

### 3. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN AMBIENTAL EN RASTROS

El rastro de Mexicaltzingo actualmente está en construcción, lo que facilita la implementación de las variantes necesarias en las instalaciones sanitarias para evitar la problemática ambiental generada por la mayoría de los rastros en México.

#### 3.1. Plan y estrategias de sustentabilidad ambiental

El desarrollo sostenible no es exclusivo de cuestiones ambientales, de acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas los tres componentes del desarrollo sostenible son el crecimiento económico, el desarrollo social y la protección al medio ambiente, los cuales son pilares interdependientes que se refuerzan mutuamente (ONU, 2004). El presente proyecto tiene aportaciones ambientales, sociales y económicas, pues se espera que las acciones a realizar se traduzcan en oportunidades para mejorar la calidad de vida de las personas que viven en la periferia, preservando su capital económico, ecológico y cultural. A continuación se presenta el plan de sustentabilidad ambiental propuesto para el rastro.

Con base en los rubros prioritarios, se han identificado cuatro temas: gases de efecto invernadero y emisión de olores, consumo de agua, generación y tratamiento de residuos sólidos y uso de fuentes renovables de energía. A continuación se describen las acciones a llevar a cabo en cada uno de ellos.

##### 3.1.1. Gases efecto invernadero y emisión de olores

Se contempla el aprovechamiento de los desechos originados en el rastro para evitar las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Un desecho es un material que no podrá incorporarse al mismo proceso que lo generó. Los desechos enviados a cuerpos acuíferos y cielo abierto producen por su descomposición gases que son emitidos a la atmósfera sin ningún control. Para ello los residuos líquidos se convertirán en la materia prima para generar energía. Los residuos al ser tratados se incorporarán al proceso o procesos externos, capturando los gases para convertirlos en un potencial energético para la producción de energía térmica y/o eléctrica que el mismo rastro consumirá.

La emisión de malos olores se evitará tomando las siguientes medidas (PROARCA, 2004):

- Mejorar la higiene operacional

- Remover frecuentemente las grasas acumuladas, lodos del sistema de tratamiento, entre otros materiales que sean generadores de malos olores
- Acortar el tiempo de matanza
- Guardar un mínimo de existencias de materia prima y almacenarlo cerrado y bien ventilado

En caso de ser necesario, utilizar productos 100% biodegradables a base de bacterias lácticas que aceleran el proceso de descomposición mediante fermentación o aumento de microorganismos por unidad para acelerar el proceso. Estas bacterias pueden usarse directamente sobre los emisores de olores, en tuberías y tanques con buenos resultados.

### 3.1.2. Consumo de agua y efluente

El agua es utilizada abundantemente en el proceso de obtención de carne, por lo tanto las medidas de ahorro de agua son oportunidades comunes para lograr la Producción más Limpia, la cual consiste en la aplicación continua de una estrategia de prevención ambiental a los procesos y a los productos con el fin de reducir riesgos tanto para los seres humanos como para el medio ambiente (PNUMA, 2011). El primer paso es analizar los patrones de consumo de agua mediante la instalación de medidores de agua y registrar el consumo con regularidad. Los datos de consumo se deben recolectar durante las horas de producción, especialmente en los períodos de limpieza, algunos datos deber ser tomados también fuera del horario normal para identificar fugas o algún área de gasto innecesario. Los datos de consumo de agua deben ser presentados y discutidos en las reuniones de gestión para formular estrategias que mejoren la eficiencia del gasto de agua.

También se debe realizar un estudio de toda el área de procesos y operaciones auxiliares para identificar las prácticas no adecuadas. Algunos ejemplos son: dejar las llaves de las mangueras abiertas cuando no estén en uso, utilizar caudales excesivos para realizar alguna parte del proceso, entre otros. La instalación de un control automático para abrir y cerrar las llaves de las mangueras y reductores de caudal podría evitar el desperdicio de agua (COWI, 2000).

Se debe investigar el uso del agua en los procesos esenciales. Es probable que sea difícil establecer el consumo mínimo necesario para mantener las operaciones del proceso y cumplir con las normas higiénicas en la producción de alimentos. El consumo mínimo sólo puede establecerse a través del estudio de cada proceso y ensayos al respecto. Las investigaciones deben llevarse a cabo en colaboración

con los directores de producción, calidad de los alimentos, los representantes de seguridad y personal de operaciones. Cuando la tasa de utilización óptima se ha acordado, se tomarán medidas para ajustar los mecanismos y evitar el control manual.

En lo que respecta a la reutilización, el agua residual que se encuentren ligeramente contaminada puede utilizarse en otras áreas. Por ejemplo, el agua que se descongela de los sistemas de refrigeración y la utilizada en las bombas de vacío esta generalmente limpia, y podría ser reutilizada en áreas no críticas. El agua utilizada en el lavado de las canales puede ser reciclada. El efluente resultado del tratamiento del agua residual proveniente del rastro puede ser utilizado para el lavado de los corrales u otras áreas.

La reutilización de las aguas residuales tratadas no debe comprometer la calidad de los productos. Los sistemas de reutilización deben ser instalados adecuadamente para evitar una confusión entre las líneas de agua potable y las de aguas residuales tratadas. La calidad del agua residual debe cumplir con las normas vigentes (COWI, 2000).

Otros lineamientos a seguir para disminuir el consumo de agua son (COWI, 2000; PROARCA 2004):

- Realizar la limpieza en seco antes del lavado con agua en las áreas de procesos de pre-limpia y suelos. Los materiales sólidos deben ser recolectados de las superficies a lavar y ser enviados a su tratamiento final.
- Lavar superficies de trabajo, paredes y pisos con detergentes biodegradables.
- Instalación de boquillas de pulverización de alta presión y bajo volumen.
- El uso de alta presión en lugar de alto volumen para la limpieza de superficies. Se recomienda una presión de 25 a 30 bar.
- Sustituir periódicamente las boquillas de rociado de las mangueras utilizadas en las operaciones de limpieza.
- Reutilización de aguas residuales relativamente limpias en los sistemas de refrigeración, bombas de vacío y para el lavado de ganado, siempre y cuando se cumplan con las normas vigentes.
- Volver a utilizar el enjuague final de las operaciones de limpieza para el enjuague inicial al día siguiente.

- Utilizar los sistemas de control automático para operar en el flujo de agua en las estaciones de lavado de manos y esterilización de cuchillos u otros instrumentos.
- Realizar el mantenimiento de válvulas y tuberías para prevenir fugas.
- Capacitar y supervisar permanentemente a los trabajadores en las prácticas nuevas de limpieza. El consumo de agua puede ser reducido de 10 a 50% con sólo incrementar la conciencia de los trabajadores y mostrándoles cómo reducir el consumo innecesario de agua.

En lo relativo al efluente, las acciones se concentran en reducir la carga contaminante. Una cuestión importante es el volumen de las aguas residuales generadas pero dado que éstas son proporcionales al agua consumida, la reducción en la cantidad de agua empleada se traducirá en un menor volumen del efluente. Las medidas para reducir la carga contaminante del efluente deben evitar la descarga de sustancias tales como sangre, contenido sin digerir del estómago del animal a sacrificar, grasa y restos de carne en el agua residual. Ésto significa impedir que este tipo de residuos lleguen al alcantarillado y utilizar métodos de limpieza en seco siempre que sea posible (COWI, 2000).

Puesto que la sangre es una de las principales fuentes de contaminación orgánica de los mataderos, su recuperación es una iniciativa de producción limpia importante, la recuperación de sangre pueden disminuir la carga orgánica en un 40% (Jones, 1974).

Otras medidas para reducir la carga orgánica del efluente son:

- Maximizar la separación de la sangre mediante el diseño de instalaciones adecuadas para su extracción y con tiempo suficiente para el sangrado, por lo general siete minutos.
- Barrer el material sólido para su uso como subproductos, en lugar de lavarlos y mezclarlos con los efluentes.
- Ajustar los desagües con pantallas y/o trampas para evitar que los materiales sólidos entren en el sistema de efluentes.
- Utilizar los sistemas de transporte de despojos que eviten o minimicen el uso del agua.
- Usar rociadores de agua con una presión inferior a 10 bar de la canal de lavado para evitar la eliminación de la grasa de la superficie.

- Utilizar técnicas de limpieza en seco de las áreas de procesos de pre-limpia y suelos antes de lavar con agua.

### 3.1.3. Residuos sólidos

Casi todos los residuos sólidos generados son recuperables, a excepción de los lodos de las plantas de tratamiento de las aguas residuales y el estiércol proveniente de los corrales. Estos residuos tendrán un tratamiento adecuado de bajo a nulo mantenimiento y operación. Ésto evitará que sean arrojados a cielo abierto, lo cual tiene un alto impacto ambiental en suelo y cuerpos acuíferos. Asimismo los desechos a cielo abierto generan gases efecto invernadero sin control. . La ingeniería conceptual para definir el tipo de tratamiento esta fuera de los alcances de este estudio.

### 3.1.4. Energía

A partir del tratamiento de los desechos líquidos por un sistema de anaerobio, se obtendrá como producto biogás que será aprovechado en el rastro para obtener energía térmica y/o eléctrica según convenga. Además del uso de energía renovable, se implementarán directrices para el uso eficiente de la energía, las cuales se mencionan a continuación (COWI, 2000; PROARCA, 2004):

- Instalar iluminación de bajo consumo y alta eficiencia.
- Instalar sensores para desactivar o apagar las luces y equipos cuando no estén en uso.
- Instalar luminarias agrupadas en circuitos, para permitir el uso independiente de acuerdo a las necesidades.
- Mejorar el aislamiento de calefacción, refrigeración y tuberías, además de instalar alarmas que detecten cuando las puertas de la cámara de refrigeración estén abiertas.
- Aislar y cubrir los tanques de escaldado.
- Recuperar el calor residual de las corrientes de aguas residuales, de ventilación, extractores y compresores.
- Recuperar calor de las corrientes de vapor de desecho y compresores. Utilizar evaporadores de efectos múltiples, en caso de ser necesario.

- Mantener libre de fugas de aire comprimido.
- Favorecer la compra de equipo con alta eficiencia energética. La instalación de bombas eficientes pueden reducir el consumo de energía en más del 50% comparado con las bombas estándares.
- Mejora continua del plan de mantenimiento para maximizar la eficiencia energética de los equipos.
- Mantener la eficiencia óptima de combustión en las calderas. Controlar los parámetros de operación para evitar variaciones en las variables de trabajo que afecten la eficiencia de las mismas.
- Eliminar las fugas de vapor.

En la Tabla 3.1 se presenta un resumen de la situación ambiental generada por los rastros, su causa y la propuesta para disminuir el impacto ambiental.

Tabla 3.1 Situación ambiental generada por rastros

Situación	Causa	Propuesta
Generación de gases sin control (GEI)	Inadecuada disposición de residuos líquidos y sólidos	Tren de tratamiento para aguas residuales
Consumo de agua	Altos consumo de agua para cumplir con estándares higiénicos	Mantenimiento adecuado en tuberías, lavado en seco, instalación de boquillas de alta presión y bajo volumen, entre otras
Residuos sólidos	Estiércol proveniente de los corrales de recepción. Órganos y partes de la canal no aptos para consumo humano	Tratamiento anaerobio de bajo a nulo mantenimiento.
Consumo de energía	Quema de combustibles fósiles y emisiones indirectas por la demanda de energía a la planta de generación eléctrica	Aprovechamiento del biogás obtenido en el tratamiento de residuos líquidos

### 3.2. Condiciones y mecanismos de utilización de equipos de energías renovables

Las energías renovables son aquellas que se regeneran y se espera que perduren por cientos o miles de años, éstas se basan en los flujos y ciclos implícitos en la naturaleza. Así mismo, se consideran de libre

disposición, se distribuyen en amplias zonas y tienen impactos ambientales poco significativos. Entre este tipo de energía se encuentran la eólica, solar, minihidráulica, geotermia y bioenergía (SENER, 2009).

La bioenergía resulta cuando los combustibles de la biomasa de reciente origen biológico son usados para fines energéticos. La biomasa es la materia orgánica contenida en productos de origen vegetal y animal, incluyendo los desechos orgánicos, que puede ser capturada y usada como una fuente de energía química almacenada. Un sistema anaerobio involucra la descomposición de desechos orgánicos por una bacteria en un ambiente libre de oxígeno, ésto produce un gas rico en metano que puede ser usado para generar calor y/o electricidad, conocido como biogás (IILSEN, 2004).

Para el aprovechamiento del biogás se considera el consumo total de energía del rastro, el cual dependerá de los tipos de actividades que ocurren en él. Por ejemplo, el escaldado es un proceso que consume energía y es específico de los mataderos de cerdos. Aproximadamente el 80-85% de la necesidad total de energía de un matadero es energía térmica en forma de vapor o agua caliente, producida a partir de la quema de combustible en las calderas del sitio. El porcentaje de consumo de cada proceso se indica en la Tabla 3.2, se asume que el tratamiento de los subproductos y el escaldado forman parte del proceso.

Tabla 3.2 Desglose del consumo de energía térmica de plantas de sacrificio (COWI, 2001)

Áreas de consumo	Porcentaje del total %
Tratamiento de los subproductos	42%
Pérdidas en la caldera	25%
Agua caliente	14%
Escaldado	3%
Secado de la sangre	3%
Otros	13%

El restante 15-20% del consumo energético es por energía eléctrica. La Tabla 3.3 muestra un desglose indicativo de uso de la electricidad en un matadero. Como se puede observar, el consumo en refrigeración es una proporción significativa del consumo de electricidad (COWI, 2001).

Dado que el mayor consumo energético de un rastro es de tipo térmico, el aprovechamiento de biogás, es una opción importante para lograr la sustentabilidad y formar un ciclo en el que se disminuya la emisión de GEI al mismo tiempo que se protegen y preservan las aguas.

Tabla 3.3 Desglose del consumo de electricidad de plantas de sacrificio (COWI, 2001)

Áreas de consumo	Porcentaje del total
Refrigeración	59%
Cuarto de calderas	10%
Procesos de subproductos	9%
Área de sacrificio	6%
Aire comprimido	5%
Sala de deshuesado	3%
Otros	8%

Para el caso del rastro en construcción de Mexicaltzingo se propone un tren de tratamiento para los desechos líquidos que consiste en un proceso anaerobio y otro aerobio como unidades principales de degradación de la carga de la materia orgánica de los residuos. Además, el diseño se complementará con las instalaciones necesarias para transformar el biogás en energía eléctrica y térmica, esta última para sustituir el gas LP, que se utiliza comúnmente para pailas y flameado.

Para entender las barreras técnicas que enfrenta el uso de biogás en México, primero hay que tener una idea de cómo se genera el biogás y para ellos es necesario entender cómo funciona un sistema anaerobio. Este sistema aparentemente simple es una tecnología relativamente nueva que ha sido puesta en práctica en varios sitios alrededor del mundo. Sin embargo, cada sistema anaerobio es diferente debido a los animales que contribuyen a su contenido y su ubicación. Por lo tanto, cada sistema debe ser diseñado individualmente para asegurar el funcionamiento apropiado (Lokey, 2007).

La ubicación del sistema anaerobio es quizás el parámetro más significativo para que funcione. Los sistemas que son instalados a grandes altitudes o en temperaturas frías o en un sitio con lluvia frecuente, pueden reducir su temperatura, disminuyendo la eficiencia en la producción de metano, sustancial componente del biogás. (Lokey, 2007). A continuación se describe el tratamiento de residuos líquidos industriales. Este tema es trascendente porque a partir de una fase del tren de tratamiento de residuos líquidos se obtendrá el biogás necesario para producir calor y energía eléctrica.

### 3.2.1. Tratamiento de desechos líquidos industriales

Las aguas residuales de un número significativo de industrias en las que se incluyen químicas, farmacéuticas y agroalimentarias poseen una alta carga orgánica en su composición. Lo cual conlleva a que los principales procesos de tratamiento estén enfocados a la eliminación de la composición orgánica. Los métodos usados para el tratamiento de aguas residuales se denominan operaciones y procesos

unitarios. Las operaciones unitarias incluyen remoción de contaminantes por fuerzas físicas. Los procesos unitarios consisten en la utilización de reacciones biológicas y químicas (González, 2008). En una planta de tratamiento típica el agua residual es dirigida a través de una serie de tratamientos (tren de tratamiento) que pueden ser físicos, químicos y biológicos, cada uno de los cuales posee una función para reducir una carga contaminante específica. Estas funciones son típicamente las mostradas en la Tabla 3.4 (Kiely, 1998).

En la Tabla 3.5 se muestran las operaciones y procesos unitarios para tres tipos de aguas residuales: Urbanas, químicas y alimentarias. En ella se muestra el tren de tratamiento para cada tipo de agua residual, dado que poseen características diferentes entre sí, es importante la elección adecuada del procedimiento a emplear para lograr resultados óptimos.

Tabla 3.4 Categoría del tratamiento, tipo de tratamiento y procesos unitarios en el tratamiento de aguas residuales industriales (elaborado a partir de Rivera, 2000)

Categoría del tratamiento	Tipo de tratamiento	Operaciones y procesos unitarios
Pretratamiento	Físico y/o químico	Rejillas Desarenadores Homogeneización Tanques de preaeración
Tratamiento primario	Físico	Tanques sépticos Tanques de sedimentación simple
Tratamiento secundario	Biológico	Procesos anaerobios Procesos aerobios
Tratamiento terciario y/o avanzado	Físico y/o químico y/o biológico	Adsorción en carbón activado Intercambio iónico Osmosis inversa Cloración Ozonación

### 3.2.2. Sistemas de tratamiento empleados en desechos líquidos de rastros

La Figura 3.1 muestra un posible sistema de tratamiento de los desechos líquidos y sólidos generados en un rastro. El tren de tratamiento para la totalidad del agua residual comprende un pretratamiento, que consiste en una trampa de grasas y rejillas. Un proceso anaerobio, en donde se produce biogás, seguido de uno aerobio y finalmente su posterior vertido. A continuación se explica con mayor detalle cada uno de estos procesos.

Tabla 3.5 Tren de tratamiento para tres tipos de agua residuales: Urbanas, químicas y alimentarias (adaptado de Kiely, 1998)

Categoría del tratamiento	Agua residual urbana	Agua residual de la industria química	Agua residual de la industria láctea
Pretratamiento físico	Homogeneización Reja de gruesos Reja de finos Eliminación de arenas	Homogeneización Lavado con aire Oxidación/reducción Flotación	Reja de gruesos Reja de finos Eliminación de arenas Flotación
Pretratamiento químico	Ninguno	Neutralización	Neutralización
Tratamiento primario	Tratamiento primario	Clarificación primaria	No se aplica
Tratamiento secundario	Tratamiento biológico Lodos activados Filtros percoladores Lagunas aireadas Clarificación secundaria	Lodos activados biológicos	Biotorres Lodos activados
Tratamiento terciario	Filtros de arena	Filtros de arena	Filtros de arena
Eliminación de nutrientes	Biológico Químico Biológico	Adsorción Oxidación química Ozonización	No se aplica

### 3.2.2.1. Sistemas de tratamiento empleados en desechos líquidos

#### 3.2.2.1.1. Pretratamiento (sistemas de tratamiento primario)

Antes del tratamiento anaerobio, el agua residual de rastro debe ser sometida a un pretratamiento que tiene como objeto separar la mayor cantidad posible de materia que dada su naturaleza o tamaño, generaría problemas en los tratamientos posteriores (López y Casp, 2003). Además los procesos de tratamiento anaerobio pueden ser más eficaces si la grasa y los sólidos suspendidos son removidos por un pretratamiento (Mittal, 2006).

##### 3.2.2.1.1.1. *Rejillas de desbaste*

El objetivo es la separación de sólidos flotantes de gran tamaño para proteger las distintas unidades subsecuentes de posibles obstrucciones. Existen cuatro tipos de rejillas de uso habitual:

- Rejillas de gruesos: Aberturas mayores a 6mm.

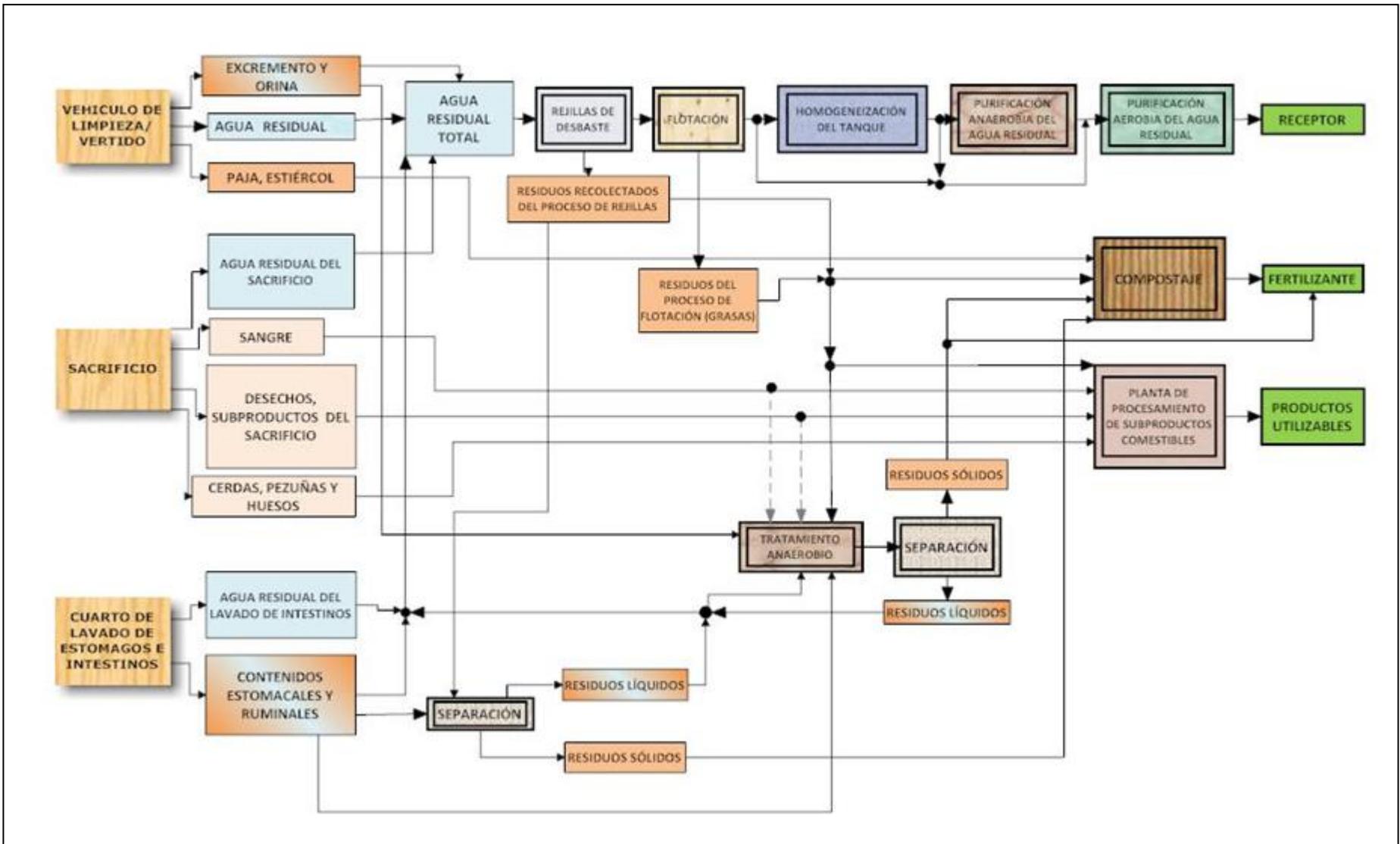


Figura 3.1 Sistema sugerido de depósito de residuos líquidos y sólidos en un rastros.

- Rejillas de finos: Aberturas en un rango entre 1.5 a 6 mm. La abertura más utilizada en mataderos está entre 1 y 2 mm (López y Casp, 2003)
- Rejillas de extrafinos: Aberturas en un rango entre 0.2 y 1.5 mm.
- Microtamices: Aberturas en un rango entre 0.001 a 0.3 mm. Éstos no se emplean en un pretratamiento sino como proceso de tratamiento de una sola etapa para aguas residuales con un contenido predominantemente inorgánico.

#### 3.2.2.1.1.2. Flotación

Es el proceso unitario de separación basado en la capacidad para flotar de partículas sólidas en una fase líquida. Este proceso implica el aporte de burbujas de aire por la parte inferior en los recipientes de flotación. Estas burbujas de aire se adhieren a la materia sólida y la capacidad del conjunto para flotar provoca que las partículas se eleven hasta la superficie donde son recogidas con rasquetas (Kiely, 1998). En los sistemas de flotación se incluyen:

- Flotación por gravedad. Se acompaña por la denominada <<trampa de grasas>> o una serie de ellas. El residuo líquido fluye a través de cámaras y debido a que las partículas de grasa son más ligeras que el agua, éstas se elevan a la superficie.
- Flotación al vacío. Consiste en saturar con aire el agua residual en el tanque de aireación y posteriormente provocar un vacío parcial en un depósito cubierto, lo que provoca la liberación de burbujas diminutas.
- Electroflotación. Unos electrodos dispuestos en la base del tanque producen unas microburbujas cuando el líquido del tanque es electrolizado por medio de corriente continua. Este proceso tiene un alto costo.
- Flotación por aire disuelto (FAD). El caudal se almacena en un depósito a presión donde se satura con aire, para después ser mezclado con el caudal bruto de la entrada, conforme la presión vuelve a ser atmosférica, el aire disuelto se desprende de la solución formando burbujas finas.
- Flotación por aire. El aire se introduce en el tanque de flotación por medio de un soplante.

### 3.2.2.1.1.3. Homogenización

El vertido de aguas residuales provenientes de un rastro no es homogéneo, por lo que podría ser necesario realizar una homogenización de varios parámetros, entre los cuales están:

- Homogenización de caudal. Para minimizar las puntas y proveer de una caudal de entrada constante a la planta y de un efluente continuo de la planta al medio o proceso receptor.
- Homogenización orgánica. Para amortiguar las fluctuaciones
- Equilibrado de nutrientes.
- Equilibrado de pH. El pH del agua en los tratamientos biológicos debe mantenerse entre 6.5 y 8.5 para asegurar una adecuada actividad biológica.

### 3.2.2.1.2. Tratamiento anaerobio (sistemas de tratamiento secundario)

Dado que el agua residual de rastro presenta un alto contenido de materia orgánica biodegradable, los sistemas anaerobios son los más convenientes para el tratamiento de estos efluentes (Malina y Pohland, 1992; Veall, 1993; Caldera y col., 2005; Mittal, 2006).

Las ventajas asociadas con el tratamiento anaerobio de aguas residuales provenientes de rastros incluyen (Tritt y Schuchardt, 1992):

- Considerables reducciones en la concentración de impurezas en el agua
- Baja producción de lodos
- Producción de lodos estables biológicamente
- No hay emisión de olores
- Producción de gas rico energéticamente que puede ser usado en el rastro como sustituto de la energía primaria convencional

Dichos sistemas se pueden clasificar en función de su capacidad para mantener altas concentraciones de microorganismos en el reactor, siguiendo diferentes métodos (IDAE, 2007), los cuales se explican a continuación.

### 3.2.2.1.2.1. *Reactor de mezcla completa sin recirculación (RMC)*

Consiste en un reactor que mantiene una distribución uniforme de concentraciones, tanto de sustrato como de microorganismos (Figura 3.2). Mediante un sistema de agitación la cual puede ser mecánica o neumática, y nunca violenta. Comparativamente a otros reactores, el tiempo de retención necesario es alto.

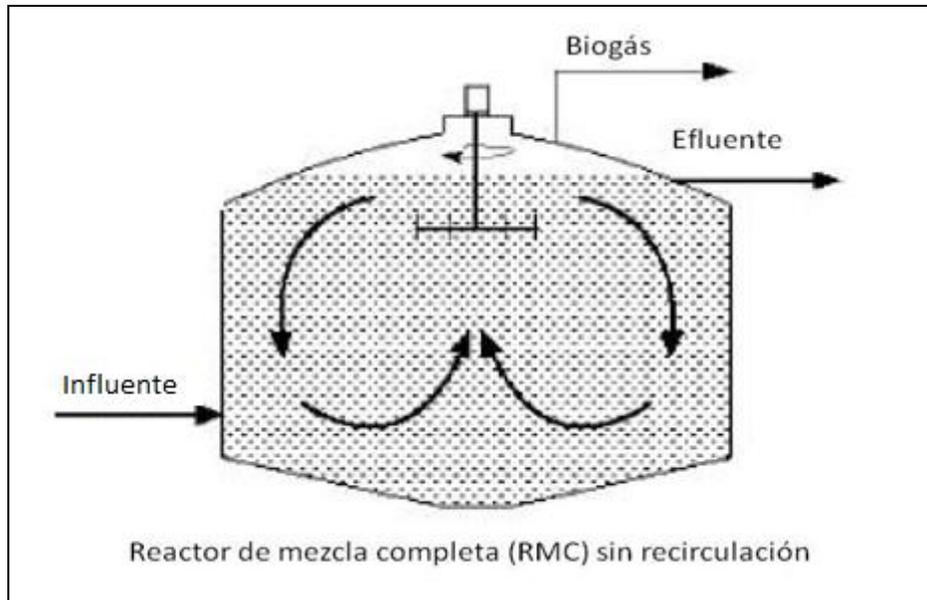


Figura 3.2 Reactor de mezcla completa (RMC) sin recirculación (IDAE, 2007)

### 3.2.2.1.2.2. *Reactor de mezcla completa con recirculación (reactor anaerobio de contacto)*

Es equivalente al sistema de lodos activados aerobios para el tratamiento de aguas residuales (Figura 3.3). Regulando la recirculación es posible conseguir tiempos de retención hidráulica más bajos que en un reactor simple de mezcla completa. Sólo es aplicable a aguas residuales de alta carga orgánica. Antes del decantador se debe disponer de un sistema de desgasificación, sin el cual la decantación se puede ver imposibilitada.

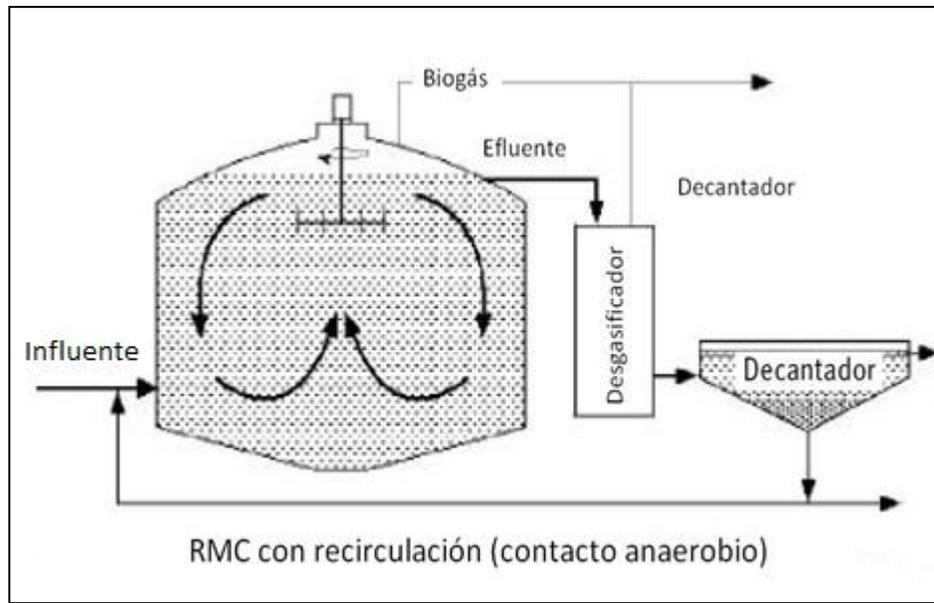


Figura 3.3 Reactor de mezcla completa (RMC) con recirculación (IDAE, 2007)

#### 3.2.2.1.2.3. Reactor de flujo pistón

La tasa de crecimiento de microorganismos es más elevada a la entrada del reactor, donde la concentración de sustrato también es más elevada. Lo cual hace que la concentración media en el reactor sea superior a la correspondiente a un RMC, o en todo caso superior a la de salida, por lo que el tiempo de retención es inferior (Figura 3.4).

#### 3.2.2.1.2.4. Reactor con retención de biomasa

Si se retienen bacterias en el interior del reactor, evitando la configuración de RMC, es posible reducir el tiempo de retención. Los métodos de retención de biomasa son básicamente dos:

- a) Inmovilización sobre un soporte (filtros anaerobios y lechos fluidizados)
- b) Agregación o floculación de biomasa y su retención por gravedad (reactores de lecho de lodos)

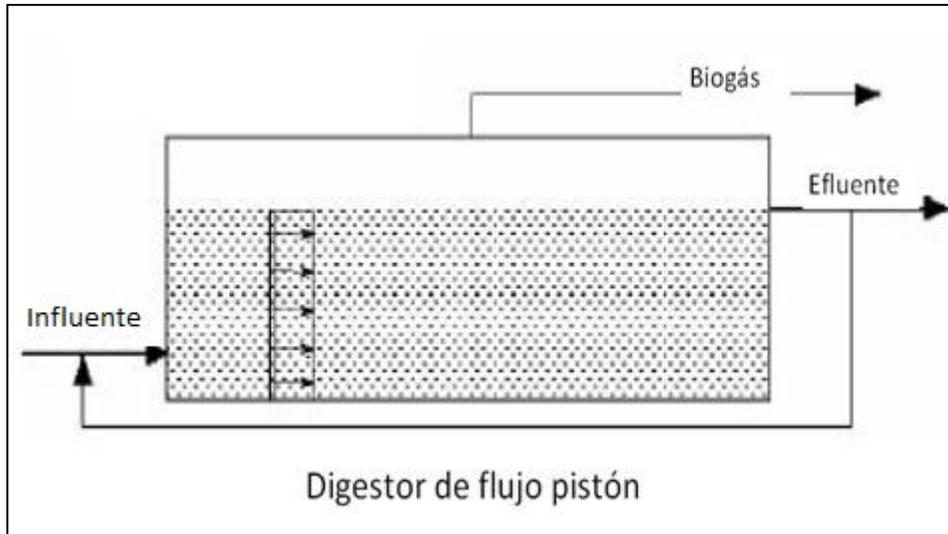


Figura 3.4 Digestor de flujo pistón (IDAE, 2007)

3.2.2.1.2.5. *Filtro anaerobio*

Consiste en hacer pasar el agua a través de un lecho o medio poroso, natural o sintético, en dirección ascendente o descendente (Figura 3.5). La biopelícula fija sobre el medio remueve la materia orgánica a través de un proceso de degradación biológica anaerobia. Los filtros anaerobios trabajan en un amplio intervalo de carga orgánica de 1-50 kgDQO/m<sup>3</sup>día y temperatura ambiente (Malina y Pohland, 1992). El coste de inversión es una limitante importante para su implantación.

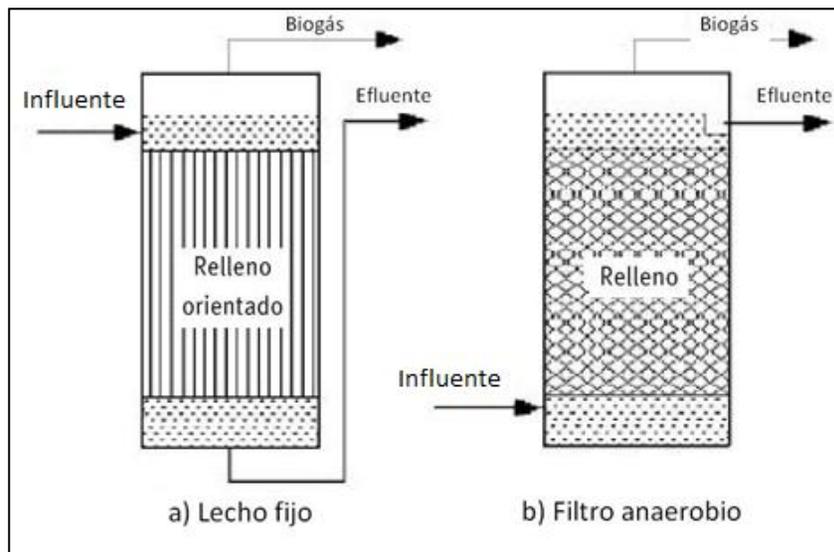


Figura 3.5 Reactores con retención de biomasa, a) Lecho fijo con flujo ascendente, la distribución es regular y orientada verticalmente b) Filtro anaerobio con flujo ascendente, la distribución es irregular (IDEA, 2007)

### 3.2.2.1.2.6. Lecho fluidizado

En este sistema las bacterias se encuentran fijas, formando una biopelícula, sobre pequeñas partículas de material inerte que se mantienen fluidizadas mediante el flujo ascendente adecuado del fluido. Para mantener el caudal adecuado, que permita la expansión y fluidización del lecho, se recurre a la recirculación (Figura 3.6).

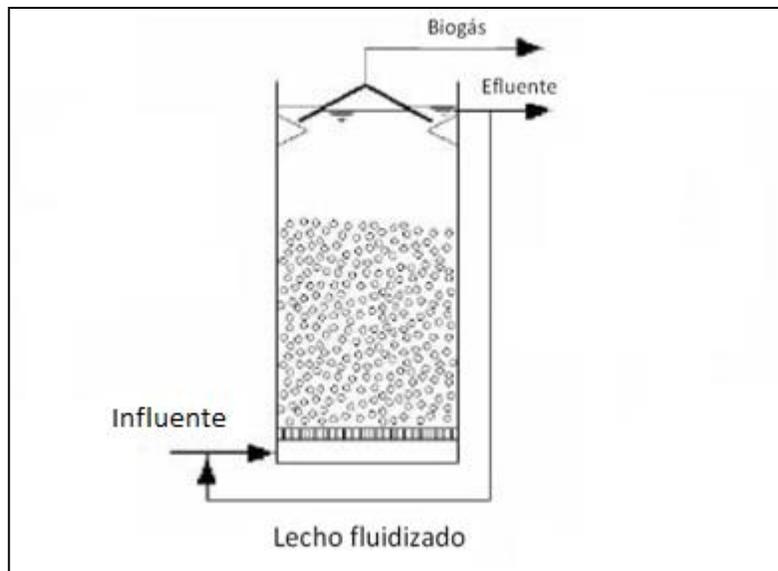


Figura 3.6 Reactor de lecho fluidizado (IDEA, 2007)

### 3.2.2.1.2.7. Reactor de lecho de lodos de flujo ascendente

En este sistema se favorece la floculación o agregación de bacterias entre ellas, formando gránulos o consorcios, de forma que por sedimentación se mantienen en el interior del reactor, con la velocidad ascendente adecuada del fluido, siempre que en la parte superior exista un buen separador sólido (biomasa)/líquido/gas. El diseño más común es el Reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA, que por sus siglas en inglés es *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*, UASB). El influente inyectado en el fondo del reactor se encuentra primero con una capa gruesa de gránulos de biomasa (lecho de lodo granular) producidos por los organismos anaerobios bajo determinadas condiciones. Estos gránulos son los principales responsables de la eliminación de los contaminantes. Dichos gránulos poseen una densidad lo suficientemente alta como para quedar retenidos en la parte baja del reactor sin ser arrastrados por el agua residual ascendente. Por encima de esta capa, existe una región que contiene organismos individuales, flóculos y gránulos pequeños (manta de lodo). Esta biomasa se mantiene en suspensión y es arrastrada en sentido ascendente por el flujo del líquido y las burbujas de gas que se

forman durante el proceso anaerobio. Toda esta región posee recolectores de gas en forma de campana que solo dejan pasar el líquido a la parte superior del reactor. Por encima de los recolectores de gas existe una zona de calma que permite que gran parte de los sólidos vuelvan a las regiones inferiores donde podrán seguir con su actividad metabólica (Figura 3.7). El efluente es recolectado por la parte superior. Las ventajas de los reactores RALLFA con respecto a otros reactores anaerobios son su bajo costo de inversión, consumo de energía bajo, resistencia a fluctuaciones de carga. El único limitante para su aplicación es que la biomasa activa granule, esto es, que forma agregados de alta densidad. Para ello es determinante la composición del agua a tratar y mantener una operación adecuada.

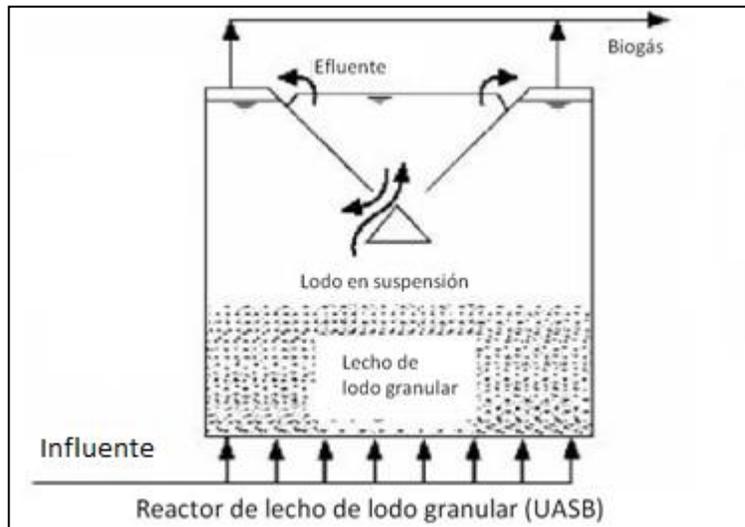


Figura 3.7 Reactor anaerobio de lecho de lodo de flujo ascendente (RALLFA) (IDEA, 2007)

#### 3.2.2.1.2.8. *Sistemas discontinuos*

La curva de evolución temporal de la producción de biogás sigue la misma tendencia que la curva típica del crecimiento de microorganismos (latencia, crecimiento exponencial, estacionalidad y decrecimiento). Para conseguir una producción de biogás cercana a la continuidad deben combinarse varios reactores discontinuos con puestas en marcha intercaladas en el tiempo.

#### 3.2.2.1.2.9. *Sistemas de dos etapas*

Los reactores anteriores pueden ser combinados para conseguir sistemas más eficientes, según el tipo de residuo a tratar. Éstos consisten en un primer reactor con elevado tiempo de retención, en el cual se favorece la hidrólisis, seguido de un reactor de bajo tiempo de retención que digiere la materia orgánica disuelta y los ácidos producidos en la primera etapa.

#### 3.2.2.1.2.10. *Sistemas de dos fases*

A diferencia de los sistemas de dos etapas, la separación de fases se refiere a mantener dos reactores en serie, en los cuales se realizan, respectivamente, las fases de acidogénesis y metanogénesis, y su objetivo es conseguir un tiempo de retención global inferior al correspondiente a un único reactor de mezcla completa.

#### 3.2.2.1.2.11. *Sistemas híbridos*

En general serán sistemas que combinen los conceptos que sustentan los diferentes tipos de reactores descritos. Los dos sistemas anteriores podrían considerarse como tales. También se han realizado diseños de reactores con retención de biomasa híbridos, en los cuales la parte baja de éste se comporta como un RALLFA y la parte superior como un filtro.

#### 3.2.2.1.3. Tratamiento aerobio (sistemas de tratamiento secundario)

Con el fin de reducir la materia orgánica (MO) en su totalidad o como etapas de pulimento diferentes tipos de tratamiento aerobios han sido utilizados para tratar los efluentes anaerobios (Omil y col., 2003; Gutiérrez-Sarabia y col., 2004, Mittal, 2006). El proceso básico de tratamiento aeróbico es el proporcionar un medio de alto contenido de oxígeno para que los organismos puedan degradar la porción orgánica de los desechos a dióxido de carbono y agua en presencia del oxígeno. A continuación se exponen el funcionamiento de los sistemas aerobios empleados en el tratamiento de aguas residuales provenientes de rastros.

##### 3.2.2.1.3.1. *Lagunas aireadas*

Se trata de embalses de agua provistos de aireadores superficiales que promocionan la transferencia de oxígeno y mantienen las condiciones aerobias en toda la laguna, la cual tiene una profundidad de entre 2 y 5 metros. La energía requerida por el sistema de agitación para transferir suficiente oxígeno es bastante importante, normalmente del orden de 3 a 4 kW/m<sup>3</sup>. Desde un punto de vista microbiológico, las lagunas bien aireadas y completamente aerobias operan de forma similar al proceso de lodos activados, en el cual los organismos aerobios se alimentan del material orgánico y crean flóculos microbianos. Sin embargo, al contrario que en el proceso de lodos activados, muchas lagunas aerobias operan generalmente como un sistema de flujo continuo de paso único sin recirculación. Esto quiere decir que la densidad de la biomasa normalmente es baja y que el efluente de la laguna contiene flóculos

microbianos que han de ser separados antes del vertido de las aguas residuales tratadas. Por todas estas razones, las lagunas aerobias generalmente forman parte de un sistema de lagunas. En estos sistemas, a la laguna aerobia le sigue una laguna facultativa y/o una laguna de sedimentación donde los lodos aerobios son parcialmente descompuestos o sedimentados.

Las lagunas aerobias pueden verse afectadas de forma importante por las variaciones diarias y estacionales de temperatura (Armenante, 1997).

#### 3.2.2.1.3.2. *Lodos activados*

Los factores esenciales del proceso de lodos activados son (Yáñez, 1979):

- Etapa de contacto, adsorción o floculación
- Etapa de aireación
- Etapa de separación
- Etapa de recirculación
- Etapa de disposición

En el proceso de lodos activados (Figura 3.8) los desechos líquidos son alimentados continuamente a un tanque aireador (reactor) en el que se encuentra el cultivo de los microorganismos (lodos activados), en su mayoría bacterias en suspensión. Las cuales en su conjunto se conocen como licor mezclado que metabolizan y floculan biológicamente los compuestos orgánicos. El medio ambiente aerobio, así como la mezcla del sustrato (agua residual influente) y microorganismos (sólidos suspendidos volátiles SSV) se mantiene mediante el uso de aireación. Después de un determinado tiempo de retención el licor mezclado pasa a un tanque de sedimentación, donde se lleva a cabo la separación de microorganismos en forma de flóculos del agua. La cual sale por la parte superior del tanque, terminándose aquí el tratamiento mediante lodos activados. Una parte de la biomasa sedimentada es retornada al tanque de aireación (lodos de retorno) para mantener la concentración deseada de sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado (SSVLM) y la otra parte es retirada del sistema como lodos de desecho (López, 2010).

Los lodos en exceso suponen un producto residual importante en el proceso de lodos activados, y se utilizan diversos sistemas alternativos para su tratamiento y evacuación final.

Los procesos de lodos activados no difieren en su principio básico operativo sino en la configuración de los dos componentes principales del proceso, es decir, el tanque de aireación y el decantador secundario (Armenante, 1997). Algunas de las configuraciones más importantes se explican a continuación.

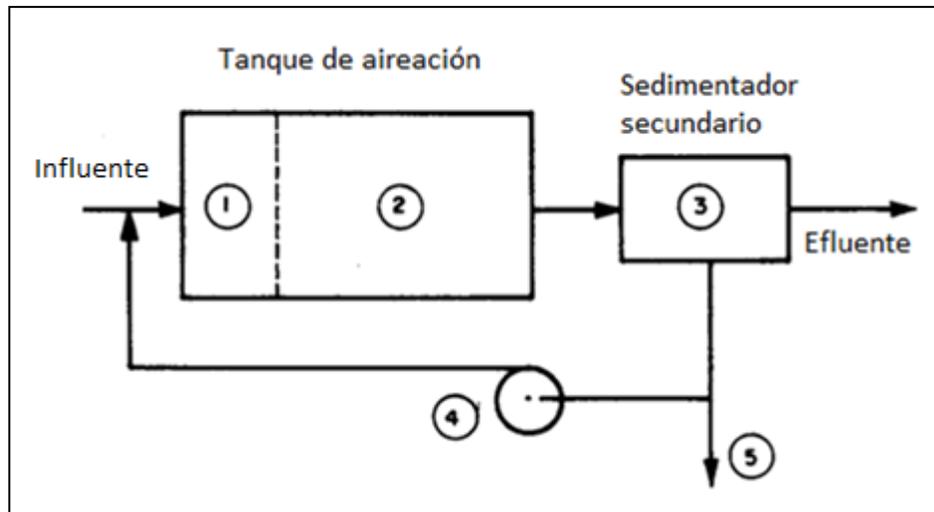


Figura 3.8 Proceso de lodos activados (Yáñez, 1979)

#### 3.2.2.1.3.2.1. Reactores de lodos activados con mezcla completa

La configuración básica de este tipo de reactor es la de un depósito en el que se mezcla y airea completamente el contenido. Por lo tanto, la composición del líquido en el interior será la misma en cualquier punto. Estos sistemas soportan las sobrecargas puntuales, debido a que cualquier variación en la composición del influente se amortigua en la disolución que se genera cuando el influente se mezcla con el contenido del reactor. Se emplean con frecuencia para tratar aguas residuales que contienen contaminantes complejos y difícilmente biodegradables, como los contenidos en los efluentes de las plantas químicas (Armenante, 1997).

#### 3.2.2.1.3.2.2. Reactores de flujo pistón con lodos activados

El agua residual fluye por tanques de aireación largos y angostos. El reactor de flujo pistón generalmente estimula el crecimiento de un lodo de buena calidad con excelentes características de sedimentación. Una desventaja de este tipo de reactores es su sensibilidad respecto a una sobrecarga puntual.

### 3.2.2.1.3.2.3. Reactores en serie con lodos activados

Para eliminar la sensibilidad a una sobrecarga puntual, se pueden emplear diversos métodos, uno de ellos consiste en dividir el reactor en una serie de reactores más pequeños de mezcla completa que se alimentarán en serie. Otro método es utilizar un sistema de distribución para lograr que el influente entre en diversos puntos del reactor de flujo pistón.

### 3.2.2.1.3.2.4. Canales de oxidación

Son reactores con forma de pista de atletismo, la entrada del influente es antes de una de las rectas del reactor, el agua es bombeada horizontal y longitudinalmente mediante agitadores axiales horizontales sumergidos. Los cuales pueden ser distribuidos de manera que generen zonas alternas, ricas y pobres en oxígeno a lo largo del sistema, favoreciendo la nitrificación y desnitrificación, respectivamente. La velocidad del agua debe ser tal que la mayoría de los sólidos se mantenga en suspensión. El efluente del estanque se separa de forma continua en un punto del sistema antes del punto de entrada y se envía a un decantador donde se separa parcialmente la biomasa y se recircula.

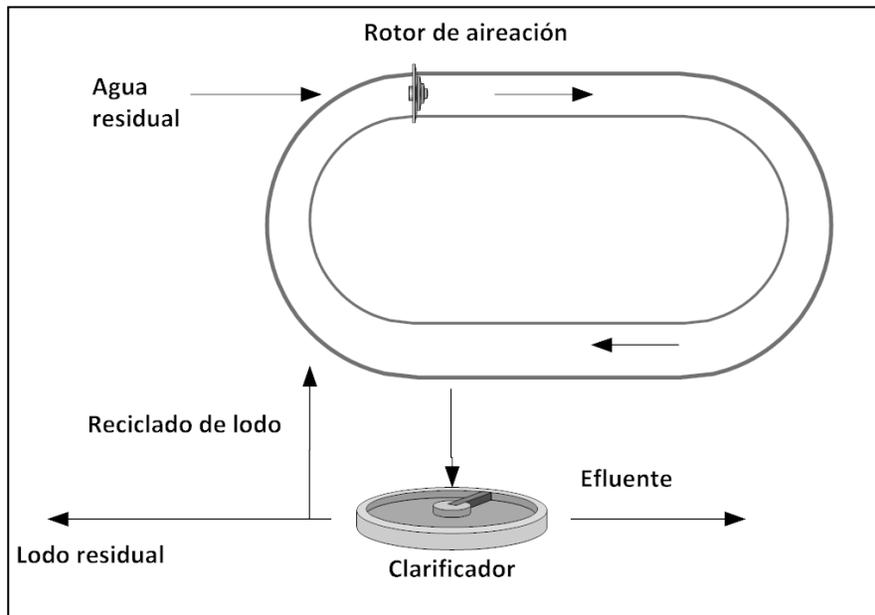


Figura 3.9 Canal de oxidación

#### 3.2.2.1.3.2.5. *Reactor secuencial discontinuo (RSD)*

Es un reactor en donde tiene lugar un proceso de lodos activados, utilizando un sólo reactor para todos los pasos del proceso, uno después de otro de manera discontinua. Cada ciclo comienza con el reactor casi vacío, con una capa de lodos aclimatados en el fondo, después el reactor se llena con las aguas residuales y comienza la aireación y agitación. La degradación biológica inicia durante el proceso de llenado y continúa, una vez lleno el reactor, hasta lograr un valor deseado de purificación del agua. Entonces, la aireación y agitación se detienen, y el lodo comienza a sedimentarse. Cuando el lodo ha sedimentado, se vierte la capa superior clarificada de las aguas residuales tratadas y se puede iniciar un nuevo ciclo. Una ventaja de los RSD es que pueden asimilar grandes variaciones de caudal y composición del influente sin fallar.

#### 3.2.2.1.3.3. *Filtro percolador*

La estructura de un filtro percolador generalmente es un cilindro grande y abierto, relleno con un material grueso y suelto. El reactor posee un equipo de distribución de agua, el cual consiste en una serie de brazos giratorios colocados sobre el relleno que distribuyen uniformemente las aguas residuales sobre la superficie de la capa superior del relleno. Durante la operación del reactor se forma una biopelícula sobre todo el relleno, así cuando el agua residual percola en forma descendente a través del relleno, se va depurando progresivamente mediante la acción de la biomasa.

#### 3.2.2.1.3.4. *Discos rotativos biológicos o biodiscos (DRB)*

Son reactores formados por etapas cada una de las cuales tiene una serie de discos paralelos entre sí y unidos a un eje horizontal que pasa a través de sus centros, estos discos se encuentran parcialmente dentro de un tanque. La biopelícula se forma sobre la superficie de los discos, que giran aproximadamente a una velocidad de 1 y 2 rpm. La alimentación del agua residual pasa a través de los tanques en serie, perpendicular a los discos y paralelo al eje de estos, de manera que la superficie de los discos está aproximadamente el 40% sumergida en todo momento. Debido a la rotación diferentes sectores de los discos se exponen de forma alterna al líquido y al aire, de esta manera se consigue la oxigenación de la biopelícula sin necesidad de una compresión o dispersión del aire. La biopelícula se desprende periódicamente debido a su crecimiento, en consecuencia la disminución de contaminantes en los DRB está dada por un mecanismo similar al del filtro percolador, por la presencia de la biopelícula

formada junto al disco. Así como un mecanismo análogo al de los lodos activados, por la presencia de biomasa en suspensión.

Estos reactores poseen como ventajas el bajo consumo de energía y mantenimiento sencillo, aunque son bastante sensibles a los cambios de temperatura.

#### 3.2.2.1.3.5. Humedales

Habitualmente se trata de embalses de agua, con un tamaño que puede variar entre unos cientos de metros cuadrados y varios kilómetros cuadrados, en los cuales los organismos autotróficos, por ejemplo las algas, son los que realizan las actividades de descontaminación. La fotosíntesis de estos organismos produce el oxígeno que los microorganismos emplean para atacar y degradar los contaminantes. A cambio, la población microbiana responsable de la degradación del contaminante genera dióxido de carbono y otros productos residuales que pueden ser utilizados por las algas. Las algas necesitan luz, por lo que las lagunas aerobias son poco profundas, entre 0.15 y 1m, lo que también permite mantener las condiciones aerobias.

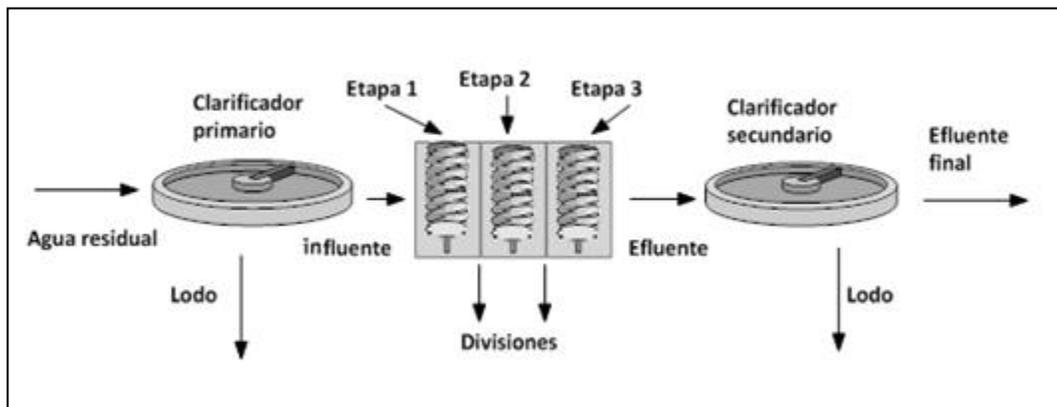


Figura 3.10 Discos rotativos biológicos

Debido a la elevada relación área/volumen, las lagunas aerobias pueden sufrir importantes variaciones de temperatura, esto tiene un efecto significativo sobre la población microbiana y, finalmente, sobre el rendimiento de la laguna. Las cargas orgánicas en las lagunas aerobias son menores que en lagunas facultativas o anaerobias.

Las cargas típicas se encuentran en torno a  $0.01 \text{ kgDQO/m}^3\text{día}$ , con DBO del orden de miligramos por litro. El tiempo de retención hidráulico varía de pocos días a 100 días aproximadamente, con una tasa de eliminación entre 80 y 90 % (Armenante, 1997).

#### 3.2.2.1.4. Cloración (tratamiento terciario)

La cloración es un proceso muy usado en el tratamiento de aguas residuales industriales y urbanas. Los objetivos de la cloración se resumen como siguen:

*Desinfección.* El cloro es un desinfectante debido a su fuerte capacidad de oxidación, por lo que destruye o inhibe el crecimiento de bacterias y algas.

*Reducción de DBO.* El cloro produce una reducción de DBO por oxidación de los compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales.

*Eliminación o reducción de colores y olores.* Las sustancias que producen olor y color presentes en las aguas residuales se oxidan mediante el cloro. La capacidad oxidante del cloro se emplea para el control del olor y la eliminación del color en muchos tratamientos industriales (Rivera, 2000).

Por lo general los tanques de cloración se diseñan con tiempos de contacto de 15 a 30 minutos. Las dosis típicas de cloro requeridas para desinfección se presentan en la Tabla 3.6. La Tabla 3.7 presenta características de los recipientes de cloro comerciales.

Tabla 3.6 Dosis típicas de cloro en desinfección (Rivera, 2000)

Efluente de:	Intervalo de dosificación (mg/L)
Aguas residuales sin tratar	6 a 25
Sedimentación primaria	5 a 20
Planta de precipitación química	2 a 6
Filtro percolador	3 a 15
Lodo activado	2 a 8
Filtro múltiple seguido de planta de lodos activados	1 a 5

Tabla 3.7 Características de los recipientes de cloro (López, 2010)

Peso del contenido	Peso solo	Máxima cantidad de gas que se puede extraer
kg	kg	Kg/día
50	33	11.7
75	50-59	18.2
908	680	182

Se han desarrollado diversos proyectos con diferente configuración del tren de tratamiento, la Tabla 3.8 muestra los resultados obtenidos aplicando aisladamente pretratamiento, procesos anaerobios, aerobios y una combinación de ellos.

Tabla 3.8 Sistemas de tratamiento aplicados a residuos líquidos provenientes de rastros

Tratamiento	Carga orgánica [kgDQO/m <sup>3</sup> día]	T [°C]	TRH [días]	Reducción DQO[%]	Producción de CH <sub>4</sub> [LCH <sub>4</sub> /gDQO <sub>rem</sub> ]	Referencia
<b>Pretratamiento</b>						
Rejillas, FAD	NA	NA	NA	68	NA	Massé y Massé, 2000
Químico, FAD	NA	NA	NA	42	NA	Massé y Massé, 2000
<b>Anaerobio</b>						
RALF	2.9-54	35	0.0208-0.3333	75-99	0.320	Borja y col., 1995b
RALF con filtrado	0.78-10.4	35	-	>70	-	Chen y col., 1997
RALF sin filtrado	0.78-10.5	35	-	<70	-	
RASL	2.25-2.86	20-25	-	90.3	0.310	Massé y col., 2001
RALGE	15	35	0.2083	65-80	-	Nuñez y Martínez, 1999
RALLFA	0.34-1.01	35	10-15.6	51-87	0.200-0.320	Hansen y West, 1992
RALLFA	6.5	37	1.2	59	-	Ruiz y col., 1997
RALLFA	2.7-10.8	35	0.58, 0.75 y 0.916	77-91	0.157-0.845	Caixeta y col., 2002
RALLFA	5.6	-	2	80	-	Rodríguez y col., 2002
RALLFA	5.7-17	37	1	80	-	Caldera y col., 2005
FA	0.47-2.98	23.6-27.1	0.8-4.9	37-77	-	Viraraghavan y Varadarajan, 1996
FA	6.16	37	1.5	63	-	Ruiz y col., 1997
FA	8	35	0.625	87	-	del Pozo y col., 2000
<b>Sistemas acoplados (pretratamiento, anaerobios, aerobios)</b>						
DAF-RALLFA	4	30	0.416	90	0.340	Manjunath y col., 2000
Dos RALLFA	15	18-30	0.16	90		Sayed y col., 1993
RALLFA-FA integrados	5.00-25	35	-	96	0.216	Borja y col., 1995a
RALLFA-FA integrados	2.49-20.82	35	0.5	90-93	0.345	Borja y col., 1998
RALLFA-LA	2.5	35-20	0.7	85	-	Nuñez y Martínez, 2001
RALLFA-LA	4.6	23-20	2.4	89-93	0.280 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kgDQO <sub>rem</sub>	Reyes, 2009
RALE-LA	4.7	30-20	2.1	94-91	0.470 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kgDQO <sub>rem</sub>	Reyes, 2009
<b>Aerobios</b>				Reducción DBO [%]		
Lagunas aerobias	-	-	3.0-10.0	95	-	EPA, 2002
Filtros percoladores	-	-	-	60-90	-	EPA, 2002
LA	0.4-8	-	-	95	-	EPA, 2002

TRH: Tiempo de Retención Hidráulico, RALGE: Reactor anaerobio de lecho granular expandido, FA: Filtro anaerobio, RALLFA: Reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente, FAD: Flotación por aire disuelto RALF: Reactor anaerobio de lecho fluidizado, RASL: Reactor anaerobio secuencial por lotes, RAL: Reactor aerobio por lotes, LA: Lodos activados RALE: Reactor anaerobio de lecho expandido NA: No Aplica

### 3.3. Biogás

#### 3.3.1. Características generales

Como resultado de la degradación anaerobia de las aguas residuales se obtiene biogás, el cual es una mezcla de metano y dióxido de carbono junto con trazas de otros gases, como hidrógeno, nitrógeno, sulfuro de hidrógeno y vapor de agua (Tabla 3.9)

Tabla 3.9. Componentes del biogás (FIRCO, 2007)

Compuesto	% Volumen
Metano (CH <sub>4</sub> )	55-70
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	35-40
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	0.5-3
Hidrógeno (H <sub>2</sub> )	1-3
Sulfuro de hidrógeno (H <sub>2</sub> S)	0.1
Vapor de agua (H <sub>2</sub> O)	Trazas

Con base en la eficiencia de un quemador convencional, un m<sup>3</sup> de biogás equivale a los valores mostrados en la Tabla 3.10. La combustión del metano da como resultado dióxido de carbono y agua, además de ser una reacción exotérmica por lo que es una fuente importante de energía. El biogás puede ser aprovechado en procesos térmicos tales como calentamiento de agua y aire. Además de generación de energía eléctrica para el bombeo de agua, iluminación (Montúfar, 2008) y en algunos casos venta de electricidad.

Tabla 3.10 Equivalencia energética para un m<sup>3</sup> de biogás (Geraldo y Jabes, 2005)

Combustible	Equivalencia energética para un m <sup>3</sup> de biogás
Gasolina	0.613 L
Diésel	0.579 L
Gas licuado	0.454 L
Gas natural	0.535 m <sup>3</sup>
Electricidad	1.428 kWh

### 3.3.2. Aprovechamiento del biogás

Dado que el biogás es una mezcla de gases puede ser aprovechado de diferentes maneras de acuerdo a su grado de pureza y poder calorífico (McBean y col., 1995). Algunos métodos de aprovechamiento son los mostrados en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11 Aprovechamiento de biogás de acuerdo a su pureza y poder calorífico (elaboración a partir de Domenzain y Espinosa, 2009)

Tipo de gas	Poder calorífico [kcal/m <sup>3</sup> ]	Método de aprovechamiento	Tratamiento
Combustión directa del biogás extraído		Incineración: Limita la emisión de olores y la cantidad de GEI hacia la atmósfera	Ninguno. Se instala un sistema activo de recolección y control.
Gas con bajo potencial calorífico	4,000	Combustible en calderas para calentar agua y hacer funcionar turbinas de vapor	Sólo se remueve la humedad
Gas con potencial calorífico medio	6,200	Combustible para: Turbinas de vapor Turbinas de gas Motores de combustión interna	Remoción de humedad, compuestos sulfurosos, siloxanos, partículas sólidas, mercaptanos y COV
Gas con potencial calorífico alto	8,900		Remoción del 100% de humedad, trazas de otros gases y CO <sub>2</sub> .

### 3.3.3. Sistemas de recuperación de energía

Para lograr el aprovechamiento del biogás existen tecnologías disponibles en el mercado que permiten obtener un biogás medianamente purificado. Este último es un combustible versátil y puede utilizarse para calentamiento y para la generación de energía eléctrica, usando turbinas de vapor, turbinas de gas o motores recíprocos de combustión interna. Las turbinas de vapor se utilizan en sistemas grandes de 10 a 50 MW y las turbinas de gas y los motores recíprocos se utilizan en los sistemas más pequeños de 1 a 10 MW (Domenzain y Espinosa, 2009). En la Tabla 3.12 se muestran algunas tecnologías disponibles para el aprovechamiento del biogás. Algunas de las ventajas de las turbinas de gas es que son más resistentes a la corrosión, generan menos emisiones, cuentan con un sistema dual de aceite que previene paros inesperados, simple operación y se adaptan a los cambios de cantidad y calidad del biogás. Aunque tienen un costo inicial alto y una eficiencia energética baja (15 y 25%), sin embargo generan una gran cantidad de calor de desecho que puede ser aprovechado por sistemas de generación de ciclo

combinado (Mcbean y col., 1995). La principal ventaja de un ciclo combinado es su alta eficiencia (Tchobaulogos y col., 1994).

Tabla 3.12 Tecnologías disponibles para el aprovechamiento de biogás (elaboración a partir de Domenzain y Espinosa, 2009)

Tecnología	Descripción
Turbinas de vapor	Consecuencia de la combustión del biogás se produce vapor de agua que se utiliza para mover una turbina de vapor que alimenta un generador eléctrico.
Turbinas de gas	Consisten en un compresor, un combustor y una turbina para convertir los gases calientes de combustión en energía mecánica. El generador eléctrico se conecta al eje de salida de la turbina de gas.
Turbinas de ciclo combinado	Se utilizan los gases de escape a alta temperatura de una turbina de gas para aportar a la caldera o generador de vapor de recuperación, el cual a su vez alimenta de vapor a la turbina de vapor.
Motores de combustión interna	En los motores de dos o cuatro tiempos, la explosión/inflamación se realiza en una cámara de combustión que tiene una parte móvil (pistón) que se desplaza dentro del cilindro con un movimiento lineal. El pistón está unido al mecanismo del cigüeñal que transforma el movimiento lineal en giratorio, y que a su vez está conectado al generador.

### 3.3.4. Pretratamiento del biogás

Las opciones de pretratamiento del biogás son desde un simple proceso de remoción de humedad y condensados, hasta procesos más complejos para llevar al biogás a una calidad de gas natural.

#### *Remoción de H<sub>2</sub>O*

Dado que la digestión se realiza en un medio acuoso, existe vapor de agua en el biogás, el cual posee una humedad relativa del 100%. Los equipos para el aprovechamiento del biogás requieren un menor contenido de agua en la mezcla, por lo que el agua debe ser eliminada por alguno de los procesos descritos a continuación.

*Condensación del vapor de agua.* Se aprovecha el efecto Joule-Thomson. El biogás pasa por una cámara de expansión lo cual hace que la temperatura de la mezcla disminuya y el vapor de agua se condense, para ser drenado posteriormente. Éste es un sistema muy sencillo y de bajo costo y sólo es necesario instalar una cámara de expansión (Tchobanoglous y col., 1994).

*Compresión y enfriamiento.* Al comprimir un volumen de biogás saturado habrá un excedente de agua en el volumen final sobrecalentado. Si al volumen final le sigue una etapa de enfriamiento hasta la

temperatura inicial de la mezcla, la cantidad de agua excedente para ese volumen se condensará. Cuando la temperatura de saturación es alta (mayor a 30° C), la compresión no es necesaria y es suficiente un proceso de enfriamiento (Domenzain y Espinosa, 2009).

*Adsorción del vapor de agua.* Consiste en una adhesión entre el vapor de agua y una superficie de un sólido desecante. El agua forma una película muy delgada que se adhiere a la superficie del sólido por las fuerzas de atracción, pero no existe una reacción química. El desecante es un sólido granulado que tiene una gran superficie efectiva por unidad de masa gracias a una multitud de poros y canales capilares microscópicos. Un sistema de deshidratación por adsorción es simple en operación y diseño, capaz de adaptarse a cualquier flujo de biogás. Sin embargo, los costos de inversión y mantenimiento son altos (Domenzain y Espinosa, 2009).

*Absorción del vapor de agua.* La absorción puede ser tanto física como química. En la física, los solventes más usados son los glicoles o soluciones concentradas de litio y sodio mientras que en la absorción química del agua, las soluciones de cal viva son los absorbentes más usados. Debido a la alta capacidad de absorción de los solventes, estos sistemas pueden manejar altos volúmenes de biogás a costos de operación relativamente bajos. El absorbente puede ser recuperado mediante un sencillo proceso de destilación (Domenzain y Espinosa, 2009).

### *Remoción de gases ácidos (CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S)*

Para prevenir problemas de corrosión y taponamiento, el tratamiento del biogás incluye la reducción de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S. El gas natural que contiene H<sub>2</sub>S y otros compuestos de azufre se conoce como gas amargo, mientras que el gas que contiene únicamente CO<sub>2</sub> se conoce como gas dulce. El sulfuro de hidrógeno es un gas altamente tóxico que en presencia de agua forma un ácido débil muy corrosivo. El valor límite para una exposición prolongada es de 10 ppm. Se detecta fácilmente, incluso a bajas concentraciones (0.13 a 4.6 ppm) por su olor a huevo podrido. En concentraciones elevadas (200 ppm) mata las terminaciones nerviosas de la nariz en segundos. A 500 ppm produce problemas respiratorios severos y puede ocasionar la muerte en minutos.

El dióxido de carbono no es inflamable por lo que en altas concentraciones puede inhibir la combustión del metano. Al igual que el H<sub>2</sub>S, en presencia de agua forma un ácido débil corrosivo a una presión parcial mayor a 2 bar. La concentración de estos gases en el biogás no llega a ser tan alta como en el gas natural de reservas naturales, pero sus niveles deben reducirse para cumplir con las especificaciones de

los equipos con los que se desee generar energía y también con la normatividad ambiental (Domenzain y Espinoza, 2009).

Los procesos que se utilizan para remover  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  se pueden agrupar en cinco categorías de acuerdo a su tipo y pueden ser sencillos o complejos de acuerdo a si es necesario recuperar o no los gases removidos y el material usado para removerlos.

En algunos casos no hay regeneración con recobro de azufre y en otros sí (Martínez, 2008). En la Tabla 3.13 se muestran las cinco categorías para la remoción de gases ácidos.

Tabla 3.13 Procesos para remoción de gases ácidos presentes en el biogás (realizado a partir de Martínez, 2008)

Proceso	Características
Absorción química	Es un proceso con aminas y carbonato de potasio. La regeneración se hace con incremento de temperatura y decremento de presión.
Absorción física	La regeneración no requiere calor.
Híbridos	Utiliza una mezcla de solventes químicos y físicos. El objetivo es aprovechar las ventajas de los absorbentes químicos en cuanto a capacidad para remover los gases ácidos. Sobre los absorbentes físicos en cuanto a bajos requerimientos de calor para regeneración.
Conversión directa	El $\text{H}_2\text{S}$ es convertido directamente a azufre.
Lecho seco	El gas agrio se pone en contacto con un sólido que tiene afinidad por los gases ácidos. Se conocen también como procesos de adsorción.

La elección del método o técnica de purificación que debe emplearse en la limpieza del biogás generado en un sistema de tratamiento, depende principalmente del flujo de biogás disponible y de la pureza del metano que se desee alcanzar lo que lleva a determinar la viabilidad económica de la purificación

Finalmente, el proceso a seguir para generar energía a partir de los residuos líquidos de un rastro se muestra en la Figura 3.11.

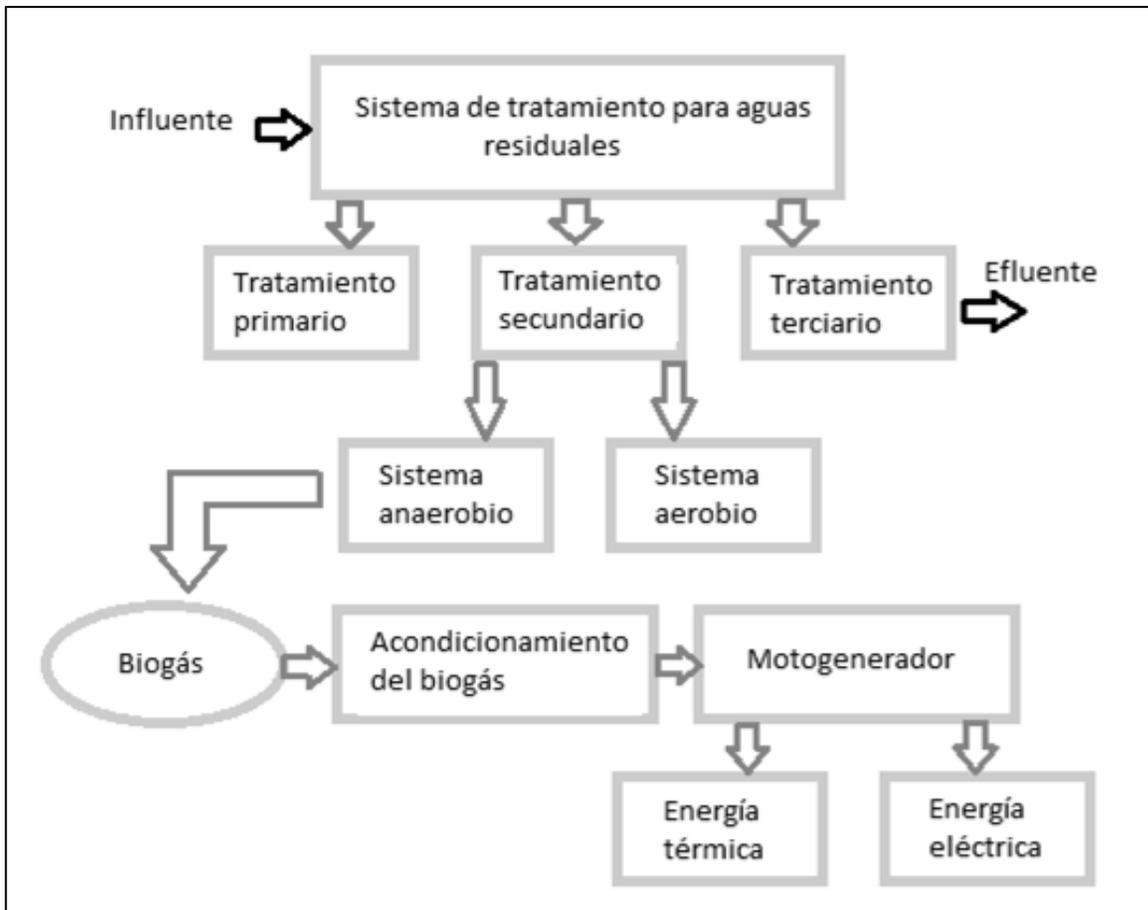


Figura 3.11 Proceso para generar energía eléctrica y térmica a partir de residuos líquidos de rastros