometalúrgicas. Las operaciones pirometalúrgicas típicas incluyen:

Trituración y molienda: Los minerales se reducen de tamaño para facilitar la separación de las diferentes fracciones minerales.

Flotación: Se separa por flotación selectiva el mineral de cobre de la mayor parte del material inerte, obteniéndose un concentrado con 20-30% de cobre.

Tostación: Los sulfuros son oxidados parcialmente a altas temperaturas (500-800°C), generándose SO_2 y óxido de cobre. Esta operación se realiza en hornos (de reverbero o eléctricos).

Fusión: Se procesa el concentrado de cobre en presencia de un fundente (sílice) a temperaturas de alrededor de 1200°C, generándose una fase de sulfuros de cobre y hierro líquidos (mata) y una fase sólida oxidada flotante (escoria). La mata contiene entre 30 y 55% de Cu.

Conversión: La mata líquida se oxida con aire a 110°C, para remover el hierro y el

azufre, generando un cobre metálico (blister) con una pureza de 98%. Este proceso es exotérmico, siendo prácticamente autógeno.

Refinación térmica: Permite eliminar las impurezas de azufre, oxígeno y metales. En una primera fase, se agrega aire durante 1-2 hrs, para oxidar el azufre. Luego, se agrega metano, propano u otros hidrocarburos durante 3-4 hrs a 1100°C, para reducir el contenido de oxígeno. Se puede obtener un cobre refinado de 99,5% de pureza.

Refinación electrolítica: La refinación electrolítica (0,2-0,3 V, 250 V/m²) permite obtener un cobre refinado de 99,96% de pureza.

Residuos generados en la Minería del Cobre

La extracción, purificación y procesamiento de minerales implica la eliminación de compuestos no deseados que están presentes en la materia prima original. En el caso de la minería del cobre, ello significa eliminar hasta más del 99% en peso del material primario, dependiendo de la concentración del mineral y de los niveles de pureza final requeridos. Gran parte de dichos desechos corresponde a compuestos estables de poco impacto ambiental. Sin embargo, se pueden generar compuestos de azufre y metales pesados que afectan seriamente la salud y cuya emisión debe estar sujeta a estrictos controles.

La búsqueda de alternativas de procesos menos contaminantes ha dominado el escenario mundial de la investigación minera en las últimas dos décadas. Como consecuencia de ello, se ha implementado procesos que derivan en menores emisiones de SO₂, arsénico y otros metales pesados que puedan tener un impacto ambiental adverso.

En Chile, la industria del cobre procesa preferentemente minerales sulfurados, con un alto contenido de arsénico y, por lo tanto, la atención ha estado focalizada en las emisiones de compuestos de azufre, arsénico y otros metales. Estos elementos están presentes en la materia prima original y su generación como residuo, es intrínseca al proceso de refinación del producto. Por ejemplo, la enargita (Cu₃ AsS₄) contiene 31% en peso de azufre y 19% de arsénico, mientras que la calcopirita (CuFeS₂) tiene un 35% de azufre.

En general, una parte importante de los residuos se elimina en fase sólida, en formas relativamente estables y de bajo impacto ambiental (ej.: ganga, escoria), con una considerable fracción de óxidos metálicos y sulfuros. A pesar del alto volumen que ellos representan (cerca de 100 ton por cada tonelada de cobre), su impacto ambiental está limitado al área local donde se efectúa el proceso de extracción y concentración. El material particulado emitido durante las operaciones de extracción y molienda puede tener efectos significativos si dichos procesos no son llevados a cabo en condiciones adecuadas.

A su vez, los efluentes provenientes de la flotación y otras operaciones hidrometalúrgicas, contienen iones metálicos (cobre, hierro, arsénico, molibdeno, manganeso, níquel, etc.) provenientes de los componentes solubles, cuyo impacto

depende de las concentraciones y del destino de dichos efluentes. Su descarga en cuerpos receptores que eventualmente sean fuente de agua potable, regadío o pesca (ej.: ríos, embalses, lagos, mar) debe ser evaluada críticamente, ya que dichos iones se caracterizan por ser altamente bioacumulables, con altos factores de bioconcentración en peces y productos vegetales.

Por su parte, los residuos gaseosos derivados de la industria del cobre provienen esencialmente de las operaciones pirometalúrgicas. Los componentes de mayor interés son los arsénicos volátiles, el dióxido de azufre y el material particulado. En el caso del SO_2 , éste se genera en la oxidación del mineral sulfurado y en la combustión de materiales fósiles, constituyendo un problema ambiental crítico en la gran minería nacional, que se caracteriza por procesar mineral con alto contenido de azufre.

Por su parte, el arsénico es uno de los compuestos residuales de reconocida toxicidad y gran capacidad bioacumulativa, por lo cual ha atraído una considerable atención y control regulatorio. Su toxicidad es mayor cuando está como As^{+3} y menor cuando se encuentra como organoarsénico. Parte del As ingerido (por vías oral o respiratoria) es metilizado y transformado en $(\text{CH}_3)_2\text{AsO}(\text{OH})_2$, el cual es excretable.

Alrededor del 50% del arsénico original se emite a la atmósfera como As_2O_3 (el cual es volátil a 380°C) durante las operaciones de pirometalurgia, mientras que el 30 % se descarga en los relaves en forma iónica.

Las tecnologías para purificación de minerales han sufrido importantes transformaciones en la última década, gracias a las consideraciones ambientales que han motivado dichas innovaciones. La Tabla 4.9 resume las diferentes alternativas para reducir las emisiones de SO_2 y As . En el caso de los contaminantes gaseosos (ej. SO_2 , As volátil) interesa reducir la concentración y exposición en los puntos de máximo impacto y reducir la carga emitida (ton/día). Existen tecnologías establecidas para remover el azufre de las emisiones gaseosas (ej.: absorción alcalina, oxidación a sulfato), transfiriendo el azufre a fase líquida o sólida; además, se puede obtener H_2SO_4 para ser utilizado internamente o como subproducto. La implementación industrial de estos procesos puede estar limitada por factores termodinámicos y cinéticos, así como por el costo de las tecnologías y el tamaño de los mercados.

Por su parte, los procesos para reducir las emisiones de arsénico tienen como objetivo general, transformar el As en un sólido de mayor estabilidad y, preferentemente, con potencial comercial. Sin embargo, el mercado del arsénico es relativamente pequeño, llegando a 58.000 ton As_2O_3 /año a nivel mundial (comparado con un volumen mundial total de residuos de As del orden de 150.000 ton/año).

En general, los iones metálicos pueden ser eliminados de los efluentes líquidos vía adsorción, precipitación o microfiltración; sin embargo, ello implica trasladar de fase el contaminante, generando un nuevo problema ambiental. La recuperación de los iones metálicos podría ser atractiva, solamente cuando estos tuvieran valor comercial potencial o cuando el costo asociado con su evacuación, fuese mayor que el costo de transformarlos a una forma más estable y de menor impacto.

TABLA 4.9: REDUCCIÓN DE EMISIONES DE SO₂ Y ARSÉNICO EN LA INDUSTRIA DEL COBRE

OPCIONES PARA LA REDUCCIÓN DE EMISIONES DE SO₂	
Conversión a productos comerciales:	<ul style="list-style-type: none"> • Producción de H₂SO₄ a partir de SO₂ • Reducción a azufre elemental
Conversión a Sólidos Inertes y Estables:	<ul style="list-style-type: none"> • Conversión a sulfatos insolubles: formación de CaSO₄ por medio de adición de CaO durante la tostación • Conversión a sulfuros (ej. FeS, Fe₂S₃, CaS) Proceso carbotérmico (reducción del Cu en presencia de C y CaO)
Reducir el S del Concentrado	<ul style="list-style-type: none"> • Optimización del proceso de flotación
Reducir el Flujo de Gas	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de aire enriquecido con O₂ puro: aumenta la concentración de SO₂ para un procesamiento posterior más eficiente. • Reducir las fuentes de SO₂ : combinar tostación, fundición y conversión.
Tratamiento de las Emisiones Gaseosas:	<ul style="list-style-type: none"> • Absorción alcalina • Adsorción en limonita
OPCIONES PARA LA REDUCCIÓN DE EMISIONES DE ARSÉNICO	
Optimizar las condiciones en tostación/conversión	<ul style="list-style-type: none"> • Tostación en presencia de CaO (forma Ca₃(AsO₃)₂)
Precipitación del As en solución	<ul style="list-style-type: none"> • Formación de arsenato férrico • Formación de arsenito de calcio
Remoción del As de los gases	<ul style="list-style-type: none"> • Precipitación térmica de As₂O₃ • Adsorción/absorción • Filtración, precipitación electrostática

BIBLIOGRAFÍA

Austin G.T. "Manual de Procesos Químicos en la Industria". McGraw-Hill (Interamericana de México SA). México (1992)

Davis M., Cornwell D. "Introduction to Environmental Engineering". 2ªed. McGraw Hill International Editions, Singapore (1991)

De Nevers N. "Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire". McGraw-Hill, México (1998)

Nemerow N. L., Dasgupta A. "Industrial and Hazardous Waste Treatment" Van Nostrand Reinhold. New York (1991)

Springer A.M. "Industrial and Environmental Control: Pulp and Paper Industry" 2ªed., TAPPI Press, Atlanta (1993).

Tchobanoglous G., Theisen H., Vigil S. "Gestión Integral de Residuos Sólidos". Vol. I y II., McGraw Hill, Madrid (1994).

Young. R., "Handbook of air pollution analysis", J. Wiley & Sons, New York.(1997).

Wark, K. "Contaminación del aire Origen y Control". Ed. Limusa. México (1992)

CAPÍTULO 5

TRATAMIENTO DE RESIDUOS

El primer objetivo de una estrategia de control ambiental en la industria de procesos es prevenir o reducir la generación de los contaminantes en su fuente, tal como se detalla en el Capítulo 6. Sin embargo, en la práctica, las limitaciones tecnológicas y las restricciones impuestas por los procesos mismos hace casi inevitable la generación de residuos de producción, los cuales deben ser tratados antes de su descarga a los medios receptores.

Las tecnologías de tratamiento de residuos tienen como objetivo disminuir el impacto ambiental de dichas descargas, y generar residuos finales que cumplan con los flujos y concentraciones de contaminantes estipulados en la legislación vigente, o en las políticas de la empresa. En este capítulo, se revisará en forma general los principales procesos de tratamiento de los residuos líquidos, sólidos y gaseosos. En primer lugar, se describe los mecanismos generales presentes en los sistemas de tratamiento de residuos y las consideraciones que se debe tener presentes en la selección de las operaciones unitarias.

5.1) MECANISMOS PRESENTES EN LOS TRATAMIENTOS DE RESIDUOS

En general, los tratamientos de residuos se basan en alguno(s) de los siguientes mecanismos:

- **Eliminación física del contaminante**

A través de operaciones de separación, tales como: filtración, sedimentación, adsorción, absorción, extracción, etc..

- **Dstrucción o transformación química/biológica del contaminante**

Transformando el contaminante a una forma menos contaminante y/o eliminable de la corriente de descarga. Por ejemplo, a través de un tratamiento aeróbico, combustión del material orgánico, transformación de óxido de azufre a sulfato, etc..

- **Consumo del material contaminante**

Ya sea recuperando y reciclando compuestos reutilizables o generando nuevos sub-productos (ej.: digestión anaeróbica (metano), fertilizantes, combustibles (sólidos), etc.).

Muchas veces los procesos de tratamiento, simplemente cambian la fase en la que se encuentra presente el contaminante, con lo que el problema ambiental puede persistir (ej.: la adsorción de fenoles en carbón activado; en este caso se traslada el

problema, a uno de contaminación en fase sólida). A veces, dicho cambio de fase permite un mejor manejo del material contaminante, disminuyendo su impacto final. Tal es el caso de los tratamientos aeróbicos, donde los compuestos orgánicos disueltos en el efluente son utilizados en los procesos de metabolismo celular e incorporados a la biomasa, la cual puede ser separada y desechada con mayor facilidad. De este modo, el tratamiento sirve como una etapa de concentración de los residuos.

- **Criterios de Selección de Operaciones Unitarias para el Tratamiento de Residuos**

Existe una amplísima gama de tecnologías que sirven para la remoción, destrucción, transformación o utilización de residuos. La Tabla 5.1 muestra una lista de procesos disponibles para la remoción de contaminantes específicos. Casi todas estas operaciones son operaciones unitarias, que están establecidas en la industria de procesos.

La selección de las operaciones unitarias que se requiere incluir en un sistema de tratamiento depende de factores tanto técnicos como económicos. A continuación, se enumera algunos aspectos que deben ser tomados en consideración:

- Tipo de contaminante a eliminar.
- Características del medio receptor (alcantarillado público, aguas superficiales, aguas subterráneas, características de ventilación atmosférica, etc.).
- Normativa legal aplicable.
- Eficiencia de depuración requerida.
- Presencia de otros contaminantes que puedan afectar el tratamiento (ej.: efectos inhibitorios debido a compuestos tóxicos).
- Generación de residuos secundarios; por ejemplo: lodos de tratamiento primario y secundario.
- Requerimientos de tratamiento para los residuos secundarios.
- Cambio de fase de contaminantes peligrosos (ej.: adsorción de metales pesados a los lodos biológicos en el tratamiento secundario).
- Características ambientales del área de la planta (es decir, cercanía de poblaciones, dirección de los vientos predominantes, características climáticas).
- Datos sobre la cinética de los procesos: si no se cuenta con datos propios, se debe utilizar información de literatura o de otras plantas industriales similares.
- Requerimientos energéticos y aditivos químicos.
- Requerimientos de terreno para la instalación de las unidades de tratamiento.
- Complejidad y confiabilidad del sistema de tratamiento.
- Requerimientos de monitoreo y control automático.
- Cantidad y tipo de personal.
- Estabilidad operacional frente a cambios de caudal y concentración.
- Requerimientos de mantención periódica.
- Respuesta frente a parada de planta.
- Tiempo y recursos requeridos para la puesta en marcha (importante para el caso de los sistemas de tratamiento biológicos, donde se necesita generar una gran

cantidad de biomasa activa).

La mayoría de las operaciones unitarias utilizadas en el tratamiento de residuos se encuentra ampliamente documentada en la literatura técnica especializada, y se sugiere consultar los textos de Metcalf-Eddy (1991), Ramalho (1983), Kelly (1998), Perry & Green (1998), entre otros, citados en lista de referencias recomendadas.

Generalmente, los diseños se basan en las condiciones de operación promedio, correspondientes a un día típico. Sin embargo, es importante tomar en consideración las variaciones horarias de flujo, particularmente para diseñar los sistemas de impulsión y cañerías, y las operaciones que requieren cortos tiempos de residencia. En el caso de plantas que presenten variaciones estacionales en sus características de producción, y que generen residuos con diferencias muy significativas de flujo y cargas contaminantes, se deberá evaluar la factibilidad de que los requerimientos de depuración puedan ser cubiertos por un sistema de tratamiento único o, alternativamente, incorporar unidades adicionales para cubrir aquellas condiciones de operación extremas.

Una buena base de información sobre las características de los residuos a tratar, debería incluir las proyecciones de aumento (o disminución) de flujo y carga contaminante, debido a posibles ampliaciones de la planta, o modificaciones importantes en los procesos. Cuando se trate de diseñar sistemas de tratamiento para plantas industriales que aún no están en operación, se debe contar con información histórica sobre instalaciones similares. Mientras más completa sea la información con que se cuenta para el diseño del sistema de tratamiento, más acertado será el dimensionamiento de las unidades.

Finalmente, se debe enfatizar que la segregación racional de las distintas líneas residuales facilita el diseño de sistemas de tratamiento de mayor eficiencia y menor costo. Para ello, se debe contar con una completa caracterización de cada línea.

A continuación, se entrega antecedentes generales, con vistas a apoyar el dimensionamiento preliminar de los diferentes sistemas.

TABLA 5.1: OPERACIONES PARA LA ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES

<p>Contaminante: Grasas y Aceites Libres y Emulsificados: Separación por Gravedad Filtración Flotación</p>
<p>Contaminante: Sólidos Suspendidos: Sedimentación Coagulación y Sedimentación Flotación Filtración</p>
<p>Contaminante: Materia Orgánica Disuelta: Tratamiento Biológico Aeróbico Tratamiento Biológico Anaeróbico Adsorción Oxidación Química</p>
<p>Contaminante: Sólidos Inorgánicos Disueltos: Evaporación Intercambio Iónico Osmosis Reversa Electrodialisis</p>
<p>Contaminante: Ácidos y Alcalis: Neutralización</p>
<p>Contaminante: Gases y Material Particulado: Incineración Absorción Ciclones Precipitación Electroestática</p>
<p>Contaminante: Residuos Sólidos y Lodos de Tratamientos: Tratamiento biológico Incineración Vertederos controlados Compostado/ Fertilizante/ Forraje Utilización Termoquímica (Carbón Activado, Licuefacción, Gasificación)</p>

TABLA 5.2: DATOS BÁSICOS SOBRE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS LÍQUIDOS

SISTEMAS DE SEPARACION DE SOLIDOS		
Sedimentación:		
Tiempo de Residencia: 2-4 hrs	Remoción de Sólidos:	50-98%
	Remoción de DBO ₅ ¹ :	10-30%
Flotación:		
Tiempo de Residencia: 5-30 min.	Remoción de Sólidos:	75-98%
	Remoción de DBO ₅ :	10-30%
SISTEMAS DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO:		
Lagunas Facultativas:		
Tiempo de Residencia: 10-25 días	Remoción de DBO ₅ :	60-75%
Filtros Biológicos:		
Tiempo de Residencia: 0,4-2 días	Remoción de DBO ₅ :	60-85%
Lagunas de Aireación:		
Tiempo de Residencia: 3-7 días	Remoción de DBO ₅ :	70-97%
Lodos Activados:		
Tiempo de Residencia: 0,3-2 días	Remoción de DBO ₅ :	70-97%
Digestión Anaerobia:		
Tiempo de Residencia: 0,5-3 días	Remoción de DBO ₅ :	30-90%
OTROS DATOS:		
SISTEMAS AIREADOS:		
Requerimientos de Energía	1-3 kg O ₂ / kWh	
Requerimientos de Oxígeno:	1, 1-1,6 kg O ₂ / kg DBO ₅ removido	
Generación de Lodos	0,3-0,6 kg lodos / kg DBO ₅ removido	
DIGESTION ANAERÓBICA:		
Generación de Metano:	0,35 m ³ CH ₄ / kg DBO ₅ removido	
Generación de Lodos	0,05-0,15 kg lodos / kg DBO ₅ removido	

¹ DBO₅: demanda biológica de oxígeno en 5 días.

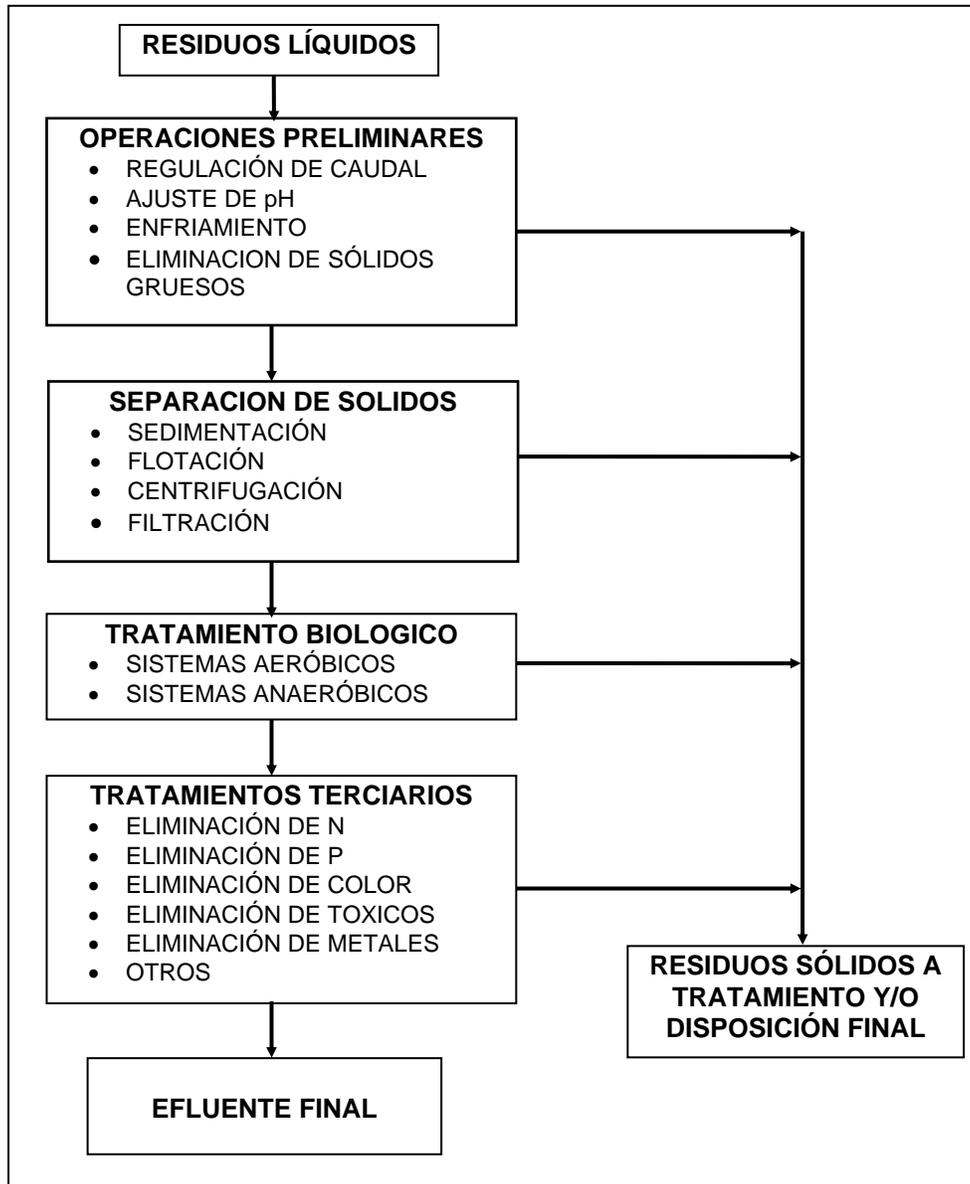


FIGURA 5.1: SISTEMA TÍPICO PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS LÍQUIDOS

5.2) TRATAMIENTO DE RESIDUOS LÍQUIDOS

Los sistemas de tratamiento de uso frecuente para residuos líquidos se presentan en la Tabla 5.2, donde se incluyen algunas características operacionales y de diseño básicas. La Figura 5.1 presenta esquemáticamente la secuencia de tratamientos para un sistema convencional de depuración de residuos líquidos.

5.2.1) Tratamiento primario

La primera etapa de un sistema de tratamiento de residuos líquidos incluye normalmente, la separación de sólidos y material no disuelto (ej.: grasas, coloides), neutralización de pH, regulación de caudal y estabilización térmica.

La variedad de sistemas disponibles comercialmente es muy amplia para una completa revisión aquí. Los sólidos más gruesos se eliminan a través de cribaje, mientras que aquellos de menor tamaño se eliminan usando mecanismos de sedimentación o flotación. Los principios básicos se revisan a continuación. Primeramente, será necesario neutralizar y estabilizar el flujo y composición del efluente.

5.2.1.1) Neutralización y Regulación de Caudal

Neutralización de pH

Se aplica cuando el efluente tiene un pH fuera de los límites aceptables. Normalmente, se usan ácidos (o bases) para llevar el pH a un rango cercano a 7. En aquellos casos donde existan líneas ácidas y básicas de concentraciones similares, será posible neutralizarlas mezclándolas con anterioridad al tratamiento primario.

En la actualidad, se usa sistemas automáticos de control de pH, los que permiten una buena regulación del pH frente a cambios de carga y flujo.

El diseño de los tanques de neutralización es muy sencillo, y no presenta mayores problemas de ingeniería, dado que la reacción de neutralización química es muy rápida. Normalmente, la neutralización y la estabilización de flujo se efectúan en el mismo tanque.

Estabilización de Flujo

Normalmente, el flujo y composición de los residuos líquidos presenta enormes variaciones durante la operación rutinaria de la planta, reflejando diferentes operaciones que tienen lugar durante el proceso (ej.: lavado de los reactores). Ello puede presentar serios problemas, particularmente para las operaciones de tratamiento secundario, que se caracterizan por ser procesos muy lentos, cuya eficiencia es muy sensible a las variaciones de flujo y concentración.

Para garantizar un flujo y carga lo más constante posibles se puede usar un tanque

de almacenamiento (homogeneizador), con un tiempo de residencia lo suficientemente largo como para amortiguar las variaciones. El tiempo de residencia (normalmente, entre 4 y 24 horas) está determinado por las características de operación de la planta, la biodegradabilidad del material orgánico y el tipo de tratamiento secundario.

Un tiempo de residencia muy largo, implicará un tanque de mayor volumen (es decir, mayor costo), y puede dar lugar a crecimiento microbiano, malos olores, etc.. Cuando se trate de volúmenes de líquido muy grandes (ej.: miles de m³), se puede usar lagunas de estabilización.

La segregación de las líneas residuales de mayor contenido orgánico (que requieren de tratamiento secundario) puede resultar en una substancial disminución del flujo, con la consiguiente reducción del volumen del tanque de retención.

5.2.1.2) Eliminación de Sólidos Gruesos

Los sólidos gruesos flotantes (ej.: astillas, corteza), pueden ser eliminados a través de cribas o tamices. Se debe especificar la anchura del canal y de las barras de la criba, sobre la base de la velocidad requerida para evitar la sedimentación de los sólidos. Dicha velocidad de flujo a través de la criba debe exceder 0,5 m/s, lo cual requiere de una adecuada selección de la anchura del canal. Los sólidos son removidos mecánicamente (dragas), en forma continua.

La ecuación de diseño es:

$$W = \frac{b F}{v H}$$

donde:

W = ancho del canal (m)
 F = flujo (m³/s)
 v = velocidad a través de las barras (m/s)
 H = profundidad del canal (m)
 b = factor empírico:

2,0 para espaciamientos de 12 mm;
1,7 para espaciamientos de 18 mm;
1,5 para espaciamientos de 24 mm.

Las arenas y gravas se deben eliminar para evitar la abrasión. Un desarenador bien diseñado debe remover al menos 95% de las partículas con diámetro mayor de 0,2 mm. Para evitar la eliminación de materia orgánica, que puede producir descomposición posterior, se usa una velocidad de 0,3 (m/s), que permite eliminar los sólidos inorgánicos, pero no los orgánicos.

Otros diseños incluyen desarenadores aireados, donde el aire produce corrientes suaves que impiden la sedimentación de materia orgánica, pero no de la inorgánica.

5.2.1.3) Sedimentación Primaria

Se debe retirar los sólidos suspendidos (0,05-10 mm en diámetro), cuando estos están presentes en gran cantidad. No es esencial removerlos antes del tratamiento biológico, pero su separación física (primaria), puede conducir a la eliminación de un 30-40% de DBO (dependiendo de la biodegradabilidad de los sólidos).

Así, se puede reducir la carga orgánica para el tratamiento biológico, y reducir la cantidad de lodos biológicos generados. La sedimentación es, por lo tanto, el proceso de tratamiento de aguas más usado.

Tipos de tanques de sedimentación

Un tanque ideal debe tener 4 características:

- La zona de entrada debe facilitar la reducción y uniformización de la velocidad del efluente.
- Un canal de salida, para captar el líquido clarificado, con trampas para el material flotante (ej.: aceites).
- Una zona de sedimentación que representa la capacidad del tanque. En esta zona tiene lugar la sedimentación, y no debe presentar cortocircuitos o áreas estancadas.
- Una zona de almacenamiento y eliminación de los sedimentos.

Existen 3 tipos de diseños:

- **Tanques de flujo horizontal:** Normalmente son rectangulares ($L:A=4:1$). Tienen la alimentación por uno de los extremos y la salida por el extremo opuesto.
- **Tanques de flujo radial:** De forma circular, con alimentación en el centro, fluyendo hacia el exterior radialmente. La velocidad es más alta al centro, y disminuye hacia la periferia.
- **Tanques de flujo ascendente:** Ya sea de forma circular o cuadrada, con un suelo de pendiente fuerte. La alimentación se hace desde el centro del tanque, bajo la superficie, hacia abajo. Debido a la configuración del fondo, el flujo cambia de dirección bruscamente hacia arriba, y los sólidos sedimentan cerca de la periferia. Son muy eficientes.

Algunos principios generales

La sedimentación ocurre debido a la acción de la gravedad. El tamaño y la densidad de las partículas son factores importantes en el resultado final de la operación. Algunas partículas mantendrán su identidad durante la sedimentación (discretas), mientras que otras van a flocular (partículas floculantes). En general, la velocidad de sedimentación de partículas, es directamente proporcional al cuadrado del radio, y a la diferencia de densidad entre el sólido y el líquido.

La sedimentación de partículas, se describe convencionalmente a partir de la

ecuación de Stokes, la que cuantifica los factores que afectan la velocidad de sedimentación en un líquido quieto:

$$Q = \frac{2g r^2}{9\mu} (\rho_1 - \rho_2)$$

donde:

- Q = velocidad de sedimentación (m/s),
- r = radio de la partícula (m)
- μ = viscosidad del fluido (N s/m²)
- ρ_1 = densidad del sólido (kg/m³)
- ρ_2 = densidad del fluido (kg/m³)

Esta ecuación no se puede aplicar directamente al diseño de sedimentadores, debido a que ni el diámetro ni la densidad de las partículas se pueden predecir con precisión. Más aún, algunas partículas son irregulares, mientras que otras tienden a aglomerarse o flocular, y a sedimentar más rápidamente, en la medida que la sedimentación progresa.

Existen diferentes tipos de sedimentación:

- Sedimentación Tipo 1: partículas discretas (ej.: sedimentación de arenas y gravas).
- Sedimentación Tipo 2: partículas floculantes sin interacción (ej.: sedimentación primaria).
- Sedimentación Tipo 3: partículas floculadas que interactúan debido a la alta concentración de floculos. (ej.: sedimentación de lodos biológicos).
- Sedimentación Tipo 4: en este caso existe una alta concentración de partículas, que forman una estructura estable. La sedimentación ocurre debido a la compresión que ejercen las partículas que se agregan a la parte superior de la estructura.

En la sedimentación tipo I, el área del tanque de sedimentación es más importante que la profundidad, ya que la velocidad ascendente está determinada por el área del tanque y el flujo.

La velocidad de sedimentación Q está dada por:

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

donde:

- Q = es la velocidad de sedimentación (m³ m⁻² día⁻¹), conocida como la velocidad de carga superficial
- A = es el área superficial del tanque (m²).
- F = es el flujo volumétrico de afluente (m³/día).

Para dimensionamiento preliminar se puede usar $Q = 30-50$ (m³ m⁻² día⁻¹).

En el caso de los sedimentadores circulares, el flujo de líquido clarificado por unidad de perímetro del sedimentador, Q_p , es un parámetro importante, cuyo valor de diseño debería mantenerse inferior a $220 \text{ (m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ día}^{-1}\text{)}$. Las dimensiones del sedimentador deben satisfacer ambos criterios de diseño. Se puede demostrar que el diámetro de sedimentador que satisface ambos criterios es:

$$d = \frac{4Q_p}{Q}$$

Para flujos mayores de $9.000 \text{ (m}^3\text{/día)}$, el diámetro (d) de los sedimentadores es del orden de 30-35 m. El número de unidades de sedimentación, N , se estima a partir de:

$$N = \frac{4F}{Q \pi d^2}$$

La profundidad del tanque está determinada por el tiempo de residencia necesario para permitir la sedimentación de la partícula más pequeña. Típicos valores de tiempos de residencia, están en el rango 1 a 4 horas; mientras mayor la concentración de sólidos, mayor el tiempo de residencia necesario. El tiempo de residencia determinado en experimentos de laboratorio se multiplica por un factor de seguridad de 1,5 o 2 (y se reduce la velocidad de carga superficial por 1,25-1,75), para compensar por las corrientes convectivas debidas a gradientes de temperatura, composición variable, efectos hidráulicos, etc.

Se pueden generar malos olores debido a la descomposición anaeróbica de los sólidos sedimentados si el tiempo de residencia es innecesariamente largo.

En el caso de tanques rectangulares, la relación entre longitud y profundidad es 12:1 (para longitudes menores de 90 m), mientras que la relación entre longitud y anchura es 4:1.

Profundidad máxima	= 5 m
Tiempo de retención	= 1,5-2 h a flujo max.
Número mínimo de tanques	= 2 (uno se limpia, mientras el otro opera).

Los tanques de flujo radial (circulares), normalmente tienen sistemas continuos de recolección y eliminación de lodos (ver Figura 5.2).

Se puede agregar compuestos químicos que ayuden a la sedimentación, tales como agentes precipitantes, coagulantes y floculantes. Los más usados son: FeCl_3 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, Na_2SO_4 , FeSO_4 , poliacrilamida, gelatina, almidón. Estos agentes se utilizan en concentraciones en el rango $5\text{-}1000 \text{ g/m}^3$.

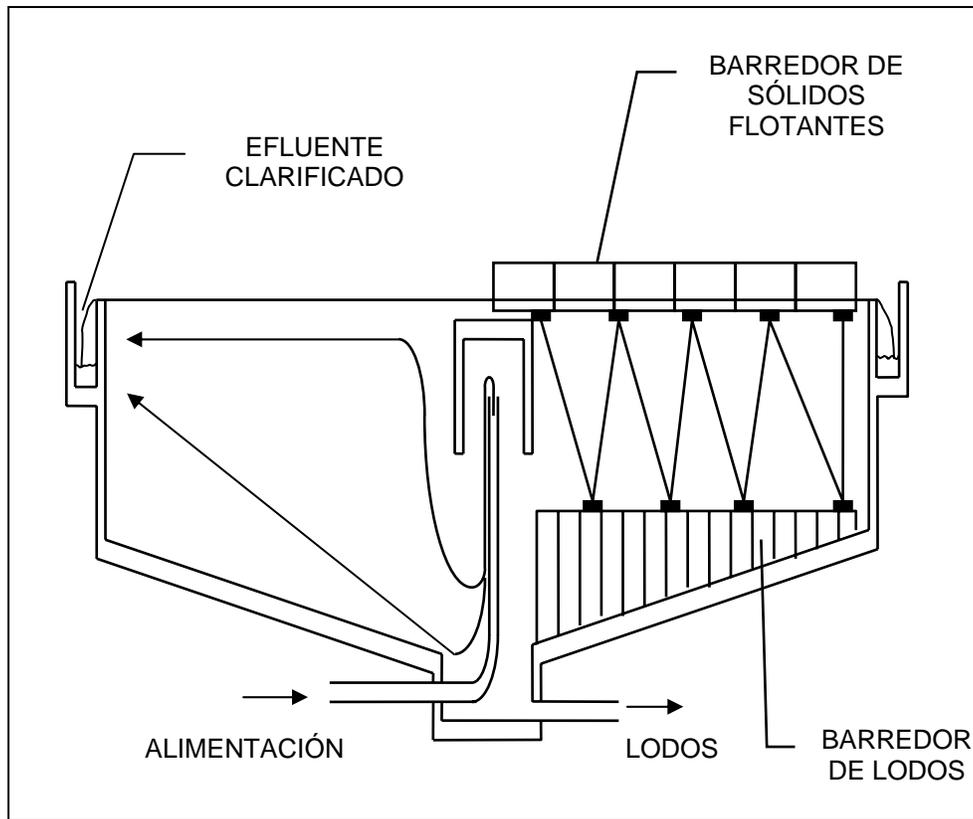


FIGURA 5.2: TANQUE DE SEDIMENTACIÓN CIRCULAR, DE FLUJO RADIAL

5.2.1.4) Flotación

La flotación se usa para eliminar sólidos y material no disuelto agregando burbujas de aire para lograr una densidad aparente menor que la del líquido. También se utiliza para concentrar los lodos.

Flotación con aire disuelto (FAD)

Al agregar aire bajo presión, se forman millones de microburbujas (diámetro 0,02-0,1 mm) que se meten dentro de los flóculos, o se nuclean alrededor de los sólidos suspendidos, o quedan atrapadas en los flóculos durante su formación (especialmente cuando se agregan agentes coagulantes o floculantes). La densidad aparente del conglomerado disminuye, y flota en la superficie.

En algunos diseños, el aire sólo se agrega a una parte de la alimentación; en otros casos, se recicla parte del efluente clarificado, al que se le agrega el aire comprimido. Las principales variables de diseño son: presión, razón de reciclo, tiempo de retención, concentración de sólidos en la alimentación. Ya que la flotación depende del tipo de superficie del material particulado, los parámetros de diseño deben ser obtenidos a partir de datos de laboratorio específicos para el agua residual a tratar. En particular, el volumen de aire por unidad de masa de sólidos, debe ser determinada en base a experimentos, utilizando una celda de flotación. La relación aire:sólidos en sistemas sin reciclo se puede determinar a partir de la expresión:

$$\text{aire : sólidos} = \frac{s_A (0,5P - 1)}{S} \quad (\text{m}^3 \text{ aire / kg sólidos})$$

donde:

- s_A = solubilidad del aire (a 20°C: 0,024 (kg aire / m³ agua))
- P = presión absoluta del aire (atm)
- S = concentración de sólidos en el líquido (kg/m³)

Una relación aire:sólidos típica, es del orden de 0,01 (m³ aire / kg sólidos). En general, se usan presiones de 5 a 6 atm. En el caso de reciclo, se usa un reciclo del 25-60%.

El área de flotación se determina en base a la velocidad de ascenso de los sólidos:

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

donde:

- A = es el área superficial del tanque (m²).
- Q_F = es la velocidad de flotación (m³m⁻²día⁻¹).
- F = es el caudal del efluente (m³día⁻¹)

La velocidad de flotación varía ampliamente, dependiendo de la concentración de

sólidos ($11 - 220 \text{ (m}^3\text{m}^{-2}\text{día}^{-1})$). Para fines de dimensionamiento preliminar, se puede utilizar un valor de Q_F de $100 \text{ (m}^3\text{m}^{-2}\text{día}^{-1})$. El tiempo de retención en la unidad de flotación está dentro del rango 5 - 30 minutos.

La flotación es muy usada en la separación y recuperación de fibra celulósica, grasas, carbohidratos y proteínas. Presenta menos riesgo de malos olores, ya que la aireación evita la descomposición anaeróbica del material biodegradable.

Electroflotación

El equipo consiste en un tanque (que actúa como cátodo) y varios ánodos. Se aplica directamente una corriente, usando un voltaje de 10-15 volt. Los cationes formados en el cátodo neutralizan las cargas negativas de las partículas, las que coagulan y luego son flotadas por las microburbujas formadas electrolíticamente. La carga eléctrica de las sustancias coloidales y emulsificadas de origen industrial es generalmente negativa. El proceso de electroflotación neutraliza eléctricamente las cargas de las partículas, las que pueden flocular y ser llevadas a la superficie por microburbujas de oxígeno e hidrógeno que se forman por acción electrolítica.

Permite tratar aguas con concentraciones de sólidos flotantes de 9-12%, comparados con 3-5% en el caso de la FAD, sin que se requieran agentes floculantes, ni reciclo. Sin embargo, pueden existir problemas de corrosión en el ánodo.

Típicamente, el tiempo de residencia en la electroflotación está en el rango 7-12 min, con un consumo de electricidad estimado en 0.5 kWh/m^3 . El tamaño típico de una unidad de electroflotación permite tratar un flujo de $3000 \text{ m}^3/\text{día}$.

5.2.2) Tratamiento secundario

El material orgánico solubilizado o en estado coloidal, puede ser utilizado como fuente de carbono por parte de microorganismos existentes en el medio, transformándolos en subproductos volátiles y en componentes celulares. A su vez, las células microscópicas pueden ser separadas del efluente, utilizando técnicas de separación sólido/líquido.

Estos principios son utilizados en los sistemas de tratamiento biológico de efluentes contaminados con material orgánico bioutilizable. Las diferencias entre los diferentes procesos, se manifiestan en el tipo de microorganismos utilizados, la configuración de los biorreactores, su modo de operación y el tipo de actividad biológica presente.

En estos sistemas, los contaminantes orgánicos son degradados por organismos que los transforman en compuestos más sencillos, de fácil eliminación (ej.: CO_2 , CH_4) o incorporados al proceso de síntesis de material celular y, por lo tanto, concentrados en la biomasa. Esta última puede entonces ser eliminada con más facilidad por procesos de separación sólido-líquido.

Los microorganismos juegan un papel fundamental en los sistemas de tratamiento de

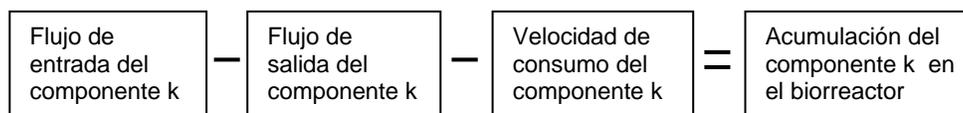
residuos líquidos. Algunos antecedentes básicos se presentaron en los capítulos iniciales. En términos generales, los microorganismos heterótrofos necesitan carbono, nitrógeno, fósforo y trazas de metales para llevar a cabo las reacciones metabólicas y reproducirse. Dichos microorganismos se clasifican en **aeróbicos** y **anaeróbicos**:

- **Organismos Aeróbicos:** Son aquellos que requieren oxígeno para llevar a cabo sus reacciones metabólicas. Generan CO_2 como subproducto.
- **Organismos Anaeróbicos:** Son aquellos que crecen en ausencia de oxígeno. Generan CO_2 , CH_4 y compuestos orgánicos de bajo peso molecular como subproductos.
- Aquellos organismos aeróbicos y anaeróbicos que sólo pueden sobrevivir en su respectivo ambiente (es decir, en presencia y ausencia de oxígeno, respectivamente), se denominan **organismos aeróbicos obligados** y **organismos anaeróbicos obligados**, respectivamente.
- Los organismos que pueden sobrevivir en ambos ambientes se denominan **organismos facultativos**.

Antes de abordar la descripción de los sistemas de tratamiento de residuos líquidos, basados en la acción de los microorganismos, es conveniente revisar algunos conceptos básicos sobre el dimensionamiento de reactores y los métodos utilizados para determinar la concentración de material orgánico disuelto en las aguas residuales.

a) Dimensionamiento de Biorreactores

El volumen de reactor y el tiempo de residencia requeridos para completar la degradación biológica de los contaminantes orgánicos se estiman a partir de un balance de masa y de la cinética del proceso. En general, el balance de masa para el componente k en el biorreactor considera los siguientes términos:



En la práctica, existen diferentes modos de operación, con distintas características, a saber:

Modo de Operación Discontinuo o por lotes (batch)

En este caso, se carga el reactor con los microorganismos y el líquido a tratar, manteniéndose en contacto hasta completar el tiempo de reacción para alcanzar el grado de depuración deseado. Al no existir entrada ni salida de biomasa o de líquido, el balance de masa resultante, para el componente C (compuestos orgánicos biodegradables) es:

$$-r_C = \frac{d[C]}{dt}$$

donde

r_C = es la velocidad de consumo del contaminante ($M L^{-3} T^{-1}$).

$[C]$ = es la concentración de DBO del efluente en el reactor ($M L^{-3}$).

t = tiempo de reacción (T)

Conociendo la cinética y la concentración inicial, $[C]_O$, la ecuación diferencial puede integrarse para obtener el tiempo de reacción, t_R , necesario para alcanzar una concentración final $[C]_F$

$$t_R = - \int_{C_O}^{C_F} \left[\frac{d[C]}{r_C} \right]$$

Modo de Operación Continuo, reactor perfectamente agitado:

En este modo de operación, el líquido a tratar se alimenta constantemente al reactor, cuyo contenido está sometido a vigorosa agitación, lográndose una homogeneidad de concentración al interior del reactor. El efluente tratado es retirado continuamente del reactor. El sistema se mantiene en estado estacionario, cuando se cumplen las siguientes condiciones:

- El flujo y las características químicas y físicas de la entrada se mantienen constantes
- El flujo volumétrico de salida es igual al de alimentación
- Las características de la biomasa en el reactor se mantienen constantes
- El pH y la temperatura del reactor se mantienen constantes
- La concentración de oxígeno disuelto en el reactor se mantiene constante (para sistemas aeróbicos)

Bajo tales condiciones, el balance de masa resultante es:

$$F [C]_O - F [C]_F - V r_C = 0$$

Por lo tanto, el tiempo de residencia (t_R) en el reactor se puede calcular a partir de:

$$t_R = \frac{V}{F} = \frac{[C]_O - [C]_F}{r_C}$$

Modo de Operación Continuo, reactor flujo pistón:

En el caso de reactores tubulares continuos, donde se pueda despreciar el gradiente de velocidad en el sentido radial, se puede suponer que el fluido avanza como un flujo pistón, es decir sin mezcla axial. Bajo condiciones de estado estacionario, se puede demostrar que el tiempo de residencia requerido está definido por la siguiente ecuación:

$$t_R = \frac{V}{F} = - \int_{C_o}^{C_f} \left[\frac{d[C]}{r_C} \right]$$

Las ecuaciones resultantes de los balances de masa permiten dimensionar el biorreactor, de acuerdo al modo de operación correspondiente. Se puede observar que, en todos los casos, se requiere conocer la velocidad de consumo del contaminantes (r_C). Este aspecto se revisa en los párrafos siguientes.

b) Cinética de Degradación Biológica del Material Orgánico Disuelto

La cinética de biodegradación de un substrato orgánicos se expresa, generalmente, en base al modelo de Monod:

$$r_C = \frac{\mu_M [C][X]}{K_S + [C]}$$

donde:

- r_C = es la velocidad de consumo del contaminante ($M L^{-3} T^{-1}$).
- $[C]$ = es la concentración del contaminante orgánico en el reactor ($M L^{-3}$).
- $[X]$ = es la concentración de microorganismos en el reactor ($M L^{-3}$).
- K_S = es la constante de afinidad de Monod ($M L^{-3}$).
- μ_M = es la velocidad máxima de crecimiento celular (T^{-1}).

De acuerdo al modelo cinético de Monod, la velocidad de degradación del contaminante depende de la concentración del substrato y de la concentración de biomasa activa. Los valores típicos utilizados en el modelamiento de biorreactores aeróbicos son:

- μ_M = 11 - 14 ($día^{-1}$) para residuos industriales.
2,4 - 7,2 ($día^{-1}$) para residuos domésticos.
- K_S = 2 - 30 mg/l para residuos industriales.
50-120 mg/l, para residuos domésticos.

Existen diferentes formas de expresar la concentración de contaminantes orgánicos biodegradables, como se revisa a continuación.

c) Determinación de Compuestos Orgánicos en Aguas Residuales

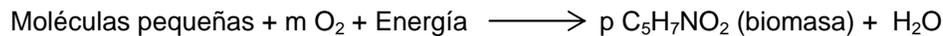
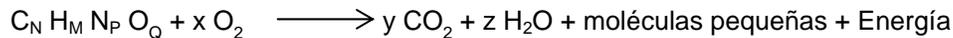
Los materiales orgánicos contenidos en las aguas residuales incluyen una amplia mezcla de compuestos, y resulta difícil su determinación individual. Desde el punto de vista del control ambiental, interesa la demanda de oxígeno que dichos compuestos imponen, ya que ello refleja el efecto que tendrán una vez que se viertan en los cuerpos de agua receptores. Los microorganismos aeróbicos consumen el oxígeno (fuente de electrones) para la producción de energía necesaria para el crecimiento. Por ejemplo, en el caso de la glucosa:



Este tipo de reacciones es usado para medir la demanda química o biológica de oxígeno. Son análisis no específicos, y los átomos de carbono pueden ser oxidados química o biológicamente para producir CO₂. A continuación, se describe brevemente algunos análisis utilizados en el control ambiental para la determinación de compuestos orgánicos disueltos en agua.

Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)

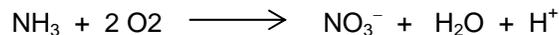
El análisis de DBO usa microorganismos para oxidar los componentes orgánicos, utilizando oxígeno molecular, bajo condiciones controladas. Se mide el oxígeno consumido durante un período especificado (5 días, 7 días o 30 días). La muestra se pone en contacto con una solución saturada de oxígeno, y se incuba en un recipiente cerrado, en la oscuridad a 20°C. Generalmente, se utiliza un inóculo de microorganismos. Paralelamente, se hace un control como referencia, con agua pura y el inóculo. El test de DBO₅ (5 días, 20°C) ha permanecido inalterado desde 1912. El consumo de oxígeno puede ser descrito en forma simplificada por dos reacciones: degradación (catabolismo) y síntesis (anabolismo), respectivamente:



Cuando el período de incubación está a punto de terminar, debido a la baja concentración de material biodegradable presente, los organismos comienzan a oxidar su propio material celular, para obtener la energía necesaria para mantener su viabilidad. Esto es conocido como metabolismo endógeno:



La demanda última de oxígeno se mide como el consumo total después de 28 días de incubación. En el caso de aguas con alto contenido de N, se experimenta una alta demanda de oxígeno entre los días 5 y 12, debido a la acción de bacterias nitrificantes:



Para evitar la acción de estas bacterias durante la medición de DBO, éstas se inhiben con alitiourea (ATU).

Cinética del test de DBO

A pesar de la complejidad de las reacciones involucradas, la cinética de consumo de oxígeno se puede aproximar a una reacción de 1er orden:

$$\frac{d[O_2]}{dt} = -k [O_2]$$

donde $[O_2]$ es la concentración de oxígeno disuelto y k es la constante cinética. Integrando, se obtiene el consumo de oxígeno, es decir, la Demanda Biológica de Oxígeno:

$$DBO_t = [O_2]_0 (1 - e^{-kt})$$

Los valores de k a diferentes temperaturas ($k(T)$) pueden ser calculados a partir del valor a 20°C (k_0):

$$k(T) = k_0 \theta^{(T-20)}$$

donde θ es aproximadamente 1,047, para $T > 20^\circ\text{C}$ y 1,135 para $T < 20^\circ\text{C}$.

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Se refiere al potencial de oxígeno requerido para oxidar químicamente el material orgánico, bajo condiciones controladas. Usa como agente oxidante el dicromato de potasio, en presencia de H_2SO_4 y un catalizador de Ag a 150°C . El dicromato remanente se determina a partir de titulación con FeSO_4 usando Ferroína como indicador (1 mol de dicromato corresponde a 1,5 moles de oxígeno). Tiene la ventaja de que el análisis demora dos horas, por lo que puede ser utilizado en control de procesos. Generalmente, entrega valores mayores que la DBO.

Test Valor de Permanganato (VP)

La oxidación química se hace usando permanganato de potasio. Es menos riguroso que la oxidación con dicromato. Se usa H_2SO_4 diluido, y la muestra se hierve durante 30 min. El permanganato residual se titula con oxalato de amonio. Generalmente, el VP es menor que la DBO.

Demanda de Oxígeno Total (DOT)

Es un análisis rápido y automatizado, en el cual una muestra se oxida en presencia de catalizador a 900°C , en presencia de aire. La demanda de oxígeno se calcula en base al consumo de oxígeno. Este valor incluye también el consumo de oxígeno debido a la oxidación de sustancias inorgánicas y orgánicas recalcitrantes (ej.: lignina y plásticos). El valor de DOT es superior al DQO.

Los diferentes métodos de determinación de demanda de oxígeno, entregan valores diferentes, como consecuencia del poder oxidante característico de cada uno. El único de ellos que mide directamente la demanda biológica de oxígeno, es el test de DBO. Sin embargo, para que éste tenga validez, es necesario medir el consumo de oxígeno por un período mínimo de 5 días, lo cual no es adecuado como herramienta de control de procesos. Los otros tests son más rápidos, pero determinan el consumo de oxígeno asociado al efluente no sólo debido a la actividad biológica, sino que también a la oxidación química bajo diferentes condiciones de temperatura, y catalíticas. La relación entre DBO y DQO (o DOT o VP) varía dentro de márgenes relativamente pequeños para un efluente dado, y

las mediciones rutinarias de oxidación química pueden ser usadas como indicadores del nivel de DBO existente.

5.2.2.1) Sistemas de Tratamiento Aeróbico

Los procesos aeróbicos de tratamiento de efluentes están diseñados para acelerar los procesos de aireación natural y bioxidación del material orgánico. Nos referiremos aquí a las lagunas de aireación, a los sistemas de lodos activados (en sus variaciones más relevantes) y a los filtros biológicos. En cada caso, se mostrarán las características operacionales básicas y los parámetros de diseño de importancia. Ya que la aireación es de primera importancia para los procesos aeróbicos, es necesario comenzar esta sección revisando los conceptos básicos de aireación.

a.1) Aireación

Una gran parte de los costos de operación es debida al consumo energético asociado con la aireación. Por lo tanto, es importante diseñar y operar los sistemas eficientemente, para reducir el impacto económico.

La transferencia de oxígeno en los sistemas aeróbicos puede ser llevada a cabo de varias maneras, por ejemplo: mecánicamente, difusores de aire comprimido, alimentación con oxígeno puro, etc. Sin embargo, no importando cual sea el sistema, las leyes físicas que gobiernan la transferencia son comunes a todas ellas. El modelo más usado para explicar la absorción de oxígeno en un líquido supone que la velocidad de transferencia está limitada por la resistencia difusional impuesta por la película líquida estancada, presente en torno a la interfase gas - líquido.

Tal como se ilustra en la Figura 5.3, las moléculas de oxígeno son transferidas por difusión, a través de la película líquida que se forma en torno a la burbuja de aire. La fuerza motriz de dicho proceso es el gradiente de concentración de oxígeno disuelto a través de dicha película líquida. El oxígeno disuelto en el líquido inmediatamente en contacto con el gas tendrá una concentración muy cercana a su valor de saturación ($[O_2]_{SAT}$). Si la concentración de oxígeno disuelto en el seno del líquido, ($[O_2]$) es inferior a la concentración de saturación, se establece un flujo difusional desde la interfase hasta el seno del líquido, a través de la película estancada. El transporte de las moléculas de oxígeno desde el seno del líquido hasta las inmediaciones de los microorganismos es por convección y, posteriormente, cruzan la pared celular dentro del sistema microbiano, de acuerdo a su tasa metabólica (la que a su vez dependerá de la cantidad de nutrientes orgánicos (DBO)).

La velocidad de transferencia de oxígeno (J) a través de la película estancada, se puede expresar de acuerdo al modelo de Graham:

$$J = k_L a ([O_2]_{SAT} - [O_2])$$

donde:

a = es el área interfacial (m^2/m^3).

k_L = es el coeficiente de transferencia de oxígeno en la película líquida (m/s)).

$k_L a$ es un parámetro empírico que depende de la geometría del sistema, temperatura, tamaño de burbujas, composición química, condiciones hidrodinámicas, etc.. En el caso de los agitadores mecánicos, $k_L a$ se correlaciona con la potencia de agitación por unidad de volumen P_V (kW/m³). Por ejemplo, se puede utilizar la ecuación de Penney:

$$k_L a = 21.5(P_V)^{0.79}$$

Los principales factores que afectan la Concentración de Saturación son la temperatura y la presión parcial de O₂ en el gas. Por ejemplo, a 0°C $[O_2]_{SAT} = 14.6$ mg/l, a 20°C $[O_2]_{SAT} = 9.29$ mg/l (a 1 atm). El efecto de la presión parcial de O₂ en el gas es significativo; por ejemplo, la concentración de saturación en el agua en contacto con aire a 1 atm y 10°C es $[O_2]_{SAT} = 11.3$ mg/l, mientras que aquella que se obtiene cuando se usa O₂ con una presión parcial de 0.9 atm es: $[O_2]_{SAT} = 48.4$ mg/l, lo que representa un aumento de 4 veces en la capacidad de oxigenación del líquido.

Métodos de Aireación

Existen dos técnicas generales de aireación: mecánica y por difusores.

- **Aireación Mecánica:** La agitación en la interfase aire-líquido produce miles de gotas que entran en contacto con la atmósfera. Existen diversos diseños (ej.: sistemas superficiales, chorros de líquido, y sistemas combinados (agitación y aspersión)). Los aireadores superficiales pueden ser montados verticalmente (en casi todos los casos, de turbina) u horizontalmente (sólo en el caso de zanjas de oxidación, de paletas). La tasa estándar de aireación es del orden de 1 - 3 (kg O₂/kWh).
- **Aireación por Difusores:** Los difusores están montados en el fondo del reactor y el aire se alimenta en burbujas. La transferencia de oxígeno tiene lugar durante el ascenso de las burbujas. Las corrientes generadas debido al burbujeo ayudan a agitar la mezcla de líquido y microorganismos. Normalmente, no todo el O₂ alimentado es transferido, y la eficiencia de utilización en los sistemas de difusores, es baja (1-15%). Se tiene una capacidad de aireación en el rango 0,5-2 (kg O₂ /kWh). Los volúmenes de aire alimentado son del orden de 30-40 (m³/kg DBO).

a.2) Configuración del Biorreactor

Tal como se mencionó en secciones anteriores, los sistemas de tratamiento biológico pueden operar en modo de operación discontinuo o continuo.

Modo Discontinuo (Por lotes o batch): En este modo de operación, se presentan cuatro etapas sucesivas: alimentación, aireación, sedimentación, vaciado del sobrenadante y comienzo de un nuevo ciclo. El tiempo requerido para completar un lote comprende el tiempo de carga del reactor, el tiempo requerido para la bioreacción y el tiempo para descarga. Los tiempos de carga y descarga pueden ser muy

grandes cuando el volumen de líquido a tratar es alto, por lo que el modo discontinuo se prefiere sólo para pequeña escala de operación.

- **Modo Continuo:** Se utiliza cuando la escala de operación es grande.

Reactores perfectamente agitados: Su principal ventaja radica en el hecho que el afluente es rápidamente diluido en el reactor, actuando como amortiguación contra la presencia de sustancias tóxicas que pueden estar presentes en la alimentación. La carga es uniforme en todo el reactor, con necesidad uniforme de O_2 . En la práctica, pueden existir problemas de cortocircuitos hidráulicos, debido a un mal diseño. También se presentan problemas debido a baja sedimentabilidad de los flóculos. En general, esta configuración de reactor requiere un mayor volumen que los reactores tipo flujo pistón.

Reactores flujo pistón: Existe un gradiente axial de DBO decreciente a lo largo del reactor, creciente concentración de lodos, y decreciente concentración de O_2 disuelto. Usualmente, son zanjas largas y angostas, o se puede aproximar a partir de un gran número de reactores completamente mezclados, en serie. En la práctica, es mejor usar tanques en series, ya que cada uno de ellos puede tener su propio aireador diseñado ad-hoc. Generalmente se utiliza aireación graduada a lo largo del reactor flujo pistón, con una tasa mayor al comienzo, disminuyendo a lo largo del reactor. Los problemas de sedimentabilidad son mucho menores en los reactores de flujo pistón.

a.3) Lagunas de Aireación

Son relativamente baratas y, aparentemente, fáciles de operar. Normalmente tienen 2-6 m de profundidad, con una gran superficie. En el caso de las lagunas de maduración, donde se tienen largos tiempos de residencia, la principal fuente de O_2 proviene de la actividad fotosintética de las algas, llegándose a niveles de oxígeno disuelto de 20-30 g/m^3 . En climas con menor disponibilidad de luz solar esto no es muy eficiente.

La estructura de la población microbiana en el reactor depende del tipo de afluente y de las características de aireación. Una buena aireación elimina la presencia de algas y provee una población bacteriana heterotrófica con buenas características de floculación.

Los aireadores cumplen dos roles: oxigenación del efluente y agitación, para evitar la sedimentación de los flóculos en la laguna. Los aireadores mecánicos pueden ser flotantes o fijos. En caso de lagunas más profundas, se usa turbinas sumergidas. La potencia requerida para mezclar el contenido de la laguna, es del orden de 5-20 (W/m^3). El requerimiento energético para transferencia de O_2 se puede estimar sobre la base de datos de diseño de aireadores comerciales, típicamente entre 1 y 3 ($kg O_2/kWh$). Los aireadores mecánicos deben ser localizados de manera adecuada, para hacer un uso eficiente de ellos, de acuerdo a recomendaciones del fabricante. Normalmente, para aireadores de 75 kW se usa espaciamientos de 20 m o más.

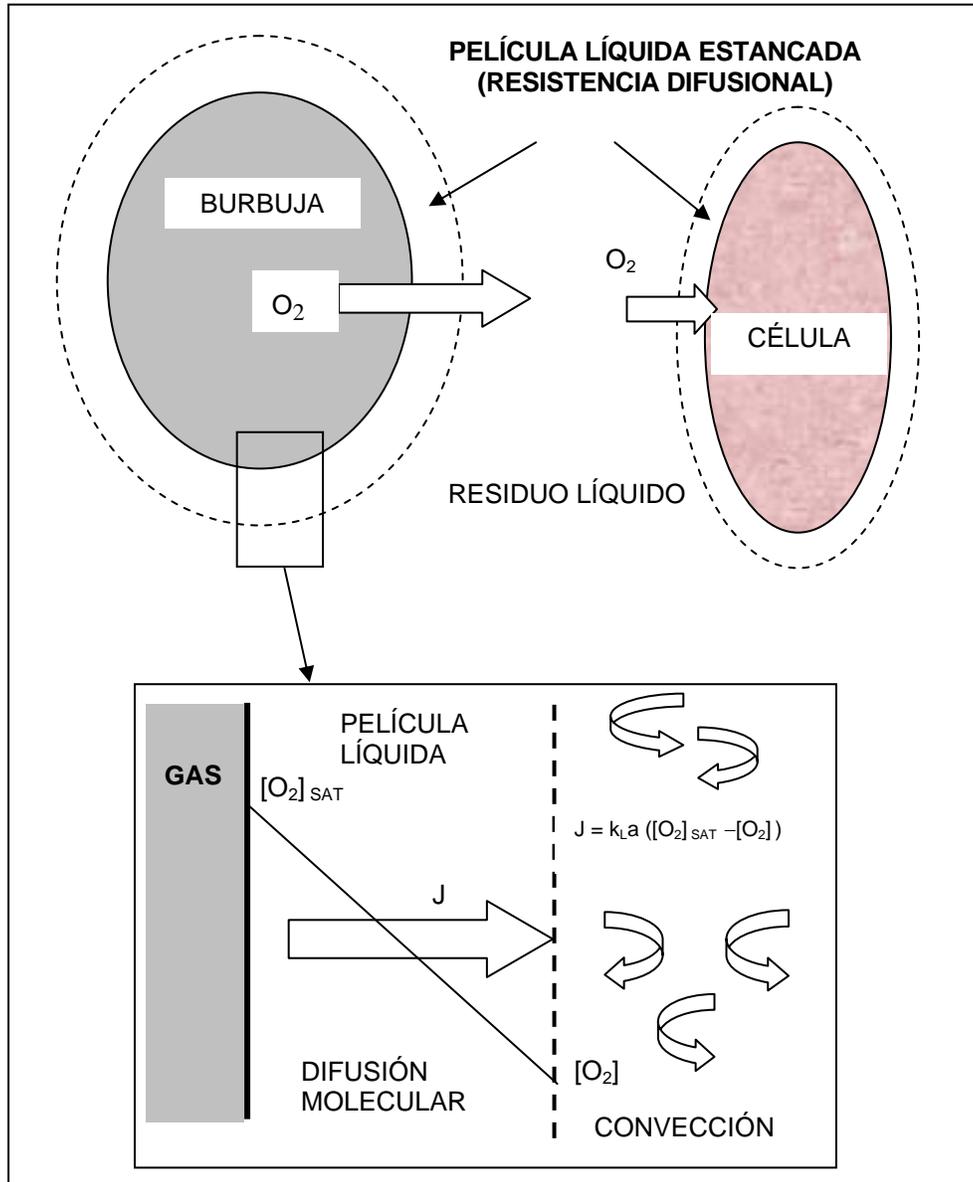
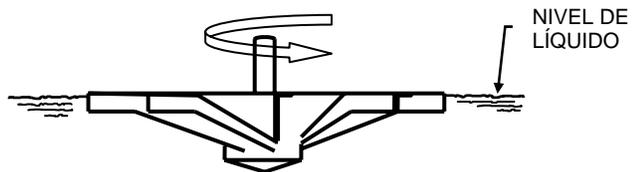
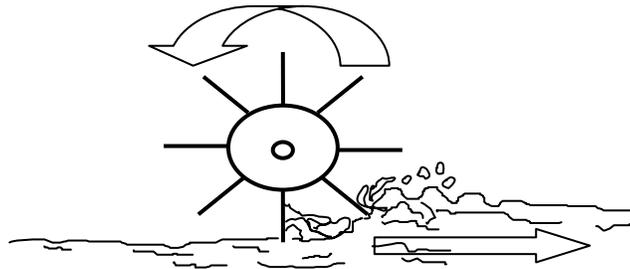


FIGURA 5.3: TRANSFERENCIA DE OXÍGENO EN TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE EFLUENTES.

AIREADOR "SIMCAR" (SIMON-HARLEY LTD.)



AIREADOR CON CEPILLO DE KESSENER



SISTEMA DE AIREACIÓN DE TURBINA "CONO SIMPLEX"

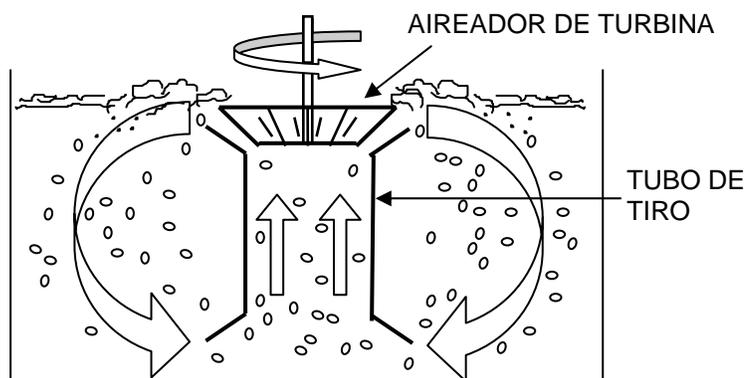


FIGURA 5.4: AIREADORES MECÁNICOS

Los sedimentos se pueden digerir naturalmente cuando la temperatura del agua en el fondo excede los 20°C (verano, clima tropical). En climas fríos, los sedimentos se acumulan en el fondo, requiriendo una limpieza periódica.

Para estimaciones preliminares, se puede calcular el área de la laguna aireada sobre la base de un tiempo de residencia dado, por ejemplo 6 días, y una profundidad media de 5 m. También se puede utilizar una carga orgánica de diseño, con valores del orden de 400 (kg DBO alimentación ha⁻¹día⁻¹) con eficiencias de remoción de DBO en el rango 70-90%. En el caso de las lagunas con aireación forzada, donde existan condiciones hidrodinámicas de agitación completa, se puede utilizar las ecuaciones de diseño revisadas en secciones anteriores, en base a datos cinéticos de literatura o de experiencias con efluentes similares.

Los problemas típicos asociados a las lagunas de tratamiento son: mala distribución del líquido en la laguna, variaciones estacionales de temperatura, malos olores, generación de lodos en el efluente y baja eliminación de organismos patógenos.

Normalmente, el efluente de la laguna contiene material en suspensión correspondiente a los microorganismos que se han reproducido en la laguna, con una concentración en el rango 0,08 - 0,4 (kg/m³). Estos microorganismos deben ser eliminados del efluente antes de su descarga final, si no cumple con las normas que regulan su vertido.

Las lagunas de aireación se justifican en aquellos casos donde existe una adecuada disponibilidad de terreno a bajo costo. Sin embargo, su implementación no es recomendable en el caso de industrias que contienen contaminantes de baja biodegradabilidad, ya que pueden resultar inadecuadas para cumplir con la legislación ambiental.

Se recomienda utilizar lagunas en serie para permitir una mayor estabilidad operacional, a la vez de que dicho arreglo ayuda a "especializar" cada laguna, de acuerdo a las características del afluente que recibe. Por ejemplo, la primera laguna recibe la mayor concentración de DBO, por lo que tendrá requerimientos de aireación más altos; las lagunas de las etapas finales presentarán bajas concentraciones de DBO y una mayor proporción de N y P, lo que puede generar una mayor actividad fotosintética.

Es interesante usar plantas acuáticas (ej.: jacinto acuático) en la última laguna, ya que ello permite reducir los niveles de nitrógeno en el efluente, así como los sólidos suspendidos y iones que son adsorbidos por las raíces de las plantas. Un aspecto importante de estos sistemas radiculares es que ofrecen condiciones apropiadas para la formación de una rica cadena trófica (rizosfera), lo que facilita la remoción de diversos tipos de contaminantes. Las plantas acuáticas se usan extensivamente en aquellas zonas climáticas donde son abundantes. Su alta capacidad para captar metales pesados de los efluentes las transforma en un valioso agente depurador. Sin embargo, dichas plantas deben ser cosechadas, lo que genera un problema adicional de eliminación de sólidos.

a.4) Sistema de Lodos Activados

El sistema de lodos activados es un sistema de tratamiento biológico de mayor velocidad de degradación, debido a que se mantiene una alta concentración de biomasa en el reactor (Figura 5.5). El sistema consta de dos etapas básicas:

- **Biorreactor aireado:** Donde la biomasa natural (lodos activados) degrada/metaboliza los componentes orgánicos; se forman flóculos.
- **Sedimentador:** Donde los flóculos (lodos) son separados del líquido clarificado y parcialmente reciclados al biorreactor.

La existencia de reciclo de biomasa, implica mantener una población microbiana más alta en el reactor, alcanzando mayores tasas de conversión, para un volumen y tiempo de residencia (hidráulico) dado.

En un estudio preliminar, interesará determinar el volumen del biorreactor, su configuración básica (flujo pistón vs reactor agitado), las dimensiones del sedimentador, los requerimientos de aireación, y otros datos operacionales básicos (razón de reciclo, concentraciones, etc.).

Características Generales de los Lodos Activados

Este tipo de sistemas incluye una amplia gama de diseños, de acuerdo a su configuración, método de aireación y características operacionales. Básicamente, las aguas residuales se ponen en contacto con una población de microorganismos en un biorreactor, bajo condiciones aeróbicas. Los microorganismos consumen el material orgánico disuelto y suspendido. El efluente del reactor se alimenta a un sedimentador (u otro sistema de separación sólido-líquido), donde se obtiene el efluente final clarificado, mientras que los flóculos microbianos (lodos) son concentrados y reciclados parcialmente al biorreactor.

En el reactor, la materia orgánica disuelta se elimina rápidamente, debido a adsorción en los flóculos y aglomeración del material orgánico suspendido. La degradación metabólica del material orgánico tiene lugar más lentamente, por acción de los microorganismos presentes. En este proceso, parte del material orgánico se oxida a CO₂ (mineralización) y parte se convierte en nueva masa celular (asimilación). Parte de la masa microbiana muere y se descompone regenerando el material orgánico disuelto. Los lodos desechados representan la cantidad neta de biomasa producida por asimilación.

La naturaleza floculenta de los organismos es un factor fundamental, tanto para la adsorción de materias coloidales, iónicas y en suspensión dentro del agua residual, como para la separación rápida y efectiva de la biomasa del agua tratada.

Parámetros Operacionales para Lodos Activados

Existen varios parámetros operacionales claves para el funcionamiento del proceso:

- Nivel de carga de la planta.

- Tiempo de residencia hidráulico.
- Concentración de lodos.
- Tiempo de residencia de los lodos.

A continuación, se revisan los principales conceptos acerca de estos parámetros.

- **Nivel de Carga de la Planta:** Se refiere a la cantidad de material orgánico que se carga al reactor. Los parámetros usados comúnmente para describir la tasa de carga son:

i) Carga Orgánica, Q_0 : Es la cantidad de DBO alimentada por unidad de volumen de reactor, expresada como ($\text{kg DBO m}^{-3} \text{ día}^{-1}$):

$$Q_0 = \frac{F[C]}{V}$$

donde F es el flujo de afluente a tratar ($\text{m}^3/\text{día}$), $[C]$ es la concentración de DBO del afluente (kg/m^3) y V es el volumen del biorreactor (m^3). La carga orgánica varía con la operación de la planta, tanto en flujo como en concentración de DBO. Típicamente, los valores de diseño son entre $0,25\text{-}2,0$ ($\text{kg DBO m}^{-3} \text{ día}^{-1}$).

ii) Razón Alimento/Microorganismos (A/M): La A/M o factor de carga de los lodos es uno de los parámetros más útiles; se refiere a la cantidad de DBO alimentado por unidad de lodos presente en el reactor:

$$A/M = \frac{F[C]}{V X}$$

donde $[X]$ es la concentración de lodos en el reactor (sólidos suspendidos en el licor mezclado (SSLM)). Valores típicos para A/M se encuentran en el rango $0,1 - 0,6$ [$(\text{kg DBO alimentado}) / (\text{kg lodos})^{-1} \text{ día}^{-1}$]. Cuando la cantidad de DBO se expresa como DBO *removido* por unidad de lodos por día, la A/M se denomina Factor de Carga del Proceso. La A/M es uno de los únicos parámetros que pueden ser manipulados por el operador de la planta, ya que la concentración de microorganismos en el sistema puede ser modificada aumentando o disminuyendo la purga de lodos.

iii) Carga de flóculos: Se refiere a la relación entre DBO y microorganismos en un instante dado ($\text{kg DBO}/\text{kg lodos}$).

- **Tiempo de Residencia Hidráulico:** El tiempo de residencia del líquido (V/F) debe ser suficiente para permitir un tiempo de contacto adecuado entre el material orgánico disuelto y los microorganismos. Los sistemas convencionales presentan tiempos de residencia hidráulicos entre 6 y 10 horas.
- **Concentración de lodos:** Se refiere a la masa de lodos por unidad de volumen de reactor. Cuando la masa de lodos se expresa como peso seco, la

concentración se denomina sólidos suspendidos en el licor mezclado (SSLM). Cuando la masa de lodos se expresa en términos del peso seco de material orgánico se habla de sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado (SSVLM). La concentración de lodos en el sistema está determinada por la tasa de reciclo de los lodos y por la capacidad del clarificador secundario para concentrar los flóculos. Los valores típicos de concentración de lodos son del orden de 1,2 – 3,5 (kg/m^3) (3,5 a 5 (kg/m^3) en el caso de aireación extendida).

- **Tiempo de residencia de los lodos, t_R (edad de los lodos):** La característica esencial de los lodos activados es la recirculación de lodos concentrados al reactor. Por lo tanto, el t_R es uno de los parámetros más importantes de la operación. Se calcula como la cantidad total de lodos dividida por la tasa de pérdida (purga) de lodos (incluyendo la pérdida en el sobrenadante del clarificador; ésta es normalmente despreciable). El t_R típico es 7 días (4-10 días).
- **Consumo de O_2 por unidad de DBO removido:** Depende de la naturaleza de la carga orgánica y del t_R , entre otros factores. Varía de sistema a sistema, pero normalmente se encuentran valores en el rango 0,6-2,0 ($\text{kg O}_2/\text{kg DBO removido}$) (1,2 para un t_R de 7 días).
- **Requerimientos de Nutrientes:** La relación DBO:N:P es 100:3:0.6 en los sistemas de lodos activados convencionales.
- **Tasa de remoción de DBO :** Los sistemas de lodos activados bien operados pueden lograr alrededor de 90-95% de eliminación de DBO.
- **Tasa de producción de lodos:** Alrededor de 0.5 kg lodos (peso seco)/kg DBO removido. En cuanto a la sedimentación, normalmente los lodos en el reciclo tienen una concentración del orden de dos veces la concentración en la salida del aireador (<1% peso seco).

Problemas relacionados con los Lodos

Lejos de ser un sistema homogéneo, los lodos son un complejísimo sistema ecológico, formado por una mezcla de diferentes clases de organismos, aglomerados, adsorbidos en sedimentos inorgánicos, floculados, etc. Además, contienen compuestos orgánicos e inorgánicos. La composición en cada sistema depende de la composición de los nutrientes, de las condiciones de operación, de las características locales, condiciones climáticas, etc.

Los flóculos microbiales de los lodos son cúmulos de varios millones de células bacterianas, junto a otros organismos y materiales, que se encuentran en un equilibrio dinámico. Los protozoos contribuyen al proceso de floculación y su presencia en alta concentración se considera un signo de buena salud del sistema biológico. Su importancia radica en su capacidad para alimentarse de las bacterias dispersas, las que no serían separables por sedimentación. Algunos protozoos están fijos en los flóculos, mientras que otros nadan libremente. Muchos protozoos segregan una

mucosidad que permite acelerar la floculación.

El Índice de Volumen de los Lodos (IVL) es uno de los indicadores más usados para determinar las características de sedimentación de los lodos, y corresponde al volumen sedimentado en 30 minutos, expresado por unidad de lodos en suspensión.

Cuando la densidad de los lodos es menor que la del agua, estos tienden a flotar (esponjamiento), lo que representa un serio problema operacional. Se cree que esto se debe a la presencia de organismos filamentosos, entre los que se encuentran principalmente algunos hongos y protozoos ciliados. Existe controversia sobre cuales son los factores que favorecen la formación de esponjamiento. Al parecer, las condiciones ácidas, el desbalance de nutrientes, las altas temperaturas (sobre 30°C), el descenso de la concentración de O₂ bajo 1 (g/m³) y las bajas tasas de carga orgánica (bajo 0,2 [(kg DBO) (kg lodos)⁻¹ día⁻¹]) favorecen el crecimiento de hongos filamentosos.

Otro problema operacional bastante frecuente es la desfloculación que puede ocurrir debido a bajos niveles de O₂, bajo pH y presencia de compuestos tóxicos.

Los lodos están compuestos por organismos que se encuentran en distintas etapas de su ciclo biológico, materia orgánica biodegradable y materia inorgánica inerte. La proporción de lodos viables (organismos vivos) es baja. En el proceso convencional, los lodos viables representan entre el 2-3 % (para 4 días de retención de lodos). Mientras más largo el tiempo de residencia, mayor será el número de organismos no viables y viceversa. De ello se deduce que el requerimiento de oxígeno depende de la "edad" de los organismos.

a.5) Variantes del Sistema de Lodos Activados Convencional

Existen muchas variaciones, tanto en configuración como en método de aireación.

- **Estabilización por Contacto:** Es apropiado para sistemas completamente mezclados (donde se generan problemas de sedimentabilidad). En ella, el reciclo contiene una alta concentración de lodos, que se mezcla con la alimentación en un tanque pequeño. Ello permite un contacto de alrededor de 1/2 hora para que se adsorba y aglomere gran parte de la DBO. Luego se separan los lodos en el sedimentador y se alimentan a un tanque de estabilización, donde se someten a alta aireación para que se produzca la biodegradación del material adsorbido. El tiempo de residencia en el estabilizador es de aproximadamente 12 horas. Después de la estabilización, los lodos son reciclados al estanque de contacto. La ventaja del proceso es que gran parte de la aireación tiene lugar en el estabilizador, donde sólo están los lodos sedimentados después de la fase de contacto. Este proceso es efectivo solamente en aquellos casos en que gran parte del DBO puede ser rápidamente adsorbido y aglomerado por los flóculos. Es importante desarrollar un intenso trabajo de laboratorio para estudiar las características de adsorción.

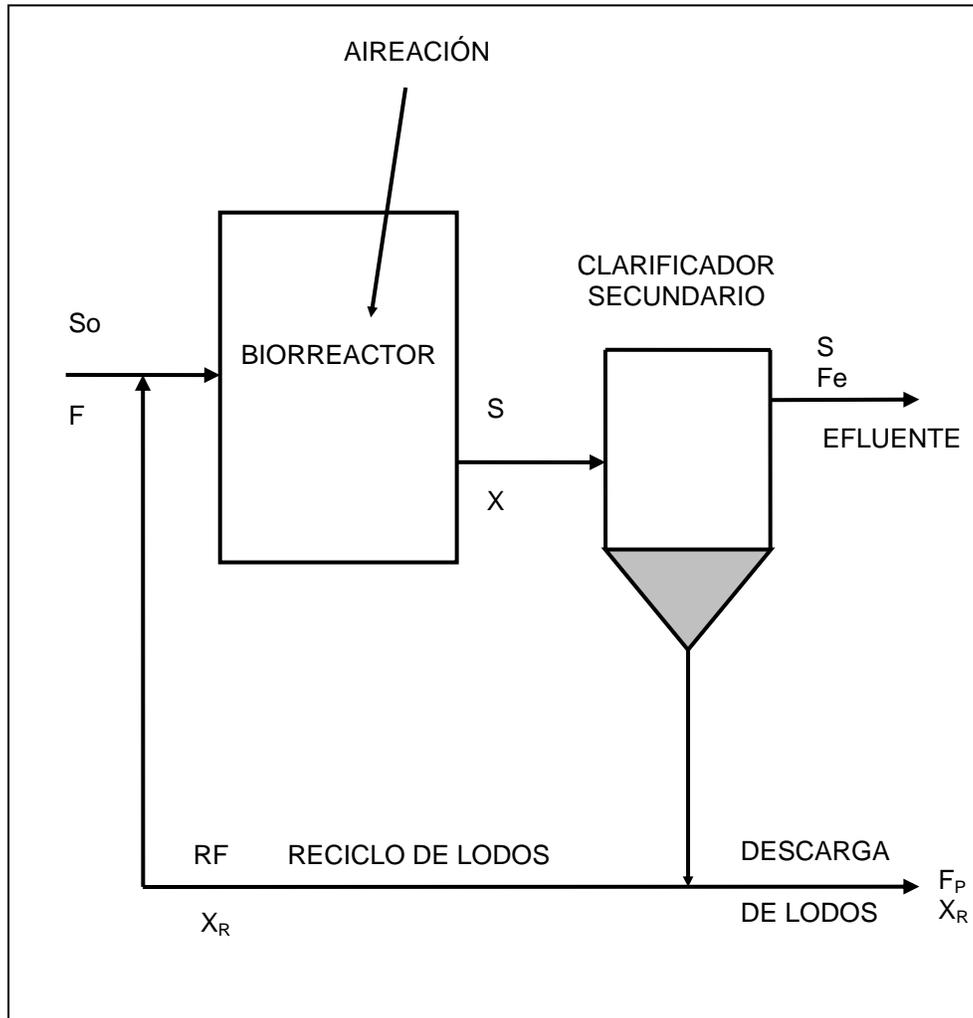


FIGURA 5.5: SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS CONVENCIONAL

- **Zanjas de oxidación:** Es un típico ejemplo de flujo pistón. El mezclado y la aireación se efectúan utilizando paletas rotatorias. Es un diseño adecuado para la aireación prolongada, con un alto tiempo de residencia de lodos. Operan con baja carga orgánica, del orden de $0,2 \text{ (kg DBO m}^{-3} \text{ día}^{-1}\text{)}$.
- **Procesos avanzados:** Permiten una mayor velocidad de transferencia de oxígeno al aumentar la presión parcial del O_2 en el gas. De este modo, se tiene una mayor fuerza motriz al aumentar la concentración de saturación en el líquido. Se usa principalmente dos mecanismos:
 1. Aumentar la presión total del sistema, incluyendo la fase gaseosa (por ejemplo, sistema de pozo profundo (*deep shaft*))
 2. Aumentar la proporción de O_2 en la fase gaseosa (por ejemplo, procesos que utilizan O_2 puro).

Proceso *Deep Shaft*: Es un proceso intensivo del tipo flujo pistón, en el que se usa la presión hidráulica para efectuar una transferencia eficiente a una alta tasa de O_2 . Se desarrolló como consecuencia del proceso de fermentación en gran escala para producir proteína unicelular. Dicho proceso requería elevadas concentraciones de biomasa y tasas de alimentación de O_2 ($10 \text{ (kg O}_2 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}\text{)}$). Debido a que la agitación mecánica convencional implicaba altos costos de operación, se inventó un sistema de fermentador del tipo sifón de aire: el alimentador de aire proporciona no sólo el suministro de O_2 sino que también la energía para la agitación del líquido. Los requerimientos en tratamiento de aguas son menos estrictos.

Los sistemas en operación tienen una profundidad entre 30 y 220 m. Se dividen verticalmente en una sección de flujo ascendente y otra descendente, con diámetros entre 0,8 y 6 m. La presión hidrostática en el fondo, puede alcanzar 5-10 atm, con lo que la solubilidad del O_2 aumenta 5 a 10 veces. Otros datos de diseño:

3-5 (kg O_2 /kWh); $A/M = 0,9 \text{ [(kg DBO) (kg lodos)}^{-1} \text{ día}^{-1}]$
 tiempo de residencia de los lodos = 4-5 días;
 tiempo de residencia hidráulico = 1,5-2 h
 eficiencia de remoción de DBO = 90-95%
 carga orgánica = 3,7-6,6 (kg DBO $\text{m}^{-3} \text{ día}^{-1}$)

Sistemas con Oxígeno de Alta Pureza: Este sistema es atractivo cuando existe disponibilidad de oxígeno barato en la planta. Utilizan gas con alta concentración de O_2 en vez de aire. Los métodos de obtención de oxígeno más usados son:

- i) licuefacción del aire a -185°C y separación del N_2 y O_2 a diferentes temperaturas;
- ii) uso de lechos de zeolitas para separar el N_2 del O_2 debido a la diferente capacidad de adsorción (el N_2 es adsorbido preferencialmente) ($0,8 \text{ kg O}_2 / \text{kg lecho}$, 90% de concentración de $\text{O}_2 \text{ v/v}$).

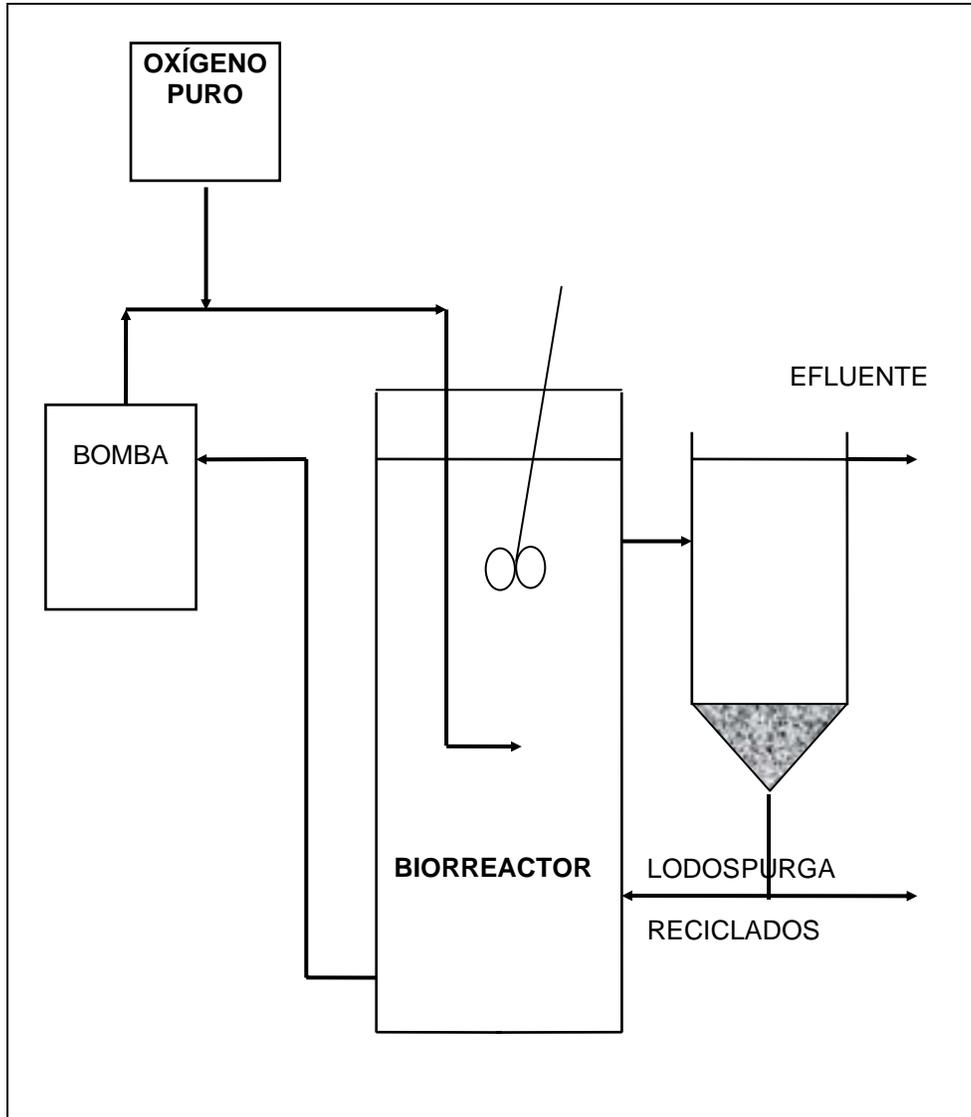


FIGURA 5.6: SISTEMA DE OXÍGENO DE ALTA PUREZA, PROCESO VITOX

Algunos ejemplos de sistemas comerciales basados en este principio son:

El proceso UNOX es un sistema cerrado, de oxigenación en etapas múltiples en modo co-corriente. Permite procesar entre 0,4 y 1 [(kg DBO) (kg lodos volátiles)⁻¹ día⁻¹], lo que es aproximadamente el doble de los sistemas convencionales que utilizan aire. La carga orgánica está en el rango 2,5 - 4 (kg DBO m⁻³ día⁻¹) (3 a 4 veces mayor que un sistema convencional) y 1/3 del tiempo de retención que el convencional. El O₂ disuelto es aproximadamente 4-8 mg/l, lo que permite obtener lodos con buenas características de sedimentación.

-El proceso VITOX es un sistema abierto y usa oxígeno puro (Figura 5.6). La inyección del gas se hace a través de un Venturi, en una recirculación del líquido del reactor. Se forman burbujas pequeñas y se produce casi un 90% de disolución. Es muy usado para ampliar la capacidad de plantas convencionales en operación. Otros procesos similares son: Proceso MEGOX, Marox, Primox.

a.6) Filtros Biológicos

Los sistemas de tratamiento biológico basados en microorganismos inmovilizados en matrices inertes se caracterizan por tener una gran concentración de biomasa y son muy simples de operar (Figura 5.7). Su eficiencia depende de una buena distribución del material orgánico, del estado de la masa microbiana y de la circulación de aire a través del lecho. Generalmente, el aire circula por convección, debido a las diferencias de temperatura que se generan debido a las reacciones bioquímicas exotérmicas.

Los lechos más sencillos son de roca o escoria de 3-10 cm, con filtros de hasta 3 m de profundidad. En la actualidad existen medios sintéticos más livianos, de gran área específica, lo que permite construir biorreactores de alturas de hasta 12 m.

La nueva masa celular formada es arrastrada por el efluente y separada en un sedimentador secundario. En muchos casos, parte del efluente clarificado se recircula. Normalmente, el líquido se introduce mediante brazos de alimentación mecánicos.

Los modelos son difíciles de desarrollar en estos casos. Existen muchas variables: profundidad del lecho, flujo hidráulico, tasa de carga orgánica, tasa de recirculación, tipo de lecho, transferencia de masa de material orgánico y oxígeno desde la fase líquida a la película microbiana.

Para cálculos preliminares, se usan criterios de diseño puramente empíricos:

- La carga de DBO no debe exceder 1,2 (kg DBO m⁻³ día⁻¹)
- La carga hidráulica (incluyendo la recirculación) debe ser menor de 30 (m³m⁻²día⁻¹)
- La recirculación debería ser tal que la DBO que entra (incluyendo la recirculación) no sea más de 3 veces que la DBO alimentada.

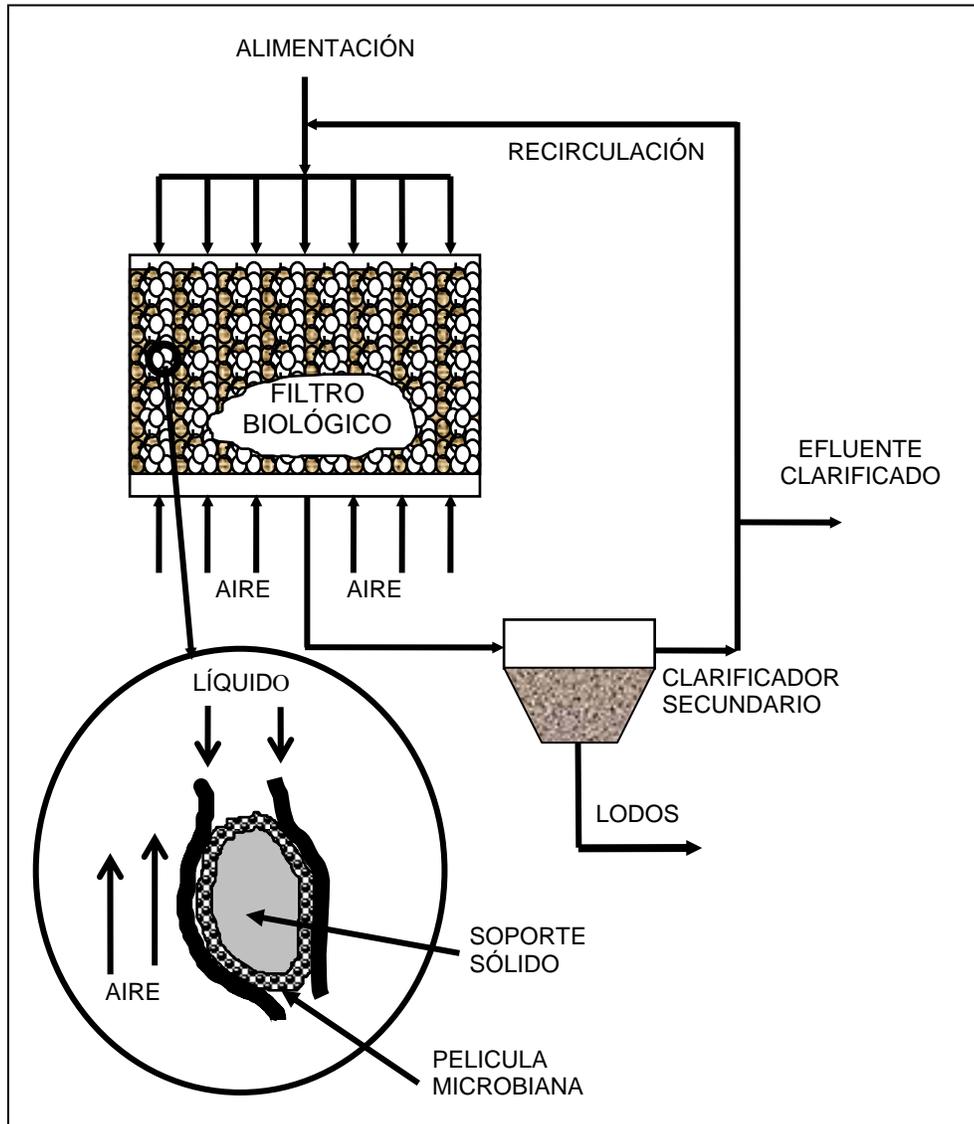


FIGURA 5.7: FILTRO BIOLÓGICO

El volumen del filtro se determina dividiendo el total de DBO diario por 1,2 (kg DBO $\text{m}^{-3} \text{ día}^{-1}$) o menos. El área puede ser calculada dividiendo el flujo volumétrico de efluente a tratar, por la carga hidráulica de diseño.

a.7) Diseño de Clarificadores Secundarios

Todos los procesos de tratamiento biológico de efluentes generan biomasa, a una tasa de alrededor de 0,5 (kg biomasa/kg DBO removido). Los microorganismos representan la carga orgánica de la corriente original, metabolizada en formas orgánicas más concentradas y de mayor peso molecular. Las bacterias y protozoos floculantes deben ser separados del efluente antes de que éste sea emitido a los medios receptores. Dicha separación normalmente se logra usando sedimentadores (clarificadores) u otras operaciones para la separación sólido-líquido.

El diseño de dichos clarificadores no es sencillo, dado que es una sedimentación Tipo 3. Para lograr una separación satisfactoria es necesario usar procedimientos de diseño basados en datos experimentales sobre las características de sedimentación de los lodos biológicos. Generalmente, los sedimentadores secundarios requieren tiempos de residencia del orden de 4 horas. Se debe evitar que los microorganismos permanezcan mucho tiempo en el clarificador y puedan generar una gran actividad metabólica, ya que ello dificulta su sedimentación.

5.2.2.2) Procesos Anaeróbicos

Aún cuando los procesos aeróbicos han monopolizado el tratamiento secundario de las descargas industriales, en la actualidad existe un enorme impulso para aprovechar los avances experimentados en el procesamiento anaeróbico. El proceso anaeróbico se usa masivamente en el tratamiento de los lodos producidos por los procesos aeróbicos; de esta manera se reduce el volumen final de los lodos, se estabilizan biológicamente (eliminación de patógenos) y se aprovecha parte del potencial energético.

Entre las ventajas de los procesos anaeróbicos se puede citar:

- Integración energética (produce CH_4 , 0,35 ($\text{m}^3 \text{ std/kg DBO removido}$)).
- Menor producción de biomasa (1/3-1/5 de lo que genera un proceso aeróbico).
- Menores requerimientos de nutrientes inorgánicos.
- No se requiere aeración; menores costos energéticos.
- Se pueden dejar sin uso por largos períodos (1-25 años) y se reactivan rápidamente (1-3 días).
- Resistente a choques orgánicos.

Entre sus principales limitaciones, se pueden mencionar:

- Menor tasa de eliminación de DBO por unidad de biomasa.
- La puesta en marcha inicial puede demorar meses (1-6 meses).
- La retención de biosólidos es crítica, debido a la baja tasa de producción de lodos

(0,04-0,08 kg/kg DBO).

- Debido a las condiciones reductoras, se producen también muchos otros compuestos (H_2S , mercaptanos, ácidos orgánicos y aldehídos) produciendo corrosión y malos olores.
- Sensible a ciertos inhibidores y compuestos tóxicos (ej.: O_2 , H_2O_2 , Cl_2 , H_2S , HCN , SO_3^-).

Muchos de los problemas experimentados en el pasado (que le generaron una mala reputación) se debieron a la ignorancia sobre los aspectos fundamentales del proceso. Enormes esfuerzos en los 70 y 80 derivaron en nuevos esquemas que presentan atractivo potencial y existen centenares de plantas anaeróbicas operando en gran escala en diferentes rubros industriales en todo el mundo.

La degradación anaeróbica es un proceso de biodegradación en múltiples etapas, que incluye un amplio rango de bacterias, las cuales se pueden agrupar en 3 categorías:

- Los compuestos de alto peso molecular (ej.: proteínas) sufren primero hidrólisis y son transformados en moléculas simples (azúcares, glicerol, etc), las que luego son convertidas en ácidos orgánicos, H_2 y CO_2 por las bacterias acidificantes.
- Los ácidos mayores son entonces convertidos a ácido acético e H_2 por las bacterias acetogénicas.
- La etapa final (metanogénesis) incluye a tres tipos de bacterias que metabolizan CO_2 , H_2 , metanol, ácido fórmico y ácido acético a metano.

Cuando se encuentra presente S inorgánico, la bacteria reductora *Desulfovibrio* usa el sulfato o sulfito como receptor de electrones, produciendo H_2S y CO_2 . La presencia de SO_4^- y SO_3^- limita la eficiencia del sistema, ya que las bacterias reductoras de S y las metanogénicas compiten por el mismo tipo de fuente energética (ácido acético). La producción de metano se puede reducir en $0,7 m^3$ por cada kg de S reducido.

En la mayoría de los casos, el tratamiento anaeróbico se aplica a líneas de residuo segregadas, con alta concentración de DBO. En muchos casos, se ha usado como una primera etapa de tratamiento, antes de un procesamiento final aeróbico. La temperatura es muy importante: los organismos anaeróbicos más eficientes son mesofílicos o termofílicos. El rango $32-36^\circ C$ es el más común industrialmente. Las necesidades energéticas se pueden suplir con parte del CH_4 generado.

Los requerimientos de N y P son mucho menores que en el proceso aeróbico (en algunos casos, los efluentes no contienen suficiente N y P y se necesita agregarlos). El pH óptimo para maximizar el CH_4 es 7-7,5. Bajo pH 6 y sobre 8,5 la producción de CH_4 cesa.

b.1) Configuraciones del Sistema

En la práctica existen 5 configuraciones anaeróbicas en uso: lagunas anaeróbicas, sistemas de contacto, sistema anaeróbico de flujo ascendente y manto de lodos (UASB), biofiltro anaeróbico y lecho fluidizado. Estos sistemas se revisan brevemente a continuación.

- **Lagunas Anaeróbicas:** Son el sistema anaeróbico más antiguo en uso (desde los años 40). La laguna está cubierta con material plástico para mantener condiciones anóxicas, recolectar el CH_4 y controlar los malos olores. Las bacterias anaeróbicas se desarrollan y permanecen suspendidas gracias a la convección producida por los gases generados. Se puede mejorar la agitación con agitadores de baja velocidad y reciclo de sólidos. Es importante permitir cierto grado de sedimentación para facilitar la hidrólisis y degradación de los sólidos suspendidos. El CH_4 se colecta en varios puntos; se mantiene una presión negativa dentro de la cubierta para mantenerla en contacto con la superficie del agua. Las lagunas anaeróbicas son ideales para tratar efluentes con alta concentración de sólidos suspendidos (como podría ser el caso en muchas plantas celulósicas de pulpa mecánica y semiquímica), ya que los sedimentos pueden permanecer por largos períodos en el reactor, permitiendo su degradación. Las lagunas anaeróbicas permiten tratar los lodos residuales de tratamientos aeróbicos a muy bajo costo. Permite también estabilizar el flujo de los efluentes debido a su gran volumen. Desgraciadamente, las lagunas requieren grandes extensiones de terreno, debido a la baja velocidad de las reacciones anaeróbicas (7-10 días de retención), y se pierde calor debido a la gran superficie externa.
- **Proceso Anaeróbico de Contacto:** Es similar a un proceso de Lodos Activados pero en condiciones anaeróbicas. La reacción tiene lugar en un reactor agitado, donde se incluyen los nutrientes requeridos, con control de T y pH. El efluente pasa a un tanque desgasificador donde se permite flocular a la biomasa antes de entrar a un sedimentador, que permite reciclar parte de la biomasa para mantener una alta concentración de biomasa en el reactor. Una ventaja adicional es que los sólidos adsorbidos en los lodos biológicos tienen largos tiempos de residencia permitiendo su hidrólisis. Se ha medido cargas orgánicas de 1-2 (kg DBO removido $\text{m}^{-3} \text{ día}^{-1}$), a un 90% eliminación y 35°C .
- **Sistemas de Flujo Ascendente (UASB):** Desarrollado en Wageningen (Países Bajos) en los años 70. Es uno de los avances más espectaculares en sistemas anaeróbicos de alta tasa. Las bacterias forman gránulos densos que tienden a sedimentar y se mantienen como un manto en el fondo del reactor. La alimentación entra por la parte inferior del reactor. Sobre el lecho existe una zona de manto más floculado ($3\text{-}10 \text{ kg lodos/m}^3$). En el tope del reactor hay un separador de fases, para separar el biogas de los sólidos atrapados en las burbujas ascendentes. Algunas variantes incluyen reciclo. Las principales ventajas del UASB son:
 - Tiene una puesta en marcha rápida, cuando se usa un inóculo obtenido de una planta existente.
 - Existe una alta retención de sólidos, lo que permite tratar aguas con contenido

orgánico bajo 0,4 (kg DBO/m³).

- Se puede utilizar una carga orgánica de 3,5-5 (kg DBO removido m⁻³ día⁻¹), a 35°C.

- **Filtros Anaeróbicos:** Los filtros anaeróbicos no han encontrado gran acogida en la industria, debido al alto costo del empaque sintético, a pesar de que hay casos exitosos en el sector de bebidas alcohólicas (ej.: Bacardi, Puerto Rico, ha operado continuamente un filtro de 9200 m³, desde 1981). El concepto es similar al de un filtro aeróbico. Puede operar con cargas orgánicas en el rango 4-15 (kg DBO m⁻³ día⁻¹).
- **Lechos Fluidizados:** Las bacterias están adheridas a la superficie de partículas de arena, y son mantenidas en suspensión. Es el proceso anaeróbico de alta tasa con mayor carga volumétrica: 17-40 (kg DBO m⁻³ día⁻¹) y 80-90% eliminación de DBO.
- **Eliminación de S:** El S inorgánico es uno de los principales problemas en la implementación de sistemas anaeróbicos en la industria de celulosa y otros sectores que producen efluentes con contenidos de azufre. Esto se puede mitigar, ya sea reduciendo su presencia en las aguas antes del tratamiento anaeróbico, o usando sistemas en dos etapas. En la primera etapa se produce principalmente H₂S el cual puede entrar en un ciclo de oxidación posterior a SO₂, mientras que en la segunda etapa se produce la metanación.
- **Degradación Anaeróbica de los Lodos de Aireación:** Hasta ahora, el principal uso de los sistemas anaeróbicos es el tratamiento de los lodos generados en los procesos aeróbicos. Esto reduce el impacto ambiental de las descargas de lodos de aireación (ej.: lodos activados), ya que los estabiliza biológicamente, elimina los patógenos y reduce su volumen final. La digestión anaeróbica de los lodos se hace en el rango mesofílico (35°C). Las características de este proceso son:

Material volátil alimentado: 1-2 (kg material volátil m⁻³ día⁻¹)

Sólidos suspendidos alimentados: 1,5-2,1 (kg sólidos suspendidos m⁻³ día⁻¹)

Destrucción de sólidos: 30-35% del inicial

Producción de gas: 0,9-1,2 (m³/kg material volátil destruido)

Poder calorífico del gas: 22.400 (kJ/m³ gas)

Si el diseño es adecuado, se puede lograr que el metano provea la energía no sólo para el control de temperatura en la digestión, sino que también para la aeración en los sistemas aeróbicos presentes en la planta (turbinas de gas), u otros requerimientos energéticos.

Finalmente, los sistemas anaeróbicos ofrecen una serie de ventajas, sobre todo si son usados en combinación con los tratamientos aeróbicos. Existe un gran esfuerzo de investigación para estudiar la acción sobre efluentes recalcitrantes, organoclorados, etc. La utilización de sistemas segregados permite visualizar la implementación de sistemas biológicos adaptados a las características del material orgánico a eliminar.

5.2.3) Tratamiento Terciario

En esta categoría se incluye sistemas para eliminar otros contaminantes, tales como: metales, nitrógeno, fósforo, compuestos coloreados, y compuestos no biodegradables. Algunos de estos se describe brevemente a continuación.

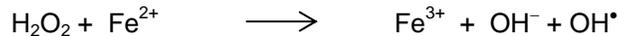
- **Sistemas biológicos para la eliminación de nitrógeno:**

El amonio puede ser transformado en nitrato, utilizando bacterias nitrificantes en medio aeróbico; el nitrato puede ser eliminado en una etapa posterior, bajo condiciones anaeróbicas, donde bacterias denitrificantes lo transforman en N_2 . Los procesos de nitrificación y denitrificación se describen en el Capítulo 2).

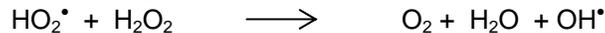
- **Oxidación avanzada:**

Permite eliminar compuestos orgánicos tóxicos, compuestos cromóforos u otros compuestos orgánicos no biodegradables: Se pueden utilizar agentes oxidantes tales como ozono o peróxido de hidrógeno, que generan radicales libres OH^\bullet altamente reactivos. En la actualidad se han implementado estos agentes oxidantes en presencia de radiación UV o de un catalizador de TiO_2 . Un sistema interesante para generar radicales libres se basa en la reacción de Fenton:

Iniciación:



Propagación



Terminación



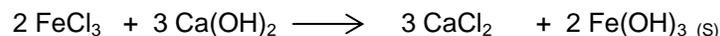
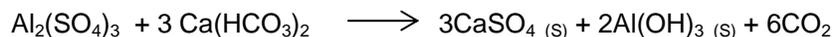
- **Carbón activado**

La adsorción en carbón activado se utiliza para eliminar metales, compuestos orgánicos, y cromóforos. El contaminante se adsorbe en la superficie del carbón; sin embargo, ello resulta en un residuo sólido que debe ser tratado. Los carbones activados comerciales presentan un área específica del orden de $1000 \text{ m}^2/\text{g}$, con capacidades de adsorción en el rango 10-400 (g contaminante / kg de carbón). El carbón se puede reactivar desorbiendo el contaminante utilizando vapor o gases a alta temperatura.

- **Precipitación química:**

La precipitación química en el tratamiento de aguas residuales implica la adición de compuestos químicos para alterar el estado físico de compuestos disueltos y

de sólidos suspendidos, y facilitar la separación sólido/líquido. Los agentes químicos precipitantes de mayor uso en tratamiento de efluentes son:



La formación del precipitado permite adsorber moléculas orgánicas y metales disueltos, y eliminar coloides.

Los coloides ("sols") son partículas suspendidas en agua de pequeño tamaño (inferior a 0,5 μm) que forman dispersiones estables. Los coloides hidrofóbicos son dispersiones de compuestos insolubles, mientras que los hidrofílicos son soluciones de moléculas con dimensiones coloidales (polímeros, macromoléculas) que presentan grupos funcionales ionizables ($-\text{COOH}^+$, $-\text{SiOH}^+$, $-\text{NH}_4^+$). Para separar los coloides de una solución acuosa es necesario, por lo tanto, desestabilizar las partículas coloidales e inducir la agregación. Para ello, se requiere neutralizar o superar las cargas superficiales, mediante la adición de cargas iónicas para neutralizar, ajuste de pH, o adición de polielectrolitos que se quemisorben y actúan como puentes entre partículas

- **Precipitación de óxidos metálicos hidratados**

Los iones metálicos (M^{z+}) (ej. Ni, Cu, Pb, Al, Zn) en solución acuosa están asociados a las moléculas de agua en diferentes grados de hidratación: La precipitación de los óxidos metálicos hidratados ocurre a través de una secuencia de etapas, a medida que el pH o la actividad del metal aumenta. El precipitado se forma cuando se supera el producto de solubilidad.

Además, las especies metálicas iónicas pueden ser adsorbidas sobre el hidróxido precipitado. Esta adsorción ocurre incluso contra las fuerzas de repulsión electrostáticas, en un rango de pH crítico donde la hidrólisis comienza. Por ejemplo, el Zn, Cu y Cd son fuertemente adsorbidos por $\text{Fe}(\text{OH})_3$ precipitado a pH 8-9. A un pH dado, el grado de adsorción depende del tipo de anión, de las concentraciones de las especies y del tipo de metal

- **Hidrólisis ácida y alcalina:**

La degradación hidrolítica de compuestos tóxicos o persistentes puede efectuarse en condiciones ácidas y alcalinas, dependiendo de la naturaleza de tales compuestos. Por ejemplo:

- Hidrólisis de cianato ($\text{HOCN} + \text{H}^+ \rightarrow \text{NH}_4^+ + \text{CO}_2$)
- Descomposición de pesticidas por hidrólisis ácida y alcalina

- Descomposición de residuos de nylon mediante hidrólisis alcalina
- Hidrólisis de residuos fluoroboratos, por hidrólisis ácida, seguida de hidrólisis alcalina

5.3) SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS

Los residuos sólidos de origen industrial ofrecen una gran oportunidad para implementar una gestión adecuada, con vistas a recuperar recursos materiales y facilitar el vertido de aquellos que no tengan valor comercial. Tal como se discute en el Capítulo 6, los residuos sólidos finales se pueden minimizar a partir de un conjunto de medidas para segregarlos y reutilizarlos, de tal modo que solo una mínima fracción del total deba ser vertida al ambiente. Los residuos industriales inertes o aquellos asimilables a residuos urbanos no requieren mayor tratamiento y se pueden depositar en vertederos controlados. Sin embargo, los residuos sólidos peligrosos deben ser tratados y reducidos a formas inocuas antes de su vertido final.

A continuación, se describen brevemente las principales opciones para la gestión y el tratamiento de los residuos sólidos industriales. Para mayores antecedentes técnicos e información de diseño se recomienda las referencias Perry y Green (1998), Tchobanoglous *et al* (1994) y LaGrega *et al* (1994).

5.3.1) Confinamiento de los Residuos Sólidos Industriales

El confinamiento de los residuos sólidos de origen industrial es una de las medidas más comunes a nivel mundial. Los residuos no peligrosos, inertes y asimilables a residuos sólidos urbanos (RSU) generalmente se almacenan en vertederos controlados. Estos son lugares donde los residuos se almacenan, se compactan y se cubren con una capa de material de relleno. Ya que generalmente se genera residuos líquidos secundarios, producto de las transformaciones biológicas y químicas que sufren los sólidos, se debe mantener una adecuada impermeabilización de las paredes del vertedero, particularmente, del fondo. Las medidas preventivas necesarias para reducir los riesgos a la salud de las personas y a la calidad ambiental incluyen: recolección y tratamiento de lixiviados, control de las emisiones gaseosas y mantención de una cobertura permanente con material inerte, para evitar el acceso de roedores, insectos u otros vectores. La ubicación de un vertedero controlado debe ser seleccionada cuidadosamente, tomando en consideración el transporte de los residuos y las características geológicas, hidrogeológicas y climáticas del área. Más aún, se debe realizar una cuidadosa evaluación de los procedimientos de cierre final del vertedero una vez que se alcanza la capacidad de diseño, teniendo en cuenta las características de la zona y los usos que serán asignados a dichos terrenos. Debido a las inadecuadas prácticas que por muchas décadas se han llevado a cabo en nuestro país, existe una desfavorable percepción pública que motiva resistencia de la comunidad local a la instalación de vertederos.

En el caso del confinamiento de residuos sólidos peligrosos, se debe seleccionar un lugar apropiado que garantice una barrera permanente entre dichos residuos y el entorno. En varios países tales residuos se confinan en minas subterráneas (sal, plomo), que presentan una barrera geológica adecuada. En todos los casos, se exige condicionar aquellos residuos que puedan cambiar de fase o que puedan difundir fuera de su lugar de contención, mediante un tratamiento que logre su inertización e inmovilización de los contaminantes peligrosos.

ATRIBUTOS DE LOS VERTEDEROS CONTROLADOS	
VENTAJAS	Bajo costo relativo. Tecnologías establecidas en el mercado Adecuado para residuos asimilables a RSU y no peligrosos
DESVENTAJAS	Generación de gases y lixiviados. Debe incluir sistemas de tratamiento para gases y lixiviados No adecuado para residuos peligrosos Costos de transporte (baja densidad, alta humedad). Requerimiento de terreno adecuado. Vida útil limitada.

5.3.2) Tratamiento Biológico de Residuos Biodegradables

Si el contenido de materia orgánica biodegradable de los residuos sólidos es significativo, se puede aprovechar la acción de microorganismos para reducir el volumen y estabilizar el residuo final. De este modo, se utiliza la materia orgánica presente como fuente de carbono para el crecimiento de microorganismos. Al respecto, existen dos opciones alternativas para el tratamiento biológico de residuos sólidos biodegradables:

- Biodegradación anaeróbica:** La biodegradación se realiza en ausencia de oxígeno, para así promover la acción de bacterias anaeróbicas. Estos procesos ocurren naturalmente en los vertederos controlados donde se deposita residuos sólidos biodegradables. El residuo sólido se reduce a formas más estables, de tipo húmico. Además, se genera residuos secundarios, gaseosos y líquidos. Estos residuos secundarios contienen CH₄, CO₂, mercaptanos y compuestos orgánicos intermedios, los que deben ser tratados para evitar impactos ambientales no deseados. Generalmente, los gases residuales se recolectan y se someten a combustión. Los líquidos secundarios se tratan en sistemas de tratamiento de residuos líquidos diseñados adecuadamente. Cuando existe presencia de compuestos de azufre en los residuos sólidos, se puede generar considerables cantidades de H₂S y compuestos volátiles azufrados, por lo que se debe tener mucha precaución en el tratamiento de los residuos gaseosos secundarios. La utilización del potencial energético del metano para generación de energía eléctrica puede ser rentable en caso de operaciones en gran escala.
- Degradación aeróbica:** Este proceso consiste en promover la biodegradación bajo condiciones aeróbicas a temperaturas en el rango 40-65°C, lo que permite transformar el residuo biodegradable en un sólido húmico de alto poder nutritivo para uso agrícola (*Compost*). Sin embargo, debe estar libre de metales pesados u otros compuestos que puedan afectar la calidad del suelo. Es muy utilizado para revalorizar los lodos obtenidos del tratamiento biológico de efluentes sanitarios.

ATRIBUTOS DE LOS TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS DE RESIDUOS SÓLIDOS	
VENTAJAS	Recuperación de subproductos. Estabilización del residuo sólido Reducción de volumen Adecuado para residuos asimilables a RSU
DESVENTAJAS	Sensible a presencia de compuestos tóxicos o inhibidores. Sensible a condiciones climáticas. Complejidad operacional. No adecuado para residuos peligrosos. Costos de transporte (baja densidad, alta humedad)

5.3.3) Destrucción Térmica de los Residuos Sólidos

Aquellos residuos sólidos que son inestables a altas temperaturas pueden ser destruidos mediante tratamiento térmico. Dicho tratamiento térmico puede ser efectuado en ausencia o en presencia de aire.

- **Proceso térmico en ausencia de oxígeno (Pirólisis)**

Cuando el tratamiento a alta temperatura se realiza en ausencia de oxígeno, los sólidos se destruyen mediante pirólisis, generando un residuo sólido (20%), gases condensables (60%) y no condensables (20%). El residuo sólido es rico en carbono y puede ser utilizado como combustible. La fracción no condensable está compuesta, principalmente, de CO₂, CO y CH₄ con un poder calorífico aceptable para ser utilizado como combustible. Los compuestos condensables forman una compleja mezcla de ácidos orgánicos y alquitranes y representan un insumo químico potencial. Los sistemas basados en pirólisis se utilizan mayoritariamente en el tratamiento de residuos lignocelulósicos, para producción de carbón vegetal.

- **Proceso térmico con déficit de oxígeno (Gasificación)**

Cuando el tratamiento térmico se realiza con una cantidad de oxígeno insuficiente para lograr una oxidación completa del material sólido, se genera gases con alto contenido de CO y CH₄ que pueden ser utilizados como combustible. Los gasificadores han sido empleados desde fines del siglo XIX, pero su uso ha decrecido desde la masificación de los combustibles derivados del petróleo. En la actualidad, existen diseños eficientes para llevar a cabo la gasificación de residuos orgánicos, que son competitivos respecto a otros sistemas térmicos.

- **Proceso térmico en presencia de oxígeno (Combustión)**

Si el proceso térmico se realiza en presencia de oxígeno en cantidades iguales o superiores al nivel estequiométrico ocurre una incineración del sólido, donde la

reacción con el oxígeno lo transforma en cenizas inorgánicas y en gases residuales. La composición de tales gases residuales depende de la composición química de los sólidos combustibles y de las condiciones de operación (ej. temperatura en la cámara de combustión, flujo de oxígeno). Dichos gases contienen CO₂, H₂O, material particulado, compuestos orgánicos volátiles, SO₂ y otros compuestos derivados de la combustión. Por lo tanto, en la mayoría de los casos se debe incluir sistemas de depuración de gases (ej. ciclones, precipitadores electrostáticos, lavadores, adsorbedores, etc). Es conveniente neutralizar los gases ácidos (ej. HCl, SO₂) mediante tratamiento alcalino (ej.: neutralización con cal) para reducir los efectos de corrosión en los equipos de tratamiento de gases.

Es atractivo utilizar sistemas con recuperación de calor, producción de vapor y energía eléctrica, cuando la escala de operación así lo permite. Tal es el caso, por ejemplo, de las plantas de celulosa kraft y de los aserraderos, donde resulta altamente rentable instalar una caldera de poder y electro-generadores para utilizar el poder calorífico de las cortezas, finos de madera y lodos de tratamiento de residuos líquidos, generando vapor y energía eléctrica.

Cuando el poder calorífico de los residuos no es suficiente para lograr las altas temperaturas requeridas es necesario adicionar un combustible de alto poder calorífico (ej. gas natural, petróleo combustible).

En el caso de residuos sólidos orgánicos peligrosos, tales como solventes orgánicos, aceites gastados, hidrocarburos, bifenilos policlorados, residuos hospitalarios orgánicos y biocidas es conveniente llevar a cabo la incineración a altas temperaturas (sobre 950-1.100°C).

Además del CO₂, vapor de agua y cenizas, se puede generar otros residuos gaseosos secundarios peligrosos. Por ejemplo, la incineración de residuos clorados produce ácido clorhídrico y compuestos organo-clorados volátiles. La mayor parte de las dioxinas y furanos emitidos a la atmósfera proviene de la combustión de residuos sólidos clorados. Igualmente, la presencia de residuos organofosfóricos puede originar P₂O₅ el que es altamente corrosivo. Por estos motivos, los sistemas de incineración de residuos peligrosos, incluyen estrictos sistemas de control de emisiones gaseosas e incorporan cámaras de combustión secundaria, para destruir los contaminantes formados en la combustión primaria. Con ello, se completa la oxidación de los compuestos orgánicos parcialmente oxidados y se incrementa el tiempo de residencia a alta temperatura. Los incineradores que operan a gran escala incluyen sistemas de depuración de gases de alta eficiencia para abatir los compuestos orgánicos volátiles y material particulado. Se deben utilizar sistemas eficientes para remoción de partículas (ej. filtros, precipitadores electrostáticos) y depuradores de metales pesados y compuestos orgánicos volátiles. Los residuos secundarios generados por estos sistemas de tratamiento deben ser tratados como residuos peligrosos ya que pueden contener metales pesados y compuestos orgánicos tóxicos.

Los sistemas de alimentación de los hornos dependen de las características físicas de los residuos a tratar. Si estos son fluidos (por ejemplo, solventes agotados, lodos) se pueden utilizar sistemas de alimentación por inyección, que permiten atomizar el

residuo y facilitar su combustión. Es fundamental mantener un estricto control de la temperatura y de la alimentación de oxígeno, para evitar la formación de contaminantes secundarios parcialmente oxidados. Los hornos utilizados con mayor frecuencia a escala industrial son los hornos rotatorios y de lecho fluidizado.

- *Hornos Rotatorios:* Este tipo de hornos permite incinerar residuos combustibles, incluyendo aquellos con altos contenido de agua. Su diseño es muy similar a los hornos rotatorios utilizados en las plantas de cemento y de celulosa kraft. En muchos países, se utilizan los hornos de dichas plantas para la destrucción de aceites y solventes orgánicos residuales. Sin embargo, el residuo combustible debe ser tratado previamente para satisfacer los requerimientos de calidad de esos sistemas (ej. eliminar el agua emulsificada, eliminación de impurezas metálicas).
- *Hornos de Lecho Fluidizado:* Estos son utilizados para un amplio rango de residuos sólidos. Se requiere una granulometría lo más homogénea posible para mantener buenas condiciones de operación (es común la utilización de molinos para reducción de tamaño de los residuos). El aire de combustión se inyecta desde el fondo, a la velocidad de fluidización de los sólidos. Se debe diseñar un sistema para recolectar los sólidos que salen con los gases de combustión y retornarlos al horno.

En general, es conveniente separar las fracciones no combustibles (ej. metales, vidrios y otros materiales inorgánicos) previo al tratamiento térmico. De este modo, se facilita la operación y el manejo de los residuos secundarios.

ATRIBUTOS DE LA DESTRUCCION TERMICA DE RESIDUOS SOLIDOS	
VENTAJAS	Potencial integración energética. Destrucción efectiva de los contaminantes. Reducción de volumen. Residuo sólido estable. Tecnologías establecidas en el mercado. Adecuado para residuos orgánicos peligrosos.
DESVENTAJAS	Generación de residuos gaseosos que requieren tratamiento. Generación de residuos sólidos secundarios, provenientes del tratamiento de gases residuales. Alta complejidad operacional. Altos costos de operación. Necesidad de monitoreo de emisiones gaseosas. Altos requerimientos de inversión. Requerimiento de combustibles adicionales.

5.3.4) Tratamiento Físico-Químico de Residuos Peligrosos

Algunos residuos sólidos peligrosos que presentan características de toxicidad, corrosión o reactividad pueden ser neutralizados mediante reacciones químicas ácido-base y oxidación-reducción. Los residuos peligrosos que generalmente se tratan mediante este tipo de procesos son: residuos ácidos o alcalinos, aceites gastados, residuos orgánicos aromáticos emulsionados, lodos metálicos, lodos sulfúricos y clorhídricos, lodos cianurados, lodos con cromato, entre otros.

- *Neutralización Química:* Aquellos residuos peligrosos que presentan niveles de pH extremos (ej. H_2SO_4 , HCl, HNO_3 , NaOH) deben ser neutralizados mediante adición de álcalis o ácidos, según corresponda.
- *Oxidación Química:* Se utiliza cuando los componentes peligrosos orgánicos e inorgánicos presentes en el residuo son oxidables a formas inocuas o más susceptibles de ser separadas y destruidas posteriormente. Como agente oxidante se utiliza cloro molecular, hipoclorito, permanganato de potasio, peróxido de hidrógeno, ozono u oxígeno. Por ejemplo:
 - Eliminación de cianuro, mediante la oxidación con Cl_2 para formar CO_2 y N_2 .
 - Destrucción de compuestos orgánicos aromáticos mediante aplicación de ozono o peróxido
 - Precipitación de metales pesados en forma de óxidos
- *Reducción Química:* En muchos casos, los compuestos peligrosos se pueden transformar en moléculas inocuas mediante reducción química. Por ejemplo, el cromato (Cr^{+6}) puede ser reducido a Cr^{+3} , que es mucho menos tóxico e insoluble en medio alcalino. Se debe utilizar agentes reductores compatibles con la naturaleza del contaminante peligroso que se desea destruir. Dada las características no selectivas de muchos agentes químicos, se debe prevenir la formación de compuestos secundarios tóxicos.

En algunos casos, se genera un residuo sólido secundario que debe ser manejado adecuadamente (ej. precipitación de óxidos metálicos).

ATRIBUTOS DE LOS TRATAMIENTOS FISICO QUIMICOS	
VENTAJAS	Reducción de la peligrosidad del residuo. Inertización.
DESVENTAJAS	Altos costos de operación Complejidad operacional. Es complicado a gran escala de operación.

5.3.5) Estabilización y Solidificación de Residuos Peligrosos

Aquellos residuos sólidos peligrosos que tienen tendencia a disolverse en agua o a volatilizarse (ej. metales pesados solubles en agua, solventes orgánicos volátiles) deben ser estabilizados adecuadamente.

- **Estabilización**

Se utiliza aditivos para reducir la movilidad y la toxicidad del residuo. Existe una amplia variedad de métodos para estabilizar los componentes tóxicos y/o con mayor capacidad migratoria, dependiendo de la naturaleza física y química de dichos compuestos. En muchos caso, se utiliza aditivos para reducir la solubilidad o la volatilidad de los compuestos tóxicos.

- **Solidificación**

Se utiliza agentes solidificantes que se mezclan con el residuo sólido peligrosos en cantidades suficientes como para formar una matriz sólida estable e inerte, que reduce la permeabilidad del residuo. Las matrices sólidas más utilizadas son: cemento, asfalto, vidrio y polímeros plásticos. La inmovilización permite incrementar los niveles de seguridad ya que reduce sustancialmente la capacidad de transporte de los contaminantes fuera del lugar de confinamiento.

ATRIBUTOS DE LA ESTABILIZACION Y SOLIDIFICACION	
VENTAJAS	Reducción de la peligrosidad del residuo. Reduce la movilidad migratoria de los contaminantes. Permite un confinamiento con menor impacto ambiental potencial.
DESVENTAJAS	Altos costos de insumos fijadores/solidificantes Complejidad operacional. Es complicado a gran escala de operación.

5.4) SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS GASEOSOS

En la industria, los contaminantes atmosféricos se generan a partir de los procesos de combustión, procesamiento químico o biológico, o durante la transformación de las materias primas. Existen dos mecanismos generales para abatir la carga contaminante de las emisiones gaseosas, a saber:

- Separar los contaminantes de aquellos gases inofensivos y transferirlos a fase líquida o sólida
- Convertir los contaminantes en productos inocuos que puedan descargarse en la atmósfera con mínimo impacto ambiental

En el primer caso, se retira el contaminante de la fase gaseosa, mediante procesos físicos y físico-químicos tales como absorción, adsorción, precipitación o sedimentación. De este modo, se genera una nueva línea residual que requiere atención. Tal es el caso de la eliminación de material particulado mediante ciclones o precipitadores electrostáticos, donde se obtiene un sólido residual formado por las partículas retiradas de la fase gaseosa.

Por otra parte, los sistemas de depuración basados en procesos químicos incluyen reacciones de oxidación y reducción para transformar el contaminante original en un compuesto inocuo. El sistema más utilizado se basa en la oxidación del contaminante utilizando aire. Por ejemplo, los compuestos orgánicos volátiles pueden ser transformados en CO_2 y H_2O mediante combustión. Si hay presencia de S (por ejemplo, en los mercaptanos) y N (por ejemplo, aminas) en las moléculas orgánicas, se forma también SO_2 y NO_x como producto de combustión, respectivamente. En los procesos de transformación química se debe evitar a toda costa la formación de compuestos residuales de mayor impacto que los contaminantes originales. Por ejemplo, la combustión de compuestos clorados puede generar compuestos volátiles tóxicos y corrosivos.

En la práctica, los sistemas de depuración de gases presentan una combinación de operaciones unitarias destinadas a eliminar los diferentes contaminantes de la corriente residual, en forma secuencial. Por ejemplo:

1. Eliminación de material particulado de mayor tamaño, mediante ciclones.
2. Eliminación de material particulado fino, mediante filtros de alta eficiencia o precipitadores electrostáticos.
3. Eliminación de SO_2 , mediante absorción alcalina o adsorción con limonita.
4. Eliminación de compuestos orgánicos volátiles (por ejemplo, compuestos odoríferos), mediante combustión a alta temperatura.

A continuación, se revisa los principales sistemas de tratamiento de residuos gaseosos de origen industrial.

5.4.1) Sistemas Para Remoción de Material Particulado

Si la corriente gaseosa residual contiene material particulado, se puede utilizar métodos de separación de sólidos de las corrientes gaseosas, tales como ciclones, filtros, precipitadores electrostáticos y lavadores.

a) Ciclones

Son ampliamente utilizados para capturar cenizas y polvos. Se basan en la acción de la fuerza centrífuga sobre la partícula. Están formados por un cuerpo principal cilíndrico-cónico, donde los gases son alimentados tangencialmente (Figura 5.8). Al interior del equipo se forman dos vórtices: uno periférico (descendente) y otro central (ascendente). Las partículas más pesadas son lanzadas hacia las paredes, depositándose en la parte inferior del cono. El resto del gas forma un vórtice central, que circula hacia arriba y sale por la parte superior del cilindro.

La capacidad de separación del ciclón aumenta con la velocidad tangencial de alimentación. El factor de separación (S) depende de la velocidad tangencial (v_T) y del diámetro del cilindro (d) de acuerdo a:

$$S = \frac{2v_T^2}{dg}$$

Los parámetros típicos para ciclones convencionales son $d = 30$ cm y $v_T = 15$ (m/s). En la práctica, el valor de S varía en el rango 10-2.500, siendo menor en aquellos sistemas de mayor diámetro y menor pérdida de carga. Los sistemas de ciclones de alta eficiencia generalmente contienen varios cilindros de diámetro pequeño, normalmente, entre 10 y 25 cm, instalados en paralelo.

La pérdida de carga (ΔP) representa un importante parámetro en el diseño de un ciclón y se puede estimar en base a:

$$\Delta P = \frac{K F_G^2 P \rho_G}{T_G}$$

donde K es un parámetro empírico que depende del diámetro del ciclón, P es la presión absoluta, F_G , ρ_G y T_G son el flujo volumétrico, la densidad y la temperatura del gas, respectivamente. Las pérdidas de carga son menores a mayores diámetros. Al duplicar el diámetro del ciclón, la pérdida de carga se reduce en un factor de 10. En la Tabla 5.3 se compara la capacidad de separación de los ciclones convencionales y los de alta eficiencia, para diferentes rangos de tamaño de partículas.

TABLA 5.3: COMPARACIÓN DE LA CAPACIDAD DE SEPARACIÓN ENTRE CICLONES CONVENCIONALES Y DE ALTA EFICIENCIA

<i>Tamaño de Partícula</i>	SÓLIDOS REMOVIDOS (% EN PESO)	
	Ciclón Convencional	Ciclón de alta eficiencia
< 5 μm	< 10 %	40-70 %
5-20 μm	50-60 %	80-95 %
20-40 μm	80-95 %	95-99 %
> 40 μm	95-98 %	> 99%

La principal ventaja de los ciclones radica en su gran sencillez de construcción y bajos costos de instalación, operación y mantención; además, permiten recuperar los sólidos secos. Sin embargo, pueden sufrir deterioro debido a la circulación de sólidos abrasivos a alta velocidad, y presentan una baja eficiencia de remoción para granulometrías pequeñas (menores de 10 μm).

b) Filtros

Son ampliamente utilizados a escala industrial. El gas se hace circular a través de la unidad filtrante, donde los sólidos quedan retenidos. A medida que la operación transcurre, se forma una película de sólidos que incrementa la capacidad de filtración, pero que aumenta progresivamente la pérdida de carga. Por lo tanto, los filtros deben ser limpiados periódicamente, ya que una vez que se colmatan, la pérdida de carga puede ser 10 veces mayor que la del filtro limpio.

Los sistemas de limpieza incluyen: Sistemas mecánicos por vibración, uso de aire en contracorriente y choques de aire comprimido. Generalmente, los filtros se diseñan en módulos separados, de modo que algunos mantengan su operación, mientras otros se someten a limpieza. Como medio filtrante, se utilizan filtros de fibras naturales (lana, algodón) y fibras sintéticas (poliéster, polipropileno, poliamida, PVC, fibra de vidrio). Los factores que determinan su selección son: costos, permeabilidad al aire, resistencia mecánica, resistencia contra ácidos y álcalis, hidrofobicidad y resistencia a altas temperaturas.

Se puede lograr altas eficiencias de depuración, llegando a remover el 100% de las partículas de 1 μm . Además, se recupera el producto seco y no se generan efluentes líquidos. Sin embargo, su uso está restringido por las altas temperaturas (generalmente, hasta un máximo de 250°C para la fibra de vidrio) y los peligros de explosiones e incendios en el caso de polvos de alta combustibilidad. Son mucho más caros que los ciclones.

c) Precipitación electrostática

Se basa en la acción de un campo eléctrico sobre las partículas sólidas cargadas eléctricamente. Las partículas son cargadas mediante una corriente de electrones que circula entre los electrodos por efecto corona, gracias al alto voltaje existente entre ellos (del orden de 60 kvolts DC). Las partículas son atraídas hacia electrodos

colectores, donde se depositan y separan del resto de la corriente gaseosa. El gas fluye en dirección paralela a los electrodos (Figura 5.9).

Son altamente eficientes para remover partículas de tamaño pequeño, incluso menores de 1 μm y presentan mínimas pérdidas de carga. Puede recolectar más del 99% de las cenizas de los gases de combustión.

TABLA 5.4: EFECTO DEL TAMAÑO DEL MATERIAL PARTICULADO SOBRE LA EFICIENCIA DE LOS PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS

TAMAÑO DE PARTÍCULA	EFICIENCIA DE REMOCIÓN
< 5 μm	70-80 %
5-20 μm	95-99 %
20-40 μm	100 %
> 40 μm	100 %

El área total de los electrodos colectores, A , se puede estimar a partir de la relación de Deutsch-Anderson:

$$A = \frac{F}{v} \ln\left(\frac{1}{1-\eta}\right)$$

Donde:

η = es la eficiencia de remoción (expresada como fracción en peso de sólidos recolectados).

F = es el flujo volumétrico de gas a través del electrofiltro (m^3/s).

V = es la velocidad de la partícula hacia el electrodo (se debe obtener empíricamente; generalmente, es del orden de 0,1 (m/s)

Se puede observar que el área de los colectores es muy sensible a la eficiencia requerida. Así, para aumentar la eficiencia de remoción de 90 a 99 % se debe duplicar el área de electrodos colectores, mientras que para aumentar de 90 a 99,9%, se requiere triplicar dicha área. El área transversal de la carcasa debe ser tal que la velocidad media del gas esté dentro del rango 0,7 – 2,5 (m/s). Las principales desventajas de estos equipos radican en su pérdida de eficiencia frente a condiciones variables de temperatura, flujo y composición del gas. Además, la presencia de partículas de alta resistividad afecta negativamente la eficiencia de recolección.

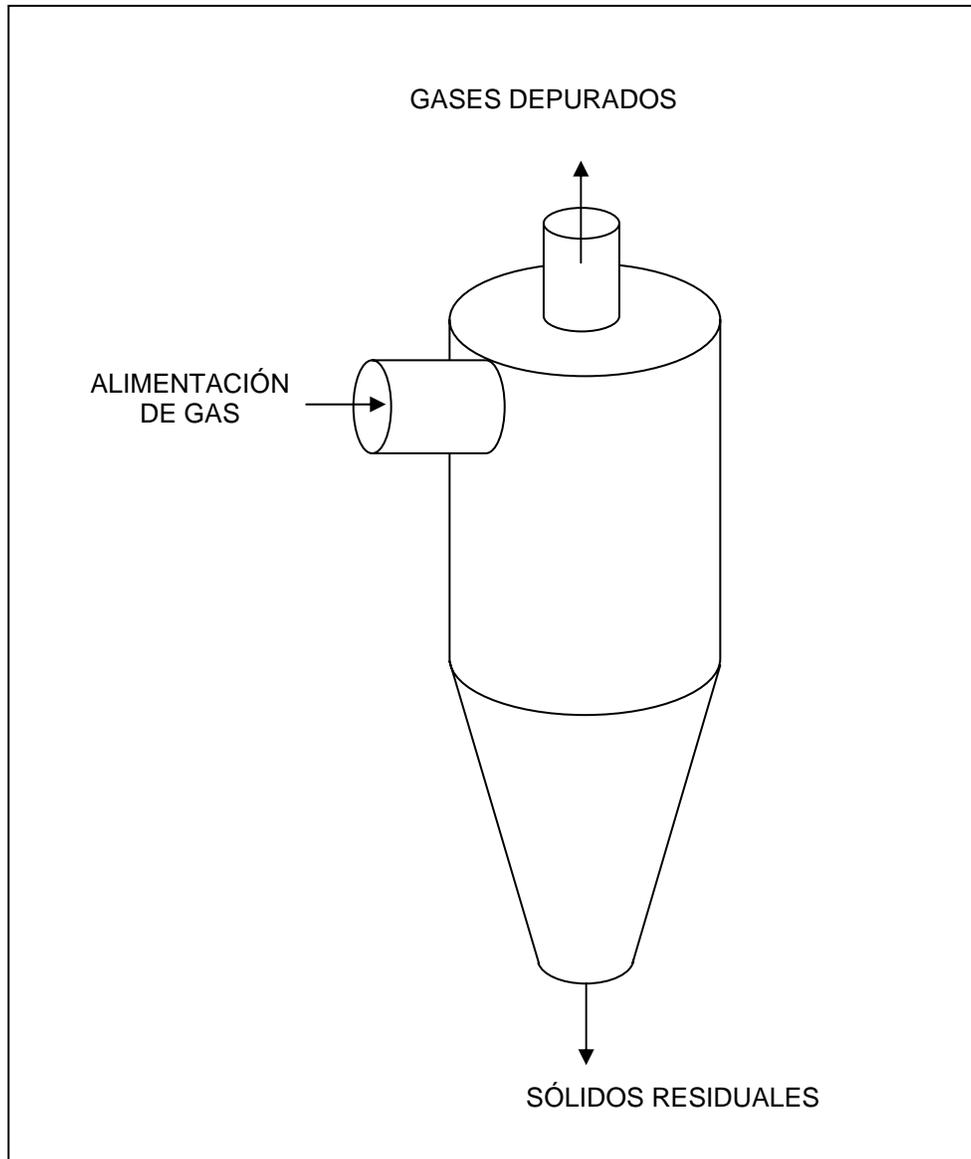


FIGURA 5.8: CICLÓN PARA ELIMINACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN GASES

Si la cantidad de finos es muy grande, es conveniente instalar primero un ciclón antes del precipitador electrostático, para reducir la acumulación de material particulado al interior del equipo. Los precipitadores electrostáticos son muy caros y tienen costos de operación elevados, debido a los altos requerimientos de energía eléctrica. Finalmente, este tipo de equipos no es recomendable cuando se tiene presencia de compuestos combustibles o explosivos.

d) Lavadores con líquido (*scrubbers*)

Aquí se incluyen diversos equipos basados en la eliminación del material particulado, mediante el uso de un líquido absorbente. Cualquier compuesto gaseoso que sea soluble en dicho líquido, también puede ser removido de la corriente gaseosa principal. Ello representa una ventaja sobre los sistemas de depuración secos, descritos en secciones anteriores. Además, no presentan limitaciones debido a la presencia de compuestos combustibles y explosivos, y tienen mayor tolerancia a variaciones de la temperatura del gas. Sin embargo, la principal desventaja se debe a la generación de un residuo líquido que contiene el contaminante removido del gas. En general, los costos globales de tratamiento utilizando estos sistemas son altos cuando se requiere una alta eficiencia de depuración.

Los diferentes diseños varían de acuerdo a la forma como se efectúa el contacto entre la corriente gaseosa que contiene el material particulado y el líquido lavador. Entre estos se destacan:

- *Torres de aspersion:* El líquido se alimenta en la parte superior en forma de lluvia, el que entra en contacto en contracorriente con el gas que circula hacia arriba. Generalmente, gran parte del líquido se recircula. Mientras menor sea el tamaño de las gotas de líquidos, mayor es el área de contacto, con una mayor eficiencia de remoción de partículas sólidas. Se puede remover eficientemente partículas de pequeño tamaño, en el rango 1-2 μm .
- *Lavadores ciclónicos:* El gas se alimenta en forma tangencial, en forma similar a los ciclones secos. El agua de lavado se alimenta en forma de pequeñas gotas desde la parte superior del equipo (o desde los lados hacia el centro). De este modo, se combina el efecto de la fuerza centrífuga y el impacto entre el sólido y el líquido.

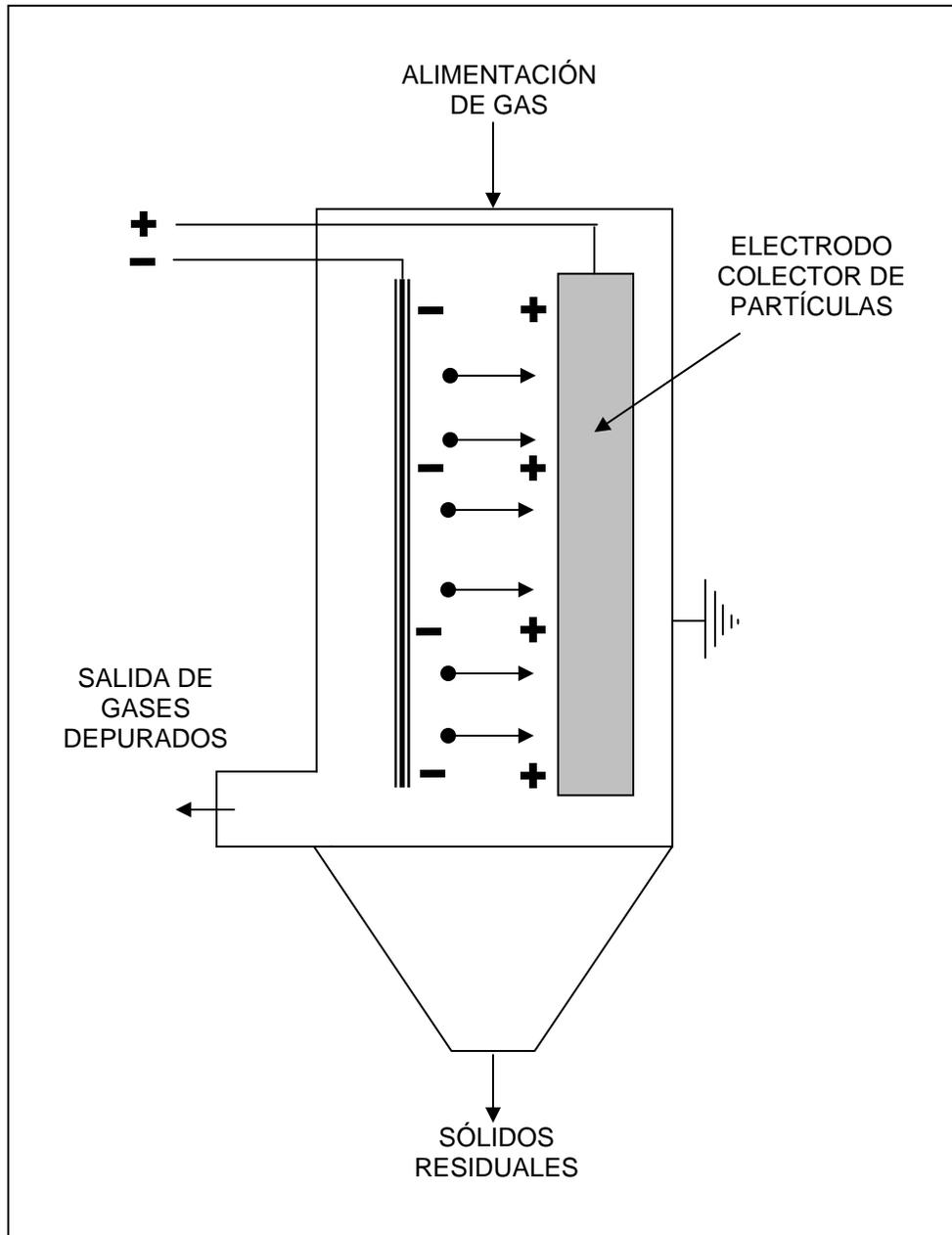


FIGURA 5.9: ESQUEMA DE PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO

Lavadores inerciales (Venturi): El gas se hace pasar a través de una contracción donde aumenta su velocidad. En el punto donde la velocidad alcanza un valor máximo, se inyecta agua de lavado, la que se dispersa en múltiples gotas de pequeño tamaño, generando una gran área de contacto. El material particulado choca violentamente con las gotas de agua. La eficiencia de depuración depende directamente de la velocidad del gas, la que se debe mantener al máximo valor posible. Este tipo de lavadores tiene una mayor eficiencia de remoción de material particulado que los otros diseños, alcanzando valores superiores a 99% para partículas de 1 μm y 90-95% para tamaños menores de 1 μm . Debido a la gran pérdida de carga que se produce, los costos de operación son más altos que para los otros tipos de lavadores.

5.4.2) Sistemas para la Remoción de Compuestos Gaseosos

Los compuestos gaseosos contenidos en el gas residual, tales como óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles, ácido sulfídrico, amoníaco y compuestos odoríferos (mercaptanos y aminas volátiles), pueden ser eliminados en base a diferentes tipos de procesos físicos y químicos. A continuación, se describen los principios y aplicaciones de tales procesos.

a) Procesos Basados en Absorción (*scrubbers*)

Si el compuesto gaseoso es soluble en un líquido, se puede absorber y retirarlo en solución líquida. El agua es el medio absorbente más utilizado a escala industrial. En muchos casos, se agrega solutos al medio acuoso, tales como hidróxido de sodio o aminas, para incrementar la solubilidad del gas que se requiere absorber. Generalmente, se utiliza columnas de relleno para aumentar el área de contacto gas-líquido. Alternativamente, se pueden utilizar columnas de platos. El gas se hace circular en contracorriente con el líquido absorbente (Figura 5.10).

Estos procesos son utilizados en la eliminación de SO_2 , H_2S y compuestos orgánicos volátiles de las corrientes gaseosas residuales. Ya que el contaminante solamente cambia de fase, en muchos casos el líquido residual debe ser tratado antes de su vertido final, para cumplir con las normas de control ambiental.

En algunos casos, los procesos basados en absorción se implementan con vistas a recuperar el contaminante y reprocesarlo. Por ejemplo, la absorción selectiva de H_2S para su utilización en la producción de azufre y sulfidrato de sodio. Ello implica agregar otras unidades para recuperar selectivamente el contaminante de interés.

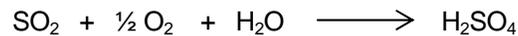
En aquellos sistemas de absorción para la remoción de SO_2 de los gases residuales, se suele agregar CaO al líquido, lo que permite obtener sulfito de calcio de acuerdo a la reacción:



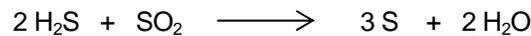
Como alternativa, se puede utilizar CaCO_3 en vez de CaO . En ambos casos, se

obtiene un lodo residual rico en CaSO_3 , el cual debe ser tratado antes de su vertido final. Generalmente, el tratamiento consiste en oxidar el CaSO_3 a CaSO_4 (yeso), ya que éste precipita con mayor facilidad y puede ser separado como residuo sólido o utilizado como materia prima para construcción.

También se puede utilizar NaSO_3 como absorbente, el cual forma NaHSO_3 en presencia de SO_2 . Este se puede recuperar en forma concentrada, aplicando calor para producir su desorción, y ser utilizado para producir H_2SO_4 :



Alternativamente, el SO_2 reacciona con H_2S para generar azufre en el proceso Claus:



Este proceso es de mucho interés en las refinerías de petróleo ya que ambos compuestos representan un serio problema ambiental.

b) Procesos Basados en Adsorción

Se utiliza un sólido con capacidad para adsorber y retener selectivamente los compuestos que se desea retirar de la fase gaseosa. Como agentes adsorbentes se utilizan sólidos con alta superficie específica, como por ejemplo, carbón activado (del orden de $1.000 \text{ m}^2/\text{g}$). También se pueden utilizar zeolitas, que, a pesar de poseer un área específica menor (aproximadamente, $200 \text{ m}^2/\text{g}$), presentan una estructura porosa adecuada. Los sistemas basados en adsorción varían de acuerdo al tipo de contacto existente entre la fase gaseosa y la fase sólida:

- *Sistemas de Lecho Fijo:* Se utiliza columnas rellenas con adsorbente y el gas circula continuamente a través del lecho. A medida que los sólidos adsorben los contaminantes, su capacidad de adsorción se reduce gradualmente, hasta alcanzar el punto de saturación. Cuando la eficiencia de depuración alcanza un nivel muy bajo, el adsorbente debe ser cambiado por adsorbente fresco o reconstituido. La reconstitución del adsorbente saturado se logra frecuentemente mediante tratamiento térmico con vapor sobrecalentado; sin embargo, el contaminante desorbido se transfiere al vapor de agua, lo que requiere tratamiento posterior (por ejemplo, incineración). Cuando se requiere mantener una operación continua, se debe tener una torre de reemplazo, de modo que ésta entre en operación mientras se procede a la reposición del adsorbente colmatado.
- *Sistema de Lecho Fluidizado:* Este sistema permite un contacto íntimo entre el sólido adsorbente y el gas. Se debe utilizar un sistema de separación sólido-gas para recuperar las partículas de material adsorbente arrastradas por el gas.

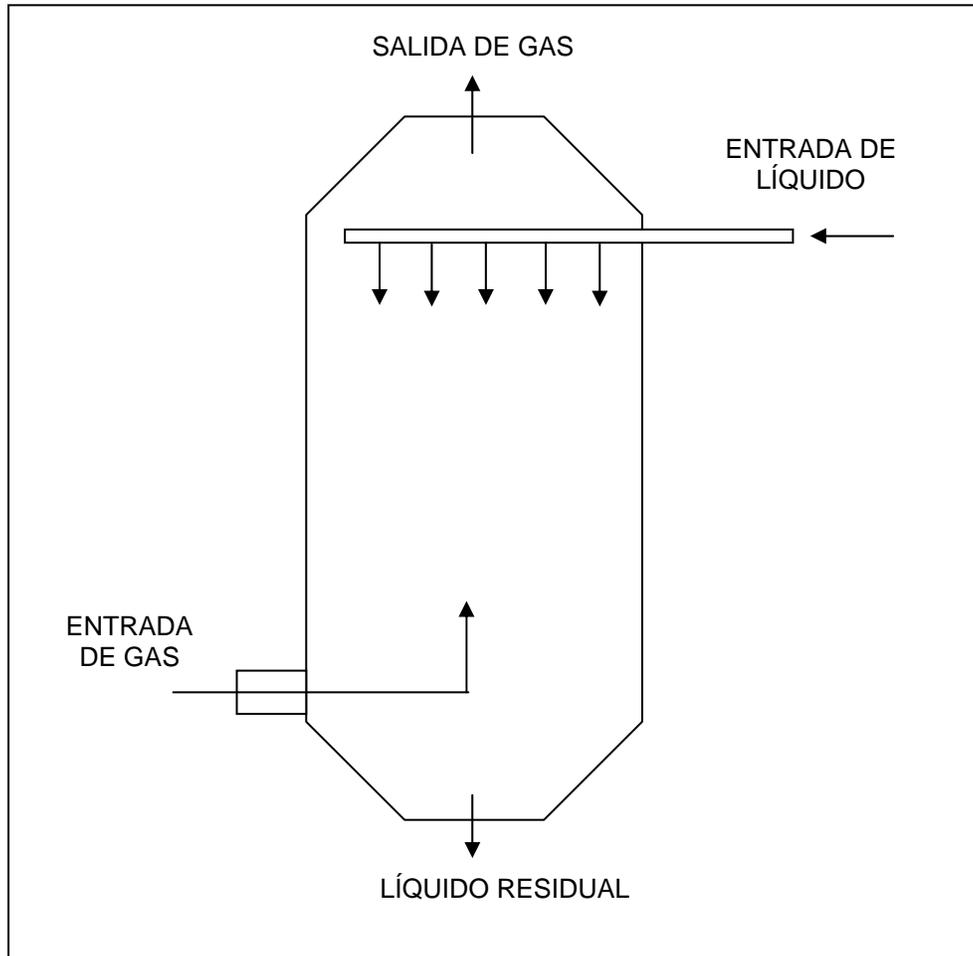


FIGURA 5.10: SISTEMA DE ABSORCIÓN EN CONTRACORRIENTE

c) Sistemas Basados en Oxidación

Estos sistemas se utilizan para destruir compuestos susceptibles a ser oxidados a formas químicas de menor impacto ambiental, mediante reacciones de oxidación. Generalmente, el agente oxidante es el O₂ del aire.

La combustión es uno de los métodos más utilizados para eliminar compuestos orgánicos volátiles presentes en el gas. La oxidación de dichos contaminantes resulta en la formación de CO₂, vapor de agua y óxidos de otros precursores oxidables presentes en la corriente gaseosa. En este sentido, se debe prevenir la formación de compuestos nocivos. Por ejemplo, la combustión de compuestos orgánicos clorados puede derivar en la producción de dioxinas, si las condiciones de operación no son controladas cuidadosamente.

Generalmente, el poder calorífico del gas no es suficientemente alto como para mantener una combustión autosustentada, por lo que se debe utilizar un combustible adicional (por ejemplo, propano, gas natural). Algunos de los sistemas más utilizados en la industria incluyen:

- *Antorchas:* Los sistemas de combustión por antorchas se pueden utilizar cuando los contaminantes a destruir se encuentran en concentraciones que están dentro de los límites de inflamabilidad de la mezcla. Se utiliza con frecuencia en las refinerías de petróleo y en plantas petroquímicas. En esos casos, se requiere un buen control de las condiciones de operación, ya que se debe minimizar la generación de humos, debido a la polimerización de hidrocarburos por craqueo a alta temperatura. Para mantener la temperatura de combustión a niveles inferiores a los de la temperatura de craqueo se puede inyectar vapor de agua, o se agrega aire como diluyente de la mezcla de gases.
- *Incineradores:* Son hornos a elevadas temperaturas generalmente calentados por llama directa por donde se hacen circular los gases a tratar. Se utiliza para destruir compuestos orgánicos volátiles. Los factores críticos que determinan la eficiencia de los incineradores son:
 - La temperatura de la cámara de combustión
 - El tiempo de residencia de los gases en la cámara
 - Las características hidrodinámicas del sistema
 - La cantidad de O₂ disponible

Estos factores son difíciles de controlar, sobre todo en situaciones donde la composición de la carga presenta alta variabilidad.

- *Oxidación Catalítica:* Existen hornos o reactores de oxidación que utilizan catalizadores para acelerar las reacciones de oxidación y mejorar la eficiencia del proceso. Normalmente, un reactor tubular contiene un catalizador sólido que adsorbe el gas y facilita su oxidación, a una temperatura más baja que en la combustión convencional. Permite eliminar compuestos orgánicos cuando estos se encuentran en pequeña concentración. Un ejemplo de este tipo de procesos

es la oxidación de SO_2 a SO_3 utilizando V_2O_5 como catalizador. El SO_3 puede formar H_2SO_4 en presencia de agua. En aquellos procesos que utilizan combustibles que tienen un significativa contenido de azufre, se puede llevar a cabo la combustión en un lecho fluidizado de CaCO_3 , lo que facilita la oxidación del azufre a CaSO_4 (yeso), minimizando así las emisiones de SO_2 .

d) Sistemas Basados en Reacciones de Reducción

Estos se basan en reacciones químicas entre el contaminante y un agente reductor, que lo transforman en una forma química de menor impacto ambiental.

El gas residual se mezcla con una corriente con el gas reductor en un reactor a alta temperatura. Por ejemplo, para eliminar los NO_x se utiliza NH_3 , H_2 o CO como agentes reductores, a temperaturas sobre 900°C , en presencia de catalizadores. Los NO_x generalmente se encuentran en baja concentración en las corrientes de gas residual, lo que dificulta su separación por absorción.

En el caso de los NO_x generados durante los procesos de combustión, la mayoría de las técnicas para su abatimiento se basan en el control de las condiciones de operación. En los sistemas de combustión, gran parte de los NO_x se forman a partir de la reacción entre el N_2 y el O_2 del aire a alta temperatura. Generalmente, se opera con un 10-20% de exceso de aire para asegurar una combustión completa y evitar la formación de CO e hidrocarburos volátiles; sin embargo, ello permite la oxidación del N_2 que resulta en la formación de NO_x . Al reducir dicho exceso de aire, se puede reducir la emisión de NO_x . Los sistemas de combustión en dos etapas (con dos cámaras de combustión en serie) también son usados con tales fines, ya que se puede usar una menor cantidad de aire para completar la combustión y, al mismo tiempo, mantener una menor temperatura de llama. La reducción de la temperatura de combustión tiene un gran efecto en prevenir la formación de NO_x . El diseño de los quemadores en las calderas modernas privilegia una menor temperatura de llama, con tales fines.

5.4.3) Descarga de los Gases Residuales a la Atmósfera

Las descargas gaseosas derivadas de la combustión y de los sistemas de depuración de gases, se hacen a través de chimeneas, las que no solamente ayudan a mantener el flujo de gases, sino que permiten dispersar los gases en la atmósfera. Tales emisiones deben respetar las normas de calidad de aire, por lo que la altura y diámetro de la chimenea deben ser cuidadosamente diseñados, tomando en consideración los factores meteorológicos locales. Para tales efectos, se utilizan modelos de dispersión, tales como aquellos descritos en el Capítulo 3.

BIBLIOGRAFÍA

Davis M., Cornwell D., "Introduction to Environmental Engineering". 2ªed. McGraw Hill International Editions, Singapore (1991)

De Nevers N., "Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire". McGraw-Hill, México (1998)

Eilbeck W.J., Mattock G., "Chemical Processes in Waste Water Treatment". Ellis Horwood. New York (1987)

Itsemap Ambiental, "Implicación Ambiental de la Incineración de Residuos Urbanos, Hospitalarios e Industriales", Fundación MAPFRE, Madrid (1994)

Kelly G., "Environmental Engineering". McGraw Hill International Editions., Singapore (1998)

LaGrega M.D., Buckingham P.L., Evans J.C., "Hazardous Waste Management", McGraw-Hill International Editions, New York (1994).

Metcalf & Eddie, "Waste water Engineering: Treatment, Disposal and Reuse". 3ªed., McGraw Hill Inc., New York (1991).

Perkins H.C., "Air Pollution", McGraw Hill Book Co., New York. (1974).

Perry R.H., Green D. "Perry's Chemical Engineer's Handbook", 7ªed., McGraw Hill, New York (1998).

Ramahlo R.S., "Tratamiento de Aguas Residuales", Editorial Reverté SA, Barcelona (1991).

Springer A.M., "Industrial and Environmental Control: Pulp and Paper Industry", 2ªed., TAPPI Press, Atlanta (1993).

Tchobanoglous G., Theisen H., Vigil S., "Gestión Integral de Residuos Sólidos", Vol. I y II., McGraw Hill, Madrid (1994).

Ulrich G.D., "Diseño y Economía de los Procesos de Ingeniería Química". McGraw Hill, México (1992).

Young., R., "Handbook of air pollution analysis", J. Wiley & Sons, New York. (1997).

CAPÍTULO 6

PRINCIPIOS DE DISEÑO DE PROCESOS LIMPIOS

6.1) EL CONCEPTO DE PROCESOS LIMPIOS

Durante muchos años, gran parte de los esfuerzos de control ambiental en la industria, estuvieron centrados, principalmente, en el tratamiento de los residuos líquidos, gaseosos y sólidos. Sin embargo, las graves crisis ambientales sufridas por muchos países industrializados en las últimas décadas, han modificado drásticamente tales enfoques.

Los problemas ambientales generados por las emisiones de residuos de producción, por el excesivo consumo de recursos naturales y por los accidentes en el transporte y procesamiento de materiales peligrosos, han tenido repercusiones que van más allá de las fronteras de los países individuales. Ello se ha traducido en fuertes presiones económicas y legales, a nivel internacional, para lograr niveles de desempeño ambiental cada vez más exigentes, en todos los sectores industriales.

En particular, los crecientes costos asociados al tratamiento y vertido de residuos, han motivado la elaboración de nuevos enfoques de control ambiental. La Figura 6.1 muestra claramente, que los residuos generados en los procesos productivos son pérdidas netas de recursos materiales y energéticos, que no han sido incorporados en el producto final. Resulta lógico, por lo tanto, llevar a cabo todos los esfuerzos necesarios, **para reducir tales pérdidas de recursos e incrementar la productividad global del proceso.** De este modo, se logra una reducción de los residuos generados y también una disminución de los recursos consumidos por unidad de producto.

Este concepto de **eco-eficiencia** es uno de los pilares de las estrategias modernas de control ambiental, ya que al incrementar la eficiencia de utilización de los recursos, se reduce el impacto ambiental del proceso de producción:

$$\text{ECO-EFICIENCIA} = \frac{\text{PRODUCTOS}}{\text{RECURSOS CONSUMIDOS}}$$

Las nuevas estrategias para reducir el impacto ambiental derivado de la actividad industrial, se basan en un enfoque integral preventivo, que pone énfasis en una mayor eficiencia en la utilización de los recursos materiales y energéticos, incrementando simultáneamente la productividad y la competitividad.

Ello involucra la introducción de medidas tecnológicas y de gestión, orientadas a reducir los consumos de materiales y energía, prevenir la generación de residuos en su fuente misma, reducir los riesgos operacionales y otros posibles aspectos ambientales adversos, a través de todo el proceso de producción.

Esta estrategia preventiva e integral, tiene la ventaja de que considera el control ambiental como parte integral del proceso de producción, que surge como consecuencia de una gestión productiva más eficiente. Efectivamente, el control ambiental coincide con un mejor aprovechamiento de las materias primas y de la energía utilizadas, en base a un eficiente sistema de gestión, donde se aprovecha al máximo el potencial de la tecnología existente y se identifican, permanentemente, oportunidades de mejoramiento en todas las áreas y actividades de la empresa.

Las modificaciones tecnológicas e innovaciones a los procesos industriales aparecen como conclusión de un proceso de búsqueda de un mejor desempeño productivo, que persigue reducir costos e incrementar la eficiencia de dichos procesos, generando un aumento en los beneficios económicos de la empresa.

Todos estos elementos se integran en el concepto de Procesos Limpios¹. Lo que en la década de los 80 surgió como un nuevo paradigma de los países de mayor desarrollo industrial, se ha constituido en un principio fundamental para el desarrollo de la actividad industrial, en el contexto de una real sustentabilidad económica y ambiental.

Los Desafíos:

La Agenda 21 acordada en Río de Janeiro y las conclusiones del Tercer Foro de Desarrollo Productivo realizado en 1997, han fomentado la producción limpia como componente básico de una política de desarrollo económico-social. Estas políticas tienen como propósito general catalizar, incentivar y facilitar el aumento de la competitividad y el desempeño ambiental de las empresas, apoyando el desarrollo de la gestión ambiental preventiva para generar procesos de producción más limpios, incluyendo el uso eficiente de la energía y el agua. En concreto, ello implica:

- Promover la eficiencia de los procesos productivos, mejorando la competitividad de la empresa.
- Promover la prevención de la contaminación, minimizando la generación de residuos y emisiones lo más cercanamente a la fuente.
- Promover el uso eficiente de la energía y el agua.
- Incentivar la reutilización, la recuperación y el reciclaje de residuos
- Contribuir al desarrollo de tecnologías de abatimiento más eficientes, cuando éstas sean la única opción económicamente viable.

¹ Otros sinónimos utilizados comúnmente para expresar este concepto son :
"producción limpia", "tecnologías limpias", "procesos menos contaminantes".

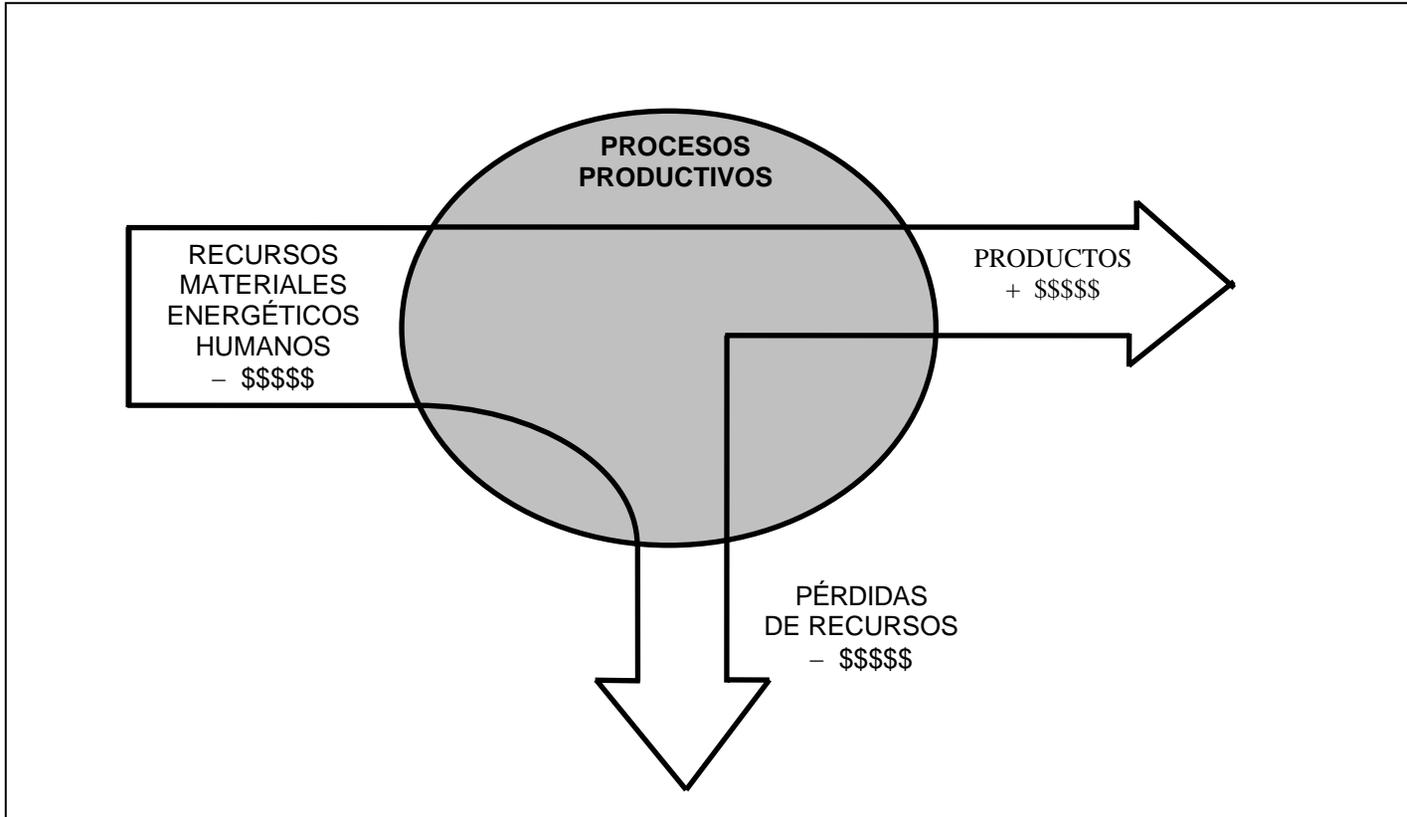


FIGURA 6.1: BALANCE DE RECURSOS EN LOS PROCESOS PRODUCTIVOS

Con ello se pretende enviar claras señales al sector industrial acerca de la necesidad de mejorar los procesos para un real aprovechamiento de todos los recursos, actuales y potenciales. Cada residuo debe ser visto como una oportunidad de nuevos negocios, de nuevos subproductos. Cada pérdida debe ser identificada y minimizada, pues atenta directamente contra la competitividad de la empresa. Cada producto fuera de especificación o sub-estándar debe ser visto como una amenaza a la existencia de la empresa.

6.2) DISEÑO DE PROCESOS LIMPIOS

El diseño de procesos limpios, se basa en el uso de las herramientas clásicas de la ingeniería, para concebir un esquema de producción, que considere tanto los aspectos técnico-económicos como los ambientales.

En este sentido, la experiencia acumulada en las últimas décadas ha permitido establecer algunos principios básicos orientadores, dentro de los cuales, se deben buscar las oportunidades para satisfacer los objetivos económicos y ambientales. La Tabla 6.1 resume tales principios técnicos generales, algunos de los cuales se exponen con mayor detalle en la Sección 6.4.

TABLA 6.1: PRINCIPIOS GENERALES PARA EL DISEÑO Y OPERACIÓN DE PROCESOS LIMPIOS

• Utilizar la evaluación de impacto ambiental como herramienta en todas las fases del diseño.
• Considerar los impactos ambientales inducidos por el proyecto, en todo el ciclo de vida del producto
• Minimizar la generación de residuos en su fuente, a partir de tecnologías de mayor eficiencia y de una gestión de producción adecuada.
• Seleccionar recursos materiales y energéticos con menor impacto ambiental potencial.
• Reducir los requerimientos materiales y energéticos, a través de la incorporación extensiva de procesos más eficientes y de sistemas de recuperación de recursos.
• Implementar sistemas de control robusto, que minimicen las desviaciones de las condiciones de operación fuera de los rangos aceptables.
• Privilegiar la reducción de riesgos de accidentes, durante todas las fases del proyecto.
• Implementar sistemas de tratamiento de residuos de alta eficiencia, con menores impactos ambientales secundarios.
• Adaptar las especificaciones de los productos, para facilitar la recuperación y el reciclado de los residuos derivados de su consumo.
• Segregar los diferentes flujos de materiales, de modo que sea posible la aplicación de los principios anteriores.
• Implementar sistemas de gestión integral: medio ambiente, aseguramiento de calidad, seguridad y salud ocupacional.