

MANUAL DE DISEÑO PARA PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES ALIMENTICIAS

Lesly Da Cámara, Mario Hernández y Luiselena Paz

Miniproyecto de Ingeniería Química
dirigido por
María Gabriela Gómez
Departamento de Fenómenos de Transporte

RESUMEN

Por ser el agua un elemento indispensable para la vida e imprescindible como herramienta de trabajo, resulta de gran importancia el cuidado del abastecimiento de agua limpia y potable, y el reconocimiento de los métodos a emplear para el tratamiento de ésta a fin de que pueda ser reubicada o reutilizada. Las aguas residuales conforman esos desechos líquidos a tratar para su vertido o reutilización, que se originan bien sea por procesos industriales o por uso doméstico. Se hace necesario un tratamiento previo para que puedan ser desechadas o introducidas nuevamente en la red de abastecimiento. Estos tratamientos contemplan una serie de procesos y equipos específicos, para lo cual se propuso la realización de un manual de diseño para plantas de tratamiento de aguas residuales en industrias alimenticias, en donde fueron presentadas las características y dimensiones de dichos equipos.

INTRODUCCIÓN

La creciente importancia que tiene la conservación de los recursos naturales ha despertado en el hombre, la búsqueda de métodos para cuidarlos y recuperarlos, para que puedan ser aprovechados por los seres vivos; de aquí que uno de los recursos de vital importancia para el hombre, como lo es el agua, sea objeto de estudio.

Las aguas residuales son aquellas vertientes provenientes de procesos post-industriales; es decir, aquellas aguas que han sido utilizadas en los diferentes sistemas de fabricación, producción o manejo industrial y que para ser desechadas necesitan ser tratadas previamente, de manera tal que puedan ser adecuadas para su ubicación en las respectivas redes de vertido, depuradoras o sistemas naturales, tales como lagos, ríos, embalses, etc.

Las impurezas se encuentran en el agua como materia en suspensión, como material coloidal, o como materia en solución; mientras que la materia en suspensión siempre se separa por medio mecánico, con intervención o no de la gravedad, la materia coloidal requiere un tratamiento fisicoquímico preliminar y la materia en solución puede tratarse en el propio estado molecular o iónico o precipitarse y separarse utilizando procesos semejantes a los empleados para la separación de los sólidos inicialmente en suspensión. A esto es lo que se denomina tratamiento de las aguas.

Cuando se habla de la aplicación de procesos biológicos, se hace referencia casi exclusiva a los tratamientos de aguas residuales, donde se busca como objetivo principal eliminar los componentes definidos como contaminantes, molestos o con efectos nocivos para el medio ambiente, de manera tal que se pueda ajustar, el agua residual, a la calidad de agua vertida a las especificaciones legales existentes. De esta manera, la mejor forma de tratar las aguas residuales dependerá de una serie de factores característicos, tales como: el caudal, la composición,

las concentraciones, la calidad requerida o esperada del efluente, las posibilidades de reutilización de la misma, las posibilidades de vertido a depuradoras municipales, tasas de vertido, etc.

AGUAS RESIDUALES: CARACTERÍSTICAS

El conocimiento de la naturaleza del agua residual es fundamental de cara al proyecto y explotación de las infraestructuras tanto de recogida como de tratamiento y evacuación de las aguas residuales, así como para la gestión de la calidad del medio ambiental.

1 Características Físicas, Químicas y Biológicas del Agua Residual. A continuación se describen brevemente los constituyentes físicos, químicos y biológicos de las aguas residuales, los contaminantes importantes y métodos de análisis

1.1 Constituyentes de las aguas residuales. Las aguas residuales se caracterizan por su composición física, química y biológica. La tabla 1 muestra las principales propiedades físicas de agua residual, así como sus principales constituyentes químicos y biológicos y su procedencia.

Tabla 1. Características físicas, químicas y biológicas del agua residual y sus procedencias

Características	Procedencia
Propiedades Físicas:	
Color	Aguas residuales domésticas e industriales, degradación natural de materia orgánica
Olor	Agua residual en descomposición, residuos industriales
Sólidos	Agua de suministro, aguas residuales domésticas e industriales, erosión del suelo, infiltración y conexiones incontroladas
Temperatura	Aguas residuales domésticas e industriales

Constituyentes químicos:	
Orgánicos:	
Carbohidratos	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
Grasas animales, aceites y grasa	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
Pesticidas	Residuos agrícolas
Fenoles	Vertidos industriales
Proteínas	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
Contaminantes prioritarios	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
Agentes tensoactivos	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
Compuestos orgánicos volátiles	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
Otros	Degradación natural de materia orgánica
Inorgánicos:	
Alcalinidad	Aguas residuales domésticas, agua de suministro, infiltración de agua subterránea
Cloruros	Aguas residuales domésticas, agua de infiltración de agua subterránea
Metales pesados	Vertidos industriales
Nitrógeno	Residuos agrícolas y aguas residuales domésticas
pH	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
Fósforo	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales; aguas de escorrentía
Contaminantes prioritarios	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
Azufre	Aguas de suministro; aguas residuales domésticas, comerciales e industriales
Gases:	
Sulfuro de hidrógeno	Descomposición de residuos domésticos
Metano	Descomposición de residuos domésticos
Oxígeno	Agua de suministro; infiltración de agua superficial
Constituyentes biológicos:	
Animales	Cursos de agua y plantas de tratamiento
Plantas	Cursos de agua y plantas de tratamiento
Protistas:	
Eubacterias	Aguas residuales domésticas, infiltración de agua superficial, plantas de tratamiento
Arqueobacterias	Aguas residuales domésticas, infiltración de agua superficial, plantas de tratamiento
Virus	Aguas residuales domésticas

1.2 Contaminantes de Importancia en el Tratamiento del Agua Residual. En la tabla 2 se describen los contaminantes de interés en el tratamiento del agua residual. Las normas que regulan los tratamientos secundarios están basadas en las tasas de eliminación de la materia orgánica, sólidos en suspensión y patógenos presentes en el agua residual. Cuando se pretende reutilizar el agua residual, las exigencias normativas incluyen también la eliminación de compuestos orgánicos refractarios, metales pesados y en algunos casos, sólidos inorgánicos disueltos.

Tabla 2. Contaminantes de importancia en el tratamiento del agua residual

Contaminantes	Razón de la importancia
Sólidos en Suspensión	Los sólidos en suspensión pueden dar lugar al desarrollo de depósitos de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar al entorno acuático
Materia orgánica	Compuesta principalmente por proteínas,

biodegradable	carbohidratos, grasas animales, la materia orgánica biodegradable se mide, en la mayoría de las ocasiones, en función de la DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y la DQO (demanda química de oxígeno). Si se descargan al entorno sin tratar su estabilización biológica puede llevar al agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y al desarrollo de condiciones sépticas
Patógenos	Pueden transmitirse enfermedades contagiosas por medio de los organismos patógenos presentes en el agua residual
Nutrientes	Tanto el nitrógeno como el fósforo, junto con el carbono, son nutrientes esenciales para el crecimiento. Cuando se vierten al entorno acuático, estos nutrientes pueden favorecer el crecimiento de una vida acuática no deseada. Cuando se vierten al terreno en cantidades excesivas, también pueden provocar la contaminación del agua subterránea
Contaminantes prioritarios	Son compuestos orgánicos o inorgánicos determinados en base a su carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad o toxicidad aguda conocida o sospechada. Muchos de estos compuestos se hallan presentes en el agua residual
Materia orgánica refractaria	Esta materia orgánica tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento. Ejemplos típicos son los agentes tensoactivos, los fenoles y los pesticidas agrícolas
Metales pesados	Los metales pesados son, frecuentemente, añadidos al agua residual en el curso de ciertas actividades comerciales e industriales, y puede ser necesario eliminarlos si se pretende reutilizar el agua residual
Sólidos inorgánicos disueltos	Los constituyentes inorgánicos tales como el calcio, sodio y los sulfatos se añaden al agua de suministro como consecuencia del uso del agua, y es posible que se deban eliminar si se va a reutilizar el agua residual

1.3 Métodos analíticos. Para la caracterización del agua residual se emplean tanto métodos de análisis cuantitativos, para la determinación precisa de la composición química del agua residual, como análisis cualitativos para el conocimiento de las características físicas y biológicas. Los métodos cuantitativos pueden ser gravimétricos, volumétricos o fisicoquímicos. Estos últimos se utilizan para determinar parámetros no relacionados con las propiedades másicas o volumétricas del agua

2 Características Físicas: Definición y Utilidad. Las características físicas más importantes del agua residual son el contenido total de sólidos, término que engloba la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia coloidal y la materia disuelta. Otras características físicas importantes son el olor, la temperatura, la densidad, el color y la turbiedad.

2.1 Sólidos totales. Analíticamente, se define el contenido de sólidos totales como la materia que se obtiene como residuo después de someter al agua a un proceso de evaporación a entre 103 y 105 °C. No se define como sólida aquella materia que se pierde durante la evaporación debido a su alta presión de vapor. Los sólidos sedimentables se definen como aquellos que sedimentan en el fondo de un recipiente de forma cónica (cono de Imhoff) en el transcurso de un período de 60 min. Los sólidos sedimentables, expresados en unidades de ml/l, constituyen una medida aproximada de la cantidad de fango que se obtendrá en la decantación primaria del agua residual. Los sólidos totales, o residuo de la evaporación, pueden clasificarse en filtrables o no filtrables (sólidos en suspensión) haciendo pasar un volumen

conocido de líquido por un filtro. Para este proceso de separación suele emplearse un filtro de fibra de vidrio (*Whatman GF/C*), con un tamaño nominal de poro de 1,2 μm , aunque también suele emplearse filtro de membrana de policarbonato. Es conveniente destacar que los resultados que se obtienen empleando ambos tipos de filtro pueden presentar algunas diferencias, achacables a la diferente estructura de los filtros.

La fracción filtrable de los sólidos corresponde a sólidos coloidales y disueltos. La fracción coloidal está compuesta por las partículas de materia de tamaños entre 0,001 y 1 μm . Los sólidos disueltos están compuestos de moléculas orgánicas e inorgánicas e iones en disolución en el agua. No es posible eliminar la fracción coloidal por sedimentación, normalmente para eliminar la fracción coloidal es necesaria la oxidación biológica o la coagulación complementadas con la sedimentación.

Cada una de las categorías de los sólidos comentadas hasta ahora, puede ser, a su vez dividida en función de su volatilidad a 550 ± 50 °C. A esta temperatura, la fracción orgánica se oxidará y desaparecerá en forma de gas, quedando la fracción inorgánica en forma de cenizas. De ahí que se empleen los términos de sólidos volátiles y sólidos fijos para hacer referencia, respectivamente, a los componentes orgánicos e inorgánicos (o minerales) de los sólidos en suspensión. A la temperatura de 550 ± 50 °C, la descomposición de las sales inorgánicas se limita al caso del carbonato de magnesio, que se descompone en óxido de magnesio y dióxido de carbono, al alcanzar la temperatura de 350 °C. De las sales inorgánicas, la más frecuente y preponderante es el carbonato de calcio, que se mantiene estable hasta una temperatura de 825 °C. El análisis de sólidos volátiles se emplea habitualmente para determinar la estabilidad biológica de fangos de aguas residuales.

2.2 Olores. Normalmente, los olores son debidos a los gases liberados durante el proceso de descomposición de la materia orgánica. El agua residual reciente tiene un olor peculiar, algo desagradable, que resulta más tolerable que el del agua residual séptica. El olor más característico del agua residual séptica es el debido a la presencia del sulfuro de hidrógeno que se produce al reducirse los sulfatos a sulfitos por acción de microorganismos anaerobios. Las aguas residuales industriales pueden contener compuestos olorosos en sí mismos, o compuestos con tendencia a producir olores durante los diferentes procesos de tratamiento.

La problemática de los olores está considerada como la principal causa de rechazo a la implantación de instalaciones de tratamiento de aguas residuales.

2.2.1 Detección de olores. Los compuestos malolientes responsables de la tensión psicológica que se produce en los seres humanos se detectan a través del sentido del olfato, pero aún hoy en día se desconoce exactamente el mecanismo involucrado en dicha detección.

2.2.2 Caracterización y medida de los olores. Para la completa caracterización de un olor se sugieren cuatro factores independientes: la intensidad, el carácter, la sensación de desagradado y la detectabilidad, aún cuando hasta la actualidad el único factor considerado en el desarrollo de las normativas reguladoras de los malos olores ha sido la detectabilidad.

Los olores pueden medirse con métodos sensoriales, mientras que las concentraciones de olores específicos pueden determinarse con métodos instrumentales.

3 Estudios de Caracterización del Agua Residual. Los estudios de caracterización del agua residual están encaminados a determinar:

- Las características físicas, químicas y biológicas del agua y las concentraciones de los constituyentes del agua residual.
- Los medios óptimos para reducir las concentraciones de contaminantes.

Las técnicas de muestreo utilizadas en un estudio del agua residual deben asegurar la obtención de muestras representativas, ya que los datos que se deriven de los análisis de dichas muestras serán, en definitiva, la base para el proyecto de las instalaciones de tratamiento.

INDUSTRIA ALIMENTICIA

1 Las Industrias Alimenticias. Los vertidos de los procesos de elaboración de productos alimenticios normalmente contienen materia orgánica (disuelta o en estado coloidal) en distintos estados de concentración, resultando así recomendables diversos sistemas biológicos de tratamiento de vertidos. Puesto que estos vertidos difieren de las aguas residuales urbanas en las características generales y también, específicamente, por su mayor concentración de materia orgánica, se requiere un pretratamiento para producir un efluente equivalente. Además, en necesario realizar ajustes frecuentes en la alimentación continua, el pH, la mezcla, las sustancias primitivas y adaptación de la población de microorganismos; con el fin de proporcionar las condiciones ambientales correctas para los microorganismos de los cuales depende el tratamiento biológico.

Entre los tratamientos biológicos aeróbicos o anaeróbicos existentes, los métodos más eficaces e importantes son los fangos activos, filtros bacterianos, digestión anaerobia, lagunas de oxidación y riego por aspersión. Pero el tipo de tratamiento que se emplee dependerá de la naturaleza del vertido, de la variación en la cantidad de vertidos, en el volumen de los vertidos, de los costes de capital, del funcionamiento y de los resultados que se esperan obtener.

1.1 Vertidos de la industria de conservas alimenticias. Proceden de las operaciones de limpieza, extracción el jugo, calentamiento preliminar y pasteurización de las materias primas, limpieza de la maquinaria para la elaboración y la congelación del producto terminado.

La planta de la industria de conservas alimenticias presenta seis categorías de tratamiento de sus vertidos:

- 1) Modificaciones dentro de la planta
- 2) Tratamiento preliminar
- 3) Tratamiento químico
- 4) Tratamiento biológico
- 5) Riego
- 6) Tratamiento municipal.

La selección del mejor tipo de tratamiento para cualquier fábrica, ha de guiarse por dos consideraciones: una, que incluye los aspectos normales de volumen y naturaleza de los vertidos y el tratamiento necesario, y la otra, que tenga en cuenta las condiciones especiales de número y duración de los períodos de elaboración. Los vertidos de fábricas de conservas se tratan de forma más eficaz por rejillas, precipitación química, lagunas y riego por aspersión. También se emplean pero con menos frecuencia, los métodos de filtración biológica y digestión. Otra operación es el desbaste que es un tratamiento preliminar cuyo fin es eliminar gran cantidad de partículas sólidas antes del tratamiento final o de verter a un río o al sistema principal de

aguas residuales, Se emplean rejas mecánicas (tamaño de la malla entre 1,6 y 0,63 mm) de tipo rotativo o vibratorio. Se pueden eliminar los sólidos que quedan en las rejillas de diferentes formas, en vertedero, empleándolos como material de relleno, secándolos o quemándolos como complemento en la alimentación del ganado.

La precipitación química, empleada junto con otros métodos de tratamiento, se usa para ajustar el pH y reducir la concentración de materia sólida en los vertidos. Con sales férricas o de aluminio y cal, se han obtenidos reducciones en la DBO de 40 a 50 %. La precipitación química produce, aproximadamente, del 10 al 15 % de volumen de fangos. Que normalmente sacaran de lechos de arena en una semana sin producir ningún olor.

Se pueden eliminar por medio de la oxidación biológica las materias necesitan oxígeno de los vertidos. Los vertidos de la fábrica se pueden mezclar con aguas urbanas y entonces, los procesos de oxidación biológica representan una solución práctica y económica. También se ha empleado el tratamiento con fangos activos para producir un efluente transparente y sin olor de los vertederos cítricos, con una reducción por lo menos del 90 % de la DBO.

1.2 Vertidos de las industrias lácteas. Estas aguas están constituidas en su mayor parte por diferentes diluciones de leche entera, leche tratada, mantequilla y suero de derrames obligados o accidentales; derrames que llegan al sistema de aguas residuales debido a un deficiente diseño o funcionamiento del proceso; restos de lavados que contienen productos químicos, alcalinos u otros utilizados para limpiar la leche de los recipientes, lo mismo que restos parcialmente caramelizados de depósitos. Las aguas residuales de las industrias lácteas, son generalmente, neutras o poco alcalinas, pero tienen tendencia a volverse ácidas muy rápidamente a causa de la fermentación del azúcar de la leche transformándose en ácido lácteo. Las aguas residuales del proceso de la leche contienen muy poco materia en suspensión (excepto el cuajo encontrado en las aguas residuales de la fabricación de queso), y sus efectos contaminantes son debidos a la demanda de oxígeno que se impone a la corriente receptora. Las aguas tienen un alto contenido en materia orgánica disuelta y por ello tienden a fermentar y tiene un olor fuerte, pero responde muy bien al tratamiento biológico. Los procesos aeróbicos son los más convenientes, pero la selección final del método de tratamiento depende de la colocación y del tamaño de la planta. Los seis métodos más convencionales y más efectivos que se utilizan son: aeración, filtros bacterianos, fangos activos, riego, lagunaje y digestión anaeróbica.

Cuando hay una amplia variación en el caudal y concentración de materias contaminantes en los vertidos, es conveniente prever un período de homogeneización y retención para hacer a las aguas residuales uniformes antes del tratamiento. Es deseable dar una aeración, ya como método e tratamiento o como un pretratamiento antes de los procesos biológicos. La aeración durante un día produce normalmente una reducción del 50 % de la DBO y elimina los olores durante la conversión de lactosa en ácido.

El proceso de fangos activados ha demostrado ser un método útil para el tratamiento completo de las aguas residuales. El sistema se basa en producir la concentración de unos fangos adaptados por medio de una aeración. La flora y la fauna en los fangos activos, cuando tienen aire suficiente, oxidan los sólidos disueltos orgánicos en las aguas residuales. Los fangos en exceso

se precipitan y se retornan posteriormente a las unidades de aeración.

2 Descripción del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales en la Industria Alimenticia. Las principales características de este tipo de plantas se presentan a continuación:

2.1 Recepción y envío de efluentes. Los efluentes de la industria son dispuestos separadamente en dos líneas constituidas por: efluentes de origen doméstico (baños, comedor, etc.) y efluentes de proceso.

La recepción y envío de efluentes consiste en la interconexión de las descargas a un sistema de bombeo del cual se envían los efluentes a la planta de tratamiento mediante bombas, las cuales se controlan automáticamente mediante un sensor de nivel. Debido a las fluctuaciones de flujo en el sistema de bombeo, el flujo de la descarga es regulado mediante una válvula de control, la cual recibe señal de nivel. Esto evita que en los períodos de bajo flujo, las bombas paren y arranquen constantemente. Por lo tanto, la carga hidráulica del sistema de tratamiento estará constituida por la que generan esos dos efluentes: los industriales y los domésticos. Para calcular el caudal es necesario hacer proyecciones futuras de este mismo basadas en los gastos actuales de consumo en relación con la respectiva producción. La producción futura se hace llevando los gastos actuales de consumo de una planta alimenticia, de acuerdo a la proporción horaria y de lunes a viernes, así como del personal con que se cuenta, personas/día, laborando un turno de 10 horas/día. Así como las normas sanitarias establecen un gasto de 80 l por persona por turno de trabajo de 8 horas, el consumo diario se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Consumo diario} = (\text{Personal/día})(\text{gasto personal (l/pers)})(\text{turno laboral(día/h)}) \quad (1)$$

La relación caudal máximo a caudal medio, se puede obtener a partir de los muestreos donde se debe escoger la que arroje el mayor valor. Partiendo de esto se calcula el caudal máximo, como:

$$Q_{\text{máx}} = (\text{relación caudal máximo a caudal medio})(\text{consumo diario})(\text{turno laboral}) \quad (2)$$

El caudal de aguas residuales industriales será:

$$Q_{\text{ind}} = (\text{proyección futura del caudal (l/día)}) - (\text{cantidad de agua que se evapora en el condensador} + \text{consumo diario (l/día)}) \quad (3)$$

$$Q_{\text{med}} = (Q_{\text{ind}} (\text{l/día}))(\text{turno laboral (día/h)}) \quad (4)$$

$$Q_{\text{máx}} = (\text{relación caudal máximo a caudal medio})(Q_{\text{ind}}(\text{l/día}))(\text{turno laboral(día/h)}) \quad (5)$$

Las características importantes a considerar son el pH y la concentración de grasas y aceites, de tal manera de saber si se requiere un equipo de desengrase.

Es necesario definir las dimensiones de la tubería: diámetro, largo e inclinación de las mismas. A partir de estos datos se puede calcular la velocidad en la tubería, por medio de la ecuación de Manning:

$$Q = (k/n)(b^{8/3})(s^{1/2}) \quad (6)$$

donde b es el diámetro de la tubería [m], s la pendiente de la tubería [grados], n el coeficiente de rugosidad [m] y k el factor de gasto. El coeficiente de rugosidad n se lee de la tabla a continuación:

Tabla 4. Factores de rugosidad en tuberías

Material	Rugosidad (mm)
Acero remachado	1,0 – 10,0
Concreto	0,3 – 3,0
Hierro fundido	0,26
Hierro galvanizado	0,15
Acero comercial	0,045

Despejando k de la expresión anterior:

$$k = (Q)(n)/((b^{8/3})(s^{1/2})) \quad (7)$$

se calcula k para Q_{med} y $Q_{máx}$.

$$v = \frac{Q}{A_{transversal}} \quad (8)$$

donde v es la velocidad [m/s] y $A_{transversal}$ el área transversal de la tubería [m²].

Otros factores a considerar son la profundidad útil, volumen, el período de retención para caudal máximo y la capacidad de la tubería de salida, para ello se define: diámetro, largo y pendiente del mismo.

$$\text{Capacidad} = (\text{velocidad de caudal}) (\text{diámetro(m)}) (\text{largo(m)}) \quad (9)$$

2.2 Separación de sólidos gruesos. Esta etapa es indispensable por: 1) Proteger las obras del arribo de grandes objetos susceptibles de provocar taponamientos en los diferentes equipos, 2) Separar y remover las partículas voluminosas arrastradas por el agua cruda, que disminuyan las eficiencias de los tratamientos, como fibras, cáscaras de frutas y legumbres, pitillos, colillas de cigarrillo, etc.

Esta separación se puede hacer mediante la utilización de rejas o cribado, o con el empleo de filtros rotativos.

2.2.1 Rejas o cribados. Las rejas o cribados permiten la filtración de los sólidos gruesos presentes en las aguas residuales. Para la determinación del tipo de rejas a implementar, se necesita tener conocimiento acerca del diámetro aproximado de los sólidos presentes, para poder así determinar la abertura o malla a utilizar. El procedimiento para su escogencia, viene dado únicamente por los parámetros que se presentan en tablas.¹

2.2.2 Filtro de tambor rotatorio. Este equipo es de filtración continua y opera a vacío; debido a ese vacío hecho en el interior del tambor, la suspensión es succionada a través del medio filtrante, colocado sobre la superficie del tambor.

El tambor se sumerge parcialmente en un tanque que contiene la suspensión, y el filtrado pasa a través del medio, saliendo por el eje del filtro. La torta que sale de la zona de filtración es sometida a la etapa de escurrido, lavado, secado por succión, soplado y recolección. De esta manera la torta es lavada y recogida de forma continua.

La ecuación básica de diseño es la siguiente:

$$M = \frac{\sqrt{(R_m n)^2 + 2(\Delta P \omega \alpha f n / \mu)} - R_m n}{At \cdot \alpha} \quad (10)$$

donde M es la velocidad de producción de torta seca [kg/s], At área de filtrado total [m²], R_m resistencia del medio filtrante [m⁻¹], n velocidad del tambor [s⁻¹], ΔP caída de presión [kPa], ω masa del sólido depositado en la torta [kg/m³], α resistencia específica de la torta [m/kg], f fracción del área total que está sumergida [$f = A/At$] y μ viscosidad del fluido [kg/(m.s)].

2.3 Unidad de desengrase. Separan el agua de los aceites, permitiendo la recuperación de ambos en altos porcentajes. Por ruptura de moléculas en placas coalescentes, el aceite es llevado a la superficie por simple gravedad, para ser removido. La capacidad de este equipo varía de 5 a 1.200 gpm. Cuando el agua de desecho entra al separador, la velocidad es reducida, permitiendo que los sólidos se precipiten al fondo a través de la trampa de arena y las gotas de aceite suspendidas floten a la superficie.

Paso seguido, el efluente pasa por un amortiguador que distribuye el flujo hacia la placas corrugadas coalescentes. Estas placas tienen la forma de un panal de abejas y logran atrapar al aceite libre, cuando el tamaño de la partícula sea lo suficientemente grande, lo dejará escapar hacia la superficie. El aceite removido es llevado hacia el vertedero ajustable por simple gravedad para ser retirado. El agua que pasó por estas placas es enviada hacia la salida. No sin antes ser forzado el paso para liberar el efluente de sólidos sedimentables y/o flotantes que hayan escapado al proceso.²

2.4 Estanque de compensación aireado. Se diseña un estanque para compensar todos los efluentes industriales y enviar un caudal de agua constante a las unidades siguientes. En este estanque de compensación se aplica aire mediante difusores conectados a sopladores de aire, a fin de mantener la mezcla y el oxígeno requerido para que se establezcan condiciones aerobias en el sistema. Una vez que se han separados los sólidos gruesos y en dado caso las grasas y aceite, se procede al cálculo de volumen que se tiene del agua a tratar, de tal manera de saber qué se le introducirá al tratamiento biológico. El volumen requerido se determina fijando como condición lo que se va a enviar del agua residual al tratamiento biológico en un día, ello conlleva a un caudal promedio.

A partir de la estimación del volumen máximo acumulado se debe considerar un porcentaje de amortiguación para cualquier carga pico.

$$V = (\% \text{ amortiguación})(\text{volumen máximo acumulado(m}^3)) \quad (11)$$

donde el porcentaje de amortiguación más utilizado es del 20% aproximadamente. Seguidamente se consideran el largo, la profundidad útil, profundidad de agua, diámetro, volumen de compensación efectivo y volumen de agua. De tal manera de calcular el caudal de aire para mantener la mezcla:

$$Q_{aire} = (\text{Volumen de agua(m}^3))(\text{factor(min}^{-1})) \quad (12)$$

¹ Para las tablas mencionadas remitirse a la referencia (3)

² Para obtener los parámetros de esta unidad dirigirse a las tablas indicadas en la referencia (4)

donde f es el factor asumido [$0,025 \text{ min}^{-1}$]

Siempre se deben considerar valores superiores a los calculados, permitiendo los márgenes de exceso. Se deben contemplar ciertos números de difusores, así como el número de estos por los bajantes, de tal manera de estimar el caudal de aire por bajante. Esto conlleva a determinar el número de bajantes a emplear a ambos lados del estanque y a que profundidad de agua colocar los mismos.

Presión requerida:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \quad (13)$$

donde P_1 es la Presión debido a la columna de agua, P_2 son pérdidas por fricción en las tuberías que conducen aire, P_3 son pérdidas en el filtro de aire y P_4 es la presión en los difusores.

Las pérdidas por fricción, P_2 , se calculan por la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$P_2 = ((f)(1)(T)(Q^2))/(38,000)(P)(D^5) \quad (14)$$

donde f factor de fricción = $(0,048)(D^{0,027})/Q^{0,148}$, T temperatura [$^{\circ}\text{C}$], Q gastos [m^3/min], P presión [kPa] y D diámetro [m].

Se calculan las longitudes equivalentes (l) para codos y tees, ya que la $l = f(D)$. De igual manera se estiman las pérdidas de carga de reducción, pérdidas de la válvula de compuerta, así como pérdidas de la válvula de retención. Estos valores se extraen de la tabla que a continuación se presenta:

Tabla 5. Longitudes equivalentes

Tipo de Accesorio	Longitud equivalente (L _e /D)
Codo estándar	
180°	50
90°	30
45°	16
Tees estándar	
Flujo recto	20
Flujo desviado	60

2.5 Neutralización y preacidificación. En esta etapa se ajusta el pH del efluente a valores requeridos para la buena operación del reactor anaeróbico.

La preacidificación es la reacción de transformación de la materia orgánica en ácidos grasos volátiles (acidogénesis), los cuales se convertirán en metano y CO_2 en el reactor anaeróbico. En el tanque de preacidificación se dosifican continuamente los nutrientes en base a los análisis que se realicen para controlar la operación de la planta.

Esta etapa del proceso tiene varias funciones, amortiguar las variaciones en el caudal afluente (tanque *buffer*), amortiguar las fluctuaciones en la composición del afluente (principalmente pH, DQO), y dar paso a las dos primeras etapas de la digestión anaeróbica (hidrólisis y acidogénesis) (tanque de preacidificación). La igualación del pH es catalizada por la adición de químicos (soda cáustica para elevar el pH, y CO_2 , ácido clorhídrico o nítrico para disminuirlo).

En aquellos casos en que son apreciables las variaciones en caudal y composición, la selección de la instalación de estas unidades por separado dependerá de los beneficios de costos comparando con el diseño de un pretratamiento para manejar picos de caudal y composición (por ejemplo sólidos,

temperatura) y diseñar un tanque de preacidificación de mayores dimensiones para la igualación hidráulica.

2.5.1 Tanque buffer. El volumen requerido para la amortiguación hidráulica se calcula como se describe a continuación:

• Datos requeridos:

Caudal acumulativo diario [$\text{m}^3/\text{día}$]

• Procedimiento

1.- Se elabora un gráfico en el que se representa el caudal acumulativo como función del tiempo

2.- En éste se determina el caudal promedio. Este es igual a la pendiente de la línea que intercepta el punto de partida con el fin de la curva

3.- Paralelo a esta línea se dibujan dos tangentes a la curva, que tocan los puntos con la máxima desviación positiva y mínima desviación negativa desde la línea de flujo promedio

4.- La distancia vertical entre estas dos tangentes resulta en el volumen mínimo requerido para el tanque *buffer*.

Por lo general, la capacidad de igualación de la composición del efluente no determina el volumen requerido del tanque *buffer*. Si estas variaciones son elevadas, se recomienda la instalación de un tanque de calamidad. Variaciones más pequeñas son absorbidas en el tanque de preacidificación. Si hubiese la necesidad de agregar agua de enfriamiento al afluente, antes del tanque *buffer* o en el mismo, se incrementaría sus dimensiones, pues el tiempo de retención hidráulica es calculado en base al caudal total.

2.5.2 Tanque de preacidificación. La función principal del tanque de preacidificación es la de acondicionar el agua residual para optimizar la eficiencia del tratamiento y promover el crecimiento del lodo anaeróbico en el reactor (Hidrólisis y Acidogénesis). Para ello, cuenta con el control automático de pH y nivel.

• Objetivos

1.- Se deben transformar el DQO (Demanda Química de Oxígeno) del agua residual hacia una forma degradable por los organismos metanogénicos.

2.- El pH del agua residual debe estar en el rango deseado.

3.- La temperatura del agua residual debe estar en el rango deseado.

4.- El potencial REDOX (Reducción-Oxidación) y el grado de preacidificación deben estar en el rango requerido.

5.- Deben haber suficientes nutrientes presentes.

6.- La composición del agua residual debe ser relativamente constante.

7.- El caudal debe ser relativamente constante.

En aquellos casos en que no se dispondrá de un tanque *buffer*, el volumen del tanque de preacidificación (PA) aumentará en la cantidad en que el tanque *buffer* hubiese sido diseñado. El criterio empleado para decidir si es apropiado construir el tanque *buffer* por separado del tanque de preacidificación es el siguiente:

Instalar sólo un tanque de preacidificación cuando se cumple alguna de estas afirmaciones:

1.- Hay grandes variaciones en pH, flujo, o composición del agua residual, que no son amortiguadas en el tanque *buffer*.

2.- El potencial REDOX del afluente es elevado; por ejemplo por la presencia de H_2O_2 , SO_3 , NO_3 , o de O_2 .

3.- El agua residual es difícil de acidificar (por ejemplo, por presencia de proteínas).

En estos casos, es conveniente recircular efluente anaeróbico si se quiere reducir el consumo de soda cáustica y diluir el DQO. Esto no deberá ser empleado en los casos en los que se ha alcanzado la máxima velocidad ascendente de diseño del reactor.

El volumen requerido para la preacidificación del efluente se calcula como se describe a continuación:

- Datos requeridos

DQO afluente [mg/l]

DQO efluente [mg/l] o, en su defecto, la eficiencia de remoción de DQO de diseño

Caudal pico [m³/h]

Variación de ácidos grasos volátiles (AGV) con respecto al tiempo (prueba de laboratorio)

Esta se fundamenta en la siguiente relación del Grado de Preacidificación (GP):

$$GP = \frac{AGV_{PA} \cdot 6500}{DQO_{degradable}} \quad (15)$$

$$DQO_{degradable} = DQO_{afl} - DQO_{efl} \quad (16)$$

donde AGV_{PA} son los ácidos grasos volátiles en el PA [meq/l] (dato real), DQO_{afl} Demanda Química de Oxígeno en el afluente [mg/l] (dato real), DQO_{efl} Demanda Química de Oxígeno en el efluente [mg/l] la cual se puede calcular en base a un porcentaje de eficiencia de remoción de la DQO_{afl} . Por lo general, este valor se encuentra comprendido entre 70 – 85% (dato calculado).

De esta relación se despeja el valor de AGV_{PA} para los límites de GP, según lo recomendado (20 – 30%). Para efectos de diseño se toma el mayor valor (30%).

$$AGV_{PA} = \frac{(DQO_{afl} - DQO_{efl}) \cdot GP}{6500} \quad (17)$$

$$V = \frac{AGV_{PA} \cdot 6500}{\rho} \quad (18)$$

donde V es el volumen [m³] y ρ densidad [mg/l].

Este valor de AGV_{PA} se toma como referencia. Luego se realizan pruebas de laboratorio con agua residual del efluente a tratar (o muestras que la simulen) en las que se determina el tiempo en que se alcanza el AGV_{PA} calculado. Este es un aproximado del TRH (Tiempo de Retención Hidráulico) requerido por concepto de preacidificación en el PA. A través de este valor se calcula el volumen del PA como se describió anteriormente.

2.5.3 Productos químicos. En el tanque de preacidificación son añadidos productos químicos para alcanzar la rápida neutralización del afluente.

- Soda cáustica

La dosificación de soda cáustica en vez de otros productos químicos (cal hidratada, amoníaco, recirculación de efluente anaeróbico) es altamente aconsejable. La cal hidratada es más económica que la soda cáustica, pero la inversión en los equipos para su manejo y el mantenimiento de estos es más elevado.

El dimensionamiento del tanque de almacenamiento de soda cáustica dependerá de la cantidad diaria requerida, la disponibilidad del suplidor y la cantidad de químico que es suministrado cada vez.

- Dióxido de carbono

El dióxido de carbono resulta de menor costo que la adición de ácido clorhídrico (que es utilizado igualmente para neutralizar). Éste es burbujeado dentro del tanque PA. No se debe utilizar ácido sulfúrico para este fin, pues el sulfato se reducirá a sulfito mediante las bacterias sulfatoreductoras. Esto se traduce en una competencia entre las sulfatoreductoras y las metanogénicas por el hidrógeno, haciendo que la remoción de la DQO disminuya. Además, se genera mayor cantidad de H₂S en el sistema, que genera problemas de corrosión por la formación de H₂SO₄.

Teóricamente, la capacidad de amortiguación por las corrientes de distintos pH y la acidificación natural en el PA deberían ser suficientes para no consumir CO₂. Sin embargo, para reducir un tiempo de espera (de retención) para lograr esta neutralización natural se cuenta con la adición de CO₂.

2.6 Sistema biológico. Se dividen en dos categorías:

2.6.1 Tratamiento anaeróbico. Conceptos básicos del tratamiento anaeróbico. El tratamiento anaeróbico se refiere a la remoción de materia orgánica del agua residual sin la inyección de aire. El metabolismo de las bacterias anaeróbicas es muy lento por lo que se necesitan mayores tiempos de residencia del agua residual a tratar en un proceso anaeróbico que en uno aeróbico, lo que se traduce en una baja tasa de crecimiento celular. Ello implica que sólo una pequeña fracción del residuo orgánico biodegradable es transformada en nuevas células, la mayor parte es convertida en metano, un gas combustible, lo que lo convierte en un producto final útil. Esto significa que se tiene una menor acumulación de lodo producido por el proceso de digestión anaeróbica.

La conversión anaeróbica de materia orgánica hasta productos finales inofensivos es compleja, resulta de un gran número de reacciones interdependientes y simultáneas. El proceso de digestión puede ser clasificado en cuatro etapas principales íntimamente relacionadas: Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogénesis y Metanogénesis.

La bacteria fermentadora realiza las dos primeras etapas de degradación de la materia orgánica (hidrólisis y acidogénesis). Un segundo grupo de bacterias, acetogénicas, sintetiza los productos de la acidogénesis, dando lugar principalmente al acetato entre otros compuestos como CO₂, H₂. La bacteria metanogénica convierte este acetato y el H₂ en metano consumiendo CO₂ para ello. Ésta también transforma otros compuestos como metanol, formato, monóxido de carbono y metilaminas, que son de menor importancia en la mayoría de los procesos de digestión anaeróbica. Únicamente las bacterias acetogénicas y metanogénicas son estrictamente anaeróbicas, las hidrolíticas y acidogénicas se componen de bacterias facultativas y anaerobias. Las bacterias facultativas son aquellas que pueden vivir tanto en la presencia de oxígeno como en su ausencia.

2.6.1.1 Reactor anaeróbico. En esta sección se describen dos tipos de reactores anaeróbicos. Estos son el UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Bed*, o reactor anaeróbico de manto ascendente) y el IC (*Internal Circulation* o de circulación interna).

2.6.1.1.1 Reactor UASB. En éste, el afluente es bombeado hacia el sistema de distribución interno, entrando en contacto con la cama de lodo anaeróbico. Cada ramal tiene aperturas a través de las cuales fluye el afluente. Estos recorren todo el fondo del reactor. La reducción del DQO provoca la expansión/fluidización de la cama de lodo que es elevada por la

velocidad ascendente producto de la generación de biogás (mezcla de gases entre el CO₂ de la respiración anaeróbica de las bacterias y el metano producto de la combustión y degradación del DQO) y la velocidad del líquido. Cuando el gránulo libera el biogás adherido a su superficie, el lodo vuelve a caer a la zona inferior del reactor, el biogás es colectado en las cámaras para tal fin, y el agua residual tratada abandona el reactor por rebose. Esta dinámica ocurre continuamente dentro del reactor. El biogás generado da lugar a una agitación interior que interviene en la formación y mantenimiento de los gránulos, removiendo la cama de lodos y permitiendo el intercambio de estos con el agua residual. El elemento en donde se separan biogás, agua residual tratada y lodo es llamado separador trifásico. Este consta de varias cámaras separadas por deflectores, en las que el gas es recolectado.

En el diseño del reactor, intervienen los factores que siguen:

- Dimensiones
Existen parámetros que se usan como criterios para realizar el dimensionamiento del reactor anaeróbico:
 - Por carga orgánica: En base a la descarga diaria de DQO y la carga volumétrica [kg DQO/m³_{reactor}·día] escogida para trabajar.
 - Por carga hidráulica: A partir de un valor máximo de diseño de la velocidad ascendente dentro del reactor.

◦ Diseño por carga orgánica

- Datos requeridos:
CO = Carga orgánica de diseño (8 – 20 kg DQO/m³.día)
DQOafl = Demanda Química de Oxígeno en el afluente [mg/l]
Q = Caudal de afluente [m³/día]. Para los cálculos se emplea el caudal promedio y el caudal pico esperado.

- Cálculos:
En base a la relación de la Carga Orgánica que se presenta a continuación:

$$CO = \frac{DQOafl \text{ (mg/l)} \cdot Q \text{ (m}^3/\text{día)}}{V \text{ (m}^3) \cdot 1000} \quad (19)$$

Se despeja el valor del volumen del reactor, utilizando el más extremo de los casos (mayor caudal y mayor DQO que se pretenden manejar en el tratamiento). De aquí se tiene:

$$V \text{ (m}^3) = \frac{DQOafl \text{ (mg/l)} \cdot Q \text{ (m}^3/\text{día)}}{CO \text{ (kg/m}^3 \cdot \text{día)} \cdot 1000} \quad (20)$$

◦ Diseño por carga hidráulica

- Datos requeridos:
VA = Velocidad ascendente de diseño (0,5 – 1,0 m/h)
Q = Caudal de afluente [m³/día]. Para los cálculos se emplea el caudal promedio y el caudal pico esperado.

- Cálculos:
De la relación de la velocidad ascendente con el caudal que debe manejar el reactor, se obtiene el área transversal del mismo.

$$VA = \frac{Q \text{ (m}^3/\text{h)}}{A \text{ (m}^2)} \quad (21)$$

donde A es el área transversal del reactor [m²], que al despejarla queda:

$$A \text{ (m}^2) = \frac{Q \text{ (m}^3/\text{h)}}{VA \text{ (m/h)}} \quad (22)$$

Como ya se ha calculado el volumen del reactor, se puede calcular la altura del mismo de la siguiente forma:

$$V = A \text{ (m}^2) \cdot h \text{ (m)} \quad (23)$$

donde h es la altura del reactor [m²] y se despeja como se muestra:

$$h \text{ (m)} = \frac{V \text{ (m}^3)}{A \text{ (m}^2)} \quad (24)$$

2.6.1.1.2 Reactor IC. El concepto del IC está basado en la tecnología del UASB, con dos etapas de separadores trifásicos. Estos son de una mayor relación entre altura y diámetro. En efecto, el IC consiste en dos compartimentos tipo UASB colocados uno sobre el otro (el inferior es altamente cargado, mientras que el superior es poco cargado de materia orgánica).

En el IC el afluente es bombeado hacia el sistema de distribución interno, donde el lodo recirculado y parte del efluente son mezclados para lograr la dilución directa y acondicionamiento del afluente. La primera etapa contiene un manto concentrado y expandido de lodo granular, donde la mayor parte del DQO es convertido en biogás. Esto provoca la expansión/fluidización de la cama de lodo que es elevada por la velocidad ascendente producto de la mezcla del afluente, recirculación interna y flujo de biogás. El contacto efectivo que se realiza entre el agua residual y la biomasa produce un lodo muy activo, que como consecuencia tiene la capacidad de tratar altas cargas orgánicas con altas tasas de conversión. El biogás producido en esta primera etapa es atrapado en los colectores de gas inferiores y es empleado para promover el ascenso del agua residual tratada y el lodo a través la tubería ascendente hacia el tanque desgasificador en el tope del reactor. Aquí, el biogás es finalmente separado y enviado al sistema de manejo de gas. La mezcla de agua tratada y lodo baja directamente al fondo del reactor por la tubería descendente. Esto resulta en la recirculación interna. Mientras mayor sea el DQO alimentado al reactor, mayor será la recirculación interna, por lo que el DQO biodegradable en el fondo del reactor se mantiene prácticamente constante. El efluente de la primera etapa es pulido en la segunda, donde el DQO remanente es removido. El biogás producido en la segunda etapa es atrapado por los colectores superiores, mientras que el efluente tratado abandona el reactor por rebose. Mediante la remoción del biogás generado en la primera etapa, la turbulencia es minimizada en la segunda etapa. De esta forma se logra una eficiente separación de los gránulos de lodo en el colector de gas del tope del reactor. El pulimento es luego alcanzado eficazmente por la relativamente baja velocidad del líquido, y comportamiento de flujo pistón en la segunda etapa.

Para el diseño de este reactor se siguen los siguientes pasos:

- Dimensiones
Existen parámetros que se usan como criterios para realizar el dimensionamiento del reactor anaeróbico:
 - Por carga orgánica: En base a la descarga diaria de DQO y la carga volumétrica (kg DQO/m³_{reactor}·día) escogida para trabajar.
 - Por carga hidráulica: A partir de un valor máximo de diseño de la velocidad ascendente dentro del reactor.

◦ Diseño por carga orgánica

- Datos requeridos:
CO = Carga orgánica de diseño (15 – 35 kg DQO/m³.día)

DQO_{afl} = Demanda Química de Oxígeno en el afluente [mg/l]
 Q = Caudal de afluente [m³/día]. Para los cálculos se emplea el caudal promedio y el caudal pico esperado.

- Cálculos:

En base a la relación de la Carga Orgánica que se presenta a continuación:

$$CO = \frac{DQO_{afl} (mg/l) Q (m^3/día)}{V (m^3) 1000} \quad (25)$$

Se despeja el valor del volumen del reactor, utilizando el más extremo de los casos (mayor caudal y mayor DQO que se pretenden manejar en el tratamiento). De aquí se tiene:

$$V (m^3) = \frac{DQO_{afl} (mg/l) Q (m^3/día)}{CO (kg/m^3.día) .1000} \quad (26)$$

◦ Diseño por carga hidráulica

- Datos requeridos:

VA = Velocidad ascendente de diseño [m/h], como referencia.

Q = Caudal de afluente [m³/día]. Para los cálculos se emplea el caudal promedio y el caudal pico esperado.

- Cálculos:

$$A (m^2) = \frac{V (m^3)}{h (m)} \quad (27)$$

Luego, con la relación de la velocidad ascendente, y con el caudal que debe manejar el reactor, se obtiene:

$$VA_{calculado} = \frac{Q (m^3/h)}{A (m^2)} \quad (28)$$

2.6.2 Tratamiento aeróbico. El sistema es del tipo de lodos activados convencionales completamente mezclado utilizando aereadores superficiales para el suministro de oxígeno y la biodegradación de la materia orgánica.

Para escoger este sistema se debe examinar aspectos como:

- a) Eficiencia (alrededor del 90-95% de remoción de los parámetros más indicativos de contaminación en este caso como son la DBO y los sólidos suspendidos).
- b) Dimensiones de las unidades de tratamiento se adaptan al área de terreno disponible.

El sistema consiste en una oxidación biológica de la materia orgánica la cual se realiza en una unidad de reacción denominada aerador o reactor biológico. En dicha unidad se hace pasar el líquido residual poniéndose en contacto éste con el lodo de alta concentración microbiana procedente de un sedimentador. En la unidad de reacción se le proporciona algo al licor mezclado a través de difusores de aire, los cuales estarán conectados a sopladores de aire proporcionando de esta forma el oxígeno requerido para estabilizar la materia orgánica, la cual se transforma casi por completo en dióxido de carbono, agua y formas estables del nitrógeno; por lo tanto, se genera biogás. Del estanque de aeración el líquido pasa a través de un sedimentador donde se asentará un alto porcentaje de las partículas en suspensión, a este separador se le agrega un coagulante, para separar las partículas suspendidas y esa masa que es separada se lleva a un tanque de almacenamiento o tanque de lodo. Los lodos sedimentados son recolectados en tolvas; parte de ellos son recirculados al reactor para proporcionar el lodo activo y el excedente es enviado a un digestor aerobio de lodos donde se completará el proceso de oxidación de los lodos mediante el

oxígeno de aire inyectado a través de difusores conectados a sopladores de aire para ser enviados luego a un espesador de lodos y de allí a los lechos de secado. Finalmente serán dispuestos como un desecho sólido o para abono.

El agua de los reactores de igual manera puede ir a un mezclador de paletas, donde se mezcla el cloruro férrico con el agua, se le inyecta polímero como coagulante. Esa separación de sólidos se da por un sistema hidráulico y físico, esos sólidos son depositados en una tolva y son llevados a un filtro prensa. Ese lodo se almacena en un tanque de mezcla junto con tierra efusoria, y se introduce al filtro prensa y sale un lodo más seco (tortas), se descarga y se lleva a los botaderos sanitarios pudiendo ser utilizados como se dijo anteriormente como abono.

En el sistema biológico se introducen las aguas residuales domésticas, ya que éstas a parte de requerir tratamiento, son las que aportarán la biomasa actuante del sistema; es decir, los microorganismos que realizarán la oxidación de la materia orgánica en medio aerobio.

- Dimensiones

1) Volumen del reactor biológico

$$V = \frac{Q Y}{CSA e K} \quad (29)$$

donde Q es el gasto a través del sistema [m³/día], K factor de carga [día⁻¹], Y el DBO del afluente al sistema [kg/kg], CSA la concentración de sólidos de aeración en el licor mezclado [kg/kg] y e el porcentaje de materia volátil

2) Cálculo del período de retención hidráulico

$$Pr = \frac{V}{Q} \quad (30)$$

3) Concentración de sólidos de recirculación de lodos (CSR)

$$Q CSR = (R + Q) CSA \quad (31)$$

$$Q = R$$

$$CSR = \frac{(Q + Q) CSA}{Q} \quad (32)$$

$$CSR = 2 CSA \quad (33)$$

4) Cálculo de la producción de lodos

$$\text{Producción de lodos} = \frac{(\text{fracción másica})(\text{flujo másico})(0,95)}{(\text{peso específico})(1 - \text{humedad})} \quad (34)$$

5) Cálculo de los requerimientos de oxígeno

$$RO_2 = a' B E + b' s' \quad (35)$$

donde RO₂ son los kg O₂ requeridos en el sistema por día [kgO₂/día], B los kg DBO agregados al sistema por día [kg/día], E la eficiencia en remoción de DBO del sistema como decimal [90-95%], a' el coeficiente que representa la fracción de DBO removida usada para suministrar energía para el crecimiento, b' el coeficiente que representa la rata de respiración endógena y s' los kg de sólidos suspendidos volátiles contenidos en el aerador

$$s' = e (CSA)(V) \quad (36)$$

Los parámetros están acotados: $0,35 < a' < 0,55$ y $0,01 < b' < 0,12$

2.7 Desinfección. El efecto que se busca en esta etapa es el abatimiento significativo de gérmenes coliformes tales como Salmonella o Siguella mediante el empleo de cloro. La adición de cloro se realiza mediante bombas dosificadoras en un tanque de contacto para asegurar la reacción del cloro con el efluente procedente del clarificador secundario.

2.7.1 Determinación del volumen. El parámetro de diseño es el período de retención para el caudal medio.

$$V = Pr \cdot Q \quad (37)$$

donde Pr es el período de retención hidráulico [h] y Q caudal volumétrico [m^3/h].

Se fija el largo, ancho, profundidad total y útil, posteriormente se continúa con el cálculo de la cantidad aproximada de cloro requerido. Para ello se asume una retención aproximada de 8 mg/l, recomendados para un agua residual pre-tratada mediante un lodo activado convencional. La cantidad exacta de cloro vendrá dada por un ensayo experimental de la demanda del mismo:

$$Cl_2/día = (\text{Caudal de agua residual}(l/día)) \cdot (\text{Retención asumida}(mg/l) \cdot 10^{-6}) \quad (38)$$

En el mercado se trabaja con hipoclorito de calcio (granulado), con el 65% cloro y el hipoclorito de sodio que viene en soluciones de concentraciones entre el 10% y el 14%. Estas cantidades deben ser estimadas en l/h según sus concentraciones, para ello se utiliza un dosificador.

2.8 Digestor aerobio de lodos. En esta etapa se estabilizan los lodos generados durante la biodegradación realizada en el reactor aerobio y las natas del separador de grasas y aceites. La digestión aerobia se puede definir como la destrucción de componentes orgánicos degradables de los lodos por mecanismos biológicos aerobios. La digestión aerobia se basa en el principio de la respiración endógena, esto es, el alimento disponible para los microorganismos es mínimo, por lo que dichos microorganismos empiezan a consumir su propio protoplasma. El material que permanece después de la digestión, es de componentes con bajo nivel energético y biológicamente estables. Es por ello que el lodo digerido se puede disponer sin ninguna dificultad.

Existen varios tipos de digestión aerobia, los cuales se presentan a continuación:

2.8.1 Digestión convencional. Se realiza principalmente en una sola fase, para lo cual se utiliza los llamados digestores convencionales, requieren de un intercambiador de calor para el calentamiento del fango y lograr así el proceso de digestión del fango crudo. Como resultado de la digestión, el fango se estratifica formando una capa de sobrenadante por encima del fango digerido, y experimenta un aumento de la mineralización.

2.8.2 Digestión de una fase y alta carga. En este caso la carga de sólidos es mayor al proceso anteriormente señalado, también se debe calentar para optimizar la velocidad de digestión, los fangos se mezclan mediante recirculación de gas, o utilizando mezcladores mecánicos, bombeo. Con este proceso

los sólidos se reducen en un 40-50% liberándose en forma de gas.

2.8.3 Digestión en dos fases. El proceso utiliza un primer tanque para la digestión y se equipa con dispositivos para el mezclado. El segundo tanque se utiliza para el almacenamiento y concentración del fango digerido y para la formación de un sobrenadante relativamente clarificado.

Para el diseño de sistemas de tratamiento de lodos, se requiere de los siguientes conceptos:

° Tiempo medio de retención celular. Se sabe que los productos finales de la respiración y oxidación que se producen durante la digestión son metano y dióxido de carbono, el metano producido se puede calcular con la ecuación:

$$VCH_4 = (0,3516) [(So - S) (1/1000) - 1,42 Px] \quad (39)$$

$$q_c = (1/k_d) [1 + \{Y [(So - S)(Q)(1/1000)]\} / Px] \quad (40)$$

donde VCH_4 es el volumen de metano [m^3], So DBO última del afluente [mg/l], S DBO última del efluente [mg/l], Px masa neta de tejido celular producida diariamente [kg/día], Y el coeficiente de producción. [$kg_{salida}/kg_{entrada}$], k_d coeficiente endógeno [$día^{-1}$] y q_c tiempo medio de retención celular [día].

° Reducción de volumen. Se ha podido observar que conforme se lleva a cabo la digestión, recirculación y extracción se puede reducir el volumen del lodo remanente en forma casi exponencial. Para calcular el volumen del digestor necesario simplemente se gráfica el volumen del lodo remanente versus el tiempo, pudiendo calcularse éste utilizando la expresión.

$$V = [V_f - (2/3)(V_f - V_d)] t \quad (41)$$

donde V es el volumen del digestor [m^3], V_f volumen de lodo crudo añadido diariamente [m^3], V_d volumen de lodo digerido extraído diariamente [m^3] y t tiempo de digestión [día].

2.9 Espesador de lodos. Se crea para cubrir la necesidad de reducir la cantidad de lodos, con el fin de eliminar los inconvenientes de disposición, confinamiento y manejo de materiales peligrosos. El proceso se lleva a cabo por gravedad específica a muy bajo costo, ya que se puede descargar con una densidad del 12 al 15% de sólidos por peso. Facilita la transportación y la disposición.

Para diseñar el espesador de lodos primero se calcula el área de espesador:

$$A_e = \frac{M_{l_0}}{T_e} \quad (42)$$

donde A_e es el área de espesamiento [m^2], M_{l_0} cantidad de lodos producidos en el sistema [kg/día] y T_e la tasa de espesamiento [$kg/(m^2 \cdot día)$].

Una vez obtenida el área se determina el diámetro del espesador:

$$D = \sqrt{\frac{4 A_e}{\pi}} \quad (43)$$

La altura del espesador se calcula conociendo el volumen de lodos producidos por día en el o los reactores presentes en el sistema:

$$h = \frac{Ae}{VI} \quad (44)$$

donde VI es el volumen de lodos producidos por día [m³/día].

Otro parámetro importante de calcular es el tiempo de retención hidráulico de los lodos dentro del espesador:

$$Th = \frac{Ae h}{VI} \quad (45)$$

donde Th es el tiempo de retención hidráulico [h].

Con los datos obtenidos anteriormente se recurre a los fabricantes de estos equipos y se selecciona el espesador de lodo más adecuado.³

2.10 Deshidratación. Previo acondicionamiento, el lodo resultante de la digestión se comprime en un filtro prensa de banda y el agua intersticial liberada se retorna al reactor aerobio. El lodo una vez deshidratado se envía por medio de una banda transportadora a un contenedor para su disposición final. Este proceso se realiza a través de un filtro prensa.

2.10.1 Filtro Prensa. El filtro prensa más común es el filtro de placas y marcos. Las placas, marcos y telas se presanan unos con otros y la suspensión entrante pasa a través de los canales que conducen a los marcos. La torta es depositada contra las telas filtrantes que constituyen las caras de los marcos, el filtrado fluye a través de los surcos existentes en las caras de las placas y al exterior por medio de unas aberturas practicadas en la parte superior de las mismas. Cuando los marcos están llenos de torta puede efectuarse el lavado introduciendo el líquido de lavado por las placas lavadoras. Dicho líquido fluye a través de la torta en todo su espesor. Luego se abre la prensa, se separa el sólido y empieza otro ciclo de filtración.

La ecuación básica para filtración es:

$$\frac{1}{A} \frac{dV}{d\theta} = \frac{\Delta P}{\mu \alpha (M + Me)} \quad (46)$$

donde V es el volumen de filtrado [m³], A área de filtrado [m²], θ tiempo [s], μ viscosidad [kg/(m.s)], α resistencia específica de la torta [m/kg], M masa de sólido depositada [kg], Me masa de la torta hipotética depositada [kg], y ΔP caída de presión [kPa].

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Empresas POLAR, Los Cortijos, “Tratamiento Anaeróbico”. Caracas, 2000
 - (2) Metcalf&Eddy, “Ingeniería de Aguas Residuales”. 3^{ra} Edición. McGraw Hill. México, 1996
 - (3) W.S.Tyler, “Manual de Tela Metálica Tyler”. Catálogo 74. Edición 1990, pp.37
- Fuentes Digitales
- (4) A.C.S Medio Ambiente. “Plantas Depuradoras de Agua”. Disponible en: <http://www.acsmedioambiente.com>
 - (5) “La depuración de aguas residuales E.D.A.R.” Disponible en: <http://www.geocities.com/rainforest>
 - (6) Secretariado de Manejo del Medio Ambiente para América Latina y el Caribe. “Cap. 3: Planta de tratamiento de aguas

servidas”. Disponible en: <http://www.ems-sema.org/castellano/proyectos>

- (7) Ruiz Jiménez, Miguel; F. Cueto Jiménez; J. Bueno Sabio; Roldan Ruiz. “Las aguas residuales”. Disponible en: <http://www.vnet.ve>
- (8) “Instalaciones de la línea de fangos E.D.A.R.I” <http://www.emersa.com>
- (9) “Medio Ambiente, Conoce tu entorno”. Disponible en: <http://www.waytoleoncom./medioambiente/edar2bhtm>

³ Tablas de fabricantes en referencia (4)