

105
-2ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO DE
UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES, A BASE DE ZANJAS DE
OXIDACION**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

JOSE NAVARRETE TOVAR





UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

	Hoja
I. INTRODUCCION	1
I.1 Antecedentes	1
I.2 Características de las aguas residuales	3
II. PROCESOS DE TRATAMIENTO MAS ADECUADO A LAS CONDICIONES NACIONALES	8
II.1 Tratamiento Preliminar	8
II.2 Tratamiento Primario	10
II.3 Tratamiento Secundario	13
II.4 Tratamiento Terciario	20
II.5 Costos de Construcción, Operación y Mantenimiento de diferentes procesos de tratamiento de aguas residuales.	20
II.6 Selección de los procesos más adecuados a las condiciones nacionales.	23
III. EL TRATAMIENTO A BASE DE ZANJAS DE OXIDACION	28
III.1 Descripción del Sistema de tratamiento	28
III.2 Pretratamiento	31
III.3 Tratamiento	31
IV. RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO A BASE DE ZANJAS DE OXIDACION	45
V. CONCLUSIONES	59
VI. BIBLIOGRAFIA	60

I. INTRODUCCIÓN

I.1 ANTECEDENTES

En el transcurso del tiempo, los recursos hidráulicos han tenido que hacer frente a las demandas que ha establecido el crecimiento demográfico y al acelerado desarrollo urbano, industrial y agropecuario, así como a la recepción de aguas residuales.

En consecuencia de estos usos y de la descarga indiscriminada de aguas residuales, con masas de contaminantes cada vez más grandes y de mayor complejidad, gran parte del recurso hidráulico existente se encuentra deteriorado en su calidad.

En México existen ciertas zonas críticas en las cuales está disminuyendo rápidamente la disponibilidad de los recursos hidráulicos como consecuencia de la creciente demanda motivada por la expansión de los grandes centros urbanos e industriales, y por los requerimientos de mejoramiento de la calidad impuestos por las normas de salud pública y la complejidad de los procesos industriales. Por otra parte, aumenta paralelamente la evacuación de residuos líquidos y sólidos en los ríos, lagos y mares hasta un punto tal, que ya no se puede confiar a los fenómenos de autodepuración el efecto de restablecer por sí solos las condiciones originales de este recurso, de los cuales depende la disponibilidad para un uso continuado y confiable.

El concepto modernista de calidad del agua establece precisamente que el nivel de calidad que debe mantenerse en los cuerpos receptores está en función de los usos a que se destinan, y por lo tanto, se habla de contaminación cuando esa calidad sufre algún deterioro que imposibilita dichos usos. De aquí que para poder obtener el máximo aprovechamiento del recurso, es indispensable proteger las aguas naturales contra la contaminación, mediante la adopción de medidas reglamentarias para el control de calidad de las descargas de aguas residuales y para el adecuado uso y conservación del recurso.

Durante el régimen del general Lázaro Cárdenas, se elaboró el "Reglamento para controlar la contaminación de las aguas naturales ocasionada -- por los establecimientos industriales y comerciales", el cual fue publicado en el diario oficial del día 6 de Noviembre de 1940.

En 1971, el Congreso de los Estados Unidos Mexicanos, decretó la "Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental ", publicada en el diario oficial del 23 de marzo de 1971.

En 1984, fue decretada la "Ley Federal de Protección al Ambiente", la que derogó a la antes mencionada. En su capítulo Tercero, la Ley trata sobre la protección de las aguas naturales, para el control de su contaminación.

1.2 CARACTERISTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES.

Las aguas residuales son las aguas que han sido utilizadas por una población. Proviene básicamente de varias fuentes dentro de las cuales podemos considerar: desechos humanos y desperdicios caseros, corrientes de escurrimiento superficial y desechos industriales entre los más significativos.

Siendo el agua un solvente universal, casi no existen sustancias que en mayor o menor grado no se disuelvan en ella y es pues fácil imaginar la enorme cantidad y variedad de sustancias que pueden encontrarse disueltas en el agua.

Las aguas residuales pueden contener millones de bacterias por mililitro: bacilos anaerobios, esporulados, coliformes, estreptococos, bacterias del grupo *Proteus* y otros tipos que proceden del tracto intestinal humano.

Las características de las aguas residuales se clasifican, de una manera muy general, en físicas, químicas y biológicas. Para conocer estas características se utilizan unos parámetros, dentro de los cuales podemos mencionar los siguientes: contenido total de sólidos, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno y bacterias coliformes y de ser necesario se pueden utilizar otros factores como: temperatura, color, olor, turbiedad, pH, etc.

A través de la determinación de esas características, es posible conocer el grado de agresividad de las aguas residuales, lo cual es necesario para determinar y diseñar el tipo de tratamiento al que es necesario someterlas y así, evitar efectos adversos en los cuerpos receptores o en los sitios donde finalmente se dispongan.

Características Físicas.

Las características físicas más importantes de las aguas residuales son:

a) *Contenido total de sólidos*

Es la característica física más importante de las aguas residuales, el cual comprende la materia flotante, materia en suspensión, materia coloidal y en solución.

El contenido de sólidos totales en una muestra de agua se define - como el residuo que permanece después de someterla a evaporación a 103-105°C.

b) *Temperatura*

La temperatura del agua es un parámetro muy importante debido a su efecto sobre la vida acuática, las reacciones químicas, rapidez de reacción y lo adecuado del agua para usos benéficos. Por ejemplo, los incrementos de temperatura pueden causar cambios en las especies de peces existentes en el agua.

c) *Color*

Bajo condiciones normales, el color de las aguas residuales es generalmente gris, con tendencia hacia el negro a medida que se presentan condiciones de septicidad. El color puede variar además dependiendo del tipo de descargas industriales presentes.

d) *Olor*

Los olores en un desecho son debidos a los gases producidos por la descomposición de la materia orgánica. El olor característico de un desecho es debido al sulfuro de hidrógeno producido por los microorganismos anaeróbicos, los cuales reducen los sulfatos a - sulfuros. Las aguas de desechos industriales pueden contener compuestos olorosos o que producen olor en el proceso de tratamiento del desecho.

c) *Turbiedad*

Esta característica de las aguas residuales es debido a la fracción suspendida de los sólidos contenidos en aquellas.

La determinación de la turbiedad ayuda a conocer la calidad de las aguas en cuanto al contenido de materia coloidal, la cual interfiere en la transmisión de la luz (dispersándola o absorbiéndola).

Características Químicas.

Las características químicas de las aguas residuales pueden afectar de manera diferente el medio ambiente, dependiendo de la sustancia que se trate. La materia orgánica puede abatir los niveles de oxígeno disuelto en cuerpos receptores; los nutrientes pueden causar eutroficación en lagos y embalses; las sustancias tóxicas pueden afectar las cadenas tróficas y llegar al hombre, etc.

a) Materia orgánica

La materia orgánica presente en las aguas residuales tiene su origen en organismos vegetales o animales (proteínas, carbohidratos, grasas y aceites), así como en compuestos sintetizados producto de la actividad del hombre, tales como fenoles, surfactantes, plaguicidas, etc.

La determinación del contenido de materia orgánica en las aguas residuales puede llevarse a cabo empleando diferentes metodologías - perfectamente establecidas tales como la Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), etc.

* Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Esta prueba se emplea para medir el contenido de materia orgánica de las aguas naturales y de desechos. el oxígeno equivalente de la materia orgánica e inorgánica, que puede ser oxidado se mide -- con un agente químico fuertemente oxidante en el medio ácido.

* Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

El parámetro de contaminación más usado y aplicado a aguas superficiales y de desechos es la DBO a los 5 días (DBO₅). Esta deter

minación comprende la medición del oxígeno disuelto empleado por los microorganismos en la oxidación bioquímica de la materia orgánica.

Es importante su determinación debido a que nos da la cantidad - aproximada de oxígeno que se necesita para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente.

b) Materia Inorgánica

Los componentes inorgánicos de las aguas naturales y de desecho - son importantes para establecer y controlar la calidad del agua. La concentración de sustancias inorgánicas en el agua se incrementa con la formación geológica con la cual el agua se pone en contacto, y por las aguas de desecho tratadas o no tratadas que se descargan en ella.

Entre de los componentes inorgánicos de las aguas residuales tenemos a los Cloruros, Nitrógeno, Fósforo, Azufre, Compuestos Tóxicos, etc.

Los compuestos tóxicos se originan generalmente de los procesos industriales. en esta categoría se incluyen compuestos tales como - cianuros, cromatos, ciertas sustancias orgánicas, etc., los cuales pueden afectar a los microorganismos utilizados en los sistemas de tratamiento biológico, disminuyendo su eficiencia y en ocasiones - eliminándolos por completo.

Características Biológicas.

En aguas residuales se encuentran microorganismos saprófitos, que degradan la materia orgánica en compuestos simples utilizando o no oxígeno disuelto, y microorganismos patógenos agregados a las aguas, que mueren rápidamente al encontrarse en un medio o habitat extraño. Los patógenos sin embargo, sobreviven un tiempo suficientemente prolongado para infectar a - otros usuarios del agua.

En general las características bacteriológicas de las aguas residuales se miden en pruebas para organismos indicadores como coliformes totales, estreptococos fecales, etc.

II. PROCESOS DE TRATAMIENTO MAS ADECUADOS A LAS CONDICIONES NACIONALES.

Los procesos que se llevan a cabo para el tratamiento de aguas residuales, siguen los de autopurificación de una corriente contaminada. Los dispositivos para el tratamiento solamente localizan y limitan estos procesos a un área adecuada, restringida y controlada, y proporcionan las condiciones favorables para la aceleración de las reacciones físicas y bioquímicas.

II.1 TRATAMIENTO PRELIMINAR

Su objetivo principal consiste en separar de las aguas residuales, aquellos constituyentes que pudiesen obstruir o dañar las bombas, o interferir con los procesos subsecuentes del tratamiento.

Para alcanzar los objetivos de un tratamiento preliminar, se emplean comúnmente los siguientes dispositivos:

- 1) Rejas y Cribas de barras
- 2) Desmenuzadores
- 3) Desarenadores

Rejillas y Cribas

Las aguas residuales son conducidas a la planta, en donde serán sometidas a un tratamiento preliminar o preparatorio antes del proceso de degradación.

Como primer paso se les hace pasar a través de rejillas, formadas por barras usualmente espaciadas desde 2 hasta 15 cm.

Estos dispositivos retienen los materiales de mayor tamaño, eliminándolos del caudal que llegará a la planta, con lo cual se evitan tapazones en la tubería y en las bombas.

Existe una gran variedad de formas de rejillas, según el tipo de aguas por tratar:

- a) Horizontales, verticales, o inclinadas
- b) Finas, medianas y gruesas
- c) Fijas o móviles
- d) De limpieza manual o mecánica
- e) Rejillas radial con triturador de martillo

Desmenzadoras o trituradoras de residuos.

Los molinos, contadores y trituradores, son dispositivos que sirven para romper o cortar los sólidos hasta un tamaño tal que permita que -- sean reintegrados a las aguas residuales sin peligro de obstruir las bombas o las tuberías, o afectar los sistemas de tratamiento posteriores.

Desarenadores

Las aguas residuales contienen, por lo general cantidades relativamente grandes de sólidos inorgánicos como arena, cenizas y grava, a los que generalmente se les denomina arenas. Las arenas pueden dañar a las bombas por abrasión y causar serias dificultades operatorias en los tanques de sedimentación y en la digestión de los lodos, por acumularse alrededor de las salidas causando obstrucciones. Por esta razón se eliminan estos materiales por medio de la cámaras desarenadoras. Estas se localizan antes de las bombas o de los desmenzadores, y si su limpieza se lleva a cabo mecánicamente, deben ser precedidos por cribas de barras y rastrillos gruesos. Los desarenadores se diseñan generalmente en forma de grandes canales. En estos canales la velocidad se disminuye lo suficiente como para que los sólidos inorgánicos se sedimenten. La velocidad ideal para este tipo de canales es de 30cm/seg.

II.2 TRATAMIENTO PRIMARIO

Este término engloba todos los dispositivos de tratamiento, cuya finalidad es la eliminación de sólidos mediante los procesos de: Sedimentación, flotación, filtración, floculación y precipitación. De éstos, el más usado y que mejor se ajusta a las características de las aguas residuales municipales es, la sedimentación, motivo por el cual a continuación, se describirán algunos dispositivos de tratamiento que utilizan este proceso.

Fosas Sépticas.

Están diseñadas para mantener a las aguas residuales a una velocidad mínima y bajo condiciones anaeróbicas por un periodo de 12 a 24 horas, durante el cual se efectúa la eliminación de sólidos sedimentables. Estos sólidos se descomponen en el fondo del tanque produciendo gases que arrastran a los sólidos y los obligan a subir a la superficie, permaneciendo -- como una nata o capa hasta que escapa el gas y vuelven a sedimentarse. Esta continua flotación y subsecuente sedimentación de sólidos los lleva con la corriente de aguas residuales hasta la salida, por lo que eventualmente salen algunos sólidos del efluente, frustrando así parcialmente el propósito del tanque. Debido a los largos periodos de retención y a la mezcla con los sólidos en descomposición, las aguas residuales salen del tanque en condiciones sépticas que afectan un tratamiento secundario.

Los principales factores que determinan su diseño son:

- a) Tiempo de retención de aguas residuales.
- b) Capacidad de almacenamiento de lodos.
- c) Espacio libre para acumulación de natas.

Tanques de doble acción (Tanque Imhoff)

Son dispositivos de tratamiento que permiten la separación de sólidos sedimentables y su digestión en un compartimiento inferior. Están diseñados de manera tal que se evita que los gases producto de la digestión molesten al proceso de sedimentación.

Estos tanques, pueden ser rectangulares o circulares, los que a su vez están seccionados en tres compartimientos o cámaras:

- 1) La sección superior que se conoce como cámara de derrame continuo o compartimiento de sedimentación.
- 2) La sección inferior que se conoce como cámara de digestión de lodos.
- 3) El respiradero y cámara de natas.

Durante la operación, todas las aguas residuales fluyen a través de la cámara de sedimentación. Los sólidos se depositan en el fondo de este compartimiento que tiene una pendiente de 1.4:1, resbalando y pasando por una ranura que hay en el fondo. Una de las partes inclinadas del fondo se prolonga cuando menos unos 15 cm, más allá de la ranura, lo cual hace de trampa, que impide que los gases o partículas de lodos que hay en la cámara inferior se ponga en contacto con las aguas residuales o interfieran en el proceso de sedimentación. Los gases y partículas ascendentes son desviadas hacia la cámara de natas o área de ventilación.

El Tanque Imhoff no tiene problemas mecánicos y es relativamente económico y fácil de operar. Provee la sedimentación y digestión de lodos en una sola unidad y produce un efluente primario de calidad satisfactoria eliminando de 40 a 60% de sólidos suspendidos.

Para el diseño de estas unidades de tratamiento, además de conocer las características del agua residual a tratar, es necesario definir los siguientes factores:

- a) Carga superficial en el área de sedimentación
- b) Tiempo de retención del agua en el área de sedimentación
- c) Temperatura media en la cámara de digestión
- d) Tiempo de retención de lodos
- e) Características de los sólidos sedimentados
- f) Eficiencia esperada en la remoción de lodos.
- g) Superficie requerida para secado de lodos.

Tanques de Sedimentación Simple

Estos sistemas de tratamiento tienen en forma separada los procesos de sedimentación y de digestión de lodos.

La separación de sólidos se lleva a cabo por el proceso de sedimentación, mediante tanques circulares o rectangulares en donde el cambio de -- condiciones de flujo permite la sedimentación de sólidos en suspensión, más que se colectan en el fondo, ya sea por inclinación de las paredes o mediante equipo mecánico. La evacuación de estos sólidos debe de hacerse con tinuamente o a intervalos frecuentes para no dar tiempo a que se desarrolle la descomposición de lodos y por consiguiente la formación de gases.

Los factores que deben considerarse para el diseño de estas unidades - de tratamiento son:

- a) Características del agua residual a tratar
- b) Carga superficial
- c) Tiempo de retención
- d) Altura mínima de la pared mojada
- e) Eficiencia en la remoción de sólidos

11.3 TRATAMIENTO SECUNDARIO

Este tratamiento es usado para aquellos sistemas que aprovechan la propiedad de algunos microorganismos que en su proceso metabólico degradan la materia ya sea por oxidación o reducción, dependiendo de las condiciones anaerobias que prevalezcan en el sistema.

Los dispositivos que se usan para el tratamiento secundario, pueden ser de medio fijo (filtros rociadores, discos biológicos) o de medio suspendido (lagunas de estabilización, lodos activados, zanjas de oxidación).

Lagunas de estabilización.

Recibe este nombre cualquier estanque o grupo de estanques previstos y proyectados para llevar a cabo un tratamiento biológico.

La descomposición de la materia orgánica puede producirse en condiciones anaerobias o aerobias. El proceso aerobio requiere una aportación continua de oxígeno disuelto libre y es el método más eficaz para reducir el contenido orgánico de los residuos líquidos diluidos. Sin embargo, cuando hay sólidos que han de pasar al estado líquido o cuando la concentración de residuos es muy grande como en el caso de la materia orgánica sólida sedimentada procedente de aguas domésticas, el proceso anaerobio resulta extremadamente efectivo.

Proceso Aerobio

En el metabolismo aerobio de la materia orgánica gran parte del carbono sirve de fuente de energía para los microorganismos y al ser respirado produce anhídrido carbónico. Los microorganismos que intervienen son en su mayoría bacterias pero también hay hongos y protozoos.

Proceso Anaerobio

La descomposición de la materia orgánica por putrefacción tiene

lugar durante la fermentación anaerobia. Este proceso es bifásico. En primer lugar un grupo especial de bacterias productoras de ácido llamadas heterotróficas facultativas descomponen la materia orgánica en ácidos grasos, al dehídos, alcoholes, etc. A continuación otro grupo de bacterias productoras de metano transforman los productos intermedios en gas metano, amoníaco, an hidrido carbónico e hidrógeno. El proceso anaerobio lo mismo que el aerobio convierte el carbono, el nitrógeno, el fósforo y otros nutrientes en protoplasma celular, sin embargo los mecanismos de la descomposición anaerobia -- son enormemente complejos y difícil de entender.

El proceso anaerobio también requiere oxígeno, pero éste procede de los compuestos químicos y no del oxígeno libre disuelto.

El término lagunas de estabilización engloba un variado número de lagu nas que aprovechan los procesos antes mencionados:

- 1) Lagunas anaerobias
- 2) Lagunas aerobias
- 3) Lagunas facultativas
- 4) Lagunas de maduración

Lagunas anaerobias. Funcionan esencialmente como un digestor que no requiere oxígeno disuelto ya que las bacterias anaerobias descomponen los complejos residuos orgánicos. En ellas la producción de ácidos orgánicos y la fermentación de éstos, con producción de metano, son las reacciones dominantes.

Lagunas aerobias. Son aquellas en que las bacterias aerobias descomponen por oxidación los residuos orgánicos, mientras que las algas por proceso de fotosíntesis y por medio de la interfase aire-agua, se provee el oxígeno suficiente para mantener un ambiente aerobio.

Lagunas facultativas. Son aquellas en que la estratificación, principalmente térmica, da como resultado que las reacciones anaerobias predominan en las capas inferiores y que la oxidación aerobia junto con la fotosínte

sis ocurra en zonas superiores. En ella se puede encontrar organismos aerobios facultativos y anaerobios.

Lagunas de Maduración. Son semejantes a las facultativas excepto que usualmente se localizan después de ellas y se utilizan exclusivamente para la reducción de organismos patógenos.

Los criterios para el diseño de lagunas de estabilización, se basan en los siguientes factores:

- a) Volumen de aguas residuales a tratar
- b) Características del agua residual
- c) Contenido de sólidos
- d) Carga Superficial
- e) Tiempo de retención
- f) Contenido de materia orgánica
- g) Temperatura
- h) Profundidad

Además, el diseño hidráulico debe de tomar en cuenta la precipitación pluvial, la evaporación y las características de permeabilidad del terreno.

Lodos Activados

El desarrollo del proceso de los lodos activados ha marcado un proceso importante en el tratamiento secundario de las aguas residuales.

Las aguas residuales contienen sólidos suspendidos y coloidales, que al ser agitados por aeración, forman núcleos sobre los cuales se desarro-

lla la vida biológica, pasando gradualmente a formar partículas más grandes - de sólidos que se conocen como lodos activados. Las aguas residuales por sí solas no contienen la cantidad de lodos activos para llevar a cabo la degradación biológica de la carga orgánica que llevan consigo, es necesario por esto hacer un cultivo de lodos que estará continuamente en recirculación de manera que se tenga una concentración uniforme y constante de lodos activados, suficiente para llevar a cabo una buena degradación biológica. Sin embargo no debe permitirse que los flocúlos de lodos activados se hagan demasiados grandes y pesados ya que tenderán a volverse inactivos y anaeróbicos y difíciles de mantener en suspensión.

Los lodos activados deben mantenerse en suspensión durante su período de contacto con las aguas residuales a tratar, mediante algún método de agitación. Por lo tanto el proceso de lodos activados consta de las siguientes etapas:

- 1) Mezclado de los lodos activados con las aguas residuales que se van a tratar
- 2) Aeración y agitación de este licor mezclado durante el tiempo que sea necesario.
- 3) Separación de los lodos activados del licor mezclado.
- 4) Recirculación de la cantidad adecuada de lodos activados para mezclarlos con las aguas residuales.
- 5) Disposición del exceso de lodos activados.

El proceso convencional de lodos activados consta de: un tanque de sedimentación primaria, un tanque de aeración normalmente con un tiempo de retención de 6 a 8 horas y un tanque de sedimentación secundaria y un sistema de recirculación de lodos activados.

La obtención de las bases de diseño para el proyecto de este tipo de sistema de tratamiento se llevan a cabo mediante pruebas de tratabilidad que consisten en la obtención de constantes de degradación biológica, para lo cual es necesario hacer estas pruebas en las aguas residuales que más -

adelante formarán el influente de la planta de tratamiento a proyectar.

Aeración Extendida

El proceso de aeración extendida opera en la fase de respiración endógena de la curva de crecimiento de los microorganismos, la cual requiere relativamente de una baja carga orgánica y un gran tiempo de aeración. En estos sistemas deben prevalecer las condiciones aerobias, esto se logra mediante una fuerte agitación mecánica que produzca la turbulencia necesaria para mantener todos los sólidos en suspensión, evitando que se produzca sedimentación de lodos que tenderían a descomponerse en forma anaerobia.

La principal ventaja de estos dispositivos de tratamiento se encuentra en que los lodos son estabilizados de manera que no requieren de su posterior digestión y exclusivamente se procederá a su extracción y posterior secado ya sea en lechos de grava y arena, mediante filtración al vacío u otro procedimiento.

El proceso de aeración extendida en algunos casos se complementa con un tanque de sedimentación posterior al de aeración y mediante equipos de bombeo se recircula el material sedimentado aumentando con ello la eficiencia del proceso. La sedimentación primaria es omitida en este proceso, -- para simplificar el tratamiento y disposición de los lodos.

Zanjas de Oxidación

La zanja de oxidación más simple consiste en un canal continuo aireado mecánicamente, en el cual las aguas residuales crudas se vierten directamente. Se dispersan rápidamente en una mezcla de aguas negras y lodos, y circulan con ellos a través de la zanja. Una velocidad de desplazamiento aproximadamente de 1 pps (0.30 mps) mantiene a los floculos en suspensión. El rotor es una modificación del aireador de cepillos de Kessener, pero corre a través del canal en vez de a lo largo de sus lados.

En las fosas o zanjas diseñadas para una operación cíclica, las profundidades se encuentran entre 1 y 1.5 m y los periodos de retención se extienden de 1 a 3 días. No se extrae efluente hasta que el nivel de aguas en el canal llega al nivel máximo de operación. Se corta entonces el efluente, el rotor se detiene, se permiten una o dos horas de reposo para que los sólidos se sedimenten, el sobrenadante clarificado se extrae mediante un canal para el efluente, y el exceso de lodos, si se desea, se levanta de una sección de la fosa a los lechos de secado. Debido a que los sólidos se estabilizan bien durante el largo periodo de aireación, ya no son putrescibles y se deshidratan con facilidad. La operación cíclica puede dar lugar a una operación continua mediante la adición de una tanque de sedimentación del cual se retornan a la zanja las cantidades útiles de lodos.

En una forma muy general los factores que deben considerarse en su diseño son:

- a) Carga orgánica.
- b) Necesidades de oxígeno
- c) Tiempo de retención de las aguas residuales a tratar.
- d) Temperatura
- e) Profundidad

Filtros Rociadores

Es una estructura generalmente circular, que pone en contacto a las aguas residuales sedimentadas, con cultivos biológicos que están fijos en el medio.

Los filtros rociadores son unidades resistentes que no se dañan fácilmente por cargas violentas, distinguiéndose por la estabilidad de su funcionamiento y por ser capaces de resistir cambios bruscos en caudal y en carga contaminante. Como en todas las unidades de tipo biológico, la temperatura les afecta; por eso el clima frío abate la actividad biológica del filtro.

El filtro rociador típico está compuesto de tres partes principales.

- 1) Un mecanismo para distribuir uniformemente las aguas residuales sobre la superficie del filtro.
- 2) Un medio de contacto que debe tener características tales como homogeneidad, dureza e insoluble en los constituyentes de las aguas residuales y una forma que evite que se obstruyan los lugares por donde fluye el agua y el aire.
- 3) Un sistema colector que a su vez proporcione el aire suficiente para que existan condiciones aerobias en todo el medio de contacto.

Las bases generales de diseño para este tipo de proceso son:

- a) Carga hidráulica
- b) Carga orgánica de proceso
- c) Temperatura
- d) Superficie específica del medio de contacto
- e) Profundidad

II.4 TRATAMIENTO TERCIARIO

Con los tratamientos anteriores, a las aguas residuales se les remueve un alto porcentaje de los sólidos suspendidos y de la materia orgánica que se le adicionó durante su uso, pero aún no es apta para descargarse a algunos cuerpos receptores especialmente delicados o para su aprovechamiento en algunos usos. Algunos de los contaminantes aún presentes son los siguientes nutrientes: nitratos y fosfatos y sustancias orgánicas e inorgánicas diversas. Si es necesario debe someterse al agua a un tratamiento más completo, al que se denomina tratamiento terciario. Entre los procesos empleados en este nivel de tratamiento se encuentran filtros de carbón activado, intercambiadores iónicos, ósmosis inversa, etc., etc.

II.5 COSTOS DE CONSTRUCCIÓN, OPERACION Y MANTENIMIENTO DE DIFERENTES PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

En esta parte se exponen las diferencias que existen en los costos de construcción, operación y mantenimiento de diferentes procesos de tratamiento de aguas residuales, de acuerdo a la referencia ii, para tres valores de caudales (43.82 l/s, 438.2 l/s, 2191 l/s), con el objeto de establecer una comparación relativa de costos entre dichos procesos y así poder determinar la opción económica más viable.

Los costos de construcción representan inversiones totales incluyendo equipos, tuberías y accesorios requeridos y se cuantificaron en dólares de Mayo de 1983.

Los costos anuales de operación y mantenimiento se determinaron con la misma referencia económica, considerando conceptos tales como consumo de energía eléctrica, materiales para mantenimiento, personal, combustible y productos químicos.

Una distinción importante entre los procesos de tratamiento considerados son los requerimientos de terreno, por lo que para fines del análisis comparativo se definieron las necesidades de espacio físico las cuales se indican en el Cuadro 1.

PROCESO	Q=1 MGD (43.82 ℓ/δ)	Q=10 MGD (438.2 ℓ/δ)	Q=50 MGD (2191 ℓ/δ)
Pretratamiento	65	320	2230
Sedimentador Primario	155	1550	7742
Tanque de Aeración	307	3070	15515
Sedimentador Secundario	193	1550	6580
Zanjas de oxidación	17010	68850	-
Lagunas Aeradas	5450	54500	272471
Lagunas de maduración	13625	136235	681178
Discos Biológicos	23000	88000	-

Cuadro 1. REQUERIMIENTOS DE AREA POR UNIDAD DE PROCESOS (m^2).

Con el objeto de establecer los costos por concepto de terreno, se seleccionaron tres tipos de ubicación asignando los valores presentados en el cuadro 2.

N I V E I.	TIPO DE TERRENO	COSTOS (US $\$/m^2$)
1	Periferia Urbana	6.60
2	Periferia Municipal	3.30
3	Rural deshabitado	0.60

Cuadro 2. COSTOS UNITARIOS DE TERRENOS

Los cuadros 3, 4 y 5, que se presentan a continuación, muestran respectivamente los costos de inversión inicial de distintos procesos de tratamiento, los costos unitarios por tipo de tratamiento, que incluyen amortización de la inversión inicial, operación y mantenimiento, y los costos normalizados de valores absolutos de construcción.

PROCESO	NIVEL DE TERRENO	Q=1 MGD (43.8 L/s)	Q=10 MGD (438.2 L/s)	Q=50 MGD (2191 L/s)
1.- Lodos Activados	1	2'688,901	10'666,837	37'415,210
2.- Zanjas de Oxidación	1	1'349,460	7'296,135	--
3.- Lagunas Aeradas	2	813,725	5'078,561	18'491,376
	3	739,059	4'665,227	17'270,042
4.- Lagunas de Estabilización.	2	715,063	4'541,986	--
	3	560,397	2'995,320	--
5.- Discos Biológicos	1	2'930,215	18'937,154	80'570,088

Cuadro 3. COSTOS DE INVERSION INICIAL DE DISTINTOS PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (Incluyendo terreno)

PROCESO	NIVEL DE TERRENO	Q=1 MGD (43.82 L/s)	Q=10 MGD (438.2 L/s)	Q=50 MGD (2191 L/s)
1.- Lodos Activados	1	0.505	0.212	0.154
2.- Zanjas de Oxidación	1	0.279	0.169	--
3.- Lagunas Aeradas	2	0.166	0.098	0.074
	3	0.156	0.092	0.069
4.- Lagunas de Estabilización	2	0.135	0.081	--
	3	0.113	0.059	--
5.- Discos Biológicos	1	0.511	0.325	0.286

Cuadro 4. COSTOS UNITARIOS POR TIPO DE TRATAMIENTO (US\$/m³)
(Incluye terreno, operación y mantenimiento)

PROCESO	NIVEL DE TERRENO	Q=1 MGD (43.82 L/s)	Q=10 MGD (438.2 L/s)	Q=50 MGD (2191 L/s)
1.- Lodos Activados	1	4.798	3.561	2.385
2.- Zanjas de Oxidación	1	2.408	2.436	--
3.- Lagunas Aeradas	2	1.452	1.695	1.179
	3	1.319	1.558	1.101
4.- Lagunas de Estabilización	2	1.276	1.516	--
	3	1.000	1.000	--
5.- Discos Biológicos	1	5.229	6.322	5.137

Cuadro 5. COSTOS NORMALIZADOS DE VALORES ABSOLUTOS DE CONSTRUCCION (Incluyendo Terreno)

Como se puede observar en los Cuadros 3, 4 y 5, las zanjas de oxidación son uno de los procesos de tratamiento de aguas residuales más económico cuando se tiene que efectuar el tratamiento en terrenos de la periferia urbana.

11.6 SELECCIÓN DE LOS PROCESOS MÁS ADECUADOS A LAS CONDICIONES NACIONALES.

Para que en forma rápida y objetiva se normen los criterios de selección, a continuación se presentará una tabla comparativa de diferentes procesos de tratamiento, elaborada de tal forma, que proporcione una idea general de las ventajas y desventajas de los diferentes procesos.

T A B L A

COMPARACION DE LAS CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LOS DIFERENTES PROCESOS DE TRATAMIENTO.

SISTEMA	RESULTADOS DEL TRATAMIENTO	COSTOS DE CONSTRUCCION	NECESIDADES DE OPERACION Y MANTENIMIENTO	NECESIDADES DE TERRENO
Lagunas estabilización.	Muy bueno	Bajo	Mínimas	Muy Grande
Aereación extendida	Excelente	Alto	Medias	Media
Zanjas de Oxidación	Excelente	Medio	Medias	Media
Filtros Rociadores	Muy bueno	Alto	Grandes	Media
Lodos Activados	Excelente	Alto	Muy Grandes	Mínima

Fosas Sépticas

Aconsejable para poblaciones rurales menores de 500 habitantes. No es posible adaptarlas para centros urbanos.

El tiempo de retención es de 12 a 24 horas lo que hace que sus dimensiones sean considerables, además, debido a sus características de operación, - no proporcionan el tratamiento adecuado, por lo que requiere de dispositivos adicionales.

Tanques Imhoff

Presentan la ventaja de proporcionar la sedimentación y digestión de lodos en la misma unidad, sus necesidades de operación son mínimas, no requiriendo de personal calificado para su operación y sus costos de construcción son bajos.

Tanques de Sedimentación Simple

Son unidades compactadas, que proporcionan un efluente con características suficientes para cumplir con los requerimientos que marcan las leyes. Su rango de operación es amplio, permitiendo cubrir poblaciones de gran magnitud. Los costos de construcción de estos dispositivos son elevados, sin embargo consideramos, que esto se debe en gran parte al manejo de lodos por medio de digestores.

Los dos procesos anteriores tienen eficiencias menores a los procesos secundarios (biológicos), por lo que son aprovechables sólo cuando no se requiere un efluente de gran calidad.

Lagunas de Estabilización

La base de tratamiento de estas unidades, es una depuración biológica por lo que los resultados obtenidos son muy buenos, los tiempos de retención son largos, derivándose de ello la necesidad de grandes extensio-

nes de terreno, sin embargo, la ausencia de equipo mecánico y de estructuras complejas, hacen que los costos de construcción sean bajos, además las necesidades de operación y mantenimiento son mínimas.

Estos comentarios sitúan a estas unidades como una de las alternativas más favorables a las condiciones nacionales.

Lodos Activados

En sus diferentes variantes, hasta la fecha son los dispositivos de tratamiento que logran mayor depuración de las aguas residuales, sin embargo tanto en su construcción como en su operación y mantenimiento son los que presentan costos más elevados.

Aeración Extendida

La necesidad de llevar a cabo una aeración prolongada de las aguas residuales, requiere de un volumen de almacenamiento relativamente grande, además de equipo mecánico que proporcione la turbulencia o inyección de aire continuada. Esto da como resultado un sistema de tratamiento que aún cuando proporciona una buena calidad de efluente, resulta costoso en su construcción y operación. Esta alternativa sólo es viable para caudales pequeños.

Zanjas de Oxidación

La profundidad media de estos dispositivos es 1m y su tiempo de retención de 24 horas, por lo que la superficie que ocupan es relativamente - - grande. Requieren de equipo de aeración mecánica y para su operación continua, de un sedimentador secundario. Es una de las mejores alternativas cuando se requiere un tratamiento secundario, debido principalmente a las recientes mejoras que se han hecho al sistema y a que mediante su empleo se elimina la necesidad de un tratamiento primario así como la digestión de lodos.

Filtros Rociadores

Son unidades de tratamiento secundario, con costos de construcción elevados, sus necesidades de operación y mantenimiento requieren de personal calificado, que conozca el funcionamiento del sistema y pueda llevar a cabo un buen control.

En este estudio se desarrollará más ampliamente el proceso de Zanjias de Oxidación, ya que como se comentó anteriormente es una de las mejores alternativas de tratamiento de aguas residuales en nuestro país.

III. EL TRATAMIENTO A BASE DE ZANJAS DE OXIDACIÓN

El proceso de zanjás de oxidación es una aplicación ingeniosa del tratamiento de lodos activados por aeración extendida, suministrando oxígeno por medio de rotores que mantienen el agua residual en circulación en un circuito cerrado.

El proceso básico fue desarrollado por el Instituto de Ingeniería de Salud Pública, T.N.O. Holanda. La primera planta con este sistema fue instalada en Voorschoten, Holanda, en 1954.

Desde entonces, se han puesto en operación una gran cantidad de zanjás de oxidación de diferente forma y diseño a través de todo el mundo, debido principalmente a los excelentes resultados obtenidos en el tratamiento de aguas residuales y a las consideraciones siguientes:

1. Las plantas requieren un mínimo de equipo mecánico.
2. Las zanjás de oxidación parecen funcionar bien aun con mínima atención del operador.
3. El lodo producido está relativamente libre de molestias y fácil disposición.
4. El proceso de tratamiento no genera olores aún bajo condiciones pobres de operación.
5. Los costos de construcción, operación y mantenimiento son competitivos con otros procesos.

III.1 Descripción del sistema de tratamiento.

La configuración de la zanja de oxidación utilizada más comúnmente para el tratamiento de las aguas residuales, es de sección transversal trapecial, como se muestra en la figura 3.1 Normalmente en el sistema de zanjás de oxidación se elimina la necesidad de un tratamiento primario. El agua residual cruda pasa directamente a través de una reja de barras a la zanja. No se necesita un triturador a menos que se requiera una determinada condición en el influente. La zanja de oxidación forma el tanque de aeración, donde el agua residual cruda es mezclada con los organismos

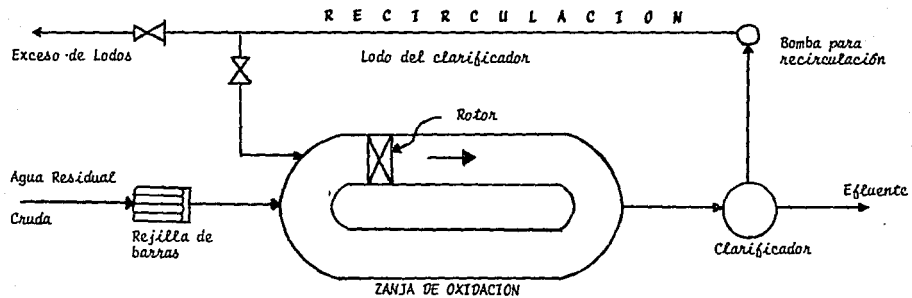


Figura 3.1 DIAGRAMA EN PLANTA DE UNA ZANJA DE OXIDACION.

activos en la zanja. El rotor introduce el oxígeno necesario dentro de las aguas residuales y las mantiene mezcladas y en movimiento. La velocidad promedio del líquido en la zanja debe mantenerse por arriba de un mínimo de aproximadamente 0.30 m/seg (1 ft/seg), para prevenir el asentamiento de sólidos. Los extremos de la zanja deben ser redondeados para prevenir remolinos y áreas muertas, y los bordes fuera de las curvas siempre deben tener protección contra la erosión.

El licor mezclado en la zanja fluye hasta el clarificador para la separación de los lodos. Las condiciones tranquilas en el clarificador permiten la separación de los sólidos del líquido. El líquido clarificado sale del clarificador a través de un vertedor y pasa a los tanques de cloración, posteriormente, pasa a la corriente receptora o al uso a que se destine.

El lodo asentado se quita desde la parte baja del clarificador por medio de una bomba y se regresa a la zanja.

La zanja de oxidación es operada como un sistema cerrado, y el crecimiento neto de los sólidos suspendidos volátiles (SSV), requerirá eliminación periódica de algo de lodo del proceso.

La eliminación del exceso de lodos, a través de una conexión en la línea de recirculación de lodos, disminuye las concentraciones en la zanja y mantienen el metabolismo más activo. El exceso de lodos puede ser secado directamente en lechos de arena o almacenado en un tanque contenedor o en lagunas de exceso de lodos como disposición final.

La zanja de oxidación vincula un proceso físico y biológico. Una pequeña porción de la materia orgánica sufre oxidación química directa, pero la gran parte de la materia orgánica debe ser estabilizada por las actividades bioquímicas de los microorganismos formados previamente en el sistema.

El proceso de zanjas de oxidación, se diseñó para concentraciones de sólidos suspendidos en el licor mezclado de 3000 a 8000 mg/ml. La relación comida-a-microorganismos (F/M) varía de 0.03 a 0.1 kg $\text{DBO}_5/\text{dla}/\text{Kg SSV}$. Este bajo factor produce un sistema que puede absorber las descargas sin que se

detenga la operación. También, debido a la baja proporción de alimento-a-microorganismos, al crecimiento del lodo volátil es relativamente bajo.

La excesiva aeración con altos niveles de oxígeno disuelto (O₂) en la zanja, puede producir la formación de grumos del tamaño de la cabeza de un alfiler, los cuales no flocculan y se perderán con la salida del efluente, por tanto con esto cantidades de DBO. Con este sistema son posibles las eliminaciones continuas de 90 a 97% de DBO.

III.2 Pretratamiento

Generalmente, las zanjas de oxidación tienen alguna forma de pretratamiento antes de que el agua residual cruda entre a la zanja.

1.- Cribado

- a) Reja de barras de limpieza manual (abertura típica de 1.25-2.5 cm)
- b) Triturador con derivación (bypass) a reja de barras con operación manual.

2.- Desarenador

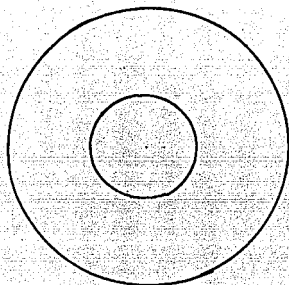
- a) De limpieza manual
- b) Mecánico

III.3 Tratamiento

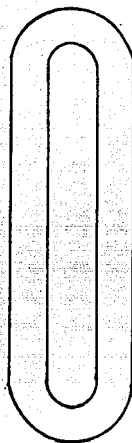
La Zanja

La zanja forma el tanque de aeración. La forma de la zanja es generalmente un óvalo alargado como se muestra en la figura 3.1, pero puede ser en forma de "L", herradura, circular, o de cualquier forma, con tal de que forme un circuito cerrado. Figura 3.2

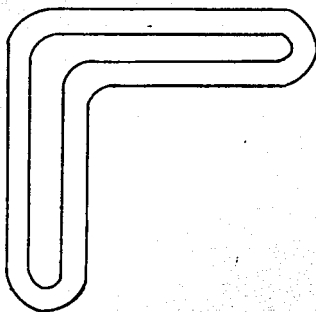
Cuando se emplean rotores pequeños de 70 cm (27.5 in) y paredes laterales con pendientes de 45°, la profundidad de la zanja varía de 0.90m (3ft) a 1.50 m (5 ft); utilizando rotores de 1.050 m (42in), la profundidad varía de 1.80 m (6 ft) a 3m (10 ft), aunque esta profundidad puede ser mayor.



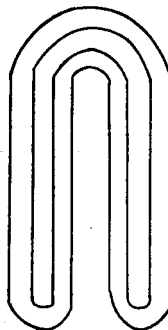
CIRCULAR



OVAL



MODELO "L"



HERRADURA

Figura 3.2 DIFERENTES FORMAS DE ZANJAS DE OXIDACION.

El ancho mínimo a nivel de agua de la isla central, esta en función de longitud del rotor, utilizándose las siguientes dimensiones:

- a) 4.25m (14ft), para longitudes de rotor entre 0.90m (3ft) y 1.50m (5 ft).
- b) 4.9 m (16 ft), para longitudes de rotor entre 1.80 m (6 ft) y 4.50m (15 ft).
- c) 6 m (20 ft), para longitudes de rotor entre 4.9m (16 ft) y 9m (30ft).
- d) abajo de los anchos mínimos utilice baffles en ambos extremos de la zanja.

La longitud de la sección recta de la zanja debe ser como mínimo de 12.20 m (40 ft), o al menos dos veces el ancho de la zanja al nivel del -- agua. Los rotores deben ser colocados justo aguas abajo de la curva, normalmente 4.50m (15 ft) aguas abajo de la sección recta de la zanja.

Para canales con paredes laterales verticales y usando rotores de 70cm (27.5 in.), la profundidad del agua en la zanja varía de la misma manera que en zanjas con paredes inclinadas a 45°; igualmente, para rotores con diámetro de 105 cm (42 in.)

La longitud del rotor debe ocupar el ancho completo de la zanja, tomando en cuenta una determinada tolerancia necesaria para soportes de ensamblaje y cojinetes exteriores; cuando se usa isla central, se utilizan los mismos anchos que en zanjas con paredes laterales inclinadas a 45°. Las paredes verticales divisoras del canal de oxidación, deben usar baffles de recirculación de flujo en ambos extremos de la zanja. El radio del baffle es la mitad del ancho del canal.

La tierra compactada de la zanja debe ser preferiblemente revestida con concreto colado o prefabricado, aunque se han usado una variedad de -- otros materiales tales como asfalto, madera, materiales prefabricados y arcilla. El espesor del revestimiento es de 10 cm (4 in.). Las paredes verticales se construyen de concreto reforzado.

Para aguas domésticas normales, el volumen de la zanja es calculado con base a $4.60 \text{ m}^3/\text{kg DBO}_5$ ($174 \text{ ft}^3/26 \text{ DBO}_5$), esta cantidad es igual a una --

carga diaria de 216 kg $\text{DBO}_5/1000\text{m}^3$ (13.5 Lb $\text{DBO}_5/1000 \text{ft}^3$). Las cargas usadas para desechos industriales concentrados dependen del tipo de desecho, la concentración que tengan y la facilidad del desecho para ser degradado biológicamente.

El rotor.

El rotor es colocado transversalmente a la zanja y tiene doble función:

- Suministrar la propulsión necesaria para efectuar el mezclado completo del contenido de la zanja.
- Introducir el oxígeno necesario para ayudar a la actividad biológica.

El rotor gira sobre un eje en un plano paralelo a la superficie del flujo. El rotor pequeño de la compañía Lakeside consiste de 12 hojas o aspas montadas en la periferia de las láminas finales. Las aspas tienen dientes en uno y otro lado; estos dientes están colocados de tal manera que ocupen los espacios vacíos de la aspa precedente.

Los rotores pequeños son fabricados desde 0.30 m (1 ft) hasta 4.90 m (16 ft) de longitud.

Los rotores grandes son fabricados generalmente de 9m (30 ft) de longitud y 105 cm (42 in) de diámetro.

El montaje del rotor puede ser para múltiples longitudes pero tiene que ser mediante soportes intermedios. Los rotores pueden ser montados directamente sobre soportes de concreto o suspendidos de una estructura. Figura 3.3

El rotor jaula es de 70 cm (27.5 in) de diámetro, operando con sumergencias de 5 cm (2 in) a 25 cm (10 in). El rotor grande deberá mantenerse en un rango de 10 cm (4 in) a 38 cm (15 in) de sumergencia. Durante la operación del rotor se ha observado que éste se limpia por sí mismo, ya que produce algunas trituraciones de los sólidos que se encuentran en las aguas

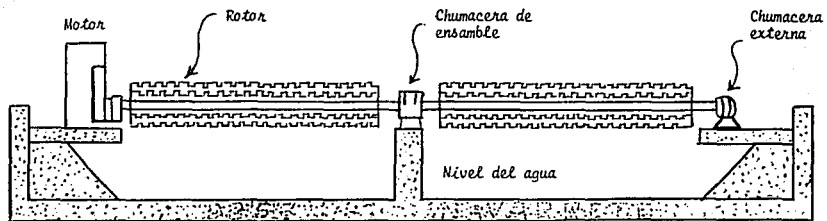


Figura 3.3 ROTOR CON SOPORTE INTERMEDIO DE ENSAMBLAJE.

residuales. Los trapos u otros materiales fibrosos no se adhieren por si solos al rotor.

La longitud del rotor requerida para un determinado proyecto, está en función de la velocidad del líquido contenido en la zanja. El criterio de velocidad se basa en pruebas y experiencias de operación real en el extranjero. Se ha observado que utilizando rotores tipo jaula, para volúmenes de tanque menores a 227 m^3 , una longitud de rotor de 60 cm por cada 100 m^3 de tanque, producen una velocidad que mantiene a todos los sólidos en suspensión; cuando se utilizan volúmenes de tanque mayores de 227 m^3 , se emplean 50 cm de rotor por cada 100 m^3 de tanque.

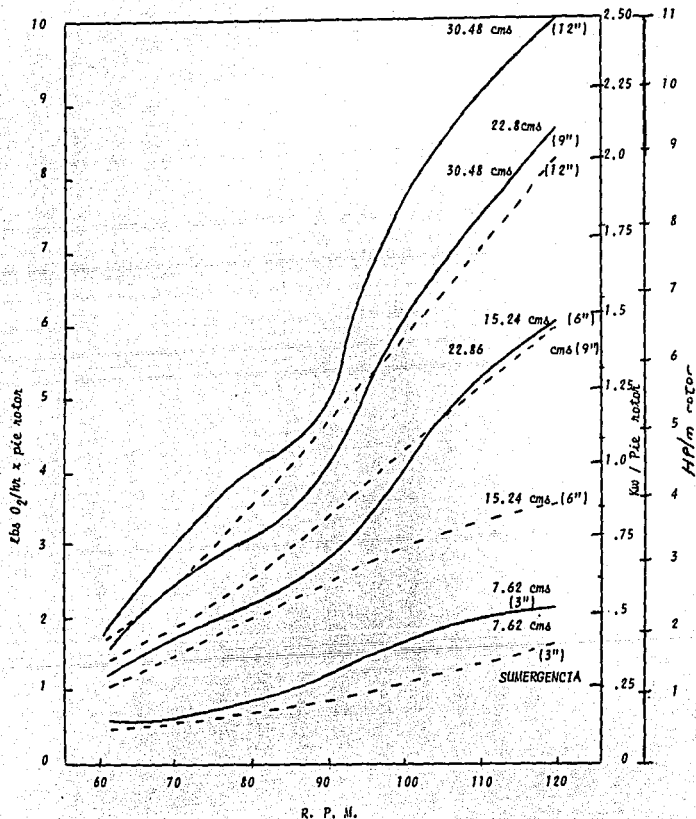
Cuando se emplean rotores de 105 cm (42 in), se deben usar 38 cm de rotor por cada 100 m^3 de tanque.

La selección de la longitud de ensamblaje del rotor establece aproximadamente la sección transversal de la zanja.

Para aplicar aeradores mecánicos apropiadamente, es esencial que la capacidad de oxigenación y requerimientos de potencia sean conocidos. La técnica estandar es la de colocar el aerador en un tanque de tamaño adecuado con agua limpia previamente desoxigenado y determinar la tasa de reoxigenación del agua. Los resultados de las pruebas son entonces convertidas a condiciones estándar de 20°C , 760mm de Hg de presión y cero de oxígeno disuelto. Los resultados de las pruebas hechas por la universidad del estado de IOWA en Ames, Iowa, bajo la dirección del Dr. E.R. Bauman, son presentados en la gráfica 3.4

El rotor tipo jaula de 70 cm de diámetro, fue probado a varias inmersiones y velocidades. Por ejemplo a 90 RPM y con las puntas de las hojas sumergidas a 15.25 cm (6 in), se introducen $4.20 \text{ kg O}_2/\text{hr} \times \text{m rotor}$ ($2.80 \text{ lb O}_2/\text{hr} \times \text{ft rotor}$), aumentando la inmersión a 30.50 cm (12 in) y con la misma velocidad, el oxígeno introducido son $7.50 \text{ kg O}_2/\text{hr} \times \text{m rotor}$ ($5 \text{ lb O}_2/\text{hr} \times \text{ft rotor}$). Debe proporcionarse suficiente potencia para permitir la máxima sumergencia considerada para un diseño en particular.

ROTOR TIPO JAULA 70 cms de diámetro



Gráfica 3.4 CAPACIDAD DE OXIGENACION EN AGUA LIMPIA 20°C, 760mm Hg Y CERO DE O.D.

La gráfica 3.5 muestra la capacidad de oxigenación de un rotor de 105 cm (42 in) de diámetro, y la gráfica 3.6 muestra los requerimientos de potencia - para el mismo rotor. Estos no son los únicos rotores en el mercado, pero son dos tamaños ampliamente usados.

Las curvas dan la oxigenación y los requerimientos de potencia en el tanque de agua limpia bajo condiciones estándar. Se ha desarrollado una ecuación para convertir el oxígeno introducido bajo condiciones estándar a oxígeno introducido requerido por los lodos activados y por diferentes desechos -- que son susceptibles de degradarse biológicamente.

La fórmula básica es:

$$N_o = \frac{1.5 N}{\left(\frac{\beta C_{sw} - C_L}{C_{st}} \right) \times 1.024^{T-20}} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

donde:

N_o = kg O_2 /día transferido al agua limpia a 20°C y cero 0.D

α = Relación entre los coeficientes de transferencia de masa de oxígeno del agua residual y agua limpia.

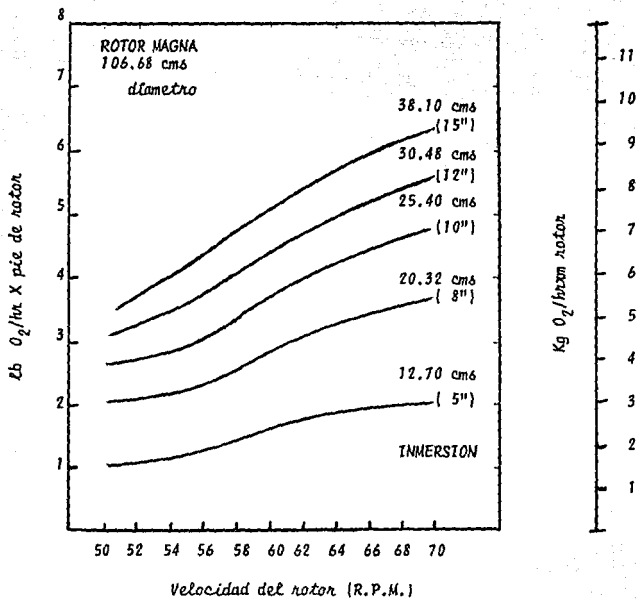
β = Relación de la concentración de saturación de oxígeno en el agua residual a la concentración de saturación de O_2 del agua limpia.

C_{sw} = Concentración de saturación de oxígeno del agua residual a la temperatura de operación y a la elevación del sitio de operación.

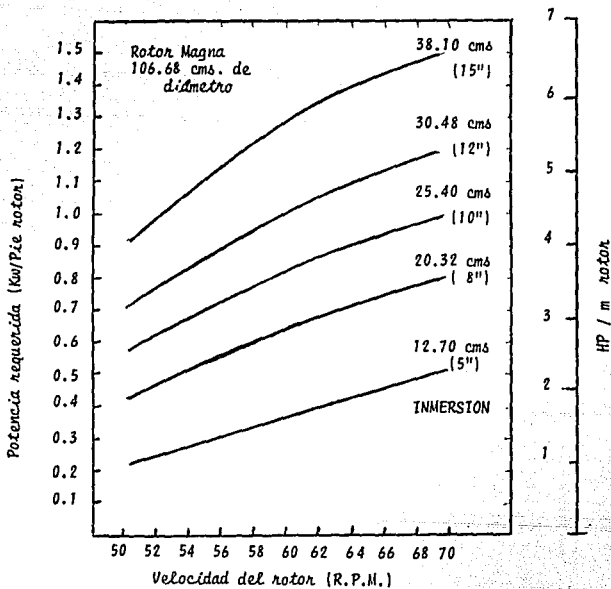
C_{st} = Concentración de saturación de oxígeno del agua limpia en condiciones estándar.

C_L = Nivel de oxígeno disuelto que se requiere mantener en el agua residual de la zanja.

T = Temperatura del desecho en °C.



Gráfica 3.5 CAPACIDAD DE OXIGENACION, ROTOR MAGNA DE 42 PULG. DE ϕ ,
 $O_2 D = O_2 T = 20^\circ \text{C}$ $P = 760 \text{ mm. Hg.}$



Gráfica 3.6 REQUERIMIENTOS DE POTENCIA 42 PULG. DE Ø
 ROTOR MAGNA.

1.5 = Conversión de DBO_5 a DBO_t

N = kg O_2 , transferido al desecho mezclado.

$$C_{d,w} = B(C_{d,t})^P$$

donde:

$$P = \frac{\text{Presión atmosférica en el sitio de la planta.}}{\text{Presión atmosférica al nivel del mar.}}$$

$$B = \frac{\text{Concentración de saturación de } O_2 \text{ en el desecho}}{\text{Concentración de saturación en el agua de la llave}}$$

Resolviendo la ecuación 3.7 para N_0 en términos de N , producen un factor de conversión. El factor de conversión para desechos domésticos normales en zanjas de oxidación es de 2.35. Debe considerarse un ajuste a este factor de conversión para desechos industriales y para plantas de tratamiento que se encuentran localizadas en altitudes mayores de 610 m (2000 ft). El fabricante de rotores puede proporcionar la corrección necesaria para grandes altitudes.

Los rotores son instalados normalmente con cubiertas para protegerlos de la intemperie, sobre todo en áreas con climas muy fríos.

Clarificador

La zanja de oxidación debe ser operada de tal manera que se forme un tamaño apropiado de flocúlos, que permitan ser separados de las aguas residuales, cuando éstas se sometan a sedimentación. El agua residual cruda y los lodos recirculados deben ser inyectados justo aguas arriba del rotor, de tal manera que el material pueda ser inmediatamente mezclado con el contenido de la zanja. El efluente de la zanja debe ser removido un tanto alejado de aguas arriba del rotor. El punto de remoción debe estar suficientemente retirado del flujo de entrada de tal manera de evitar la producción de cortocircuitos.

El contenido de la zanja en el sitio del rotor y aguas abajo, está en

condiciones altamente turbulentas. Un poco más abajo del rotor las líneas de flujo se enderezan para formar un movimiento de pequeñas olas.

El tamaño de los tanques de sedimentación final se basa generalmente en una tasa superficial de sedimentación de $24.4 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{día}$ ($600 \text{ gal}/\text{ft}^2 \times \text{día}$).

Se requiere un tiempo de retención de 3 horas que permita disponer de una profundidad suficiente en el tanque y manejar las altas concentraciones de lodo que provienen de la zanja. Las profundidades de las paredes laterales deben tener de 3.60 m (12 ft) a 4.25m (14 ft). Debido a que normalmente no se requiere de un tanque sedimentador primario en este proceso, el clarificador final debe estar equipado con desnatadores.

Nuevas Ideas en Clarificadores

El proceso a base de zanjas de oxidación es considerado como uno de los tratamientos más efectivos en relación al costo.

Este proceso puede ser mejorado con la instalación de un sistema de clarificador dentro del canal, el cual elimina elementos mecánicos utilizados -- por clarificadores externos.

Con el clarificador dentro de la zanja de oxidación, ya no son necesarios, los mecanismos raspadores, las estaciones de bombeo para retorno de lodos, tuberías, sitios de trabajo y controles eléctricos.

El clarificador puede ser instalado dentro de la zanja de oxidación sin necesidad de modificar su estructura o la disposición del equipo.

Actualmente existen diferentes sistemas de clarificador que pueden ser instalados dentro de la zanja de oxidación. Uno de los más usados es el -- "Bote Clarificador", el cual es una unidad clarificadora en forma de bote - afilado.

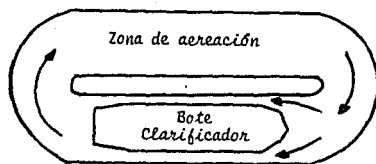


Figura 3.8 ZANJA DE OXIDACION CON SISTEMA DE CLARIFICADOR INTEGRADO.

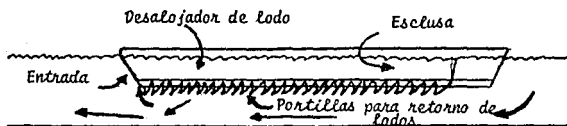


Figura 3.9 "EL BOTE CLARIFICADOR"

Como trabaja

El bote clarificador es colocado dentro de la zanja de oxidación. El agua de desperdicio que circula alrededor y bajo el bote incrementa su velocidad, creando una diferencia de densidades necesarias para remover el lodo del clarificador. El líquido mezclado entra por la popa del bote (final del bote). El lodo se precipita y es regresado a la zanja de oxidación a través de unas portillas que están colocadas en la parte inferior del bote; con este sistema el bombeo del lodo no es necesario. La superficie del líquido penetra dentro del colector de material flotante, incluyendo la nata y la espuma, y los regresa a la zanja por compuertas de natas las cuales están colocadas en las cercanías de la popa del bote. La forma del clarificador permite a los desechos flotantes pasar a los lados de la unidad, previniendo así la -- acumulación de nata en la superficie de la zanja de oxidación. El líquido clarificado fluye hacia una esclusa en la proa del bote donde es extraído de la zanja.

Los cálculos para el diseño de una zanja de oxidación con sistema de clarificador integrado, deben hacerse como para una zanja de oxidación con clarificador fuera de ella.

Manejo de lodos

El manejo de lodos es necesario, ya que una porción del lodo sedimentado en el clarificador es desechado para mantener un balance de sólidos en el sistema. Este lodo normalmente tiene una concentración de sólidos entre 1 y 2%.

El mecanismo de recirculación de lodos debe ser calculado para manejar como mínimo el 100% del flujo de diseño. Se debe prever un ajuste en la tasa de recirculación de lodos, con el objeto de estar prevenidos para cualquier cambio operacional necesario en el proceso.

Como el proceso de la zanja de oxidación opera como un sistema cerrado, con una operación eficiente se produce un bajo crecimiento de sólidos suspendidos. La velocidad de crecimiento de lodos para aguas residuales domésticas varía de 0.04 m^3 a $0.06 \text{ m}^3/100 \text{ P.E.}$ ($2.23 \text{ gal}/100^* \text{ P.E.}$). *P.E.=Población Equi

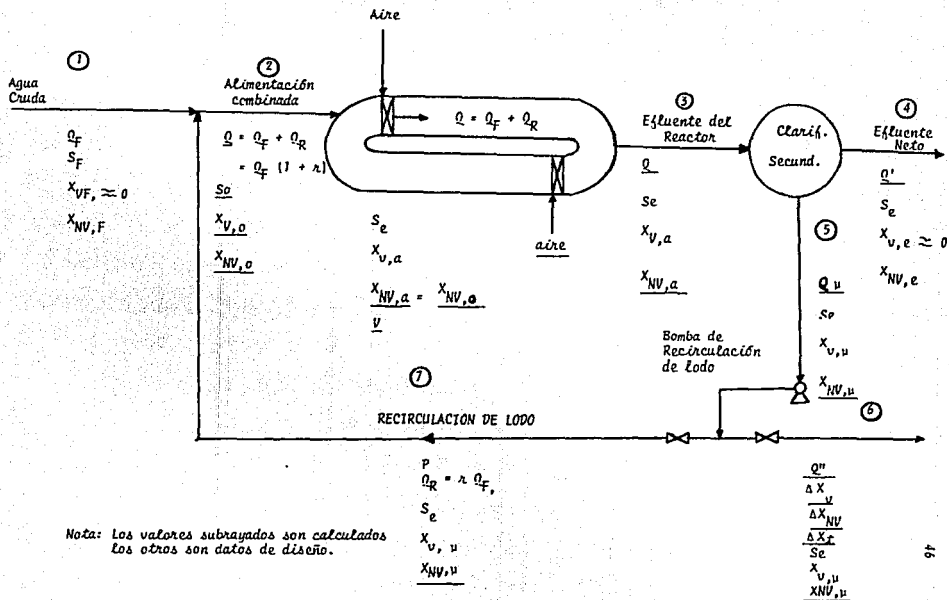
valente.

La operación normal de la zanja, permite una concentración de sólidos suspendidos en el licor mezclado de 6000 a 8000 mg/l o una concentración de oxígeno disuelto de 0.0 a 0.5 mg/l directamente aguas arriba del rotor.

IV. RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO A BASE DE ZANJAS DE OXIDACION.

Para entender de una manera más clara las variables que intervienen en el diseño de las plantas de tratamiento a base de zanjas de oxidación, nos ayudaremos del siguiente diagrama de flujo y de la tabla 4.1, en la cual se da la definición de cada una de las variables.

DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA
ZANJA DE OXIDACIÓN



XV, I, XNV, I.

El primer subíndice (V o NV) designa a sólidos suspendidos volátiles y no volátiles, respectivamente, El segundo subíndice se refiere a un flujo específico en cuestión, F, Agua Residual cruda ó fresca (flujo 1).

O, Agua residual cruda más el lodo de recirculación (alimentación, combinada, flujo 2)

a, Efluente del reactor (flujo 3).

e, Efluente neto (flujo 4)

u, Lodo del clarificador secundario (flujo 5).

SÍMBOLOS

1.- Tasas de flujo.

Q_F Alimentación de agua residual cruda, (alimentación fresca) (flujo 1), l/seg.

Q_R Recirculación; l/seg. (flujo 7).

r , Relación de recirculación; $r = Q_R/Q_F$

Q , Alimentación combinada (agua cruda + lodo recirc.) (l/seg)

$$Q = Q_F + Q_R = Q_F (1 + r) \text{ (flujo 2).}$$

Q' = efluente Neto, l/seg. (flujo 4)

Q'' Lodo desechado; l/seg. (flujo 6)

$$\text{observe que } Q_F = Q' + Q''$$

Q_U , Lodo del clarificador, Secundario, l/seg.

$$Q_U = Q'' + Q_R = Q'' + r Q_F \text{ (flujo 5)}$$

2.- Concentraciones del DBO soluble (mg/l)

S_F , DBO soluble de la agua residual cruda,

S_O , DBO soluble de la combinación de agua cruda con el lodo de recirculación.

S_e , DBO soluble del efluente.

$X_{V,F}$ - sólidos suspendidos volátiles del agua residual cruda

$X_{V,O}$ - sólidos suspendidos volátiles del agua combinada (cruda + recirculación)

$X_{V,a}$ - sólidos suspendidos volátiles en el reactor también es igual a la concentración de SSV en el efluente del reactor.

$X_{V,u}$, SSV en el clarificador secundario

$X_{V,e}$, SSV en el efluente neto (efluente del clarificador) (considera $X_{V,e} \approx 0$)

4. La concentración de sólidos suspendidos no volátiles. (SSNV, mg/l)

$X_{NV,F}$ SSNV en el agua cruda

$X_{NV,O}$ SSNV alimentación combinada (crudas + lodo)

$X_{NV,a}$ SSNV en el reactor ($X_{NV,a} = X_{NV,o}$) también son iguales a SSNV del efluente del reactor

$X_{NV,u}$ SSNV en el lodo del clarificador sec.

$X_{NV,e}$ SSNV en el efluente neto

5. Desecho de lodo.

ΔX_V Producción neta de SSVLM en el reactor (desecho de SSVLM en el lodo).

ΔX_{NV} SSNV desechados en el lodo de desecho.

ΔX_T - Lodo total producido

$$\Delta X_T = \Delta X_V + \Delta X_{NV} = Q_F X_{V,F}$$

6. Volumen del reactor

V , volumen del reactor, m^3

Para el diseño de una planta de tratamiento a base de zanjas de oxidación, se debe seguir los siguientes procedimientos:

1.- Calcular la recirculación, n

$$n = \frac{[X_{V,a} - (1-f) a (S_f - S_e)]}{(X_{V,U} - X_{V,a})}$$

donde =

$X_{V,a}$ = SSVLM del reactor (mg/l)

f = Kg SSVLM biodegradables producidos/kg SSVLM totales producidos, Se considera $f = 77\%$.

a = Parámetro de tratamiento, obtenido de datos experimentales.

S_f = DBO₅ influente

S_e = DBO₅ efluente

$X_{V,U}$ = Lodos en el clarificador secundario

2.- Calcular el tiempo de residencia, t (hrs)

$$t = \frac{b_a (S_f - S_e)}{b X_{V,a} (1 + n)}$$

donde:

b = Parámetro de tratamiento, obtenido de datos experimentales.

n = recirculación.

3.- Calcular la DBO de la alimentación combinada, S_o (Mg/l)

$$S_o = \frac{S_f + n S_e}{1 + n}$$

4.- Determinar la relación F/M (comida/microorganismo)

$$F/M = \frac{S_o}{X_{V,a} t}$$

Donde:

$$t = \text{Tiempo residencia}$$

- 5.- Calcular el gasto de la alimentación combinada, Q (l/seg)

$$Q = Q_F (1 + n)$$

Donde:

$$Q_F = \text{Gasto de diseño}$$

- 6.- Calcular el gasto de la recirculación, Q_R (l/seg)

$$Q_R = n Q_F$$

- 7.- Calcular el volumen del reactor, V (m³)

$$V = (1+n) Q_F t$$

- 8.- Calcular los requerimientos de oxígeno, RO_2 (Kg O₂/día)

$$RO_2 = a' (S_0 - S_e) Q + b' S_{V,a} V$$

Donde:

a' = Parámetro de tratamiento, obtenido de datos experimentales.

b' = Parámetro de tratamiento, obtenido de datos experimentales.

- 9.- Calcular la producción neta de lodos en el reactor, ΔX_V (kg/día)

$$\Delta X_V = \left\{ [a (S_0 - S_e) Q_F] 0.77 \right\} - b X_V, a V$$

- 10.- Calcular los flujos del efluente, desecho y lodos del clarificador, (Q' , Q'' , Q_u). (l/seg)

$$q'' = (\Delta X_V + Q_F X_{V,F}) / X_{V,u}$$

Donde:

$X_{V,F}$ = sólidos suspendidos volátiles del agua residual cruda.

$$Q' = Q_F - Q''$$

$$Q_u = Q_R + Q''$$

- 11.- Calcular los sólidos suspendidos no volátiles desechados en el lodo de desecho (ΔX_{NV}) y el lodo total producido (ΔX_t).

$$\Delta X_{NV} = Q_F (X_{NV,F} - X_{NV,e}) + Q'' X_{NV,e}$$

$$\Delta X_t = \Delta X_{NV} + \Delta X_V$$

Donde:

$X_{NV,F}$ = SSNV en el agua cruda

$X_{NV,e}$ = SSNV en el efluente neto

Q'' = Gasto o flujo de los lodos desechados.

Balance de material

Se debe cumplir que:

$$Q' X_{NV,e} = Q_F X_{NV,F} + Q'' X_{NV,u}$$

Donde:

$$Q'' X_{NV,u} = \Delta X_{NV}$$

$X_{NV,u}$ = SSNV en el lodo del clarificador

$$X_{NV,u} = \frac{\Delta X_{NV}}{Q^m}$$

$X_{NV,o}$ = SSNV alimentación combinada (crudas + lodo)

$$X_{NV,o} = \frac{X_{NV,F} + r X_{NV,u}}{1 + r}$$

$X_{V,o}$ = SSV del agua combinada (cruda + recirculación)

$$X_{V,o} = \frac{X_{V,F} + r X_{V,u}}{1 + r}$$

12.- Determinación de la longitud del rotor, L.R. (m)

Para calcular la longitud del rotor, existen dos métodos.

PRIMER METODO.- Consiste en seleccionar de los datos de prueba de los fabricantes, el rotor más apropiado, ver tablas 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7. Con la ayuda de estas tablas tomando como base la sumergencia y la capacidad de oxigenación, obtenemos el consumo de energía y las RPM del rotor. -- Una vez calculados estos datos, determinemos la eficiencia de transferencia (No.).

$$No = \frac{1.5 N}{\left| \frac{C_{\Delta w} - C_L}{C_{\Delta t}} \right|} \times 1.024^{T-20}$$

$$N = \frac{No}{1.5} \left| \frac{C_{\Delta w} - C_L}{C_{\Delta t}} \right| = X \cdot 1.024^{T-20}$$

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

SEGUNDO METODO: Se basa en pruebas y experiencias de operación real en el extranjero.

Con rotores tipo jaula y volúmenes de tanque menores de 227 m^3 , 60 cm de rotor por cada 100 m^3 de tanque, producen una velocidad que mantiene todos los sólidos en suspensión.

Para volúmenes de tanques mayores de $227,00 \text{ m}^3$, utilice 50 cm de rotor por cada 100 m^3 de tanque.

Con rotores de 105 cm, use 38 cm de rotor por cada -- 100 m^3 de tanque.

La longitud del rotor será la mayor de los dos métodos.

Tabla 4.2 Capacidad de oxigenación del rotor tipo jaula, KgO_2/hr X m rotor.

RPM Sumerg. cms.	60	70	80	90	100	110	120	Díametro del rotor cms.
7.62(3")	0.8195	0.9685	1.3410	1.788	2.4585	2.9055	3.129	69.85 (27.5")
15.25(6")	1.6763	2.5330	3.2780	4.1720	6.0345	7.748	8.940	69.85
22.86(9")	2.1605	3.6505	4.6190	5.960	8.940	11.026	12.814	69.85
30.48(12")	2.5330	4.3955	5.8855	7.3755	11.4730	13.4845	14.9745	69.85

Tabla 4.3 Consumo de energía HP/m rotor.

RPM Sumerg. cms.	60	70	80	90	100	110	120	Díametro del rotor cms.
7.62(3")	0.44	0.6050	0.7700	0.9627	1.2100	1.4850	1.8150	69.85 (27.5")
15.24(6")	1.045	1.650	2.145	2.695	3.190	3.575	3.850	69.85
22.86(9")	1.4577	2.035	2.750	3.685	4.675	5.610	6.490	69.85
30.48(12")	1.760	2.695	3.850	5.1150	6.325	7.700	9.020	69.85

Tabla 4.4 Capacidad de oxigenación del rotor magna
KgO₂/ hr x m rotor

RPM Sumerg. cms.	50	60	70	Diámetro del rotor cms.
12.70(5")	1.564	2.384	3.054	106.68(42")
20.32(8")	3.054	4.250	5.440	106.68
25.40(10")	3.950	5.513	7.152	106.68
30.48(12")	4.620	6.630	8.493	106.68
38.10(15")	5.066	7.599	9.387	106.68

Tabla 4.5 Consumo de energía rotor magna.
HP/m rotor.

RPM Sumerg. cms.	50	60	70	Diámetro del rotor cms.
12.70(5")	0.968	1.584	2.244	106.68(42")
20.32(8")	1.892	2.816	3.520	106.68
25.40(10")	2.508	3.608	4.400	106.68
30.48(12")	3.080	4.400	5.280	106.68
38.10(15")	4.004	5.632	6.600	106.68

Tabla 4.6 Eficiencia de la transferencia de oxígeno;
rotor tipo jaula. Kg O₂/HP x hr.

RPM Sumerg. cms.	60	70	80	90	100	110	120	Diámetro del rotor cms.
7.62(3")	1.8625	1.6008	1.7416	1.8573	2.0318	1.9566	1.7240	69.85 (27.5")
15.24(6")	1.6041	1.5352	1.5282	1.5481	1.8917	2.1673	2.3221	69.85
22.86(9")	1.4821	1.7939	1.6796	1.6174	1.9123	1.9654	1.9744	69.85
30.48(12")	1.4392	1.6310	1.5287	1.4410	1.8134	1.7512	1.6601	69.85

Tabla 4.7 Eficiencia de la transferencia de oxígeno;
rotor tipo magna, Kg O₂/HP x hr.

RPM Sumerg. cms.	50	60	70	Diámetro del rotor cms.
12.70(5")	1.6157	1.5051	1.3610	106.68 (42")
20.32(8")	1.6142	1.5092	1.5455	106.68
25.40(10")	1.575	1.5280	1.6255	106.68
30.48(12")	1.500	1.5068	1.6085	106.68
38.10(15")	1.2852	1.3493	1.4223	106.68

13.- Calcular las dimensiones de la zanja

- Ancho inferior de la zanja, F

$$F = \text{Long. rotores} + \text{ancho del soporte para chumacera}$$

- Area de la sección transversal, A_{st}

$$A_{st} = D^2 + D \times F$$

$$D = \text{Profundidad}$$

$$F = \text{Ancho inferior de la zanja}$$

- Longitud total de la zanja, L_t

$$L_t = \frac{\text{Vol. zanja}}{A_{st}}$$

- Longitud de los extremos de la zanja

La longitud de la circunferencia es:

$$L_c = \pi D$$

$$D = 2(E/2 + r)$$

E = longitud del nivel del agua en el canal

r = radio de la isla central. Las dimensiones de la isla central de la zanja se determinan con la longitud del rotor.

- Longitud de la parte recta de la zanja

$$L = L_t - L_c$$

- 14.- Calcular las dimensiones del tanque de sedimentación final. En aguas residuales domésticas, se usa una carga superficial de $24.50 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{día}$ y un tiempo de retención de 3 h.

* Área superficial, A_s

$$A_s = \frac{\text{flujo de diseño } (\text{m}^3/\text{día})}{\text{carga superficial } (\text{m}^3/\text{m}^2 \times \text{día})}$$

$$\text{flujo de diseño} = \text{Población} \times \text{aportación } (\text{m}^3/\text{día})$$

* Volumen del tanque, V

$$V = \text{flujo de diseño} \times \text{tiempo de retención}$$

* Profundidad efectiva del tanque, (hef)

$$\text{hef} = \frac{\text{Volumen del tanque}}{\text{Área superficial}}$$

$$D = \frac{\sqrt{4 A_s}}{\pi}$$

- 15.- Bomba de recirculación de lodos

la bomba de recirculación de lodos, debe manejar del 20 al 100% del flujo de diseño.

Máximo lodo que se

$$\text{puede recircular} = 1.0 \times \text{gasto de diseño}$$

mínimo lodo que se

$$\text{puede recircular} = 0.2 \times \text{gasto de diseño}$$

16.- Lechos de arena

Si se tiene planeado que la disposición final del exceso de lodo sea mediante lechos de arena, es razonable utilizar $8.09 \text{ m}^2/\text{hab.}$ ($1 \text{ ft}^2/\text{hab.}$)

$$\text{área} \rightarrow A = \text{Población} \times 0.0929$$

CONCLUSIONES

- 1.- Las zanjas de oxidación pueden ser aplicadas a todos los tipos de aguas residuales susceptibles de ser degradadas biológica - mente. Se han utilizado en el tratamiento de aguas residuales de industrias de: papel, productos lácteos, jabones y aceites comestibles, farmacéuticas, petroquímicas, embotelladoras, etc.
- 2.- Las zanjas de oxidación requieren un mínimo de equipo mecánico para su funcionamiento, las cuales no generan olores aún bajo condiciones pobres de operación.
- 3.- Con el proceso de zanjas de oxidación, el lodo producido está relativamente libre de molestias y es de fácil disposición.
- 4.- Los costos de construcción, operación y mantenimiento de las - zanjas de oxidación, son competitivos con otros procesos de -- tratamiento de aguas residuales.
- 5.- El sistema de tratamiento mediante zanjas de oxidación es cos - toso para aplicarse en pequeñas comunidades de nuestro país, - pero más barato que otros procesos dentro de ciertos rangos de flujo. Además este sistema se adaptaría en nuestro país a la pequeña y mediana industria.
- 6.- Dada la gran cantidad de plantas de tratamiento de aguas resi - duales que se requieren construir en México, es conveniente que el Gobierno Federal establezca un marco de referencia sobre cos - tos de construcción, operación y mantenimiento, en base a datos reales que puedan ser actualizados de acuerdo a una metodología apropiada. Esta información sería de gran utilidad para orien - tar a todas las personas involucradas en proyectos de esta natu - raleza. Cabe destacar que muchos proyectos no se han construido por los presupuestos tan altos que involucran y en otros casos las instalaciones han sido abandonadas por no haberse determina - do adecuadamente las erogaciones por concepto de operación y -- mantenimiento.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Dr. Homer W. Parker, P.E. *Wastewater Systems Engineering*. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1975.
- 2.- Metcalf and Eddy, *Wastewater Engineering*. Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1972.
- 3.- R.S. Anhalo. *Introduction To Wastewater Treatment Processes*. Academic Press, Inc. 1979.
- 4.- *Determinación y desarrollo de costos de construcción, operación y mantenimiento de los diferentes procesos de tratamiento de aguas residuales*.
Secretaría de Recursos Hidráulicos, Tomo II
- 5.- *Estudios de calidad del agua*, S.A.R.H.
- 6.- *Parámetros y características de las aguas residuales*, C.I.E.C.A.
- 7.- *Protección y mejoramiento de la calidad del agua*, S.R.H.
- 8.- *Tratamiento de aguas residuales mediante Zanjales de Oxidación Tesis - Profesional*.
Cesar Alanís Sieres, 1979.
- 9.- *La demanda Bioquímica de Oxígeno en aguas contaminadas*.
Tesis Profesional.
Mario Alberto Martínez Bremont, 1983
- 10.- *Procesos biológicos para el tratamiento de las aguas residuales*
Tesis Profesional
Miguel Ángel Antonio Ramírez García, 1983
- 11.- *Disposición de las aguas residuales en las comunidades rurales*
Tesis Profesional
Genaro Avila Ortiz, 1983

- 12.- *Costos de tratamiento de aguas residuales*
Raúl Cuellar Chávez, Luis A. Gutiérrez Morales
División de Ingeniería Civil, Topográfica y Geodésica
Facultad de Ingeniería, UNAM.

- 13.- *New Ideas in Clarifiers*
Operations Forum
Water Pollution Control Federation
Washington, D. C., August 1987.