

71
2ej



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**"AIREACION EN EL PROCESO DE
Lodos Activados"**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
RICARDO RUBIO GAMBOA



DIRECTOR DE TESIS: M.C. CONSTANTINO GUTIERREZ PALACIOS

MEXICO, D. F.

1999

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

2754



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 esta 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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTTT/061/98

Señor
RICARDO RUBIO GAMBOA
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M. C. CONSTANTINO GUTIERREZ PALACIOS, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

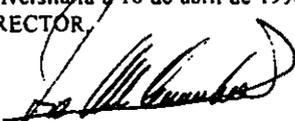
"AIREACION EN EL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS"

- INTRODUCCION**
- I. ANTECEDENTES**
 - II. TEORIA DE LA AIREACION**
 - III. SISTEMAS DE AIREACION MECANICA**
 - IV. SISTEMAS DE AIREACION POR DIFUSION**
 - V. EJEMPLO DEL DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN TANQUE DE AIREACION**
 - VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria a 16 de abril de 1998.
EL DIRECTOR.


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS
JMCS/GMP*Imf

DEDICATORIA

A mis padres Gabriel y Alicia, que siempre han estado al pendiente de mi educación y correcto desarrollo, y además han sabido apoyarme en las decisiones que he tomado. Esta tesis es el cumplimiento de una de mis metas, de esas que ustedes me han impulsado a conseguir. Gracias por educarme como lo han hecho.

A mi hermana Tania que con su cariño y comprensión ha sido parte muy importante para complementar mi lado humano y poder seguir adelante en mi formación para ser un mejor ser.

AGRADECIMIENTOS

Con todo mi respeto a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme proporcionado los medios propicios para lograr mi desarrollo integral y darme una adecuada formación como Ingeniero Civil.

A mi director de tesis el M.C. Constantino Gutiérrez Palacios que aceptó ser el responsable de llevar a buen termino este trabajo. Gracias.

A mis sinodales que de buena gana compartieron sus conocimientos y a los cuales considero grandes personas en varios aspectos. Gracias.

A la escasa gente que realmente considero como mis amigos, les agradezco su compañía durante el transcurso de mi vida y espero que consigan lo que se propongan ya que se lo merecen.

A todos mis familiares, que impulsaron de alguna manera el conseguir esta meta. Gracias.

A mis compañeros de la facultad con los cuales compartí grandes momentos que recordaré por siempre.

A toda la demás gente que se ha cruzado accidentalmente o que no ha tenido injerencia en mi vida, aunque no tengo que agradecerles por nada en específico. Gracias.

No hay nada más valioso que el ser una persona íntegra.

Esta, es aquella que es capaz de identificar si actúa congruentemente con su forma de pensar y es realmente honesto con las demás personas.

No hay sensación parecida al triunfo, en cualquiera de sus aspectos.

Para conseguir ser un triunfador, es necesario combinar tu integridad con el ser lo suficientemente inteligente para aprovechar las oportunidades que se presentan en el lugar, situación e instante preciso, sin dejarse influenciar por sus caprichos.

AIREACIÓN EN EL PROCESO DE

LODOS ACTIVADOS

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES	
I.1 Conceptos básicos.....	5
I.2 Principales fuentes de aguas residuales.....	9
I.3 Composición y características de las aguas residuales.....	11
I.3.1 Características físicas.....	11
I.3.2 Características químicas.....	12
I.3.3 Características biológicas	13
I.3.4 Composición de las aguas residuales	14
I.4 Operaciones y procesos de tratamiento de aguas residuales	
I.4.1 Operaciones unitarias.....	22
I.4.2 Antecedentes históricos del tratamiento biológico	27
I.4.3 Principales procesos biológicos.....	28
I.5 Generalidades del proceso de lodos activados	33
CAPÍTULO II TEORÍA DE LA AIREACIÓN	
II.1 Proceso de transferencia de oxígeno	
II.1.1 Teoría de la doble película.....	35
II.1.2 Ley de Henry.....	36
II.2 Determinación de la ecuación de transferencia de oxígeno.....	36
II.3 Factores que afectan la transferencia de oxígeno	
II.3.1 Factores involucrados en la transferencia de oxígeno.....	38
II.3.2 Correcciones aplicadas a la ecuación de transferencia de oxígeno...38	
II.4 Aplicaciones de la aireación	
II.4.1 Procesos que implican a la aireación.....	40
II.4.2 Principales modificaciones al proceso de lodos activados.....	41
II.4.3 Funciones de la aireación en el proceso de lodos activados.....	48

II.5 Clasificación de los sistemas de aireación

II.5.1 Evolución de los sistemas de aireación.....	48
II.5.2 Generalidades de los sistemas de aireación.....	49

CAPÍTULO III SISTEMAS DE AIREACIÓN MECÁNICA

III.1 Principios de diseño y operación

III.1.1 Determinación del rendimiento del aireador mecánico.....	53
III.1.2 Proceso de diseño para sistemas de aireación mecánica.....	54

III.2 Clasificación de los aireadores mecánicos

III.2.1 Generalidades.....	56
III.2.2 Aireadores mecánicos de eje vertical.....	57
III.2.3 Aireadores mecánicos de eje horizontal.....	58

III.3 Factores asociados con la aireación mecánica

III.3.1 Factores a considerar en la construcción del tanque de aireación...59	
III.3.2 Energía requerida para el mezclado.....	60
III.3.3 Variaciones sufridas en la transferencia de oxígeno.....	61

III.4 Proceso de selección de equipos de aireación mecánica

III.4.1 Selección de los aireadores mecánicos.....	65
III.4.2 Operación y mantenimiento de los aireadores mecánicos.....	66

CAPÍTULO IV SISTEMAS DE AIREACIÓN POR DIFUSIÓN

IV.1 Principios de diseño y operación

IV.1.1 Determinación del rendimiento del aireador por difusión.....	72
IV.1.2 Proceso de diseño para sistemas de aireación por difusión.....	75

IV.2 Clasificación de los aireadores por difusión

IV.2.1 Generalidades.....	77
IV.2.2 Difusores porosos.....	79
IV.2.3 Difusores no porosos.....	81
IV.2.4 Otros equipos de difusión.....	83

IV.3 Factores asociados con la aireación por difusión	
IV.3.1 Factores a considerar en la construcción del tanque de aireación.....	85
IV.3.2 Energía requerida para el mezclado.....	86
IV.3.3 Variaciones sufridas en la transferencia de oxígeno.....	86
IV.3.4 Equipo adicional utilizado en la aireación por difusión.....	87
IV.4 Proceso de selección de equipos de aireación por difusión	
IV.4.1 Selección del equipo de difusión	92
IV.4.2 Operación y mantenimiento de los sistemas de aireación por difusión.....	94
 CAPÍTULO V EJEMPLO DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TANQUE DE AIREACIÓN	
V.1 Justificación y planteamiento del problema	102
V.1.1 Información básica para el diseño	102
V.1.2 Diseño del tanque de aireación	103
V.1.3 Consideraciones para la construcción del tanque de aireación.....	107
V.2 Cálculo del oxígeno requerido durante el proceso	108
V.3 Diseño de los equipos de aireación	112
V.3.1 Equipo de aireación mecánica	113
V.3.2 Equipo de aireación por difusión	116
 CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
VI.1 Conclusiones	121
VI.2 Recomendaciones	126
 ANEXOS	 129
 BIBLIOGRAFÍA	 133

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. Composición de las aguas residuales de origen doméstico. (Cap. I)	14
TABLA 2. Principales características de las aguas industriales. (Cap. I)	15
TABLA 3. Principales operaciones unitarias y descripción. (Cap. I).....	23
TABLA 4. Principales procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales (Cap. I).....	30
TABLA 5. Principales modificaciones al proceso convencional de lodos activados y sus parámetros de diseño (Cap. II).....	42
TABLA 6. Dimensiones más usuales de un tanque de aireación en referencia al tamaño del aireador mecánico superficial (Cap III).....	61
TABLA 7. Tipos de difusores porosos y sus características principales (Cap IV)...	81
TABLA 8. Velocidades típicas del aire en tuberías (Cap IV).....	91
TABLA 9. Constantes cinéticas del proceso de lodos activados, parámetros "Y" y "Kd" (Cap. V)	104
TABLA 10. Características de tres diferentes modelos de aireadores mecánicos de baja velocidad (Cap. V)	115

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Aireador mecánico superficial de baja velocidad montado en plataforma	68
FIGURA 2. Aireador mecánico superficial de alta velocidad de tipo flotante	68
FIGURA 3. Aireador mecánico sumergido de eje vertical	68
FIGURA 4. Aireadores mecánicos superficiales de alta velocidad en funcionamiento	69
FIGURA 5. Aireador de baja velocidad de eje vertical en funcionamiento	69
FIGURA 6. Aireador mecánico superficial de eje horizontal (acercamiento).....	70
FIGURA 7. Aireador mecánico superficial de eje horizontal	70
FIGURA 8. Círculos de influencia de 12 aireadores de alta velocidad	70
FIGURA 9. Disco difusor poroso de membrana EPDM.....	97
FIGURA10. Disco difusor poroso.....	97
FIGURA11. Montaje de los discos difusores	97
FIGURA12. Disco difusor en funcionamiento	98
FIGURA13. Difusor poroso de membrana tipo tubular en funcionamiento.....	98
FIGURA14. Difusor poroso de membrana tipo tubular.....	98
FIGURA15. Algunos difusores utilizados en el mercado	98
FIGURA16. Montaje de difusores no porosos tipo tubo ranurado	98
FIGURA17. Difusores no porosos tipo tubo ranurado en funcionamiento.....	98
FIGURA18. Bombas sumergibles.....	99
FIGURA19. Colocación de las bombas sumergibles	99
FIGURA20. Aireador tipo jet	99
FIGURA21. Bomba sumergible	99
FIGURA22. Tubería de distribución de aire.....	100
FIGURA23. Sopladores centrífugos.....	100

INTRODUCCIÓN

A través de la historia la humanidad siempre ha tenido la necesidad de contar con agua que reúna ciertas características, ya sea para consumo o para poder utilizarla en las diversas actividades que con ella se desarrollan.

El crecimiento desmedido de las poblaciones ha ocasionado que la concentración de contaminantes tanto físicos, biológicos, químicos y energéticos haya aumentado. Todo esto ocasiona que el agua se convierta en un foco de infección, ya que los agentes patógenos ingresan al cuerpo del consumidor como componentes pasivos del agua ingerida.

Las enfermedades transmitidas por medio del agua pueden categorizarse como aquellas originadas por microorganismos y aquellas producidas por sustancias tóxicas inanimadas, suspendidas o disueltas en el agua.

En las enfermedades provocadas por microorganismos, la mayoría de estas se transmiten vía fecal-oral y tienden a manifestarse en el tracto intestinal, siendo la diarrea el síndrome más frecuente. En cambio las enfermedades provocadas por agentes físicos o químicos son causadas por la ingestión de agua que contiene sustancias dañinas o tóxicas; generalmente el daño no se presenta de manera violenta, sino después de una ingestión a largo plazo de bajas concentraciones del contaminante. Las sustancias tóxicas pueden tener un origen industrial, ser residuos de pesticidas o inclusive un origen natural como el arsénico, que por fortuna es muy poco común.

El vertido del agua residual a las corrientes o depósitos naturales sin un tratamiento previo, es otro gran problema ya que puede provocar la contaminación de las fuentes de abastecimiento de agua potable ya sean superficiales o subterráneas. Si se utilizan aguas contaminadas para riego, dependiendo de la concentración de contaminantes que presente, puede afectar a los productos agrícolas o contaminar mantos acuíferos mediante la infiltración.

Teniendo en cuenta estos factores, la naturaleza es incapaz de ejercer su proceso de autodepuración, por lo que ha sido necesario que el hombre vea la manera de separar las sustancias, materia y energía que han sido agregadas al agua llevando a cabo para esto conjuntamente procesos físicos, químicos y biológicos para devolverle al vital líquido las características necesarias para que pueda ser reutilizada.

El nivel de tratamiento va de acuerdo al tipo de reúso que se le pretenda dar al agua y a los procesos de tratamiento que se utilizan; éstos pueden ser físico-químicos o biológicos. En lo referente a los tratamientos biológicos cabe mencionar que las bacterias que realizan la degradación pueden ser de tipo aerobio, anaerobio o facultativo.

Uno de los métodos más utilizados para el tratamiento de aguas residuales es el proceso biológico aerobio denominado comúnmente como **lodos activados**. En las unidades de lodos activados el crecimiento de los flóculos microbianos producidos dentro de las aguas residuales sedimentadas y retornados sistemáticamente a ellas se mantienen aerobios, en suspensión y en circulación ya sea por medio de una agitación mecánica o neumática.

Viendo la importancia que tiene la **aireación** en este proceso y al no haber información adecuada que trate detalladamente sobre esta operación unitaria, se consideró pertinente la realización de ésta tesis que puede servir como un material de apoyo a los estudiantes que tengan el deseo de conocer el fenómeno de la aireación en el proceso de lodos activados.

Para lo anterior, en el primer capítulo se presenta una serie de conceptos que servirán como apoyo para entender este escrito, además se hace referencia a las aguas residuales y a los principales procesos de tratamiento que se utilizan en la práctica profesional. Se explica de una manera sencilla el proceso de lodos activados haciendo énfasis en la importancia que tiene la aireación en este proceso.

En el segundo capítulo se presentan las bases de la teoría de la aireación así como los modelos matemáticos referentes a la transferencia de oxígeno y a los factores que afectan dicho proceso. Se mencionan también otras aplicaciones que tiene la operación unitaria denominada aireación y se clasifican los diferentes sistemas de aireación.

En el tercer capítulo se hace referencia exclusivamente a los sistemas de aireación mecánica, mencionando los criterios que se consideran en el diseño y operación de los diversos equipos de aireación mecánica que existen en el mercado. Así mismo, se presentan los procedimientos generales para determinar la eficiencia de los equipos y el proceso de selección para elegir el más adecuado.

El cuarto capítulo trata de los diferentes equipos de aireación por difusión que existen y de igual manera que se hizo con los equipos de aireación mecánica, se desarrollan todos los conceptos mencionados en el párrafo anterior.

En el quinto capítulo se presenta un ejemplo de diseño de un tanque de aireación y se analiza su funcionamiento conforme a los dos sistemas de aireación; aireación mecánica y aireación por difusión. Además se realizan consideraciones constructivas generales en lo referente al tanque de aireación. Así que con datos que se presentan comúnmente en la práctica, se presenta numéricamente el procedimiento de diseño a seguir para determinar adecuadamente los sistemas de aireación.

En el sexto capítulo se presentan las principales conclusiones que se obtuvieron en el presente trabajo, así como las recomendaciones que se consideran pertinentes tener en cuenta para continuar con el estudio del tema tratado con una mayor profundidad y amplitud.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

I.1 CONCEPTOS BÁSICOS

El propósito de este subcapítulo, es presentar las definiciones de los principales conceptos que son necesarios para comprender el contenido de este trabajo.

Los conceptos se presentan en orden alfabético, para facilitar su búsqueda.

ABSORCIÓN. Operación unitaria que involucra la transferencia de moléculas entre dos o más fases (líquida, sólida o gaseosa).

ACUÍFERO. Formación geológica que es portadora de agua y que la transmite de un lugar a otro. Estrato que contiene agua.

ADSORCIÓN. Propiedad que presentan todos los sólidos a concentrar sobre su superficie una película de cualquier gas o líquido con el cual estén en contacto. Esta propiedad se emplea para transferir los solutos de algunas soluciones a las superficies de los sólidos que se ponen en contacto con ellas.

AIREADOR. Dispositivo utilizado para promover la aireación.

AEROBIO. Organismo que necesita la presencia de oxígeno molecular libre para realizar sus funciones vitales.

AGENTE CATALIZADOR. Es el producto o elemento que altera la rapidez con que se desarrolla una reacción química sin que sea determinante en la reacción en sí.

AGUAS CRUDAS. Son las aguas naturales, superficiales o del subsuelo que no han sido tratadas.

AGUA POTABLE. Son las aguas que cumplen los requisitos de las normas físico-químicas y biológicas establecidas por La Norma Oficial Mexicana, NOM-127-SSA1-1994.

AIREACIÓN. Es la operación unitaria que consiste en la producción de grandes superficies de contacto entre el aire y el agua, con el objeto de mejorar sus características físico-químicas mediante el intercambio de las concentraciones de algunas sustancias volátiles.

ANAEROBIO. Organismo que vive en ausencia de oxígeno libre, pero lo requiere en forma combinada ya sea como SO_4^{-2} , PO_4^{-3} , NO_3^{-1} .

AUTOPURIFICACIÓN. Es el proceso natural de purificación en una masa de agua móvil o tranquila, por el cual disminuye el contenido de bacterias, se estabiliza materia orgánica y el oxígeno disuelto regresa a su concentración normal.

BACTERIAS. Microorganismos unicelulares entre los cuales no hay diferenciación si son plantas o animales, generalmente sin pigmento, que se reproducen por división en uno, dos o tres planos. No requieren luz para su proceso vital y algunas utilizan la materia orgánica como alimento y otras la materia inorgánica.

BOMBA. Dispositivo mecánico que sirve para hacer que el agua u otro fluido fluyan, o para elevarlos o también para aplicarles presión.

BOMBA CENTRÍFUGA. Es una bomba que consiste en un impulsor colocado en una flecha rotatoria y encerrado en una coraza que tiene conexiones de entrada y descarga. El impulsor giratorio crea la presión en el líquido mediante la velocidad resultante de la fuerza centrífuga.

BOMBA DE ALTA VELOCIDAD. Grupo de bombas incluyendo las centrifugas y las de turbina en las que la energía debido a la velocidad, que se origina por un dispositivo que gira velozmente como lo es el rotor, es convertida en energía de presión, siendo esta última la que hace que el agua fluya por el tubo de descarga.

CARGA ESTÁTICA O PRESIÓN ESTÁTICA. Distancia vertical que existe entre la superficie libre de la fuente de abastecimiento y el punto de descarga libre, o nivel de la superficie de descarga libre.

CARGA HIDRÁULICA O COLUMNA DE AGUA. Altura desde la superficie libre de una masa de agua hasta un punto determinado bajo la superficie.

COAGULANTE. Agente que se adiciona al agua con el objeto de provocar y facilitar la separación de la materia que pueda contener en suspensión y en algunos casos en solución.

COLOIDE. Es una suspensión de sólidos finamente divididos que no se sedimentan fácilmente, pero que pueden ser eliminados por coagulación.

COMPUESTO. Es una sustancia cuyas moléculas están formadas por dos o más elementos diferentes que han entrado en combinación química para formar otra sustancia diferente.

CONCENTRACIÓN. Es una medida de la cantidad de sustancias disueltas contenidas por unidad de volumen de solución. Puede expresarse como partes por millón, mg/l, etc.

CONTAMINACIÓN. Dentro de los términos de tratamiento de aguas residuales, se refiere a la liberación o introducción dentro del agua de organismos patógenos o de sustancias tóxicas, que alteran sus características originales y que la hacen impropia para beberla o para usos domésticos.

DESINFECCIÓN. Proceso que consiste en aplicar al agua un desinfectante con el objeto de destruir los organismos infecciosos que pueda contener, tales como, bacterias patógenas, virus y protozoarios.

ELEMENTO. Sustancia que no puede subdividirse en otras más simples por medio de cambios químicos comunes.

FACULTATIVA. Organismo que tiene la capacidad de vivir bajo más de un conjunto específico de condiciones ambientales, ya sea realizando sus funciones vitales como un organismo aeróbico o en caso de no presentarse las condiciones adecuadas cambiar a uno anaeróbico.

FILTRACIÓN. Es el proceso por medio del cual se separa del agua la materia en suspensión, pasándola a través de un material poroso.

FLOCULACIÓN. Operación unitaria que consiste en agitar lentamente el agua previamente mezclada con los productos químicos adicionados, durante un periodo de tiempo prolongado para favorecer la aglomeración de la materia en suspensión o en solución en flóculos bien definidos y con suficiente tamaño y peso para que se asienten fácilmente. La agitación se efectúa por medios mecánicos o hidráulicos.

FLÓCULOS. Aglomeración de la materia en suspensión o solución mediante la adición de coagulantes o en lo referente al tratamiento de aguas residuales las pequeñas masas gelatinosas formadas en un proceso de lodos activados.

GASTO. Volumen de agua que pasa por unidad de tiempo, por un determinado punto de observación en un instante dado.

INFILTRACIÓN. Es el flujo o movimiento del agua a través de los poros del suelo u otro medio poroso.

PATÓGENO. Organismo que produce enfermedad.

PRESIÓN. Peso o fuerza total que actúa sobre una superficie.

SEDIMENTACIÓN. Operación unitaria en la cual se separa del agua la materia en suspensión por el asentamiento gravitacional de dicha materia en forma de flóculos.

TIEMPO DE FLUJO O DE PASO. Es el tiempo mínimo que requiere una partícula de agua para viajar a través de un tanque de mezcla, de floculación o de sedimentación.

TIEMPO DE RETENCIÓN. Tiempo necesario para que un volumen de agua fluya a través de un tanque de mezcla, de floculación o de sedimentación, o sea, es el tiempo requerido para llenar el tanque con un gasto dado.

TURBULENCIA. Es un estado del flujo de un líquido en el que éste es agitado por corrientes cruzadas o remolinos.

UNIDADES CON LECHO SUSPENDIDO DE LODOS. Son las unidades compactas en las que las aguas son sometidas a proceso, se hacen circular a través de un lecho de lodos en suspensión que obra como filtro y como catalizador del proceso físico-químico.

UNIDADES CON RECIRCULACIÓN DE LODOS. Son las unidades en las que los lodos formados se mantienen en movimiento circulando conjuntamente con el agua, produciéndose los mismos efectos que en las unidades con lecho suspendido de lodos.

1.2 PRINCIPALES FUENTES DE AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales cuentan con diversos orígenes y se pueden clasificar según la fuente de contaminación que les da sus principales características.

Se sabe que el agua residual es aquella agua limpia potable o de primer uso que al ser utilizada en las distintas actividades humanas, le son agregadas sustancias, materias, elementos y energía, que alteran sus características físicas, químicas y bacteriológicas, degradando normalmente su calidad inicial.

De acuerdo a esta definición las aguas residuales se pueden clasificar como:

- a) **AGUAS MUNICIPALES.** Son aquellas que comprenden el agua utilizada en actividades domésticas, tales como: limpieza (ropa, alimentos, pisos, automóviles), desperdicios alimenticios y desechos orgánicos (excreciones); también en esta categoría está el agua utilizada por comercios, servicios y negocios.

- b) **AGUAS INDUSTRIALES.** Se puede denominar de esta forma, al agua utilizada en procesos de preparación, fabricación y transformación de materia prima en bienes materiales, incorporando al agua, dependiendo el proceso, elementos cuyas concentraciones pueden ser tóxicas.

- c) **OTROS USOS.** Aquí se puede considerar las aguas que son utilizadas en otras actividades humanas, tales como: pesca, agricultura, recreación, minería, etcétera.

Es necesario conocer el aspecto que adoptan las aguas residuales, ya que éste varía con respecto al transcurso del tiempo. Es por esto, que se han designado a las aguas residuales con términos que hacen alusión a su estado y que a continuación se presentan.

1. **AGUAS RESIDUALES FRESCAS.** Como su nombre lo indica, son aquellas que han sido recién descargadas. Estas aguas presentan un color grisáceo, además de un olor mohoso que no es desagradable y que contiene gran cantidad de sólidos en suspensión. Estas aguas tendrán la calidad de frescas hasta que exista oxígeno disuelto suficiente para mantener la descomposición aerobia.

2. **AGUAS RESIDUALES SÉPTICAS.** Las aguas residuales entran en su estado séptico, cuando el oxígeno disuelto que se encontraba en el agua se agota y la materia entra en descomposición anaerobia. En este proceso de descomposición se desprende ácido sulfhídrico entre otros gases, provocando en el agua un olor fétido y muy desagradable al olfato. El color de las aguas se torna negro.

3. **AGUAS RESIDUALES ESTABILIZADAS.** Este estado indica que la materia ha sido degradada hasta el punto en que ya no está sujeta a posteriores descomposiciones, o bien a descomposiciones muy lentas. En esta agua nuevamente existe la presencia de oxígeno disuelto ya que lo ha tomado de la atmósfera. Presenta pocos sólidos en suspensión y un olor casi nulo.

I.3 COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES

Para obtener información de la naturaleza por medio de una muestra en particular, es necesario cuantificar diferentes propiedades mediante varios análisis que determinen sus características físicas, químicas y biológicas. Enseguida se describen en forma general los parámetros que son necesarios tener en cuenta según la NOM-001-ECOL-1996 relativa a los límites máximos permisibles de contaminantes y algunas otras propiedades relevantes.

I.3.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Las características físicas son en muchos casos relativamente fáciles de medir, inclusive utilizando únicamente la vista. A la población le interesa desde el punto de vista estético ya que estas son las que le dan la apariencia al agua residual, y como ya se ha mencionado, la temperatura afecta varias de las operaciones utilizadas en el tratamiento de aguas residuales. El parámetro físico más importante es el de contenido de sólidos.

1. **TEMPERATURA.** Es importante principalmente por su efecto en otras propiedades, por ejemplo aceleración de reacciones químicas, reducción en la solubilidad de gases, intensificación de olores y sabores, etcétera.
2. **OLOR.** Es causado principalmente por gases producidos por la descomposición de la materia orgánica, los cuales provocan aromas que suelen ser ofensivos al olfato.
3. **COLOR.** Es necesario diferenciar entre el color verdadero debido al material en solución y el color aparente debido a la materia en suspensión. Este parámetro indica el grado de descomposición de la materia orgánica o debido a algunas descargas industriales que colorean de una manera diferente el agua residual doméstica.
4. **SÓLIDOS.** El contenido de sólidos total se compone de materia en suspensión, materia flotante, materia coloidal y materia en solución, además de dividirse en sólidos de tipo orgánico e inorgánico. Estos sólidos pueden ocasionar que sin un debido tratamiento se desarrollen depósitos de lodos y condiciones anaerobias.

5. **TURBIDEZ.** Este parámetro es una propiedad que mide la transmisión de la luz en el agua e indica la calidad de las descargas en relación a la materia coloidal presente.

I.3.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

Las características químicas tienden a ser más específicas en su naturaleza que las características físicas y por eso son más útiles para evaluar las propiedades en una muestra de inmediato. Tratan generalmente acerca de la materia orgánica, la materia inorgánica y los gases que se encuentran contenidos en el agua residual.

1. **Potencial Hidrógeno (pH).** La intensidad de acidez o alcalinidad de una muestra se mide en la escala de pH, que mide la concentración de iones de hidrógeno presentes, en una escala de 0 - 14, siendo el 7 el valor neutro, ácido por debajo de 7 y alcalino por arriba de 7. El pH controla muchas reacciones químicas y la actividad biológica normal se restringe a una escala bastante estrecha de pH entre 6 y 8. Las aguas muy ácidas o alcalinas son indeseables debido a que son corrosivas o presentan dificultades en su tratamiento.
2. **POTENCIAL DE ÓXIDO-REDUCCIÓN.** En cualquier sistema que experimenta oxidación hay un cambio continuo en la relación de los materiales en la forma reducida y aquellos en la forma oxidada. Las reacciones aerobias muestran valores de potencial O-R > +200 mV, las reacciones anaerobias ocurren por debajo de +50 mV.
3. **DUREZA.** Es la propiedad del agua que evita que el jabón haga espuma y produce incrustaciones en los sistemas de agua caliente. Es debida principalmente a los iones metálicos Ca^{++} y Mg^{++} , aunque también son responsables el Fe^{++} y Sr^{++} . No representa riesgo para la salud, pero las desventajas económicas del agua dura incluyen un consumo excesivo de jabón y costos más altos de combustible.
4. **OXÍGENO DISUELTO (OD).** El oxígeno es poco soluble en el agua y es un elemento esencial para la respiración aerobia de los microorganismos y de otras formas de vida.

5. **MATERIA ORGÁNICA.** Debe ser conocida su composición, ya que debido a su variedad, muchos de ellos no pueden o son degradados muy lentamente por un proceso biológico de descomposición. La materia orgánica incluye compuestos como: proteínas, carbohidratos, aceites, grasas, fenoles y pesticidas.

6. **DEMANDA DE OXÍGENO.** La indicación del contenido orgánico de un desecho se obtiene al medir la cantidad de oxígeno que se requiere para su estabilización.
 - a) **DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO).** Mide la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos mientras descomponen la materia orgánica.
 - b) **DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO).** La oxidación química que usa una mezcla hirviendo de dicromato de potasio y ácido sulfúrico concentrado.

7. **NUTRIENTES: FÓSFORO Y NITRÓGENO.** Son elementos importantes ya que las reacciones biológicas sólo pueden efectuarse en presencia de estos nutrientes.

8. **METALES.** Es necesaria determinar su presencia, ya que hay muchos que son nocivos y son necesarios removerlos del agua residual. Los principales son: arsénico, cadmio, cianuro, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo y zinc.

I.3.3 CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS

Casi todos los desechos orgánicos contienen grandes cantidades de microorganismos; el agua residual contiene más de 10^6 /ml, pero los números reales presentes regularmente no se determinan. Entre los constituyentes biológicos se encuentran animales, plantas, virus y protistas.

Los conocimientos biológicos con que el ingeniero sanitario debe estar familiarizado incluyen: el conocimiento de los grupos principales que se encuentran en las aguas residuales, así como aquellos que intervienen en el tratamiento biológico, el de los microorganismos utilizados como indicadores de contaminación, además de los métodos utilizados para valorar la toxicidad de las aguas residuales.

Después de tratarse el agua residual, el agua tratada contiene una gran cantidad de microorganismos al igual que muchas aguas superficiales naturales, pero algunos pueden ser patógenos y ocasionar graves enfermedades. Por esto es necesario un proceso de desinfección del agua tratada.

I.3.4 COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES

En el siguiente cuadro se presentan los principales constituyentes físicos, químicos y biológicos presentes en un agua residual de origen doméstico sin tratamiento y sus concentraciones se expresan en mg/l a excepción de los sólidos sedimentables que se encuentran en ml/l.

TABLA 1

CONSTITUYENTE	CONCENTRACIÓN		
	FUERTE	MEDIANA	DÉBIL
SÓLIDOS TOTALES	1200	720	350
SÓLIDOS DISUELTOS	850	500	250
FIJOS	525	300	145
VOLÁTILES	325	200	105
SÓLIDOS DISUELTOS	350	220	100
FIJOS	75	55	20
VOLÁTILES	275	165	80
SÓLIDOS SEDIMENTABLES	20	10	5
DBO₅ A 20 °C	400	220	110
CARBÓN ORGÁNICO TOTAL	290	160	80
DQO	1000	500	250
NITRÓGENO TOTAL	85	40	20
ORGÁNICO	35	15	8
AMONIO LIBRE	50	25	12
NITRITOS	0	0	0
NITRATOS	0	0	0
FÓSFORO TOTAL	15	8	4
ORGÁNICO	5	3	1
INORGÁNICO	10	5	3
CLORUROS	100	50	30
ALCALINIDAD (CaCO₃)	200	100	50
GRASAS	150	100	50

ADAPTADO DE "WASTEWATER ENGINEERING: TREATMENT, DISPOSAL & REUSE" METCALF-EDDIE, THIRD ED. 1991.

En el siguiente cuadro se presentan las principales características de las aguas residuales industriales, las cuales como se puede apreciar varían notoriamente de acuerdo con el ramo de la industria que les da origen. Además se mencionan los métodos de tratamiento adecuados para corregir los trastornos sufridos por el agua. Las industrias se agruparon en seis ramos principales de producción: vestido, comida y medicinas, materiales, química, energía y energía nuclear.

TABLA 2

INDUSTRIAS QUE PRODUCEN DESECHOS	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	MÉTODOS DE TRATAMIENTO Y DE DISPOSICIÓN
<p>VESTIDO</p> <p>TEXTILES</p> <p>ARTÍCULOS DE PIEL</p> <p>LAVADO DE ROPA</p>	<p>Alta alcalinidad, colorantes, alta DBO y temperatura, alta cantidad de sólidos suspendidos.</p> <p>Alta cantidad de sólidos totales, dureza, sales, sulfatos, cromo, pH, cal precipitada, alta DBO.</p> <p>Alta turbiedad, alcalinidad y sólidos orgánicos.</p>	<p>Neutralización, precipitación química, tratamiento biológico, aireación y/o filtros percoladores.</p> <p>Igualación, sedimentación y tratamiento biológico.</p> <p>Cribado, precipitación química, flotación y adsorción.</p>
<p>COMIDA Y MEDICINAS</p> <p>COMIDA ENLATADA</p> <p>PRODUCTOS DE CONSUMO DIARIO</p>	<p>Alta en sólidos suspendidos, sólidos coloidales y materia orgánica disuelta.</p> <p>Alta en materia orgánica disuelta, principalmente proteínas, grasas y lactosa.</p>	<p>Cribado, tratamiento por lagunas, absorción terrestre o irrigación por aspersion.</p> <p>Tratamiento biológico, aireación, filtros percoladores, lodos activados.</p>

BEBIDAS FERMENTADAS Y DESTILADAS	Alta en sólidos orgánicos disueltos, contenido en nitrógeno y almidones fermentados o sus productos.	Recuperación, concentración por centrifugación y evaporación, filtros percoladores; alimento para animales; digestión de lodos propios del proceso.
CARNE Y PRODUCTOS AVÍCOLAS	Alta en materia orgánica suspendida y disuelta, sangre, otras proteínas y grasas.	Cribado, sedimentación y/o flotación, filtros percoladores.
DESPERDICIOS ANIMALES	Alta en sólidos orgánicos en suspensión.	Disposición terrestre y lagunas anaerobias.
AZUCAR DE REMOLACHA	Alta en materia orgánica suspendida y disuelta, conteniendo azúcares y proteínas.	Reciclaje, coagulación y tratamiento por lagunas.
PRODUCTOS FARMACEÚTICOS	Alta en materia orgánica suspendida y disuelta, incluyendo vitaminas.	Evaporación y secado, alimento para animales
LEVADURAS	Alta en sólidos (principalmente orgánicos) y en DBO.	Digestión anaerobia, filtros percoladores.
VINAGRES	pH variable, altos sólidos en suspensión.	Mantenimiento casero, cribado y estabilización
CAFÉ	Alta DBO y sólidos suspendidos.	Cribado, estabilización y filtros percoladores.
PESCADO	Muy alta DBO, sólidos totales orgánicos y olor	Evaporación de los residuos totales; descarga al mar
ARROZ	Alta DBO, sólidos suspendidos y totales (principalmente almidón).	Coagulación con cal, digestión.
REFRESCOS	Alto pH, sólidos suspendidos y DBO.	Cribado, aparte de descarga al drenaje público.

<p>PANADERIAS</p>	<p>Alta DBO, aceite, detergentes, azucares, harina.</p>	<p>Sujeto a oxidación biológica.</p>
<p>PRODUCCIÓN DE AGUA</p>	<p>Minerales y sólidos suspendidos.</p>	<p>Descarga directa a corrientes o indirectamente a través de lagunas.</p>
<p>AZUCAR DE CAÑA</p>	<p>Materia orgánica soluble con relativa alta DBO de naturaleza carbonosa y un pH variable.</p>	<p>Neutralización, recirculación, tratamiento químico, algunos procesos de oxidación aeróbica.</p>
<p>AGRICULTURA</p>	<p>Alta materia orgánica y DBO, además de soluciones que contienen detergentes.</p>	<p>Tanques de oxidación biológica, algunos tipos de digestión de composta y anaeróbica, disposición terrestre.</p>
<p>MATERIALES</p> <p>PAPEL Y CELULOSA</p> <p>PRODUCTOS FOTOGRAFICOS</p> <p>ACERO</p>	<p>Alto o bajo pH, color, alta concentración de sólidos en suspensión, coloidales y disueltos.</p> <p>Alcalino, contenido de varios agentes reductores orgánico e inorgánicos.</p> <p>Bajo pH, ácidos, cianógeno, fenol, coque, calizas, álcali, aceites, y partículas finas suspendidas.</p>	<p>Sedimentación, lagunas, tratamiento biológico, aireación y recuperación de residuos.</p> <p>Recuperación de plata; descarga de los desperdicios en el drenaje municipal.</p> <p>Neutralización, recuperación y reuso, coagulación química.</p>

<p>PRODUCTOS METÁLICOS</p>	<p>Ácido, metales tóxicos, minerales.</p>	<p>Cloración alcalina del cianuro, reducción y precipitación de cromo, precipitación con cal de otros metales</p>
<p>PRODUCTOS DE HIERRO FUNDIDO</p>	<p>Alto contenido de sólidos en suspensión, principalmente arena, arcilla y carbón.</p>	<p>Cribado selectivo, secado de las arenas recuperadas.</p>
<p>ACEITES Y REFINERIAS</p>	<p>Alta concentración salina, alta DBO, olor, fenoles y compuestos de sulfuros.</p>	<p>Separación, recuperación, inyección de sales; acidificación y quema de los lodos alcalinos.</p>
<p>COMBUSTIBLES</p>	<p>Alto en aceites emulsificados y disueltos.</p>	<p>Prevención de fugas y derrames, flotación.</p>
<p>HULE</p>	<p>Alta DBO y olor, alto en sólidos en suspensión, pH variables, alto en cloruros.</p>	<p>Aireación, cloración, sulfatación y tratamientos biológicos.</p>
<p>VIDRIO</p>	<p>Color rojizo, sólidos suspendidos alcalinos no sedimentables.</p>	<p>Precipitación por medio de calcio y cloro.</p>
<p>PUERTOS NAVALES</p>	<p>Ácido, alta DBO.</p>	<p>Recuperación de productos derivados, igualación, recirculación y reuso, filtros percoladores.</p>
<p>PEGAMENTOS</p>	<p>Alta DQO, alta DBO, sólidos y fenoles.</p>	<p>Coagulación química; fosos de oxidación y otros tratamientos aeróbios.</p>

<p>MANUFACTURA DE VELAS</p>	<p>Ácidos grasos orgánicos.</p>	<p>Digestión anaerobia.</p>
<p>CONTENEDORES METÁLICOS</p>	<p>Partículas finas de metales, aceites, pH variable, metales disueltos.</p>	<p>Separación de aceites, precipitación química, almacenamiento en lagunas, absorción por carbón.</p>
<p>PETROQUÍMICOS</p>	<p>Alta DQO, metales, inhibe la acción biológica.</p>	<p>Recuperación y reuso, igualación y neutralización, coagulación química, sedimentación o flotación, oxidación biológica.</p>
<p>CEMENTO</p>	<p>Alta temperatura, sólidos en suspensión, sales inorgánicas.</p>	<p>Segregación por corrientes de contacto de polvo, neutralización y sedimentación.</p>
<p>MUEBLES DE MADERA</p>	<p>Desechos orgánicos del barnizado y sellado de la madera.</p>	<p>Evaporación o incineración.</p>
<p>ASBESTOS</p>	<p>Asbesto en suspensión y minerales sólidos.</p>	<p>Tanques de retención, neutralización y filtrado de arena.</p>
<p>PINTURAS Y TINTES</p>	<p>Contenido orgánico de resinas, aceites, solventes, etcétera.</p>	<p>Tanques de sedimentación para separación de pinturas, coagulación.</p>

QUÍMICOS		
ÁCIDOS	Bajo pH y bajo contenido orgánico	Neutralización, incineración cuando hay materia orgánica presente.
DETERGENTES	Alta DBO y jabones saponificados.	Flotación y despumación, precipitación con CaCl ₂ .
ALMIDÓN DE MAÍZ	Alta DBO y materia orgánica disuelta; principalmente almidón y productos relacionados.	Igualación, filtración biológica, digestión anaerobia.
EXPLOSIVOS	TNT, coloración, ácido, olor; contenido de ácidos orgánicos y alcohol de la pólvora y del algodón, metales, aceites y jabones.	Flotación, precipitación química, tratamientos biológicos, aireación, cloración del TNT, neutralización, adsorción.
PESTICIDAS	Alta en materia orgánica, estructuras de benceno, tóxico para las bacterias y los peces.	Dilución, almacenaje, adsorción por carbón activado, cloración alcalina.
FOSFATOS Y FÓSFORO	Arcillas, limos y aceites, bajo pH, alto en sólidos suspendidos, fósforo, sílice y fluoruros.	Lagunas, clarificación mecánica, coagulación y disposición de los desperdicios refinados.
FORMALDEHÍDO	Normalmente una DBO alta, tóxico para las bacterias en altas concentraciones.	Filtros percoladores, adsorción con carbón orgánico.
PLÁSTICOS Y RESINAS	Ácidos, caústica, materia orgánica disuelta, como fenoles, formaldehído, etcétera.	Descarga al drenaje municipal, reuso y descargas controladas.

CAPÍTULO I
ANTECEDENTES

<p>FERTILIZANTES</p> <p>QUÍMICOS TÓXICOS</p> <p>FUNERARIAS</p> <p>HOSPITALES Y LABORATORIOS</p>	<p>Ácidos sulfúrico, fosforoso y nítrico; elementos minerales como, P, S, N, K, Al, NH₃, NO₃, etcétera, Fl, algunos sólidos en suspensión.</p> <p>Varios elementos y compuestos tóxicos disueltos, como, Hg y PCBs.</p> <p>Sangre con contenido de sal, formaldehídos, alta DBO, enfermedades infecciosas.</p> <p>Bacterias, varios materiales químicos radiactivos.</p>	<p>Neutralización, almacenaje para reuso, sedimentación, remoción de NH₃, precipitación con cal.</p> <p>Retención y reuso, cambio en la producción.</p> <p>Descarga al drenaje municipal con retención y cloración.</p> <p>Descarga al drenaje municipal; Retención y aireación biológica en grandes extensiones.</p>
<p>ENERGÍA VAPOR</p> <p>LIMPIEZA DE PLANTAS DE DESECHOS</p> <p>CARBÓN</p>	<p>Caliente, un alto volumen, alto en sólidos inorgánicos disueltos.</p> <p>Partículas de SO₂, absorbentes impuros o NH₃, NaOH, etcétera.</p> <p>Alto en sólidos suspendidos, principalmente carbón; bajo pH, alto en H₂SO₄ y FeSO₄.</p>	<p>Enfriamiento por aireación, almacenaje de las brasas, neutralización de los desechos ácidos excesivos.</p> <p>Remoción de sólidos usualmente sedimentación, ajuste de pH y reuso.</p> <p>Sedimentación, flotación por espumas control de drene y sellado de las minas.</p>
<p>ENERGÍA NUCLEAR Y MATERIALES RADIATIVOS</p> <p>NO IDENTIFICADOS</p>	<p>Los elementos radioactivos pueden ser muy ácidos y calientes.</p> <p>Varios, pero en su mayoría materia orgánica y minerales</p>	<p>Concentración y contención, o dilución y dispersión.</p> <p>Interrupción de las fuentes, retención y tratamiento por varios medios.</p>

I.4 OPERACIONES Y PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

I.4.1 OPERACIONES UNITARIAS

El concepto de operaciones unitarias, según sugirió A. D. Little menciona que: "Cualquier proceso químico, independientemente de la escala en que se lleve a cabo, puede resolverse en una serie de coordenadas de lo que puede ser llamado acciones unitarias. El número de estas operaciones unitarias básicas no es grande, y se puede encontrar un número comparativamente reducido de ellas en cualquier proceso particular". (Fair, Geyer & Okun, 1994)

Este pensamiento, originado dentro de la ingeniería química, ha dado lugar a grandes contribuciones en el avance del tratamiento de aguas residuales, como: un mejor entendimiento de los procesos y capacidades inherentes en el tratamiento de aguas y aguas residuales; el desarrollo de modelos matemáticos y físicos sencillos o análogos de los mecanismos de tratamiento, y su uso para identificar los componentes básicos del diseño de plantas de tratamiento; la coordinación de los procedimientos efectivos de tratamiento para obtener el comportamiento deseado de las plantas y la calidad del efluente.

La mayor parte de los procesos de tratamiento de aguas residuales originan cambios en la concentración de una sustancia específica, por desplazamiento de dicho sustancia al interior o exterior del agua; esto recibe el nombre de transferencia de fase.

En la siguiente clasificación se mencionarán las principales operaciones unitarias y sus características relacionadas con las fases y estados más comunes, además de presentar una breve explicación de qué consiste cada proceso.

TABLA 3

OPERACIÓN UNITARIA	CARACTERÍSTICAS Y EJEMPLOS
TRANSFERENCIA DE GASES AIREACIÓN	<p>La transferencia de gases consiste en la exposición del agua al aire o a otras atmósferas bajo presiones normales, incrementadas o disminuidas; es posible desprender o desabsorber los gases, o bien absorberlos o disolverlos.</p> <ul style="list-style-type: none">a) La adición de oxígeno por aireación mediante aspersión o burbujeo para la desferrización y desmanganización del agua y para la creación o mantenimiento de condiciones aerobias en las aguas residualesb) La remoción de bióxido de carbono, ácido sulfhídrico y sustancias volátiles olorosas, por aireación por aspersión o burbujeo, para el control de la corrosión y el olor.c) La adición de ozono, cloro o bióxido de cloro, mediante torres de ozonización o cloradores de gas para desinfección o destrucción de olores.d) La liberación del oxígeno por evacuación en desgasificadores para el control de corrosión.e) La recarbonatación de agua ablandada por cal.

<p>TRANSFERENCIA DE IONES</p> <p>COAGULACIÓN QUÍMICA</p> <p>PRECIPITACIÓN QUÍMICA</p> <p>INTERCAMBIO IÓNICO</p> <p>ADSORCIÓN</p>	<p>Para que pueda llevarse a cabo, es necesario agregar productos químicos formadores de flóculos, con el propósito de englobar o combinarse con los sólidos sedimentables, pero en particular con otros sólidos que no son sedimentables o lo hacen de manera muy lenta y con coloides, para formar agregados que sedimentan rápidamente.</p> <p>En esta operación se separan las sustancias disueltas de la solución. Los productos químicos agregados son solubles y los iones liberados reaccionan con los que están presentes en el agua residual.</p> <p>En esta operación se intercambian iones específicos contenidos en el agua por iones complementarios que son parte del complejo de un medio de intercambio sólido.</p> <p>En la adsorción, las fuerzas interfaciales remueven los iones y moléculas (adsorbatos) de la solución y los concentran en la interface de los adsorbentes.</p>
<p>ESTABILIZACIÓN DE SOLUTOS</p>	<p>El agua se estabiliza mediante una variedad de operaciones en las que los solutos objetables se convierten en formas no objetables, sin remoción.</p>

<p>TRANSFERENCIA DE SÓLIDOS</p> <p>CRIBADO</p> <p>SEDIMENTACIÓN</p> <p>FLOTACIÓN</p> <p>FILTRACIÓN</p>	<p>Las rejillas y cribas retienen sólidos en suspensión y flotación mayores que sus aberturas. Los dispositivos trituradores, combinados con las rejillas y cribas convierten los materiales retenidos, los cuales se regresan al agua para separarlos posteriormente por sedimentación.</p> <p>Es necesario reducir la potencia de arrastre del agua hasta que las partículas suspendidas puedan precipitarse por gravedad al fondo de los tanques de retención.</p> <p>En estas operaciones se reduce la potencia de arrastre del agua por reposo y algunas veces por la adición de agentes de flotación. Las sustancias más ligeras que el agua ascienden y son removidas por desnatadores. Los agentes de flotación incluyen pequeñas burbujas de aire y compuestos químicos, que generalmente son agentes humectantes y espumantes hidrofóbicos.</p> <p>Conceptualmente, la filtración logra combinar el cribado, la sedimentación y el contacto interfacial para transferir los sólidos en suspensión, o flóculos, a la superficie de materiales granulares, de los cuales se deben separar posteriormente.</p>
<p>TRANSFERENCIA MOLECULAR DE NUTRIENTES</p> <p>CONTACTO INTERFACIAL</p>	<p>Se generan flóculos o limos biológicamente activos de organismos vivos bajo condiciones aerobias, con el propósito de transferir los nutrientes putrescibles, principalmente los que se encuentran finamente divididos y disueltos, a las interfaces de flóculos, películas, limos o células.</p>

OPERACIONES VARIAS	
DESINFECCIÓN	Proceso mediante el cual se destruyen los organismos patógenos presentes en el agua (cloración y el hervido del agua).
TRATAMIENTO CON SULFATO DE COBRE	Sirve para el control de algas.
FLUORACIÓN	Sirve para reducir la caries dental.
DESALINIZACIÓN TÉRMICA	En este proceso se separa el agua dulce del agua salada, ya sea por medio de la evaporación o de la congelación.
CONCENTRACIÓN Y ESTABILIZACIÓN DE SÓLIDOS	
ESPESAMIENTO DE LODOS	Se logra mediante una agitación suficientemente prolongada, para formar agregados que logren sedimentarse más rápido con un menor contenido de agua.
CENTRIFUGACIÓN DE LODOS	Hace que los lodos se concentren, alimentándolos ya sea intermitentemente o continuamente, para separar los sólidos del licor de lodos en el que están suspendidos.
ELUTRIACIÓN	Por medio del lavado separa sustancias que interfieren físicamente en el acondicionamiento químico y la filtración por vacío.
ACONDICIONAMIENTO QUÍMICO	Coagula los lodos y mejora la deshidratación de los mismos.
FLOTACIÓN BIOLÓGICA	Eleva al lodo a la superficie, gracias al efecto que producen los gases propios de la descomposición.
FILTRACIÓN AL VACÍO	El lodo que va a deshidratarse se sostiene sobre un medio poroso y se extrae humedad de una capa de lodos por succión.

SECADO AL AIRE	Es la eliminación de humedad de los lodos, colocándolos sobre lechos de arena u otros materiales granulares, para que haga efecto la evaporación.
SECADO POR CALOR	Extracción de humedad por calentamiento.
DIGESTIÓN DE LODOS	Así se denomina a la descomposición anaerobia.
COMBUSTIÓN EN SECO O INCINERACIÓN	Se incineran los lodos por medio de altas temperaturas, ya sea solos o agregando combustible.
COMBUSTIÓN HUMEDA	Se produce la oxidación de lodos húmedos por altas temperaturas cercanas a los 282 °C y presiones entre 82 y 122 Kg/cm ² .

I.4.2 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL TRATAMIENTO BIOLÓGICO

Dentro del desarrollo en los tratamientos biológicos todo principia como una práctica agrícola en las granjas de aguas negras, en donde las aguas negras de los sistemas urbanos de drenaje, servían para irrigar y enriquecer los suelos.

El tratamiento de aguas residuales continuó en los suelos arenosos de Nueva Inglaterra con el método denominado como filtración intermitente a través de arena en tanto que pudieron intensificarse las dosificaciones y mejorarse el comportamiento mediante el pretratamiento de las aguas residuales.

Debido a los suelos compactos que existían en Inglaterra, se tuvieron que desarrollar lechos de pizarra dispuestos sobre ladrillos, y que después se mejoraron con escoria o piedra fragmentada. Estos lechos estaban adaptados para ser colonizados por grandes poblaciones microbianas, las que al alimentarse, removían de las aguas residuales los sólidos sedimentables y disueltos además de los compuestos orgánicos putrescibles.

Posteriormente la carga efectiva y el rendimiento de los lechos, que en un principio se operaban sobre un ciclo de llenado y vaciado seguido de reposo, se vieron incrementados al utilizar boquillas que descargaban las aguas residuales sobre el medio de contacto en corrientes constantes y casi saturadas de oxígeno. Ya no se llenaban los lechos, sino que se dejaron abiertos al aire a todo lo largo de su profundidad, de manera que las aguas residuales pudiesen gotear sobre las superficies de contacto hacia el sistema inferior de drenado, mientras el aire barria los lechos y los mantenía de esta forma aerobios. En Inglaterra se denominaron como lechos bacterianos y posteriormente como filtros percoladores, mientras que en los Estados Unidos de América se llamaron filtros rociadores.

Después de cierto tiempo de investigación, se comenzaron a construir las unidades de lodos activados, en las que se proporcionaba aire a las aguas residuales y a los flocúlos microbianos, no muy diferentes de las películas de lechos bacterianos, con el propósito de mantener aerobias las unidades, a pesar de la alta cantidad de microorganismos que ahí se encuentran y mantener los flocúlos en suspensión, sin tener un medio de contacto fijo.

Otro gran avance consistió en usar materiales sólidos de contacto junto con la aireación para formar los aireadores de contacto sumergidos o lechos aireados de contacto. Consiste en conjuntos verticales de hojas, ya sea de plástico o de asbesto-cemento barridas por chorros de aire que ascendían por los pasos que quedaban entre los materiales de contacto, colonizados por crecimientos superficiales microbianos.

I.4.3 PRINCIPALES PROCESOS BIOLÓGICOS

Los objetivos principales del tratamiento biológico en las aguas residuales son coagular y remover los coloides no sedimentables y degradar la materia orgánica en elementos o compuestos más simples. Estos objetivos varían dependiendo del uso que se le pretenda dar al agua tratada. Para conseguir esto es necesario la intervención de microorganismos, principalmente de bacterias aunque intervienen otros como hongos, protozoarios, rotíferos y a veces nemátodos.

Estos microorganismos realizan su proceso de crecimiento y reproducción tomando de la materia orgánica los nutrientes que necesita para realizar sus funciones de acuerdo a su metabolismo.

Cuando un organismo necesita de la presencia de oxígeno para realizar su función respiratoria y de esta manera obtener la energía para completar sus funciones, se les conoce como organismos aerobios.

En cambio hay otros organismos que generan energía por medio de la fermentación y que solo pueden existir en un medio carente de oxígeno, estos organismos son conocidos como anaerobios.

Los organismos designados como facultativos son aquellos que son capaces de cambiar su metabolismo de fermentativo a respiratorio dependiendo de la presencia o ausencia de oxígeno molecular.

Los procesos se denominan de acuerdo al medio en el que crecen las colonias de microorganismos.

Los procesos biológicos en que estos microorganismos se mantienen en suspensión en el líquido que los contiene se llaman de cultivo en suspensión. Existen también procesos en que las colonias de microorganismos están adheridos a otro medio inerte como rocas, escoria o materiales plásticos o cerámicos especialmente diseñados, y a éstos se les designa como de cultivo fijo o película fija.

A continuación se presenta un cuadro que muestra los principales procesos biológicos que se utilizan para el tratamiento de aguas residuales. Es conveniente resaltar que para el desarrollo de este trabajo sólo es de interés el proceso biológico aerobio conocido como todos activados.

TABLA 4

TIPO	NOMBRE COMÚN	USO
PROCESOS AEROBIOS		
CULTIVO SUSPENDIDO	<p>PROCESO DE LODOS ACTIVADOS Convencional (flujo pistón) Completamente mezclado Aireación graduada Oxígeno puro Reactor de lote secuencial. Contacto y estabilización Aireación modificada Aireación extendida Zanjas de oxidación Tanque profundo (90 ft) Pozo profundo</p> <p>NITRIFICACIÓN DE CULTIVOS EN SUSPENSIÓN</p> <p>LAGUNAS AIREADAS</p> <p>DIGESTIÓN AEROBIA Aire convencional Oxígeno puro</p>	<p>Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación).</p> <p>Nitrificación.</p> <p>Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación).</p> <p>Estabilización y eliminación de la DBO carbonosa.</p>
CULTIVO FIJO	<p>FILTROS PERCOLADORES Baja carga Alta carga</p> <p>FILTROS DE PRETRATAMIENTO</p> <p>SISTEMAS BIOLÓGICOS ROTATIVOS DE CONTACTO O BIODISCOS</p>	<p>Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación).</p> <p>Estabilización y eliminación de la DBO carbonosa.</p> <p>Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación).</p>

	REACTORES DE LECHO EMPACADO	Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación).
PROCESOS COMBINADOS	PROCESOS DE BIOFILTROS ACTIVADOS. Proceso de filtros percoladores por contacto de sólidos. Proceso de biofiltrado en lodos activados. Proceso de filtros percoladores en serie en lodos activados.	Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación).
PROCESOS ANÓXICOS		
CULTIVO EN SUSPENSIÓN	DESNITRIFICACIÓN CON CULTIVO EN SUSPENSIÓN	Desnitrificación.
CULTIVO FIJO	DESNITRIFICACION CON CULTIVO FIJO	Desnitrificación.
PROCESOS ANAÉROBIOS		
CULTIVO EN SUSPENSIÓN	DIGESTIÓN ANAEROBIA Baja carga, una etapa. Alta carga, una etapa. Doble etapa.	Estabilización y eliminación de la DBO carbonosa.
	PROCESO ANAEROBIO DE CONTACTO	Eliminación de la DBO carbonosa
	MANTO DE LODOS ANAEROBIOS EN FLUJO ASCENDENTE	Eliminación de la DBO carbonosa

CULTIVO FIJO	FILTRO ANAEROBIO	Eliminación de la DBO carbonosa, estabilización de desechos (desnitrificación)
	CAMA EXPANDIDA	Eliminación de la DBO carbonosa, estabilización de desechos.
COMBINACIÓN DE PROCESOS AEROBIOS, ANÓXICOS Y ANAEROBIOS		
CULTIVO SUSPENDIDO	FASE ÚNICA O DE MÚLTIPLES ETAPAS, VARIOS PROCESOS REGISTRADOS	Eliminación de la DBO carbonosa, nitrificación, desnitrificación, y eliminación de fósforo.
CRECIMIENTO VINCULADO (Suspendido y fijo)	UNA O VARIAS ETAPAS	Eliminación de la DBO carbonosa, nitrificación, desnitrificación, y eliminación de fósforo.
PROCESOS DE LAGUNAS	LAGUNAS AEROBIAS	Eliminación de la DBO carbonosa
	LAGUNAS DE MADURACIÓN (TERCIARIA)	Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación).
	LAGUNAS FACULTATIVAS	Eliminación de la DBO carbonosa
	LAGUNAS ANAEROBIAS	Eliminación de la DBO carbonosa (estabilización de desechos).

ADAPTADO DE "WASTEWATER ENGINEERING: TREATMENT, DISPOSAL & REUSE" METCALF-EDDIE, THIRD ED. 1991.

I.5 GENERALIDADES DEL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS

Como ya se ha mencionado, en las unidades de lodos activados, los crecimientos de los flóculos microbianos producidos dentro de las aguas residuales sedimentadas y retornados sistemáticamente a ellas se mantienen aeróbicos, en circulación y en suspensión, ya sea por medio de la agitación mecánica o neumática.

Las unidades estructurales que se utilizan para este contacto suspendido son: tanques y canales de terminación con tanques anexos, a través de los cuales pasa todo el flujo y, canales y fosas que cierran y retornan sobre si mismos, que son capaces de descargar a través de unidades sedimentadoras separadas.

Los requerimientos de oxígeno de los flóculos se suplen por medio de la absorción del aire, la que se origina por contacto con la atmósfera o por medio de aire comprimido inyectado a las aguas residuales.

Los flóculos frescos generados espontáneamente, es decir, formados sin el retorno de flóculos previamente formados, durante el paso de las aguas residuales a través de las unidades de aireación, no son generalmente lo suficientemente grandes en volumen para que exista una transferencia considerable de las impurezas del líquido a la fase sólida; debido a esto y para alcanzar las concentraciones necesarias de microorganismos y las intensidades de exposición, se bombean en retroceso flóculos previamente formados hacia el influente o las aguas que fluyen en forma de lodos retornados. Una vez que se alcanza un estado estable, una parte de los lodos se desecha en vez de recircularlos, como se había estado haciendo. Aquí se puede observar la importancia que tiene la aireación dentro del sistema de tratamiento aerobio denominado como lodos activados.

CAPÍTULO II

TEORIA DE LA AIREACIÓN

II.1 PROCESO DE TRANSFERENCIA DE OXÍGENO

II.1.1 TEORIA DE LA DOBLE PELÍCULA

La manera más sencilla de explicar la transferencia de gases, está dada por la teoría de la doble película. De acuerdo a esta teoría, es la presencia de dos capas, una líquida y otra gaseosa, en la interfase gas-líquido, la que proporciona la mayor parte de la resistencia al paso de las moléculas de gas de la masa en fase gaseosa a la líquida.

Cabe mencionar que para gases de gran solubilidad en la fase líquida (p. ej. absorción de SO_2 en agua), la mayor resistencia es la ofrecida por la película gaseosa. Para gases de poca solubilidad en fase líquida (p. ej., absorción de oxígeno por un agua residual, la resistencia limitante está en la fase líquida.

El proceso de transferencia de un gas (oxígeno) en un líquido (agua), se trata generalmente como una operación de transferencia de masa, desarrollándose en dos pasos.

Paso 1. Saturación de la interfase líquida entre las dos fases.
 C_s o C_{ST} es la concentración de saturación de oxígeno.

Paso 2. Paso de las moléculas de oxígeno de la interfase líquida a la masa del líquido. La concentración de oxígeno en el total de la masa líquida se denomina C , por lo que ($C < C_s$).

Con una baja turbulencia, proporcionada con poca mezcla, la resistencia a la difusión en la fase líquida es mayor que la resistencia de la película líquida. Con una turbulencia moderada, la primera disminuye, pudiendo gobernar la resistencia de la película líquida. Al aumentar la turbulencia se llega a romper la película del líquido y la transferencia de oxígeno se controla por el factor de renovación superficial, que es la frecuencia con la cual gotas del líquido, con una concentración C_s , reemplazan el líquido interfacial, en el cual la concentración es ahora también C_s .

II.1.2 LEY DE HENRY

La solubilidad del oxígeno en el agua está determinada por la "Ley de Henry", que esencialmente establece que la concentración de un gas escasamente soluble disuelto en un líquido, es directamente proporcional a la presión parcial de ese gas en su estado gaseoso, con el que la solución está en contacto. Esta relación es cierta para gases que son de poca solubilidad en el líquido de interés y donde el gas no entre en reacción con el líquido en el que se está disolviendo.

Matemáticamente se expresa como:

$$C_s = k_s p$$

C_s = Concentración de saturación del gas en el líquido.

K_s = Constante de proporcionalidad.

p = Presión parcial del gas de interés en su estado gaseoso.

II.2 DETERMINACIÓN DE LA ECUACIÓN DE TRANSFERENCIA DE OXÍGENO

A continuación se presentan las consideraciones matemáticas y el proceso que conduce a la obtención de la ecuación de transferencia de oxígeno, tomando en cuenta factores propios del proceso.

La velocidad de transferencia del oxígeno está dada por la ecuación de difusión de Fick, aplicada a través del líquido.

$$\frac{dM}{dt} = -DA \frac{dC}{dx}$$

Donde;

dM/dt es la velocidad de transferencia de Oxígeno en kg de O_2/h .

D es el coeficiente de difusión en m^2/h .

dC/dx_i es el gradiente de concentración del oxígeno $kg/m^3/m = kg/m^4$.

Hay que mencionar que la concentración C es función del tiempo y de la posición, $C = f(t, x)$.

Considerando que el espesor de la película es mínimo, puede suponerse una aproximación lineal para la disminución de concentración a través de la película del líquido y dividiendo ambos miembros entre el volumen de la fase líquida (V), la ecuación queda como:

$$CO = dC/dt = K_L a (C_s - C)$$

CO = Capacidad de oxigenación.

$K_L a$ = Coeficiente de transferencia de masa.

C_s = Concentración de saturación de oxígeno a la temperatura, presión y salinidad especificadas en mg/l.

C = Concentración de oxígeno disuelto en cualquier momento, en mg/l.

$C_s - C$ = Déficit de oxígeno.

Ahora integrando y convirtiendo a \log_{10} resulta una expresión para el coeficiente de transferencia de masa.

$$K_L a = \frac{2.303 \log ((C_s - C_1)/(C_s - C_2))}{(t_2 - t_1)}$$

C_1 = Concentración inicial de OD

C_2 = Concentración final de OD.

t_1 y t_2 = tiempos en que las mediciones del OD se efectúan.

II.3 FACTORES QUE AFECTAN LA TRANSFERENCIA DE OXÍGENO

II.3.1 FACTORES INVOLUCRADOS EN LA TRANSFERENCIA DE OXÍGENO

Los siguientes factores afectan la transferencia de oxígeno ya que modifican sus características o son necesarios tomarlos en cuenta para tener una mayor aproximación a la realidad.

1. **DÉFICIT.** Al igual que el calor fluye, de un punto con alta temperatura a uno de baja temperatura, proporcionalmente a la diferencia de temperaturas, así actúa la difusión del oxígeno; de un punto de baja concentración, en proporción a la diferencia de concentraciones entre dos puntos. Esto debe considerarse como el motor del proceso de oxigenación, y la tasa de la transferencia de oxígeno es directamente proporcional a la diferencia de concentraciones o déficits.
2. **RELACIÓN ÁREA-VOLUMEN.** La aireación más eficiente se conseguirá cuando la relación del área de agua expuesta al oxígeno por unidad de volumen del líquido aireado, es la mayor.
3. **TIEMPO DE CONTACTO.** Generalmente, la cantidad de oxígeno transferido es directamente proporcional al tiempo de aireación, y después, es necesario obtener un balance entre el tiempo de aireación y la geometría del sistema para obtener la operación óptima y más económica.
4. **TEMPERATURA.** Se sabe que si la temperatura aumenta, la solubilidad del oxígeno disminuye.

II.3.2 CORRECCIONES APLICADAS A LA ECUACIÓN DE TRANSFERENCIA DE OXÍGENO

Como se sabe, hay diversos factores que afectan el proceso de transferencia de oxígeno, por lo que es necesario tomar en cuenta, las variaciones que sufre este proceso al modificarse algunas de las condiciones externas que lo afectan o que se encuentran involucradas con éste.

- a) Corrección por temperatura. Se ha observado que $K_L a$ se incrementa con la temperatura, así que Eckenfelder propuso la siguiente ecuación.

$$K_L a_T = (K_L a)_{20} * \theta^{(T-20)}$$

Donde:

θ = El valor más utilizado es de 1.024

- b) Corrección hecha para considerar el efecto de los sólidos disueltos en el agua residual. El valor de α incrementa generalmente con el nivel de tratamiento. Es bueno mencionar que a este parámetro lo afectan también la temperatura, las características del equipo empleado, la intensidad de mezclado, la profundidad y geometría del tanque de aireación, además de la naturaleza de la materia orgánica disuelta.

$$\alpha = K_L \text{ del agua residual} / K_L \text{ del agua corriente}$$

- c) Correcciones por presión. Es necesario distinguir para este caso las diferencias entre los aireadores mecánicos y los aireadores por difusión.

Para el caso de aireación superficial, $C_s - C_{s,s}$ para indicar la concentración de saturación de agua corriente, en la superficie. P^v corresponde a la presión de vaporización del líquido.

$$C_s = (C_{s,s})_{760} * ((P - P^v) / (760 - P^v))$$

Para el caso de aireadores por difusión o por burbujeo, es necesario considerar la corrección de presión debida a la columna del líquido por encima del punto de aireación.

$$C_{s,M} = C_{s,s} * ((P_b / 2.066) + (O_1 / 42))$$

Donde:

P_b = Presión (kg/cm^2) a la profundidad que se introduce el aire que además incluye un factor de seguridad correspondiente a la pérdida de carga en las tuberías del sistema. Expresado matemáticamente, P_b es igual a:

$$P_b = P_{at} + (d/10.33) * 1.033 \text{ kg/cm}^2 + \text{pérdida de carga (kg/cm}^2)$$

Donde:

d = profundidad en metros.

P_{at} = presión atmosférica local.

O_1 = % en moles de oxígeno en el gas que sale por la superficie del tanque.

II.4 APLICACIONES DE LA AIREACIÓN

II.4.1 PROCESOS QUE IMPLICAN A LA AIREACIÓN

El aire se introduce a las aguas residuales en varios procesos unitarios para ayudar en la remoción de una gran variedad de materiales. En algunos procesos se utiliza como un gas barato, mientras que en otros es el encargado de dar el oxígeno que posee.

A continuación se dará un pequeño resumen de los procesos que implican a la aireación.

- a) **PREAIREACIÓN.** Dar una aireación previa a las aguas crudas por un periodo aproximado de unos 45 minutos, resulta en una mejoría de la tratabilidad y una mejor eficiencia a la hora de la sedimentación.
- b) **DESARENACIÓN AIREADA.** La arena es removida por una combinación de una sedimentación diferencial entre las arenas y la materia orgánica y la limpieza de la materia orgánica de la arena sedimentada. Se utilizan tubos de difusión de aire y es ese aire en circulación el que causa que el contenido del tanque gire de una manera uniforme. Las condiciones óptimas para la remoción de arena limpia prevalecen con una velocidad transversal superficial de 0.6 m/s y una mínima de 0.5 m/s en el fondo del tanque.
- c) **FLOTACIÓN.** Éste proceso consiste en sobresaturar el líquido con agua y después disminuir la presión; esto ocasiona la liberación de algunos de los gases disueltos como pequeñas burbujas que flotan suspendidas con sólidos a la superficie.
- d) **REMOCIÓN DE GRASAS.** Este es un proceso colateral que resulta de la flotación o de la preaireación.
- e) **LODOS ACTIVADOS.** En este proceso se presentan múltiples variaciones que son tantas como los ingenieros que los diseñan; pero en todos los casos el aire se introduce para proveer el oxígeno necesario para sustentar la actividad biológica, que se encarga de degradar y remover un alto porcentaje de los contaminantes orgánicos

II.4.2 PRINCIPALES MODIFICACIONES AL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS

En el diseño del proceso de lodos activados se tienen que tomar varias consideraciones como son: el tipo de reactor a utilizar, la carga de microorganismos basada en la relación comida/masa (relación F/M), la producción de lodos, requerimientos y transferencia de oxígeno, requerimientos de nutrientes, características del efluente, presupuesto, ubicación de la planta y terreno disponible.

En sí, el proceso de lodos activados es muy flexible y se puede adaptar a casi cualquier tipo de problema, por lo que ha tenido un sin número de variaciones hechas al proceso convencional desarrollado en Inglaterra por Adern y Locket en 1914.

Las principales variaciones hechas al proceso, su descripción y sus principales características se muestran a continuación en la tabla 5.

En esta tabla se muestran parámetros que se describen a continuación:

θ_c = Es el tiempo medio de retención celular que un microorganismo permanece en un sistema de lodos activados, está determinado por la relación de la masa celular con la tasa de desperdicio celular del sistema. Se expresa en días.

F/M = Establece la relación que debe existir entre el alimento y la cantidad de microorganismos para un correcto funcionamiento del sistema. Se expresa en lb DBO₅/ lb MLVSS*día.

CARGA VOLUMÉTRICA = Cantidad de materia orgánica presente en un determinado volumen de agua. Se expresa en lb DBO₅/ 10³ft³*día.

V/Q = El tiempo de retención hidráulica nos proporciona el tiempo que debe permanecer el caudal dentro del tanque de aireación como mínimo.

Q_r/Q = Tasa de recirculación. Es la relación del agua clarificada que se debe mezclar con el flujo de retorno de lodos activados para inocular el agua residual con sólidos biológicos activos.

Nota: kg/m³*d x 62.4280 = lb/10³ft³*d.
Kg/kg*d x 1.0 = lb/lb*d

TABLA 5

NOMBRE DEL PROCESO Y EFICIENCIA EN LA REMOCIÓN DE DBO	DESCRIPCIÓN	θ_c, d	FM lb DBO ₅ / lb MLVSS* d	CARGA VOLU - MÉTRICA lb DBO ₅ / 10 ³ ft ³ ·d	MLSS mg/l (MILES) ·10 ³	V/Q h	Q ₂ /Q
CONVENCIONAL (FLUJO PISTÓN) CONVENTIONAL (PLUG-FLOW) 85-95%	El agua clarificada y los lodos activados reciclados entran desde la entrada del tanque de aireación y son mezclados por difusión o mecánicamente. La aplicación es constante a través de todo el tanque. Durante el periodo de aireación ocurren, la absorción, floculación y oxidación de la materia orgánica.	3-15	0.2-0.5	20-40	1-3	4-8	0.25-0.75
MEZCLA COMPLETA COMPLETE-MIX 85-95%	Este proceso es una aplicación del régimen de un tanque que presenta flujo continuo con mezcla. El agua y los lodos se introducen en varios puntos del tanque de aireación. La carga orgánica en el tanque de aireación y la demanda de oxígeno son uniformes. Utiliza ambos tipos de aireación.	1-15	0.2-1.0	50-120	1-6.5	3-5	0.25-1.0

CAPITULO II
TEORIA DE LA AIREACIÓN

<p>AIREACIÓN GRADUADA</p> <p>TAPERED AERATION</p> <p>85-95%</p>	<p>Esta es una modificación al proceso convencional de flujo pistón. Se varía las tasas de aireación en función de la demanda de oxígeno a través del tanque. Es necesario una mayor cantidad de oxígeno a la entrada y una menor a la salida. Esto se logra generalmente con diferentes espaciamientos entre los difusores. Utiliza sólo aireación por difusión.</p>	5 - 15	0.2 - 0.4	0.3 - 0.6	1.5 - 3.0	4 - 8	0.25 - 0.5
<p>AIREACIÓN POR ALIMENTACIÓN ESCALONADA</p> <p>STEP-FEED AERATION</p> <p>85-95%</p>	<p>Esta es una modificación al proceso convencional en donde el agua clarificada es introducida en distintos puntos del tanque para igualar la relación F/M (comida/masa microbiana), además de disminuir la demanda máxima de oxígeno. Generalmente se utilizan tres o más canales paralelos Utiliza aireación por difusión.</p>	3 - 15	0.2-0.5	40 - 60	1.5 - 3.5	3 - 5	0.25 - 0.75

CAPITULO II
TEORIA DE LA AIREACIÓN

<p>AIREACIÓN MODIFICADA</p> <p>MODIFIED AERATION</p> <p>60-75%</p>	<p>Esta variación al proceso convencional utiliza periodos mas cortos de aireación y más altas relaciones de F/M. La eficiencia en la remoción de DBO disminuye. Utiliza aireación por difusión</p>	<p>0.2 - 0.5</p>	<p>1.5-5.0</p>	<p>75 -150</p>	<p>0.2 - 1.0</p>	<p>1.5 - 5</p>	<p>0.05 - 0.25</p>
<p>ESTABILIZACIÓN POR CONTACTO</p> <p>CONTACT STABILIZATION</p> <p>80-90%</p>	<p>Este utiliza dos tanques separados para tratar el agua residual y para estabilizar los lodos. El lodo activado se mezcla con el influente ya sea crudo o clarificado en un tanque de contacto. El licor mezclado se sedimenta en un clarificador secundario y el retorno de lodos se airea separadamente en un tanque de reaeración para estabilizar la materia orgánica. Normalmente requiere un 50% menos en volumen de aireación que el proceso convencional. Utiliza ambos tipos de aireación.</p>	<p>5 -15</p>	<p>0.2-0.6</p>	<p>60 - 75</p>	<p>1 - 3 Para la unidad de contacto.</p> <p>4 - 9 Para la unidad de estabilización de sólidos.</p>	<p>0.5 - 1</p> <p>3 - 6</p>	<p>0.5 - 1.5</p>

CAPITULO II
TEORÍA DE LA AIREACIÓN

<p>AIREACIÓN EXTENDIDA O TOTAL</p> <p>EXTENDED AERATION</p> <p>75-95%</p>	<p>Es distinto al proceso convencional ya que opera en la fase endógena de respiración de los microorganismos lo que implica que requiere una baja carga orgánica y un tiempo de aireación mayor. Utiliza ambos tipos de aireación.</p>	<p>20 – 30</p>	<p>0.05 - 0.15</p>	<p>10 – 25</p>	<p>1.5 – 5</p>	<p>18-36</p>	<p>0.5 – 1.5</p>
<p>AIREACIÓN DE ALTA CARGA</p> <p>HIGH-RATE AERATION</p> <p>75-90%</p>	<p>Esta modificación consiste en que una alta cantidad de sólidos sedimentables (MLSS) se combinan con altas cargas volumétricas. Esto permite que una alta relación F/M y bajo tiempo de residencia celular con tiempos de retención hidráulicos pequeños. Utiliza aireación mecánica.</p>	<p>5-10</p>	<p>0.4-1.5</p>	<p>100 –1000</p>	<p>3 – 6</p>	<p>2 – 4</p>	<p>1 – 5</p>
<p>PROCESO KRAUS</p> <p>KRAUS PROCESS</p> <p>85-95%</p>	<p>Esta es una variación al proceso de aireación por pasos diseñado para tratar agua con bajo contenido de nitrógeno. Se añade un nutriente a una porción de los lodos que después se junta con el resto del flujo.</p>	<p>5 –15</p>	<p>0.3-0.8</p>	<p>40 –100</p>	<p>2 – 3</p>	<p>4 – 8</p>	<p>0.5 – 1.0</p>

CAPÍTULO II
TEORÍA DE LA AIREACIÓN

<p>OXÍGENO PURO</p>	<p>Se utiliza en lugar de la introducción de aire en el proceso convencional. El oxígeno se suministra en tanques de aireación cubiertos, donde una parte se pierde para reducir la concentración de bióxido de carbono. El volumen de oxígeno que se suministra es 4 veces más que en el convencional. Utiliza aireación superficial o por turbinas.</p>	3 - 10	0.25-1.0	100 - 200	3 - 8	1 - 3	0.25 - 0.5
<p>ZANJA DE OXIDACIÓN</p>	<p>Consiste de un canal ovalado equipado con equipo de aireación superficial. El agua entra a la zanja y circula a una velocidad de 0.25-0.35 m/s. Funciona con largos tiempos de aireación y un gran tiempo de retención.</p>	10-30	0.05-0.3	5 - 30	1.5 - 5	8 - 36	0.75 - 1.5
<p>REACTOR DE LLENADO-VACIADO</p> <p>SECUENCIA DE REACTORES</p> <p>85-95%</p>	<p>Funciona con el modelo de llenado - vaciado que involucra una mezcla completa. El licor mezclado es retirado al final de cada ciclo y se elimina el uso de un clarificador secundario.</p>	<p>N/A</p> <p>(No es aplicable)</p>	0.05-0.3	5 - 15	<p>1.5 - 5</p> <p>Varia dependiendo el ciclo</p>	12-50	<p>N/A</p> <p>(No es aplicable)</p>

CAPÍTULO II
TEORÍA DE LA AIREACIÓN

<p>REACTOR DE POZO PROFUNDO</p>	<p>Consiste en un pozo vertical que va de 120 a 150 m de profundidad, sustituye el clarificador primario y el tanque de aireación. Se recubre con una capa de acero y se ajusta con una tubería concéntrica para formar un reactor anular haciendo que el licor y el aire bajen a la parte central y baja del pozo para ascender por el espacio anular. Utiliza aireación por difusión.</p>	<p>NI (No hay información)</p>	<p>0.5-5.0</p>	<p>NI (No hay información)</p>	<p>NI (No hay información)</p>	<p>0.5-5</p>	<p>NI (No hay información)</p>
<p>REACTOR DE POZO PROFUNDO CON TANQUE DE AIREACIÓN</p>	<p>La disminución de DBO y amoníaco suceden en una sola etapa. Los modelos seguidos pueden ser de tipo flujo pistón o completamente mezclado. Utiliza ambos tipos de aireación</p>	<p>8 -20</p>	<p>0.10 - 0.25</p>	<p>5 - 20</p>	<p>1.5 - 3.5</p>	<p>6 - 15</p>	<p>0.5 - 1.5</p>
<p>REACTOR DE POZO PROFUNDO CON TANQUE DE AIREACIÓN SEPARADO</p>	<p>En esta variante, un tanque separado se utiliza para la nitrificación, operando por medio de una alimentación de agua con un tratamiento biológico previo. Utiliza ambos tipos de aireación.</p>	<p>15 - 100</p>	<p>0.05- 0.2</p>	<p>3 - 9</p>	<p>1.5 - 3.5</p>	<p>3 - 6</p>	<p>0.5 - 2.0</p>

ADAPTADO DE WASTEWATER ENGINEERING: TREATMENT, DISPOSAL & REUSE, METCALF-EDDIE, THIRD EDITION, 1991.

II.4.3 FUNCIONES DE LA AIREACIÓN EN EL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS

Dentro del proceso aerobio biológico conocido como lodos activados, la aireación se encarga de realizar principalmente tres funciones que son de gran importancia para que se pueda llevar a cabo este tipo de tratamiento.

1. Proporcionar el oxígeno que es requerido por el metabolismo de los organismos vivos, para realizar sus funciones.
2. Provee la circulación y la agitación necesaria para prevenir la sedimentación de los sólidos y mantener los microorganismos del lodo en un contacto íntimo con la materia orgánica disuelta y suspendida.
3. Libera del agua varios productos de desecho, producidos por el metabolismo de los microorganismos, como lo sería el CO_2 .

En la mayoría de los casos es la primera de las funciones, la que establece el requerimiento mínimo de aire a compresión o de energía mecánica a utilizarse.

El primer y tercer punto son procesos de transferencia de masa y que requieren para su correcto funcionamiento, grandes superficies de contacto entre el agua y el aire. La segunda requiere en cambio una suficiente energía mecánica suministrada al agua.

II.5 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE AIREACIÓN

II.5.1 EVOLUCIÓN EN LOS SISTEMAS DE AIREACIÓN

Los experimentos dentro del campo de la aireación comenzaron hace ya mucho tiempo en Inglaterra (1882), continuando en el tratamiento por aireación y filtros de aireación en Inglaterra y Estados Unidos simultáneamente, hasta llegar al proceso de lodos activados, el 3 de abril de 1914.

En un principio el aire era introducido por tuberías abiertas o con perforaciones en las mismas. Inclusive en 1904 se le otorgó una patente a Henderson en Inglaterra, por un difusor de lámina metálica perforado y posteriormente se otorgaron más patentes a otros diseñadores según iban variando los tipos y materiales que utilizaban en los difusores.

Conforme avanzó la investigación dentro del proceso de lodos activados, se descubrió que entre más pequeñas fuesen las burbujas se obtendría un mejor aprovechamiento del aire.

El taponamiento u obstrucción de los difusores siempre ha sido uno de sus principales problemas, así que cuando salieron al mercado los difusores de tipo poroso, el problema aumentó. Así que la aireación mecánica surgió como respuesta a los problemas que sufrían los sistemas de aireación por difusión.

Durante 1916 en Sheffield, Inglaterra se desarrolló un tanque experimental que utilizó aireadores de tipo helicoidal Arquimedeano, y fue hasta 1920, en que se desarrolló una planta de tratamiento utilizando ruedas de paletas horizontales en canales estrechos. Aireadores mecánicos que generaban corrientes de aire ascendentes y descendentes se desarrollaron en un esfuerzo para distribuir el aire eficientemente y evitar el problema del taponamiento, así se desarrolló un sistema de aireación superficial de corriente ascendente, utilizando para esto un cono central.

Como es posible apreciar, es necesario obtener una adecuada distribución del aire y esto se consigue de manera eficiente a través de la utilización de burbujas pequeñas, pero al presentarse el problema del taponamiento de los difusores debido a las impurezas del aire, ha sido necesario desarrollar sistemas de filtración del aire suministrado cada vez más eficientes.

II.5.2 GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE AIRACIÓN

Los sistemas de aireación se han dividido como se puede apreciar en el párrafo anterior, en aireadores por difusión y aireadores mecánicos; por lo que enseguida se procederá a dar una breve explicación, a manera de introducción, de cada uno de los sistemas atendiendo a sus generalidades.

a) AIREACIÓN MECÁNICA.

Los aireadores mecánicos están siendo usados extensamente para abastecer de oxígeno a las plantas de tratamiento, en las cuales se presentan una gran variedad de flujos y cargas orgánicas, dando una alta eficiencia de remoción a precios competitivos.

Los aireadores mecánicos pueden transferir oxígeno atmosférico al líquido por renovación superficial e intercambio; cuando están correctamente diseñados; los aireadores mecánicos llenan los requerimientos de mezclado en varias instalaciones abarcando un amplio rango de tamaños y configuraciones de tanques. Estos aireadores pueden transferir el oxígeno atmosférico dispersando aire comprimido alimentado debajo de la superficie a un agitador rotatorio o turbina.

Con los aireadores de tipo laminar, se presenta un alto grado de aireación, ya que se genera un alto nivel de turbulencia superficial. En cambio para un aireador de corriente de aire ascendente, el oxígeno es introducido al tanque elevando grandes volúmenes de líquido sobre la superficie del agua y exponiéndola en delgadas capas a la atmósfera.

Ambos tipos de aireadores transfieren al oxígeno a través de la incorporación y dispersión de aire dentro del líquido, debido a una alta agitación superficial.

Más recientemente las burbujas son descargadas desde un tubo o un anillo de regadera y son destruidas por la acción de la fuerza cortante ocasionada por la alta velocidad de las aspas rotatorias de la turbina moviéndose a través del líquido. El anillo de aspersión es alimentado por aire a compresión; en realidad éste sistema es una combinación de los aireadores mecánicos y por difusión.

En los sistemas de corrientes de aire descendentes, el oxígeno puede ser administrado por el aire, autoinducido desde el lado negativo que es producido por el rotor. Con éste sistema, los sopladores externos o compresores no son requeridos.

Los aireadores mecánicos de tipo cepillo, consisten en un fuste horizontal giratorio con peines, aspas o discos circulares unidas a barras en forma de T, extendiéndose por debajo de la superficie del agua.

b) AIREACIÓN POR DIFUSIÓN.

Los difusores son artefactos que introducen aire dentro de los líquidos. Se utilizan en todo tipo de plantas, desde las más pequeñas hasta las más grandes.

Los difusores se instalan en varios lugares debajo de la superficie líquida el tanque, ya sea en montaduras fijas o retráctiles. Los sopladores operan a una presión suficiente para vencer la carga estática sobre los difusores, aunados a las pérdidas.

Los difusores se pueden clasificar como difusores porosos y no porosos.

Los difusores porosos en forma de láminas o tubos son de cerámica, hechos a base de dióxido de silicio o de granos de óxido de aluminio retenidos en un medio poroso con un contenedor cerámico o del tipo no cerámico, que consiste en tubos envueltos con plástico o tubos revestidos de plástico.

Los difusores no porosos pueden ser de tipo orificio, válvula, boquilla o a contraflujo. Los del tipo boquilla y orificio, están contruidos de metal o plástico y tienen aberturas más grandes, liberando consecuentemente burbujas más grandes que los del tipo poroso. Los de válvula tienen un disco o válvula que cierra cuando el abastecimiento de aire se corta y de igual manera las burbujas son más grandes que las de los difusores porosos. Los de que funcionan a contraflujo experimentan una reducción del tamaño de sus burbujas, debido a la fuerza cortante del agua entrando en el difusor por su parte superior que se encuentra abierta en una dirección que va en dirección opuesta al flujo de la corriente de aire ascendente; estos difusores son de forma cuadrada.

CAPÍTULO III

SISTEMAS DE AIREACIÓN MECÁNICA

III.1 PRINCIPIOS DE DISEÑO Y OPERACIÓN

III.1.1 DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL AIREADOR MECÁNICO

La medición del rendimiento de los equipos de aireación mecánica se realiza en función a la tasa de transferencia de oxígeno al agua residual, expresándose en kg de O₂ / kW-hr ó lb de O₂ / hp-hr, todo esto medido en condiciones estándar.

Las condiciones estándar se presentan con las siguientes características.

1. La temperatura es de 20 ° C (68 ° F).
2. El oxígeno disuelto es 0.0 mg/l.
3. El líquido en que se realiza la prueba es agua del grifo y se obtienen las mediciones a nivel del mar.

La transferencia de oxígeno en estos aireadores se consigue mediante dos mecanismos: el mecanismo de turbulencia, que comprende la transferencia en la superficie turbulenta del líquido y el mecanismo de dispersión, que comprende la transferencia a las gotas esparcidas por las palas de la unidad.

Las pruebas se realizan bajo condiciones de flujo no establecido utilizando agua fresca, previamente deaerada con sulfito de sodio. Los aireadores superficiales que existen en el mercado, generalmente transfieren de 1.2 a 1.4 kg O₂/ kW*hr (2 a 4 lb O₂/hp*hr). (Metcalf-Eddie, 1991)

Para propósitos de diseño, el rendimiento estándar debe ser ajustado para reflejar las condiciones que se van a presentar en campo. Este ajuste es necesario ya que los datos que proporcionan los fabricantes son medidos en condiciones estándar, como ya se mencionó; pero cada caso es uno particular, ya que se presentan variaciones en parámetros como presión, temperatura y concentración de sólidos disueltos, mismos que modifican el proceso de transferencia de oxígeno.

Este ajuste se puede realizar utilizando la siguiente ecuación.

Ecuación propuesta por Eckenfelder y Ford (1968)

$$N = N_0 \left(\frac{\beta C_{walt} - C_L}{C_{S20}} \right) * 1.024^{(T-20)} \alpha$$

Donde:

N = lb O₂/hp*hr transferidas en campo, también se puede llamar **OTR** (Oxygen transference rate), dado en lb O₂/hr.

N₀ = lb O₂/hp*hr transferidas en condiciones estándar o llamado como **SOTR** (Standard Oxygen Transference Rate), dado en lb O₂/hr.

C_{walt} = Oxígeno de saturación para agua corriente a una determinada altura y Temperatura, dado en mg/l, (**Anexo 1**).

C_{S20} = Oxígeno de saturación en el agua corriente a 20 ° C, **9.17 mg/l**.

C_L = Concentración de oxígeno de operación, expresado en mg/l.

T = Temperatura, ° C.

α = Factor de corrección de transferencia en el oxígeno, debido a los constituyentes del agua residual, para el equipo de aireación mecánica va de 0.7 – 1.0.

β = Factor de corrección de tensión superficial-salina, oscila de 0.9-1.0, generalmente se utiliza el valor de 1.0.

Para una correcta selección, la tasa de oxígeno requerida para un desecho determinado es ajustada a las condiciones estándar expresado en las mismas unidades.

III.1.2 PROCESO DE DISEÑO PARA SISTEMAS DE AIREACIÓN MECÁNICA

Para el caso de esta tesis se tomó como referencia el criterio que utiliza Rubens S. Ramalho. (Ramalho,1993)

Es necesario antes de comenzar con el diseño, contar con la información básica necesaria, que es la que se enumera a continuación. Su obtención se podrá apreciar detalladamente en el capítulo 5. (Esta información se obtiene según indica el libro "Wastewater engineering; treatment, disposal and reuse", Metcalf-Eddie, NY, third edition, 1991).

1. Volumen del tanque de aireación determinado por el tipo de reactor biológico.
2. Oxígeno requerido (kg de O_2/hr), determinado según la variante del proceso de lodos activados seleccionado.
3. Temperatura de funcionamiento, $^{\circ}C$.
4. O.D. en funcionamiento en régimen constante (C_L), normalmente va de 0.5-1.5 mg/l. En caso de unidades de nitrificación se usan valores $>$ a 2 mg/l.
5. Coeficiente de transferencia de oxígeno, parámetros α y β .
6. Hay que obtener las características del aireador lo cual incluye la correlación entre el rendimiento de transferencia de referencia y la P^v además de la correlación entre la potencia específica y diámetro de influencia para sólidos en suspensión.

Los pasos que hay que seguir para el diseño son:

- a) De acuerdo a la ecuación de Eckenfelder y Ford, se calculan las condiciones para verano e invierno; se toma en cuenta de la ecuación todo menos el término N_o , por lo que queda una constante a la que se denomina K. Se puede ver que $(C_{WALT\beta} - C_L)$ es mayor en condiciones invernales, mientras que el término $1.024^{(T-20)}$ es mayor en verano; por lo que regirá la K que sustituida sea la menor, ya sea la de verano o la de invierno.
- b) Es necesario utilizar un método iterativo para obtener N_o . Se supone una potencia específica a la cual va a trabajar el aireador, y se toma como referencia las gráficas que da el fabricante del equipo que se desea emplear. Se sustituye en la ecuación de Eckenfelder-Ford y en base al resultado se determina la potencia requerida en función a; $P = O_2$ requerido / N. Ahora se calcula de nueva cuenta la potencia específica dividiendo P / V , repitiendo el proceso hasta llegar a un margen de error menor al 5%.

- c) Se determina primero el número de aireadores requeridos dividiendo: la potencia requerida / la potencia de la unidad de aireación y en base a esto se ve la disposición de los aireadores, tomando en cuenta el diámetro de influencia y dando un coeficiente de seguridad del 20%. Con estos datos ya se puede determinar la distancia o separación de los aireadores, además de preparar un diagrama para la disposición de los aireadores dentro del tanque de aireación.

En caso de que el fabricante no proporcione N_o (capacidad de transferencia de oxígeno en condiciones estándar), muchas autoridades permiten que el máximo que se pueda asumir sea de 2.0 lb O₂/hp-hr (1.22 kg O₂/kW-hr).

III.2 CLASIFICACIÓN DE LOS AIREADORES MECÁNICOS

III.2.1 GENERALIDADES

Los aireadores mecánicos se han clasificado comúnmente en dos grupos basados en su diseño y en la operación de los mismos: los aireadores con un eje vertical y los aireadores con eje horizontal. Ambos grupos se pueden dividir posteriormente en superficiales o sumergidos. (Metcalf-Eddie, 1991)

Gran parte de los aireadores superficiales se fijan sobre vigas que se disponen a través de los tanques de aireación, pero también se pueden instalar flotantes. La unidad es soportada por un flotador de fibra de vidrio reforzado, relleno con espuma de plástico, proceso que lo hace insubmersible.

Los aireadores superficiales proveen el oxígeno directamente de la atmósfera, en cambio los aireadores sumergidos obtienen el oxígeno de la atmósfera y en algunos casos del aire u oxígeno introducido desde el fondo del tanque de aireación.

De cualquier manera el bombeo o la acción de agitación de los aireadores ayuda a mantener el contenido del tanque de aireación en un estado de mezcla.

III.2.2 AIREADORES MECÁNICOS DE EJE VERTICAL

a) **AIREADORES SUPERFICIALES DE EJE VERTICAL.** Los aireadores mecánicos superficiales de eje vertical están diseñados para inducir una acción de bombeo en corrientes de flujo tanto ascendente o descendente. Consisten de impulsores o aspas parcial o totalmente sumergidas sujetas a los motores que se encuentran montados en estructuras flotantes o fijas. Los impulsores se fabrican de materiales como acero, hierro, aleaciones no corrosivas y plástico reforzado con fibra de vidrio.

Los impulsores se utilizan para agitar el agua residual de forma vigorosa, logrando que el aire de la atmósfera entre en contacto con el agua, consiguiendo un rápido cambio en la interfase, facilitando de esta manera la disolución del aire. Los aireadores superficiales indistintamente de su eje, pueden ser clasificados de acuerdo al tipo de impulsor utilizado, por ejemplo de tipo **radial o axial**, o por la velocidad de rotación del impulsor como de **baja o alta velocidad**.

Los impulsores radiales (fig. 1, 5) pertenecen a la categoría de baja velocidad (30 – 60 r.p.m.). Poseen una baja velocidad de salida, un gran diámetro de su impulsor, que va de 0.9 - 3.7 m (3-12 ft). El impulsor se maneja a través de una caja de velocidades por medio de un motor eléctrico (motorreductor). Tanto el motor como la caja de velocidades se montan en una plataforma soportada por pilares que llegan hasta el fondo del tanque o por medio de vigas que atraviesan el tanque, además de poderse montar en flotadores.

El líquido es introducido al impulsor del aireador en una dirección predominantemente vertical, después es impulsado por las aspas del impulsor y finalmente descarga un flujo que puede ser considerado como extremadamente rápido y con en el flujo relativamente lento del tanque se provoca un salto hidráulico. Algunos impulsores tienen un disco plano con aspas rectangulares o ligeramente curvadas en su sección periférica y se encuentran además ligeramente anguladas.

Se utilizan para profundidades de 0.9 - 9.1 m (3 – 30 ft), siendo lo más común su utilización para profundidades del tanque de 3.7 - 4.6 m (12 a 15 ft). De 4.6 – 9.1 m (15 a 30 ft) necesita la instalación de un tubo de aspiración. Cabe mencionar que en climas fríos la formación de escarcha puede afectar su funcionamiento. Su transferencia de oxígeno está estimada en el rango de 2 - 5 lb O₂/hp-hr.

Los impulsores axiales (fig. 2, 4, 8), son del tipo de alta velocidad (900 -1800 r.p.m.), siendo lo más común de 900 a 1200 r.p.m. así que presentan una alta velocidad de salida, con un diámetro pequeño del impulsor. Generalmente utilizan acoplamiento directos montados en la estructura flotante. Tiene un bajo costo inicial y es flexible en su operación, pero son de difícil acceso para su mantenimiento. Se utilizan para tanques que van de 0.9 – 5.5 m (3-18 ft) d profundidad. Su transferencia de oxígeno en condiciones estándar es de 2 – 3.6 lb O₂/hp-hr.

Los aireadores mecánicos superficiales, se pueden conseguir en tamaños y potencias que van desde 1 a 150 hp (0.75-100 kW).

b) AIREADORES SUMERGIDOS DE EJE VERTICAL. Los aireadores mecánicos sumergidos con un eje vertical (fig. 3) no solo se basan en una agitación violenta del agua para lograr la entrada del aire que se encuentra en la atmósfera para conseguir la transferencia de oxígeno, sino que también se introduce el aire u oxígeno por difusión al agua residual debajo del impulsor o de la corriente descendente que generan los aireadores radiales. Los impulsores se utilizan para dispersar las burbujas de aire y mezclar el contenido del tanque. Usualmente el diámetro de la turbina es de 0.1 a 0.2 el ancho del tanque.

Un tubo de aspiración se puede utilizar tanto en modelos de corriente ascendente o descendente para controlar el patrón de corriente del líquido dentro del tanque de aireación y asegurar que la introducción del aire vaya desde el fondo del tanque. El tubo de aspiración es un cilindro con orillas acampanadas montado concéntricamente al impulsor y se extiende desde el fondo del tanque hasta justo antes del impulsor. La transferencia de oxígeno en este tipo de equipos va de 2 a 4 lb O₂/hp-hr. Estos aireadores se pueden obtener en tamaños y potencias que van desde 1 a 150 hp (0.75-120 kW).

III.2.3 AIREADORES MECÁNICOS DE EJE HORIZONTAL

a) AIREADORES SUPERFICIALES DE EJE HORIZONTAL. El aireador superficial está diseñado a partir del modelo de Kessener de tipo cepillo, un artefacto usado para proveer tanto aireación como circulación en el proceso de zanjás de oxidación. (fig. 6, 7)

El aireador de tipo cepillo tenía un eje horizontal con cerdas montadas a ras de la superficie del agua. Al comenzar a girar rápidamente por medio de un motor eléctrico se salpicaba agua residual a través del tanque, promoviendo la circulación y logrando que entrara aire al agua residual. Ahora se utiliza, acero con variaciones en los ángulos o barras de acero en diferentes formas, barras o espadas de plástico en lugar de las cerdas. La transferencia de oxígeno va de 1.83 – 2.13 kg/kW-hr (3.0 a 3.5 lb/hp-hr).

b) AIREADOR SUMERGIDO CON EJE HORIZONTAL. Los aireadores de eje horizontal sumergido son similares en principio a los de tipo superficial, sólo que usan discos o paletas sujetas a un eje rotatorio para agitar el agua. Estos se han utilizado en el proceso de zanjas de oxidación. Los discos se sumergen en el agua residual alrededor de 1/8 a 3/8 de su diámetro y el agua entra de una manera continua y no de manera intermitente. Los recovecos en los discos introducen el aire atrapado debajo de su superficie mientras estos giran.

La separación de los discos varía dependiendo de los requerimientos de oxígeno y de mezclado en el proceso. Los requerimientos típicos de energía van de 0.15 a 1.0 hp por disco (0.1-0.75 kW/disco).

III.3 FACTORES ASOCIADOS CON LA AIREACIÓN MECÁNICA

III.3.1 FACTORES A CONSIDERAR EN LA CONSTRUCCIÓN DEL TANQUE DE AIREACIÓN

Los tanques de aireación se construyen casi siempre de concreto reforzado y se dejan sin cubrir para que estén en contacto con la atmósfera. La forma rectangular es preferible ya que permite que las paredes sean comunes cuando es necesaria la construcción de tanques múltiples. La capacidad requerida del tanque se determina en función del proceso de lodos activados seleccionado.

En lo referente a la aireación mecánica, el arreglo más eficiente es el de un solo aireador por tanque. Cuando se disponen varios aireadores en el mismo tanque, para mejorar la eficiencia, la relación largo-ancho del tanque debe ser múltiplos iguales con el aireador centrado en una configuración cuadrada para impedir la interferencia debida a las ondas hidráulicas.

La profundidad de los tanques de aireación varía generalmente en el rango de los 2.4 – 3.6 m.

Un bordo libre de 1 – 1.5 m es necesario cuando se trata de equipos de aireación mecánica, todo esto previendo la aspersión que se produce debido a los equipos.

Los tanques deben poseer compuertas de entrada o salida o válvulas para permitir que puedan ser puestos fuera de servicio para inspección y reparación.

Los muros comunes deben ser capaces de soportar la máxima presión hidráulica de cualquiera de los dos lados, esto quiere decir soportar las condiciones hidráulicas más desfavorables.

En lo que se refiere a las cimentaciones, éstas deben ser adecuadas para prevenir asentamientos, sobre todo las del tipo diferencial ya que pueden ocasionar fracturas al tanque. En un suelo saturado debe diseñarse para prevenir el fenómeno de flotación, cuando se vacían los tanques. Algunos de los métodos mas usados para prevenir la flotación incluyen el aumentar el espesor de la losa o la instalación de válvulas de alivio hidrostático. Los sistemas de vaciado se diseñan generalmente para un periodo de 16 horas.

III.3.2 ENERGÍA REQUERIDA PARA EL MEZCLADO

Para conseguir un mezclado efectivo es muy importante considerar el tamaño y la forma del tanque de aireación. Las variaciones en la forma del tanque pueden ser muchas, pero lo más común es tener en la práctica tanques de forma rectangular o cuadrada, mismos que pueden contener uno o más aireadores acomodados de diversas formas, tomando en cuenta el rango de influencia de los aireadores

La profundidad y el ancho del tanque de aireación para el caso de la aireación mecánica, dependen del tamaño del aireador. A continuación se muestra una tabla que contiene dimensiones que se utilizan comúnmente en referencia al tamaño de los aireadores más usuales, según los caballos de fuerza con los que cuenta.

TABLA 6

**DIMENSIONES MÁS USUALES DEL TANQUE
DE AIREACION EN REFERENCIA AL
TAMAÑO DEL AIREADOR SUPERFICIAL MECÁNICO**

Tamaño del aireador Hp	Dimensiones del tanque ft	
	Profundidad	Ancho
10	10 – 12	30 – 40
20	12 – 14	35 – 50
30	13 – 15	40 – 60
40	12 – 17	45 – 65
50	15 – 18	45 – 75
75	15 – 20	50 – 85
100	15 – 20	60 – 90

1 hp * 0.7457 = kW 1 ft * 0.3048 = m

Nota: Las profundidades de más de 35 ft se utilizan con mezcladores de tubo de succión sumergidos.

ADAPTADO DE WASTEWATER ENGINEERING; TREATMENT, DISPOSAL AND REUSE, METCALF-EDDIE, NY, THIRD EDITION, 1991.

Los requerimientos de energía típicos para mantener un régimen completamente mezclado con aireadores mecánicos varían desde 19 a 39 kW/10³ m³ (0.75 – 1.5 hp/10³ ft³). Para el caso de aireación mecánica superficial el grado de mezclado es inversamente proporcional a la profundidad del tanque, así que los valores más altos corresponden a los tanques más profundos y viceversa.

III.3.3 VARIACIONES SUFRIDAS EN LA TRANSFERENCIA DE OXÍGENO

Es necesario tomar en cuenta que desde finales de los años 50's la clave para seleccionar y medir los aireadores en toda la industria ha sido la prueba de reaireación en un régimen no establecido.

Hay que tomar en cuenta efectos que provocan la variación en la transferencia de oxígeno, como lo sería el efecto químico que lo aumenta, y al ver los resultados de transferencia de oxígeno en una prueba sin intervención química, aparecen dos efectos adicionales, que son: el efecto geométrico y el efecto que provoca el aumento en la tasa de reacción biológica.

EFECTO QUÍMICO

Las pruebas de reaireación en un régimen no establecido requieren de la remoción del oxígeno disuelto existente en el agua corriente o del grifo. Esta eliminación se realiza normalmente utilizando sulfito de sodio que reacciona con el oxígeno disuelto. Pero esta reacción debe ser catalizada utilizando iones de cobalto, como resultado de la reacción queda un compuesto precipitado de cobalto y puede aparecer como oxígeno disuelto si no se cuantifica, en un análisis químico mojado.

Esta es la razón por la que muchos fabricantes que no entienden completamente el efecto químico obtienen unas tasas de transferencia de oxígeno muy altas y luego tienen problemas para cumplirlas en tanques limpios o de baja concentración de cobalto.

El efecto de los químicos en la prueba de reaireación en un régimen no establecido como ya se mencionó, puede inflar el resultado de la transferencia de oxígeno obtenido en la prueba libre de químicos, de los aireadores probados en cualquier tanque de prueba. El resultado neto es que la combinación del efecto geométrico con el incremento biológico ha compensado cualquier efecto químico que se presentaba en los tanques de prueba cuando el equipo era probado sin considerar estos efectos.

La tasa de transferencia de oxígeno es proporcional al $K_L a$ y en experimentos se observó que añadiendo un 0.4 ppm a cada nivel de oxígeno disuelto cambia la pendiente de la línea incrementándose un 25%, cosa que concuerda con los investigadores que han probado con unas 2 ppm de cobalto como catalizador, arrojando resultados muy parecidos.

EFECTO GEOMÉTRICO

Los investigadores se han dado cuenta que cuando un aireador determinado se coloca en tanque que varía en su tamaño, la eficiencia de transferencia del oxígeno se ve afectada. Entre más pequeño sea el tanque, la eficiencia de transferencia aumenta.

Este incremento puede ser causado por el decreciente tiempo de agitación del tanque de aireación, ya que un aireador con una capacidad de bombeo determinada que es colocado en tanques cada vez más pequeños, hace que el tiempo de agitación sea menor y la velocidad en el líquido se vea incrementada. Este aumento puede provocar que se ayude en su trabajo al impulsor, incrementándose de esta forma la capacidad de bombeo, además de incrementar la tasa del flujo que pasa a través de la turbina del aireador. Al pasar un mayor flujo a través de la turbina, mientras no se experimenta un aumento en los caballos de fuerza, provoca que se incremente sustancialmente la capacidad de transferencia de oxígeno de cualquier aireador.

Otra de las causas potenciales es que entren burbujas de aire al flujo desde la turbina superficial. Esto se puede explicar fácilmente, ya que las paredes se acercan al aireador conforme decrece de tamaño el tanque, así que las burbujas pueden no tener el suficiente tiempo para escapar del flujo creado por la turbina. De esta manera las burbujas pueden irse al fondo del tanque de aireación, incrementando la cantidad de oxígeno disuelto.

En un tanque más grande las burbujas probablemente tengan tiempo de escapar a la atmósfera antes de que el patrón de flujo choque con la pared del tanque de aireación.

Los aireadores de alta velocidad son los que más se ven influenciados debido al efecto geométrico que los de baja velocidad como se ha reportado por investigadores como Eckenfelder, Kormanik, Ford, Garland, entre otros.

EFFECTO DEBIDO AL INCREMENTO DE LA TASA DE REACCIÓN BIOLÓGICA

Se pensó por años que los microorganismos podrían consumir una cantidad mayor de oxígeno que lo que predecía la prueba conocida como de agua limpia. Ahora se ha visto que existe la suficiente información para darle credibilidad a esta teoría. Numerosas pruebas realizadas con turbinas sumergidas y aireadores superficiales, muestran que en el proceso biológico de lodos activados, una vez que la tasa de consumo excede los 30 mg/l/hr, experimenta incrementos significantes en la transferencia de oxígeno. Las razones para saber porque sucede esto todavía no están completamente claras.

Se sabe que varias pruebas químicas realizadas en un régimen estacionario han mostrado valores mucho más altos en la transferencia de oxígeno que las realizadas en un régimen no estacionario. Como se sabe, las reacciones biológicas en cualquier proceso de tratamiento estable, son reacciones de régimen estacionario; esto puede explicar la más alta capacidad de transferencia mientras la tasa de consumo de oxígeno aumenta.

Otra posible explicación para el efecto biológico puede ser la presencia de agentes flotantes (surfactants). Un incremento en estos agentes activos flotantes, promueve la formación de burbujas pequeñas que incrementan el área de la superficie por unidad de volumen de la burbuja original. El área incrementada se relaciona directamente al área de transferencia de masa y provoca un efecto correctivo en el factor α .

Este efecto biológico no puede ser determinado con la precisión de la prueba de reaeración en flujo no establecido libre de químicos, pero los indicadores muestran del 10 al 30 % de incremento en la transferencia de oxígeno.

EQUILIBRIO DINÁMICO

Otro fenómeno experimentado cuando los aireadores superficiales se colocan en tanques con geometrías que se aproximan a las óptimas para la transferencia de oxígeno, es el equilibrio dinámico o el efecto dinámico de saturación. En estos sistemas el equilibrio de los valores del oxígeno disuelto (saturación) ronda el 5% sobre los valores dados en las pruebas de agua corriente, utilizando el procedimiento de reaeración en flujo no establecido.

Debido a la alta cantidad de caballos de fuerza utilizados al sistema y combinado con la geometría óptima para el flujo, se cree que se presenta el equilibrio dinámico debido al detenimiento de las burbujas de aire que son conducidas al fondo del tanque. El efecto global es un incremento en la fuerza motriz y un incremento en la transferencia de oxígeno que puede ser predecido considerando únicamente los efectos geométricos.

Es conveniente que en lo que respecta a la relación que guarda el círculo de influencia con la geometría del tanque, que en lo general trata de ser de una relación largo-ancho 1:1, en caso de no poder diseñarse el tanque de esta manera se buscan relaciones lineales como 2:1, 3:1, etc., guardando siempre la proporcionalidad.

Algunos autores recomiendan que si solo se va a utilizar un solo aireador se construyan tanques de tipo circular, siempre y cuando el círculo de influencia (zona en que el aireador logra tener una adecuada transferencia de oxígeno y una mezcla adecuada) cubra el área del tanque y de esta manera se presentan una menor problemática en lo que se refiere a las zonas muertas.

III.4 PROCESO DE SELECCIÓN DE EQUIPOS DE AIREACIÓN MECÁNICA

III.4.1 SELECCIÓN DE LOS AIREADORES MECÁNICOS

Los criterios que son necesarios tener en cuenta para una correcta selección del equipo de aireación mecánica son principalmente los siguientes:

En primera instancia hay que verificar qué equipos de aireación son más utilizados, dependiendo de la variante del proceso de lodos activados que se esté manejando y en base a ésta, ver los equipos que existen en el mercado que reúnen esas características.

Se determina la cantidad de oxígeno que requiere el proceso y en función a ésta, se puede seleccionar el equipo que otorgue una mayor eficiencia en la transferencia de oxígeno en las condiciones que se van a presentar en campo. Su valor es seleccionado a partir de curvas características de rendimiento que proporcionan los fabricantes del equipo. El uso de este parámetro para los aireadores mecánicos es de mucha utilidad, porque su valor es usualmente constante para condiciones de trabajo de un aireador en particular.

Otra limitante en el proceso de selección lo constituye el costo del equipo de aireación que se desea instalar, además de ser estrictamente necesario el verificar el espacio disponible con que se cuenta en la planta de tratamiento.

Ya estimadas las necesidades de transferencia de oxígeno, se calcula la potencia que va a requerir el tanque de aireación. Una vez determinada, se procede a verificar el tamaño de las unidades disponibles en el mercado y en función a la misma, el número de aireadores que se van a instalar.

Otros datos que proporciona el fabricante son: la zona de completo mezclado, la zona de dispersión de oxígeno completo, la capacidad de bombeo a través de la unidad y todos están en referencia a la profundidad o sumergencia en que fueron probadas, dando inclusive una tabla o gráfica de sumergencia contra la eficiencia de oxigenación, que muestra las variaciones y permite dar alternativas para encontrar el diseño óptimo. Otro dato que hay que considerar es el diámetro de rociado.

Tomando estos datos se puede diseñar el acomodo o distribución más conveniente de los aireadores dentro del tanque, teniendo en cuenta las debidas precauciones que ya fueron explicadas en los subcapítulos anteriores.

Hay que tomar en cuenta que también es necesario considerar el tamaño de la plataforma y el equipo adicional que es necesario instalar.

Es conveniente contar con el mayor número de presupuestos posible, buscando además de todo lo antes mencionado, una vida útil de por lo menos 10 años bajo trabajo continuo. También es conveniente buscar el respaldo de distribuidores altamente calificados y asegurarse de que haya refacciones en existencia del equipo se va a ordenar.

III.4.2 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS AIREADORES MECÁNICOS

Debido a que los aireadores mecánicos, no utilizan compresores, sopladores, difusores, filtros de aire o tubería de conducción de aire tienen un mantenimiento mínimo.

Es necesario verificar en los aireadores mecánicos lo siguiente:

- a) La lubricación del sistema motriz.
- b) Que todas las partes del aireador estén apretadas.
- c) Si el nivel de agua con el que se va a operar, permite una correcta sumergencia del impulsor o turbina del aireador.

- d) Que el motor gire adecuadamente y sea de clase F (a prueba de humedad).
- e) Que los elementos térmicos sean del tamaño apropiado.
- f) Si el aireador es de tipo flotante:
- El motor debe ser clase F.
 - Los anclajes deben ser seguros pero no tensarse.
 - La caja de conexiones del motor debe estar sellada.
 - Cerciorarse que el motor del aireador tenga sus resistencias calefactoras para condensados y por ende su dren para eliminar los condensados.
 - Que el impulsor esté balanceado dinámicamente.
 - Los cables de anclaje deben tener sus flotadores para evitar que se hundan cuando se le dé mantenimiento a un aireador fuera del tanque de aireación.
 - Si el anclaje está realizado con "muertos" (bloques de concreto en el fondo del tanque), procure que tengan amarrado un cordel y un flotador para facilitar su localización.

Es necesario que al realizar la compra de los aireadores mecánicos verificar que se entreguen junto con el equipo los manuales de mantenimiento y operación correspondientes.

Además es necesario llevar registros del tiempo que cada aireador lleva en servicio, la energía consumida por cada aireador, de todas las reparaciones y servicios prestados a cada unidad incluyendo las lubricaciones y reportar todos los cambios en la operación, apagones e incidentes sufridos.

Para contar con flexibilidad en la transferencia de oxígeno con estos aireadores, se puede variar la velocidad, el tiempo de aireación, ajustar el rotor y variar el número de unidades en operación.

En lo que se refiere al mantenimiento de los motores, es necesario darles un mantenimiento preventivo. Los diferentes tipos y tamaños de motores que se usan para los aireadores mecánicos no se lubrican de la misma manera, debido a que los moldes y técnicas de producción usados por los diferentes fabricantes no son las mismas, así que por lo general deben ser lubricados después de 2000 horas de operación o según lo que indiquen los manuales de mantenimiento y tienen que ser detenidos cuando empiezan a eliminar la grasa.

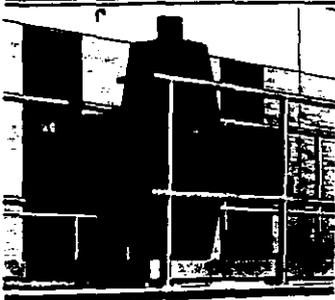


FIG. 1 Aireador mecánico superficial de baja velocidad montado sobre una plataforma.



FIG. 2 Aireador mecánico superficial de alta velocidad de tipo flotante.

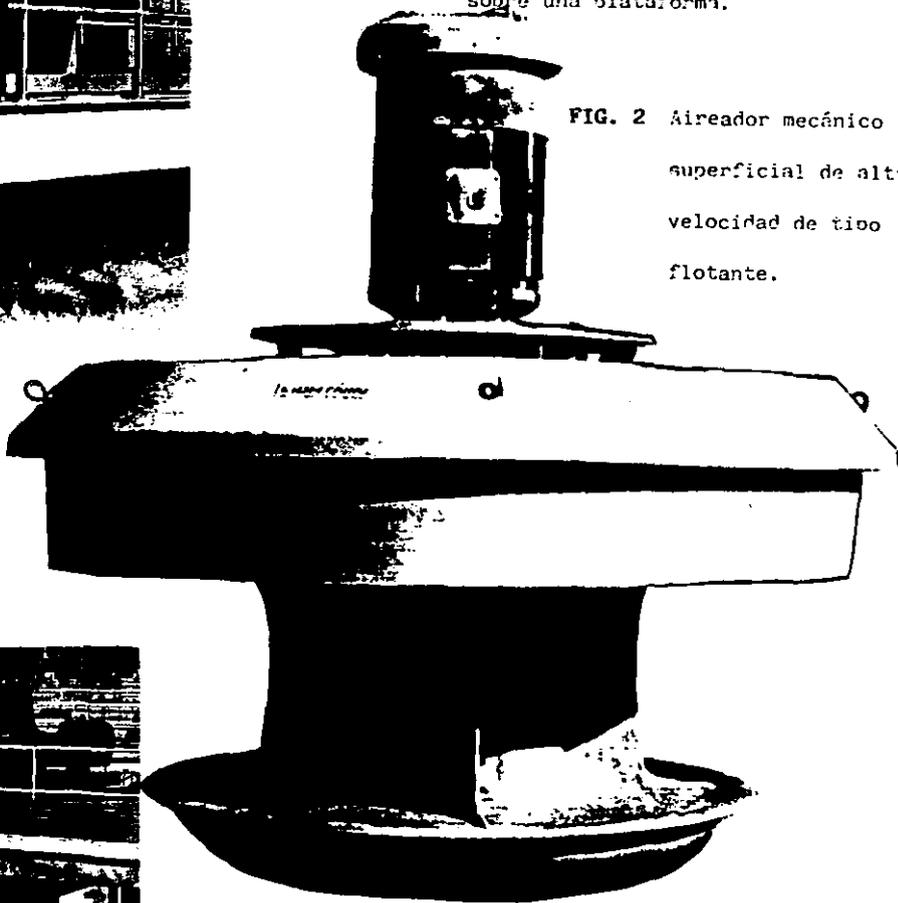


FIG. 3 Aireador mecánico sumergido de eje vertical.





FIG. 4 Aireadores mecánicos superficiales de alta velocidad en funcionamiento.

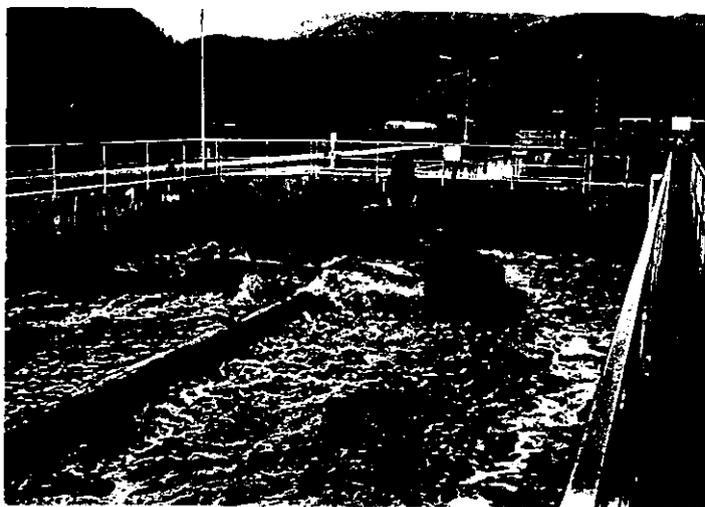


FIG. 5 Aireador de baja velocidad en funcionamiento.



FIG. 6 Acercamiento a un aireador mecánico superficial de eje horizontal.

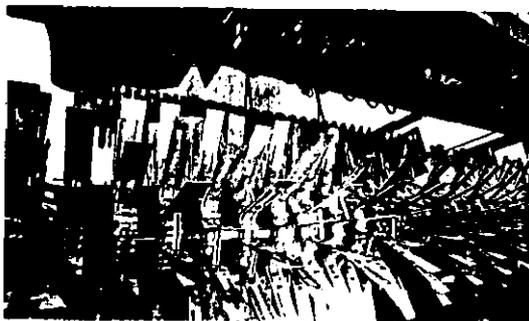


FIG. 7 Aireador mecánico superficial de eje horizontal.



FIG. 8 Círculos de influencia de doce aireadores de alta velocidad.

CAPÍTULO IV

SISTEMAS DE AIREACIÓN POR DIFUSIÓN

IV.1 PRINCIPIOS DE DISEÑO Y OPERACIÓN

IV.1.1 DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL AIREADOR POR DIFUSIÓN

La eficiencia de la transferencia de oxígeno en estos aireadores depende de varios factores, entre los cuales se pueden mencionar el tipo, tamaño y forma del difusor, la corriente de aire que genera, la profundidad a la que se encuentra el difusor, además de la colocación de los difusores y del cabezal de aire y las características propias del agua residual.

La medición del rendimiento de los equipos de aireación por difusión se realiza en función a la eficiencia de transferencia de oxígeno al agua residual, expresándose en un porcentaje que va de acuerdo al caudal que se maneje, todo esto medido en condiciones estándar.

Las condiciones estándar se presentan con las siguientes características.

1. La temperatura es de 20 ° C (68 ° F).
2. El oxígeno disuelto es 0.0 mg/l.
3. El líquido en que se realiza la prueba es agua limpia.
4. La presión es de 760 mm de Hg.

Para este tipo de aireadores la eficiencia de transferencia de oxígeno en condiciones estándar (SOTE) generalmente se incrementa conforme la profundidad aumenta.

En cambio la eficiencia de transferencia de oxígeno (OTE) se ve afectada debido a la obstrucción o taponamiento interno de los poros de los difusores; esto puede ser ocasionado por impurezas encontradas en el aire suministrado por compresión y que no pudieron ser removidas por los filtros de aire.

Otro factor que disminuye el rendimiento del aireador es la formación de flocos biológicos o precipitados inorgánicos. El efecto de ensuciamiento en el OTE se calcula por una constante designada como F. La tasa a la que F decrece con el tiempo se denomina como f_T y se expresa como una fracción del OTE perdido por unidad de tiempo.

Hay que tener mucho cuidado en seleccionar los valores de alfa (α) ya que existe una gran variedad de valores que van desde 0.4 – 0.9; además, después de investigaciones se ha reportado que la combinación de alfa y del factor de ensuciamiento (αF), ha arrojado valores desde 0.11 a 0.79 con una media < a 0.5.

Para propósitos de diseño, el rendimiento estándar debe ser ajustado para reflejar las condiciones que se van a presentar en campo. Este ajuste se puede realizar utilizando la siguiente ecuación. Cabe mencionar que lo que está en paréntesis representa el factor de corrección.

$$OTE = SOTE \left[\frac{(C_s)\beta P - C_L}{C_{S20}} \right] * \alpha (1.02)^{(T-20)}$$

Donde:

OTE = (Oxygen transfer efficiency) dado en (%), utilizado en la ecuación de forma decimal.

SOTE = (Standard Oxygen transfer efficiency), dato proporcionado por el fabricante del equipo de acuerdo a la sumergencia por medio de curvas.

(C_s)_T = Oxígeno de saturación para agua corriente a temperatura máxima (verano), mg/l (**Anexo 1**).

C_{S20} = Oxígeno de saturación en el agua corriente a 20 ° C, **9.17 mg/l**.

C_L = Concentración de oxígeno de operación, mg/l.

T = Temperatura, ° C

α = Factor de corrección de transferencia en el oxígeno, debido a los constituyentes del agua residual, para el equipo por difusión varía desde 0.4 – 0.9.

β = Factor de corrección de tensión superficial-salina, oscila de 0.9 – 0.98 generalmente se utiliza el valor de 0.9.

P = Factor de corrección de presión, calculado como $P_{Local} / P_{n.m.}$ (mm de Hg), (**Anexo 2**).

Eckenfelder y Ford (1968), propusieron otra ecuación que aparece comúnmente en la literatura relacionada con el tema y que se expresa como:

$$N = CG_a^{(1-n)} D^{0.67} (C_m - C_L) * 1.02^{(T-20)} * \alpha$$

Donde:

N = Tasa de transferencia de oxígeno, dado en lb/h (kg/h)

C y n = Constantes dadas por el fabricante.

G_a = Flujo de aire en CFM (pies cúbicos por minuto) a 20 °C y a una atmósfera de presión.

D = Profundidad de los difusores, ft (m).

C_m = Oxígeno de saturación en el agua residual a la mitad de la profundidad y en condiciones de operación. Oldshue propone:

$$C_m = \beta C_s \left(\frac{P_r}{C} + \frac{O_c}{42} \right)$$

Donde: P_r = Presión absoluta a la profundidad de liberación del aire, psia (Kpa)

O_c = Porcentaje de oxígeno contenido a la salida del flujo de aire.

C = 29.4 para el sistema de unidades USCS y 203 para el SI.

T = Temperatura, ° C

α = Factor de corrección de transferencia en el oxígeno, K_{La} del agua residual/ K_{La} del agua corriente.

Debido a que los catálogos de los fabricantes de equipos de difusión lo que otorgan es la eficiencia de transferencia de oxígeno en condiciones estándar (SOTE), en este trabajo se decidió utilizar la primera ecuación y no la de Eckenfelder y Ford, para realizar el diseño del ejemplo numérico de los sistemas de aireación por difusión.

IV.1.2 PROCESO DE DISEÑO PARA SISTEMAS DE AIREACIÓN POR DIFUSIÓN

Es necesario antes de comenzar con el diseño, contar con la información básica necesaria, que es la que se enumera a continuación. Su obtención se podrá apreciar detalladamente en el capítulo 5. (Esta información se obtiene según indica el libro "Wastewater engineering; treatment, disposal and reuse", Metcalf-Eddie, NY, third edition, 1991).

Para el caso de esta tesis se tomó como referencia el criterio que utiliza Rubens S. Ramalho. (Ramalho,1993)

1. Volumen del tanque de aireación determinado por el tipo de reactor biológico.
2. Oxígeno requerido (kg de O_2/h), determinado según el proceso seleccionado.
3. Temperatura de funcionamiento, °C.
4. O.D. en funcionamiento en régimen constante (C_L), normalmente va de 0.5-1.5 mg/l. En caso de unidades de nitrificación, se utilizan valores superiores a los 2 mg/l. (Ramalho ,1993)
5. Coeficiente de transferencia de oxígeno, parámetros α y β .
6. Datos de funcionamiento de las unidades de difusión o difusores.

Los pasos generales que hay que seguir para el diseño son:

- a) Se selecciona la profundidad del tanque de aireación, generalmente entre 3 y 4.5 metros.
- b) Se realiza la corrección de presiones $P_{Local} / P_{n.m.}$ (mm de Hg), utilizando el anexo 2, para este propósito.
- c) Se determina $(C_s)_T$ con ayuda del anexo 1.
- d) Obtenido ya el dato del SOTE que proporciona el fabricante, procedemos a determinar la eficiencia de transferencia de oxígeno en campo (OTE), utilizando la primera ecuación de transferencia de oxígeno.

- e) Se calcula el flujo de aire requerido en CFM (cubic feet per minute) con ayuda de la siguiente ecuación. (Department of the army corps of engineers, 1978)

$$Ra = \frac{O_2 * (10)^5 * 7.48}{OTE (0.0176) (1440 * V_x 10^6)}$$

Donde:

R_a = Flujo de aire requerido (CFM/1000 ft³)

O_2 = Oxígeno requerido por el proceso de lodos activados en (lb/ día)

OTE = Eficiencia de transferencia operativa (%).

V = Volumen del tanque de aireación en MG (millones de galones).

0.0176 = libras de O₂/ft³aire ; 1440 = minutos/día

Nota: 1 galón = 3.7854 litros; 1 libra = 0.454 kilogramos; 1 pie = 0.3048 metros

Otra forma de calcular el aire requerido por el proceso es mediante la ecuación que a continuación se presenta. (WPCF, 1998).

$$A.R. = \frac{(lbO_2 / dia) * 13.34}{1440(0.232) OTE}$$

1440 = min/día

1 lb aire = 0.232 lb O₂

1 lb aire = 13.34 ft³

OTE = Eficiencia de transferencia de oxígeno en campo del equipo de difusión.

Otra forma es mediante la utilización de la siguiente ecuación de los gases después de haber aplicado la formula de Eckenfelder y Ford (pág. 74) y haber dividido las libras de O₂ / hr requeridas en el proceso de lodos activados por la N del equipo para determinar el número de difusores y multiplicar este resultado por el caudal de aire que suministra cada uno. El resultado es el caudal total de aire que hay que suministrar en condiciones estándar.

$$V_2 = \frac{P_1}{P_2} * \frac{T_2}{T_1} * V_1$$

Donde:

P_1 y P_2 = Presión atmosférica estándar y presión atmosférica del lugar (lb/in²).

T_1 y T_2 = Temperatura estándar y temperatura de trabajo respectivamente ($^{\circ}\text{K}$).

V_1 y V_2 = Volumen de aire suministrado en condiciones estándar y volumen final de aire suministrado final.

- d) Se determina el volumen por airear en miles de ft^3 .
- e) Se determina el flujo total de aire requerido multiplicando el volumen por airear por el flujo de aire requerido.
- f) En función del resultado se eligen los sopladores que cubran el flujo deseado y viendo el número que se va a ocupar de ellos, dejando necesariamente uno de reserva, además de comparar si el flujo de aire requerido cubre los requerimientos de mezclado.
- g) Se prepara un plano de distribución de los difusores. La separación mínima es de 15 cm y la máxima de 60 a 75 cm para mantener los sólidos en suspensión y minimizar la coalescencia de las burbujas de aire. Si las diferencias caen fuera de este rango pueden proponerse distintos caudales de aire

IV.2 CLASIFICACIÓN DE LOS AIREADORES POR DIFUSIÓN

IV.2.1 GENERALIDADES

La aireación por difusión se ha utilizado desde principios del siglo XX. Al principio el aire se introducía a través de tubos abiertos o tuberías perforadas colocadas al fondo del tanque. El deseo por obtener una mayor eficiencia condujo al desarrollo de los difusores de placa porosos, que producían burbujas más pequeñas y ocasionaba transferencias de oxígeno más altas.

Este tipo de difusores que se convirtió en el sistema más popular por los años 30's, experimentaba sin embargo, un severo problema de taponamiento, así que empezó a decaer el uso de los difusores por equipos que requerían menor mantenimiento. La crisis energética ocasionó que se renovara el interés en este sistema de aireación y desde entonces se ha procurado el mejoramiento del funcionamiento de todos los sistemas de aireación.

La aireación por difusión se define como la inyección de gas (aire u oxígeno) a presión por debajo de la superficie del líquido.

Los aireadores por difusión o difusores se han clasificado comúnmente en sistemas de burbuja fina o de burbuja gruesa, haciendo hincapié en que los de burbuja fina proporcionan una mayor eficiencia en la transferencia de oxígeno.

Las burbujas denominadas como finas suelen tener un diámetro que se encuentra entre 1.5 – 2 mm o menores a este, y las gruesas son mayores de 3 – 5 mm. Las burbujas que se encuentran entre estos dos intervalos se denominan como burbujas medias, además de usarse el término micro, aparentemente con el mismo significado que finas.

Esta clasificación aunque es la más usada, ocasiona confusiones y es por eso que es preferible clasificarlos según las características físicas de los aireadores. Así que se presentan tres categorías que se denominan como: difusores porosos o de poro fino, difusores no porosos y otros equipos de difusión.

La eficiencia del uso de oxígeno que se obtienen con sistemas de aireación por burbujas es usualmente baja, aproximadamente del 1% para burbujas finas y de un 5% para burbujas gruesas, a pesar de que se informa de eficiencias tan altas como del 20%. Esto significa que alrededor del 90% del aire que pasa por el licor, contribuye muy poco a la transferencia de oxígeno y sólo ejerce una función mezcladora.

Es necesario filtrar el gas, comprimirlo y enviarlo por medio de tuberías de aireación a los tanques con el consiguiente desperdicio de energía. La eficiencia de uso es mayor al disminuir el tamaño de las burbujas finas y aumentar la profundidad; sin embargo, ambos efectos aumentan el costo de compresión, ya que los equipos que producen burbujas finas tienen mayor resistencia al flujo de gas que los denominados como burbujas gruesas, así que el uso de mayores profundidades del líquido representa un aumento en la presión hidrostática que se debe superar utilizando presiones más altas en la descarga del compresor.

Los difusores se pueden instalar como un montaje fijo en el fondo del tanque de aireación, este es el llamado como sistema de piso plano, además de complementarlo colocando los aireadores a una misma distancia formando lo que se conoce como sistema de malla. También se puede montar como una serie a lo largo de un lado del tanque con lo que se genera un patrón helicoidal de flujo al líquido dentro del tanque llamado erróneamente sistema de flujo en espiral.

Las series de difusores pueden, además, montarse sobre una junta giratoria, de manera que se permita el que se pueda remover fuera del líquido para realizar la limpieza y el mantenimiento sin que sea necesario vaciar el tanque primero.

IV.2.2 DIFUSORES POROSOS

Los difusores porosos se fabrican de diversas formas siendo los más comunes las placas, los domos, los discos y los tubos. (fig. 15).

En un principio los difusores de placa eran los más populares, pero su alto costo de instalación y la dificultad que acarrea su mantenimiento, abrieron paso a los discos como el sistema de difusión más popular a la fecha.

Los difusores de placa son generalmente cuadrados de 30 cm por lado y cuentan con un espesor de 2.5 a 3.8 cm. Las placas se instalan en soportes de concreto o aluminio que sostienen seis o más láminas que pueden ser colocadas en recovecos o en el fondo del tanque de aireación. Los grupos de soportes se encuentran conectados a la tubería abastecedora de aire en intervalos, a través de todo el tanque y cada grupo es controlado por una válvula.

Los domos, discos y tubos se montan o se atornillan a distribuidores de aire que corren a través de la longitud del tanque (fig. 11), cerca del fondo y en un solo sentido. También se pueden sujetar a los cabezales de distribuidores cortos que se pueden montar en tuberías de goteo movibles, en un lado del tanque. Con este sistema es posible levantar un cabezal fuera del agua sin necesidad de interrumpir el proceso o de vaciar el tanque. Los difusores posteriormente se pueden remover para limpiarlos o reemplazarlos.

Los difusores de domo son esencialmente un disco circular con una orilla descendente. Su medida más común es de 18 cm de diámetro y 3.8 cm de altura y se fabrican generalmente de compuestos o aleaciones de aluminio. Estos difusores están diseñados para operar de un rango de 0.25 a 1.0 l/s (0.5 a 2.0 CFM).

En lo que se refiere a los difusores de domo o de disco, se pueden instalar con un patrón de malla al fondo del tanque para dar mayor uniformidad a través del tanque.

Los difusores de disco son relativamente nuevos en el mercado (fig. 9 - 12) y se diferencian de los domos porque son relativamente planos y no tienen su periferia descendente. Manejan un flujo de 0.25 a 3.0 CFM, en función del tamaño del disco, esto a los de cerámica, ya que los de membrana operan de 3 – 20 CFM y con un diámetro de hasta 52 cm.

Ha sido un gran número de materiales los que se han utilizado para la construcción de los difusores porosos, siendo los más comunes los de cerámica y los de plástico, plástico flexible, hule o funda de tela.

Los materiales cerámicos consisten de partículas minerales ya sean redondeadas o irregulares, aglomeradas para formar una red de pasadizos que se entrelazan y por las cuales circula el flujo de aire. Conforme el aire emerge de los poros superficiales, el tamaño del poro, la tensión superficial y la y el flujo de aire interactúan para dar un tamaño determinado de burbuja.

De igual manera funcionan en su principio de diseño, los difusores fabricados de materiales de origen plástico, con la diferencia de que los poros varían su tamaño en función del flujo del aire que pasa por ellos.

En lo que se refiere a los difusores tubulares (fig. 13, 14), estos tienen comúnmente un tamaño medio de 50 – 60 cm y un diámetro de 6.4 – 7.6 cm y están diseñados para operar en un rango de 1 – 4 CFM.

Es esencial que el aire que se suministre, esté libre de impurezas que podrían en un momento determinado obstruir difusores porosos. Así que para este fin se utilizan filtros de aire, que consisten generalmente de impedimentos viscosos y de barreras secas, aunque también se ha utilizado filtros de bolsa precubiertas y filtros electrostáticos. Los filtros se instalan en la salida del soplador.

La eficiencia de transferencia de estos equipos oscila entre 1.8 y 2.54 lb de O₂/hp-hr. El factor alfa de transferencia de oxígeno varía de 0.3 a 0.7.

La tabla que se muestra a continuación proporciona los tipos de difusores porosos que existen en el mercado o en uso además de una breve explicación

TABLA 7

Tipo de difusor poroso	Eficiencia de transferencia	Descripción	Flujo de aire CFM (standard cubic feet per minute)	SOTE (%) a 15 ft de prof.
Placa	Alta	Láminas cuadradas de cerámica instaladas en sujetadores en el piso del tanque.	Malla---0.4 – 3.4	25 – 40
Domo	Alta	Difusores cerámicos con forma de domo montados en tuberías de distribución de aire cerca del piso del tanque.	Malla---0.5 – 2.5	27 – 39
Disco	Alta	Discos rígidos de cerámica o de membrana porosa flexible montados en tuberías de distribución de aire cerca del piso del tanque.	Malla---2.0 – 5.0	26 – 33
Tubo	Moderada alta	Difusor de forma tubular que utiliza un medio rígido de cerámica, plástico flexible o cubierta de hule sintético montado en tuberías de distribución de aire cerca del piso del tanque.	Malla---2.4 – 4.0 Doble espiral---3.0-11.0 Espiral---2.0 – 12.0	28 – 32 17 – 28 13 – 25

ADAPTADO DE WASTEWATER ENGINEERING: TREATMENT, DISPOSAL & REUSE; METCALF-EDDIE INC. THIRD ED. 1991. McGraw-Hill.

IV.2.3 DIFUSORES NO POROSOS

Este tipo de difusores produce burbujas de mayor diámetro que los porosos (fig. 17), por lo que tienen una menor eficiencia de transferencia de oxígeno, pero las ventajas de un menor costo, menor mantenimiento y que no se necesita un aire completamente depurado.

Otro punto en lo que se refiere al montaje de los difusores es que tanto en los difusores no porosos y los porosos se debe tener aperturas de sobra en los cabezales, para un posible incremento del número de unidades debido a un probable incremento del aire requerido.

Los difusores no porosos son de dos tipos en general: aquellos que utilizan solamente aire y aquellos que utilizan aire y agua conjuntamente, pero como ya se mencionó ninguno de estos necesita o requiere de sistemas elaborados de filtración de aire.

La tubería perforada provee aire a través de orificios que van de 0.6 a 1.3 cm espaciados a cierto intervalo a lo largo del tubo y se utilizan en condiciones que provoquen un taponamiento muy severo de los difusores.

Los aspersores fueron los primeros difusores de esta clase que salieron al mercado. Los aspersores son un instrumento de liberación de aire, controlado a través de un grupo de cuatro orificios con tubos cortos de alta velocidad en un patrón de aire propiamente localizado. Una turbulencia única se desarrolla mientras que una columna de aire concentrado arriba de cada aspersor reacciona con el licor del tanque y a una corta distancia del racimo de orificios la cadena de burbujas largas se rompe en una nube de pequeñas burbujas. Las unidades originalmente eran de hierro fundido o hierro fundido con orificios de teflón, pero ahora se fabrican de plástico moldeado. Llegan a operar de 6 a 20 CFM.

El tubo ranurado debe ser de acero inoxidable y ser lo suficientemente fuerte para soportar el soldado y la vibración que provoca el sistema durante la operación del mismo (Fig. 16, 17). Tienen un rango de operación deseable entre 10 a 24 CFM.

En los difusores de tipo válvula (fig. 15), generalmente fabricados de acero inoxidable, el flujo de aire debido al émbolo que se encuentra en el interior del aparato sale a una gran presión que al hacer contacto con el licor se producen burbujas. El émbolo regresa al fondo del artefacto cuando el flujo de aire es interrumpido, funcionando como una válvula check. Normalmente trabajan de 6 a 12 CFM.

En los tubos estáticos, el aire se introduce desde el fondo de un tubo circular que varía de tamaño de 0.5 a 1.25 m. Internamente los tubos están ajustados con laminas deflectoras alternadas para incrementar el contacto del aire con el agua residual. El mezclado se consigue ya que el difusor actúa como una bomba impulsora de aire. Normalmente se colocan en un patrón tipo malla.

La eficiencia de transferencia en los difusores no porosos generalmente se encuentra en el rango de 1.2 a 1.8 lb de O₂/hp-hr.

IV.2.4 OTROS EQUIPOS DE DIFUSIÓN

Esta es una clasificación arbitraria hecha para equipos que combinan la inyección de gas con bombeo mecánico o mezcladores y encontramos en esta categoría a los aireadores de chorro (Jet aeration), dispositivos de aspiración (aspirating devices) y el tubo U (U-tube aeration).

La aireación por chorro combina el bombeo del líquido con la difusión de aire. El sistema de bombeo recircula el líquido por el tanque de aireación expulsándolo por medio de una boquilla. Normalmente el bombeo de recirculación es un mecanismo de tasa constante y la falta de poder del aireador es completada variando la tasa de flujo de aire. Algunos aireadores por chorro están equipados con aditamentos para autolimpiarse y evitar así problemas por obstrucción. Estos equipos son de fácil mantenimiento, alta tasa de transferencia de O₂ y un bajo consumo de energía.

Este aireador consta de un motor de 3 fases que está sujetado a un impulsor de acero de múltiples puertos que gira a alta velocidad, creándose así una diferencia de presiones, causando que el oxígeno de la atmósfera sea conducido al fondo por una tubería de entrada y arriba al centro del aireador donde se distribuye a través de pasajes a 360 ° alrededor de la unidad

. Este movimiento crea un efecto de vórtice en el centro donde el flujo descende desde el fondo del tanque, dando como resultado un patrón de flujo helicoidal continuo cerca de los muros del tanque con un vórtice al centro el cual barre los sólidos evitando su asentamiento. Se obtiene una mejor eficiencia en tanques pequeños y una gran profundidad.

En este tipo de aireadores por chorro se puede obtener un factor alfa de transferencia de oxígeno alto que alcanza valores de 0.9 a 1.0.

En los aireadores por aspiración o bombas sumergidas (fig. 18, 19, 21), el aire presurizado es alimentado a la unidad a través de las boquillas de aire del proceso. Desde allí, el aire pasa a la turbina de rotación lenta y es dispersado en el agua que pasa rápidamente y la inyecta a alta velocidad, donde por efecto de la velocidad y del impulsor se crea una turbulencia y segmenta el aire en forma de burbujas.

La dispersión entra en el tanque a través de un sistema de tubos cuadrados. Esto asegura un mezclado óptimo incluso con la bajada de la presión mínima.

Este sistema de aireación garantiza un bajo consumo de energía durante casos de carga óptima. El nivel exacto de oxígeno y el consumo óptimo de energía son mantenidos mediante el balance de la corriente de aire y la velocidad racional de la turbina, incluso individualmente entre los aireadores en un depósito. Los requerimientos típicos de energía son del orden de 0.6 – 0.8 kWh/kg de DBO₅ contra 0.7 – 1.0 kWh/kg de DBO₅ para sistemas convencionales.

Los valores del factor alfa de transferencia de oxígeno se encuentran en el rango de 0.85 a 0.95, además, es capaz de manejar hasta 30 m³/min, con una muy alta eficiencia de transmisión de oxígeno y otorgando hasta 3.0 kg de O₂/kWh.

Una enorme ventaja de este sistema es que la mayoría de los demás sistemas cuya disposición no puede modificarse con facilidad y, además, es necesario vaciar el depósito para realizar el mantenimiento. Estos aireadores se instalan en posición libre sobre el suelo del depósito e inclusive es aceptable un fondo de grava. Su profundidad de trabajo en el tanque de aireación oscila de los 4 a los 15 m.

La aireación por medio de un tubo U consiste en un pozo que va de 10 a 100 m de profundidad dividido en dos zonas. El aire se inyecta al agua residual y baja hasta el fondo del pozo y después vuelve a la superficie donde el efluente tratado es removido para clarificarlo. Este tipo de aireación se vuelve más efectivo conforme aumenta la profundidad y se utiliza para el proceso de lodos activados denominado como pozo profundo.

IV.3 FACTORES ASOCIADOS CON LA AIREACIÓN POR DIFUSIÓN

IV.3.1 FACTORES A CONSIDERAR EN LA CONSTRUCCIÓN DEL TANQUE DE AIREACIÓN

En lo referente a la aireación por difusión, la geometría del tanque puede afectar la eficiencia de transferencia de oxígeno (factor α) y la mezcla obtenida. La profundidad de los tanques debe estar entre los 4.57 y 7.62 m (15 a 25 ft) para trabajar eficientemente.

Un bordo libre de 0.3 a 0.6 m (2 a 3 ft) sobre el nivel del agua es recomendable.

El ancho del tanque de aireación es otro factor a considerar, si es que se está diseñando con un patrón espiral en un sistema de flujo pistón. La relación ancho/profundidad para esos tanques varía desde 1:1 a 2.2:1, siendo el valor más utilizado en la práctica profesional 1.5:1.

Para el caso de plantas de tratamiento muy grandes el tanque se puede seccionar con canales que pueden exceder los 150 m y cada tanque puede tener de uno a cuatro seccionamientos que pueden enviar a su vez el flujo a múltiples tanques. La relación ancho/largo de cada canal debe ser por lo menos de 5:1, pero en un proceso de mezclado completo la relación ancho/largo puede reducirse para disminuir el costo de la obra.

Para tanques con difusores en ambos lados o en el centro del tanque suele permitirse un mayor ancho, pero evitando siempre que se produzcan zonas de mezclado inadecuado o puntos muertos. Así que las dimensiones y proporciones de cada unidad deben ser las necesarias para mantener una velocidad adecuada para impedir que se presente la precipitación de sólidos.

En tanques de acomodo en espiral se utilizan deflectores triangulares o láminas que se colocan longitudinalmente en las esquinas de los canales para eliminar puntos muertos y deflectar el flujo espiral.

IV.3.2 ENERGÍA REQUERIDA PARA EL MEZCLADO

En lo que se refiere al mezclado en sistemas con difusores, éste depende del acomodo de los difusores que en general presentan dos tipos de acomodo, en espiral o en malla.

El requerimiento de aire para asegurar un buen mezclado varía de 20 a 30 $\text{ft}^3/\text{min} \cdot 10^3 \text{ft}^3$ (20 a 30 $\text{m}^3/\text{min} \cdot 10^3 \text{m}^3$) del volumen del tanque para un acomodo en espiral (spiral roll aeration pattern) y para un acomodo en malla (grid pattern) en el que los difusores se acomodan uniformemente a través del fondo del tanque de aireación, se sugieren valores entre los 10 a 15 $\text{ft}^3/\text{min} \cdot 10^3 \text{ft}^3$ (10 a 15 $\text{m}^3/\text{min} \cdot 10^3 \text{m}^3$). (METCALF-EDDIE, 1991)

IV.3.3 VARIACIONES SUFRIDAS EN LA TRANSFERENCIA DE OXÍGENO

Una de las variaciones más importantes la da el tamaño de la burbuja ya que la tasa de transferencia es proporcional al área de contacto entre el líquido y el oxígeno y entre menor sea el tamaño de la burbuja mayor es el área de contacto.

Otro efecto que interviene en la transferencia de oxígeno es la uniformidad de la distribución del aire, tanto en lo individual como en lo colectivo. Este efecto se puede ver al mantener el nivel del agua unas cuantas pulgadas sobre la elevación de los difusores y verificar si existen puntos muertos que pueden ocasionar un ostensible aumento en el ensuciamiento del difusor.

En lo que se refiere al aumento de flujo de aire por difusor, los denominados como porosos experimentan una disminución en el SOTE al aumentar el flujo, mientras que los no porosos experimentan un aumento en el SOTE.

Como ya se ha hecho referencia, las variaciones que puede sufrir la transferencia de oxígeno con este tipo de aireación, en su mayoría corresponden principalmente a la obstrucción o taponamiento que puedan sufrir los difusores. Esto puede ser debido a un mal sistema de filtrado o problemas del equipo anexo como el compresor o fugas en la tubería de suministro de aire.

El ensuciamiento de los difusores puede ser provocado por un mal filtrado de aire, aceite de los compresores o filtros de aire viscosos, óxido debido a la corrosión de la tubería, basura generada por el proceso constructivo y sólidos provenientes del agua residual que entran por medio de fugas en la tubería o por el difusor.

Algunos métodos para limpiar los difusores porosos, son: desarmar los difusores, utilizar chorros de agua a alta presión, cepillar o un tratamiento químico con baños de ácido o sosa cáustica.

IV.3.4 EQUIPO ADICIONAL UTILIZADO EN LA AIREACIÓN POR DIFUSIÓN

SOPLADORES

Por lo común la denominación de ventilador se utiliza cuando la presión se eleva hasta unos 2 psig, entre 2 y 10 psig la máquina recibe el nombre de soplador y para presiones de descarga más altas se utiliza para designarlo el término de compresor.

La denominación de soplador también se aplica a los compresores rotatorios o de desplazamiento positivo que pueden manejar flujos relativamente bajos con una elevada relación de compresión.

Hay dos tipos de sopladores que se utilizan comúnmente: los centrífugos y los de desplazamiento positivo. Los sopladores centrífugos se utilizan donde la capacidad de aire es mayor a los 3000 ft³/min (85m³/min). A capacidades más bajas es necesario verificar si los requerimientos de aire pueden obtenerse en condiciones de bajo flujo de aire. Estos sopladores emiten un sonido desagradable por lo que es necesario instalar silenciadores por dentro y por fuera del equipo.

En el tratamiento de aguas residuales, los sopladores deben proveer un amplio rango de caudales de aire con un relativamente estrecho rango de presiones.

Debido al constante cambio de presiones y de caudales de aire que debe otorgar un soplador se han tomado las siguientes previsiones para alcanzar regulación o apagar el equipo: suspender el flujo de aire o desviarlo, estrangulamiento o regulación interna por medio de una válvula, difusores de descarga ajustable, controladores de velocidad variable u operar paralelamente unidades múltiples.

En lo que se refiere a los compresores centrífugos (fig. 23), el compresor es económico ya que se puede instalar una sola unidad, ofrece una variación bastante grande en el flujo con un cambio pequeño de carga, da un flujo suave y libre de pulsaciones pero sufre a veces de cambios en el peso molecular haciendo que las presiones de descarga sean muy altas o muy bajas.

Los sopladores centrífugos tienen características de operación similares a una bomba centrífuga de baja velocidad. El punto de operación del soplador se determina por la intersección de la curva carga-capacidad y la curva del sistema.

La densidad del aire afecta el rendimiento de un soplador centrífugo y cualquier cambio de temperatura en el aire de entrada o presión barométrica cambiará la densidad del aire comprimido. Entre mayor sea la densidad del gas, mayor será la presión. Así que el soplador se debe seleccionar para una capacidad adecuada en un día caliente de verano y ser provisto de un piloto con el suficiente poder para el invierno más crudo.

Para descargas menores de 85m³/min se utilizan sopladores de desplazamiento positivo del tipo rotatorio. Este soplador es una máquina que proporciona una capacidad constante y presiones de descarga variable. Tienen motores de baja velocidad de acoplamiento directo, en especial si son de más de 3000 hp; suelen ser de velocidad constante.

El requerimiento de potencia para condiciones de compresión adiabáticas está dado por la ecuación:

$$P_w = \frac{wRT_1}{29.7ne} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^n - 1 \right]$$

Donde:

P_w = Requerimiento de potencia de cada soplador, (kW).

w = Peso del flujo de aire (kg/s).

R = Constante del aire (8.314 kJ/k mol °K).

T_1 = Temperatura absoluta de entrada, °K.

P_1 = Presión absoluta de entrada, (atm).

P_2 = Presión absoluta de salida, (atm).

n = Para aire, 0.283.

k = Para aire 1.395.

29.7 = Conversión para el sistema internacional.

e = Eficiencia del compresor o soplador (0.7 - 0.9).

TUBERÍA DE AIRE

Lo que se designa como tubería de aire consiste en tubería principal, válvulas y otros accesorios utilizados para llevar el aire comprimido del soplador a los difusores (fig. 22). Debido a que las presiones son pequeñas (menores a 10 lb/in²), se puede utilizar tubería ligera. La tubería debe cubrir las pérdidas que se sufren en los cabezales, los distribuidores de manera que sean pequeñas en comparación a las sufridas por los difusores. Las válvulas se utilizan para regular el flujo.

Debido a la alta temperatura a la que es descargado el aire de los sopladores (140 - 180 °F), la condensación en la tubería de aire no es un problema, a menos que se encuentre sumergida dentro del agua residual, en donde sería necesario tomar precauciones sobre la expansión y contracción de la tubería.

Generalmente las tuberías se fabrican de acero inoxidable, fibra de vidrio o plásticos adaptables a altas temperaturas. Otros materiales utilizados son acero templado o hierro forjado con recubrimientos externos como vinil o alquitrán epóxico.

El incremento teórico de la temperatura en condiciones adiabáticas durante la compresión es:

$$\Delta T_{ad} = T_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^n - 1 \right]$$

Los términos fueron definidos en el requerimiento de poder para los sopladores y el incremento está dado en temperatura absoluta ($^{\circ}\text{K}$).

Las pérdidas por fricción dentro de la tubería pueden ser calculadas por medio de la ecuación de Darcy-Weisbach expresada de la siguiente manera:

$$h_L = f \left(\frac{L}{D} \right) h_i$$

Donde:

h_L = pérdidas por fricción (m)

f = Factor de fricción adimensional obtenido del diagrama de Moody, basado en la rugosidad relativa y se sugiere que se aumente f en un 10% para tomar en cuenta el aumento de fricción conforme la tubería envejece.

L/D = relación de la longitud y el diámetro

h_i = velocidad del aire

TABLA 8

Las velocidades típicas son:

Diámetro de la tubería (in)	Velocidad (ft/min)
1 - 3	1200-1800
4 - 10	1800-3000
12 - 24	2700-4000
30 - 60	3800-6500

Nota: 1 in * 0.0254 = m
1 ft/min * 0.3048 = m/min

ADAPTADO DE WASTEWATER ENGINEERING: TREATMENT, DISPOSAL AND REUSE, METCALF & EDDIE INC. MCGRAW-HILL, THIRD EDITION 1991.

Para determinar el valor del número de Reynolds que ayuda a determinar f se utiliza la ecuación:

$$N_R = \frac{28.4q_s}{d\mu}$$

q_s = Flujo de aire en la tubería (ft³/min) en las condiciones de trabajo.

d = diámetro interno de la tubería (in).

μ = viscosidad del aire, (centipoises).

Nota: centipoise * 0.000672 = lb/ft-s

De 0 a 200 °F, la viscosidad μ se calcula utilizando:

$$\mu \text{ (centipoises)} = (161 + 0.28t) \times 10^{-4}$$

La velocidad h_i en la tubería está dada por:

$$h_i = \left(\frac{v}{1.096} \right)^2 \gamma_a$$

Las pérdidas en los codos, válvulas, tees y demás accesorios pueden ser calculados como una fracción de la velocidad utilizando los valores de K, dados por los fabricantes o por libros de hidráulica. La presión de descarga será la suma de todas las pérdidas, la profundidad del agua sobre los difusores y la pérdida sufrida a través de los difusores.

FILTROS DE AIRE

Los filtros de aire evitan que los difusores se obstruyan y reducen el desgaste y las roturas de los sopladores. Generalmente se utilizan dos tipos de filtros:

Los filtros viscosos, que son aquellos que consisten en una capa de metal resistente a la corrosión, o de fibra de vidrio (desechables), cubiertos con aceite. La pérdida de presión es de sólo 3.7 - 9.5 mm de agua. Los filtros metálicos se reacondicionan por medio de inmersión en un baño limpiador y se recubren con aceite.

Los otros filtros usados comúnmente son los de tela y se limpian mediante aire a contraflujo o con dispositivos de limpieza al vacío. La carga probable de polvo de los filtros es de 13 mg por cada 2832 lt de aire, cuando la toma de aire se coloca en tal forma de evitar las áreas polvorientas.

IV.4 PROCESO DE SELECCIÓN DE EQUIPOS DE AIREACIÓN POR DIFUSIÓN

IV.4.1 SELECCIÓN DEL EQUIPO DE DIFUSIÓN

Los criterios que son necesarios tomar en cuenta para una correcta selección del equipo por difusión y del equipo complementario son:

En primera instancia hay que ver que tipo de difusores son más utilizados dependiendo de la variante del proceso de lodos activados que se este manejando y en referencia a este, ver los diferentes equipos que reúnan esas características y que se encuentren disponibles en el mercado.

Se determina la eficiencia de transferencia de oxígeno que se va a presentar en campo y en función a este parámetro, se puede seleccionar el equipo más adecuado. Su valor es seleccionado de curvas características de Eficiencia de la transferencia de oxígeno en condiciones estándar (SOTE) contra el flujo de aire en CFM. Todos varían dependiendo de la profundidad a la que se encuentren por lo que el SOTE se expresa generalmente en %/m.

El fabricante también proporciona las pérdidas que va a sufrir el difusor que aunadas con las de la tubería y las de los filtros ayudan para elegir el soplador y el flujo de aire que se va a manejar.

Otro dato lo constituye los requerimientos típicos de energía (KWh/kg DBO₅ de carga) que andan en el rango de 0.6 – 1.0 KWh/kg.

Otra limitante en el proceso de selección puede constituirlo el costo del equipo de difusión que se desea instalar, además de ser estrictamente necesario el verificar contra el espacio disponible en la planta de tratamiento, ya que los sopladores requieren un área especial donde instalarse.

Ya estimadas las necesidades de transferencia de oxígeno, se calcula la potencia que va a requerir el soplador y se elige el tipo de soplador que se va a utilizar además del número de unidades que se van a utilizar.

El número de difusores determinado mediante el flujo de aire requerido en el proceso dividido entre la capacidad de cada aireador, nos da el número de difusores que se van a necesitar y en base a esto, se puede realizar la distribución y el espaciamiento de las unidades.

Es bueno contar con el mayor número de presupuestos, buscando además de lo antes mencionado una vida útil de por lo menos 10 años bajo trabajo continuo. También buscar el respaldo de distribuidores altamente calificados y asegurarse de que haya refacciones en existencia

IV.4.2 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS SISTEMAS DE AIREACIÓN POR DIFUSIÓN

El mantenimiento en estos sistemas es mucho mayor que en los sistemas de aireación mecánica, ya que utilizan compresores, sopladores, difusores, filtros de aire o tubería de conducción de aire. (Ref. SEDUE, "Operación y mantenimiento de sistemas de lodos activados, fascículo 6, 1985).

Es conveniente revisar el sistema siguiendo el flujo de aire desde los sopladores hasta el tanque de aireación.

En lo referente a los filtros de aire:

- a) Se verifica que las puertas de acceso a la cámara de filtros estén revestidas con algún material que proporcione un sello bien ajustado.
- b) Eliminar los materiales extraños dentro de la cámara.
- c) Se instala un manómetro para leer la diferencia de presiones entre la entrada y la salida.
- d) Cuando se ha programado la limpieza de los filtros de aire, hay que removerlos de la cámara de filtración y ver según el manual cual es el método recomendado de limpieza y posteriormente verificar el no dejar herramientas que puedan ser conducidos o arrastrados a los sopladores.

En lo que se refiere a los sopladores:

- a) Es necesario leer el manual del fabricante y entender todas las instrucciones antes de iniciar la operación de los sopladores, ya que aunque el equipo tiene un año de garantía generalmente, si el equipo es dañado por una operación inadecuada, el propietario de la planta absorberá el costo.

- b) Tener especial atención en los procedimientos de paro y arranque, revisando previamente los switches, indicadores, conexiones de bombas tipo y nivel de aceite, arranque de la bomba de circulación de aceite y revisar el sistema de circulación.
- c) En ambos lados del soplador, las líneas principales están conectadas al soplador mediante coples flexibles, para permitir la expansión por calor, ya que cuando el aire es comprimido hay una generación de vapor, en donde la temperatura puede aumentar hasta 56 °C.
- d) Revisar que entre la válvula de alivio de presión y la descarga del soplador, se encuentre bien instalado el manómetro en el que se lee la presión de descarga.
- e) Generalmente todo el equipo lubricado con aceite debe pararse después de 400 horas de operación y efectuar el cambio de aceite correspondiente.
- f) Los sopladores que no están en operación normal deben ser operados al menos 6 horas por semanas, las válvulas de alivio de presión una vez al mes manualmente y no se debe cerrar la válvula de descarga completamente, ya que puede ocasionar serios daños al soplador.
- g) La válvula check debe revisarse cada mes, atendiendo su operación y que asiente cuando esté cerrada.

En lo que se refiere al sistema de distribución de aire, hay que recordar que las tuberías de distribución de aire, están conectadas a la tubería principal de aire (manifold) y vienen desde la parte superior del tanque de aireación hasta el fondo del mismo, distribuyendo el aire a lo largo del tanque, el cual sale a través de los difusores. Las tuberías de distribución de aire (air headers) pueden ser fijas o móviles.

Cada tubería posee una válvula de corte para dar mantenimiento a los difusores.

- a) Inspeccionar que las válvulas de corte funcionen de manera adecuada.
- b) Realizar una inspección cada seis meses en busca de fugas o piezas que se encuentren flojas.
- c) Si hay corrosión en el exterior de las tuberías, ésta debe limpiarse con cepillo de alambre y luego colocar pintura anticorrosiva.
- d) Elevar las tuberías de los difusores (air headers) una vez al año para su revisión y en caso de ser necesario cambiar el fluido hidráulico del cabezal de difusores (tipo swing).

En lo que se refiere a los difusores:

- a) Cuando se colocan los difusores, coloque una ligera cantidad de grasa en la rosca, teniendo cuidado de que ningún lubricante toque la abertura dentro del difusor, todo esto para facilitar su remoción cuando necesiten limpieza.
- b) Mensualmente es necesario aumentar el aire de 2 a 3 veces la cantidad normal durante unos 15 minutos, para remover el lodo biológico acumulados en los orificios del difusor.
- c) Anualmente al elevar el cabezal de aire del tanque es necesario inspeccionar, limpiar y reemplazar si es necesario los difusores dañados.

Es necesario atender a los manuales de operación y mantenimiento otorgados por los fabricantes, ya que cada tipo de difusor requiere de un cuidado especial y al seguirlos se prolongará la vida útil del equipo y se mantendrá una eficiencia más o menos constante en el proceso de tratamiento por lodos activados elegido.

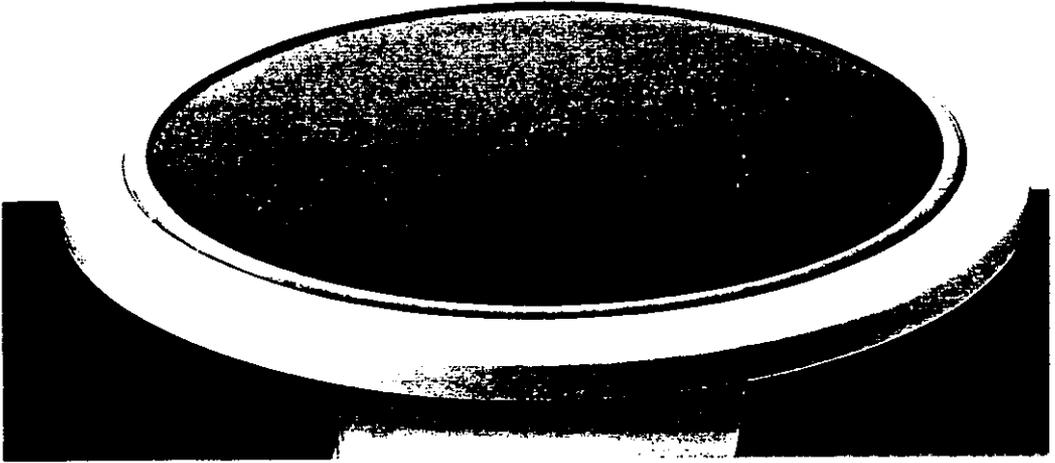


FIG. 9 Disco difusor poroso de membrana EPDM.



FIG. 10 Disco difusor poroso.

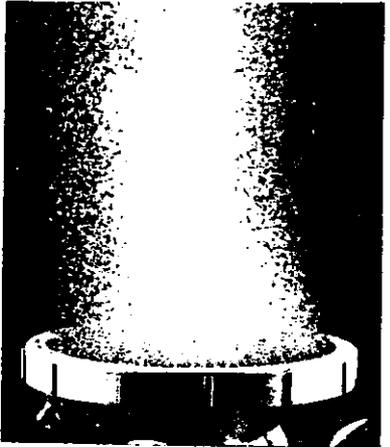


FIG. 12 Disco difusor en funcionamiento.

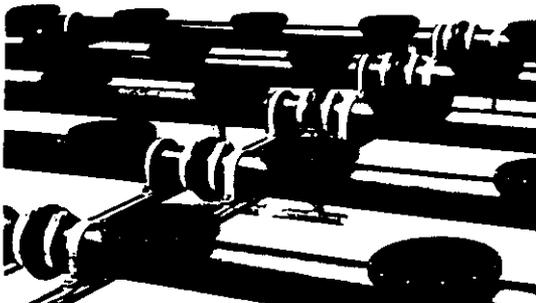


FIG 11 Montaje de los discos difusores.



FIG. 13 Difusor poroso de membrana tipo tubular en funcionamiento.



FIG. 14 Difusor poroso de membrana tipo tubular.

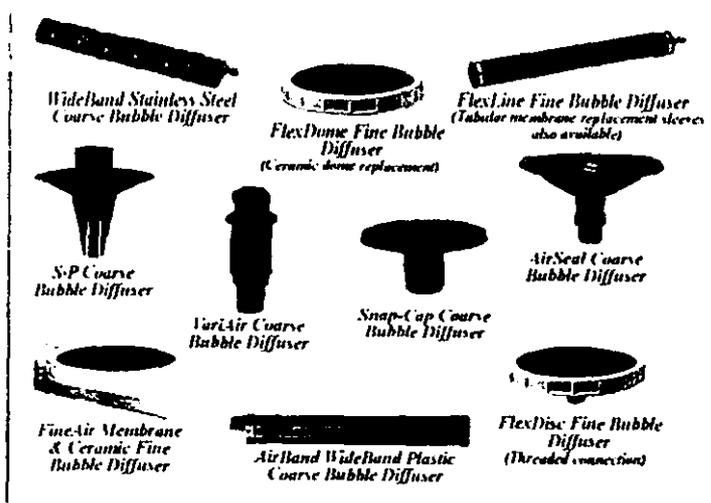


FIG. 15 Variedad de difusores existentes en el mercado.

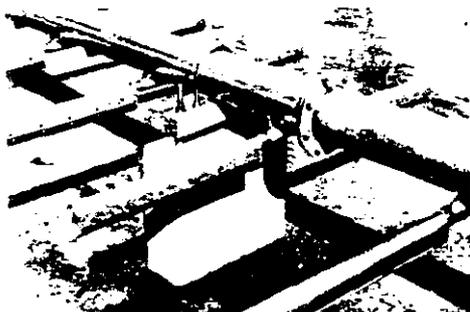


FIG. 16 Montaje de difusores no porosos tipo tubo ranurado.



FIG. 17 Difusor no poroso tipo tubo ranurado en funcionamiento.

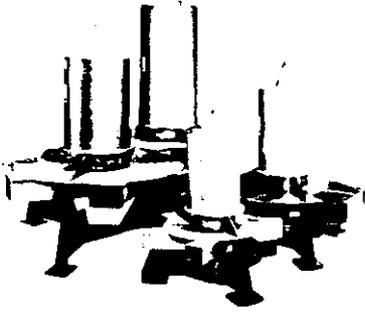


FIG. 18 Bombas sumergibles.

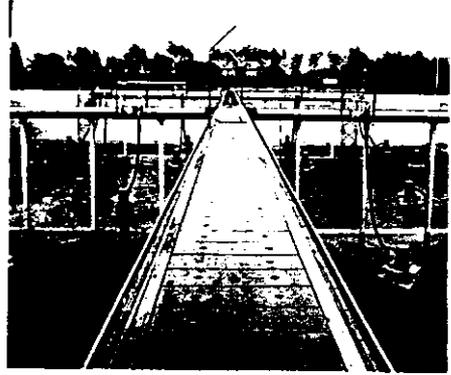


FIG. 19 Colocación de las bombas sumergibles.

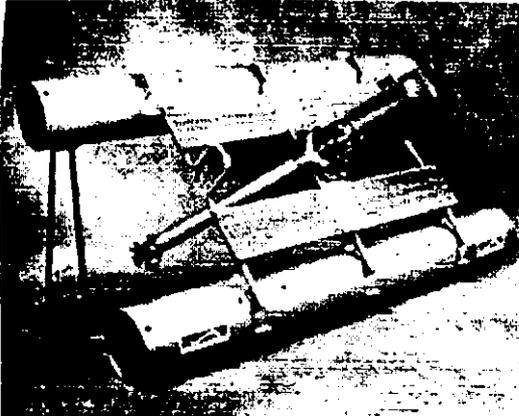


FIG. 20 Aireador tipo jet.

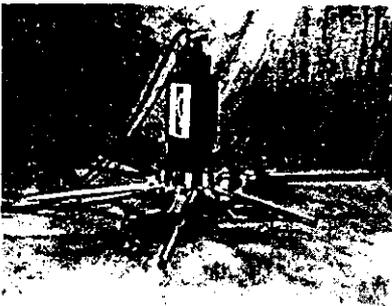


FIG. 21 Bomba sumergible.

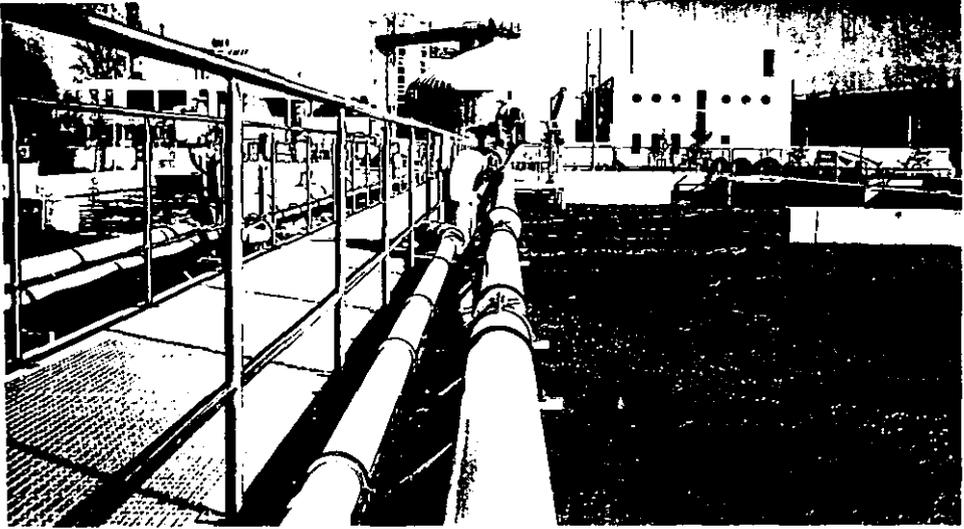


FIG. 22 Tubería de distribución de aire.



FIG 23 Sooladores centrífugos.

CAPÍTULO V

**EJEMPLO DEL DISEÑO Y
CONSTRUCCIÓN DE UN TANQUE DE
AIREACIÓN**

V.1 JUSTIFICACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La intención de este capítulo es ilustrar mediante el planteamiento de un ejemplo, el diseño hidráulico de un tanque de aireación, el cual se va a diseñar con los dos tipos de equipos de aireación descritos anteriormente: aireación mecánica y aireación por difusión.

En el ejemplo propuesto se aplicaron criterios y parámetros de diseño que se presentan comúnmente en la práctica profesional, ya que se intentó hacerlo de la manera más general posible.

Además se incluyen importantes observaciones en lo que se refiere al proceso constructivo del tanque de aireación y otras consideraciones que son necesarias tomar en cuenta para lograr un mejor funcionamiento del tanque.

En este ejercicio se decidió que la planta de tratamiento de aguas residuales opere con un proceso de lodos activados en su variante de un sistema completamente mezclado.

Se asume que un sistema completamente mezclado se logra cuando el consumo de oxígeno es uniforme a través de todas las partes del tanque de aireación y cuando se provee el suficiente mezclado para mantener los sólidos en suspensión.

En función a este proceso se determinarán los parámetros que sean necesarios para el diseño del tanque y del equipo de aireación.

V.1.1 INFORMACIÓN BÁSICA PARA EL DISEÑO

Los datos con que se cuentan para el diseño del tanque de aireación y en general para todo el sistema de aireación de la planta de tratamiento son los siguientes.

Mediante un estudio previo basado en un programa de aforo de las descargas que se van a tratar, se obtuvieron los siguientes caudales:

$$Q_{\text{med}} = 300 \text{ l/s} \quad ; \quad 25920 \text{ m}^3/\text{día}$$
$$Q_{\text{max}} = 642 \text{ l/s} \quad ; \quad 55296 \text{ m}^3/\text{día}$$

Se tiene una DBO₅ del influente de 220 mg/l y se requiere una DBO₅ del efluente de 30 mg/l.

La planta de tratamiento se encuentra a 1200 m.s.n.m. y registra una temperatura máxima de trabajo de 25 °C en verano y una mínima de 10 °C durante el invierno.

V.1.2 DISEÑO DEL TANQUE DE AIREACIÓN

Se calcula el volumen del tanque de aireación mediante la ecuación que se propone: (Metcalf & Eddie. 1991).

$$V = \frac{\theta_c Y Q (S_i - S_e)}{\chi (1 + K_d \theta_c)}$$

Donde:

V = Volumen del tanque de aireación en m³.

θ_c = Tiempo de retención celular (días).

Q = Gasto medio (m³/día).

S_i = DBO₅ del influente (mg/l).

S_e = DBO₅ del efluente (mg/l).

χ = Sólidos Suspendedos Volátiles en el Licor Mezclado (SSVLM).

K_d, Y = Constantes cinéticas del proceso.

K_d = Coeficiente de decaimiento endógeno (d⁻¹).

Y = kg de células producidas/ kg de materia orgánica removida.

El valor de θ_c para el sistema completamente mezclado se encuentra en un rango de 5 – 15 días, por lo que para este ejemplo se decidió utilizar un valor de 6 días.

Para este caso $\chi = 0.8$ SSLM (Sólidos Suspendidos en el Licor Mezclado), ya que alrededor del 20 % de los sólidos, generalmente son fijos. Los SSLM para un sistema completamente mezclado se encuentran en un rango de 2500 a 4000 mg/l, por lo que en este ejemplo se decidió utilizar un valor de 3000 mg/l.

$$\chi = 0.8 (3000); \chi = 2400 \text{ mg/l.}$$

En lo que se refiere a los parámetros "y" y "Kd" se tomaron los valores típicos que los autores mencionados recomiendan.

TABLA 9

PARÁMETRO	RANGO	TÍPICO
Y	(0.4 – 0.8)	0.6
Kd	(0.04 – 0.075)	0.06

Sustituyendo los valores en la ecuación:

$$V = \frac{6(0.6)(25920)(220 - 30)}{2400[1 + (0.06)(10)]}$$

$$\underline{\underline{V = 5432 \text{ m}^3}}$$

A continuación es necesario revisar los parámetros de diseño que se establecen para cumplir con los requerimientos del proceso de lodos activados, verificando que se encuentren dentro de los rangos permisibles (ver tabla 5).

a) Cálculo de la relación F/M (Food/Mass).

$F = S_i \cdot Q_{med}$; sustituyendo y transformándolo a kg/día; $F = 5702.4$ kg/día.

$M = \chi \cdot \text{volumen}$; sustituyendo y convirtiéndolo en kg; $M = 13036.8$ kg.

El valor resultante de la relación $F/M = 0.44$ y se encuentra dentro del rango para el sistema completamente mezclado que va de 0.2 a 0.6.

b) Cálculo de la carga volumétrica.

$C_{vol} = Co/V$

Co equivale al parámetro F (Food) y el volumen se expresa en m^3 , siendo el rango de carga volumétrica máxima aceptable de 0.8 a 1.92 kg/ $m^3 \cdot \text{día}$.

$C_{vol} = 1.05$, valor que cumple, ya que se encuentra comprendido en el rango que se determina como máximo aceptable.

c) Cálculo del tiempo mínimo de retención hidráulica en el proceso.

A partir de la expresión para el cálculo del gasto hidráulico se obtiene t (tiempo de retención hidráulica).

$$t = V/Q$$

Sustituyendo los valores del volumen (m^3) y del gasto medio ($m^3/\text{día}$).

$t = 0.2$ días; **5.0 horas**, requisito que cumple, ya que se encuentra dentro del rango determinado para el sistema completamente mezclado (3 a 5 horas).

d) Determinación del gasto de recirculación.

Para este sistema se propone el 50 % del gasto total. $Q_r = 0.5 Q_{med}$.
 $Q_r = 150$ l/s.

El dimensionamiento del tanque de aireación se hará tomando en cuenta las siguientes consideraciones, que están en función del equipo que se instalará.

- a) El tanque tendrá una altura de 3.7 m.
- b) El tanque tendrá una forma rectangular.

Para determinar el área del tanque se divide el volumen de agua que se sabe va almacenar el tanque entre la profundidad del mismo.

$$A = 5432 / 3.7$$
$$A = 1468 \text{ m}^2$$

Para este ejercicio se decidió establecer una relación que debe cumplir el área del tanque, $l = 2 \cdot a$.

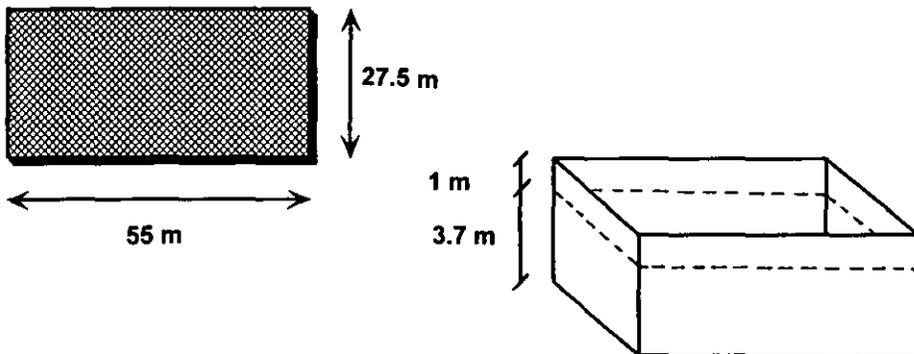
De ésta relación se obtiene que:

$$a = (1468/2)^{(1/2)}$$

$$a = 27.1 \text{ m}; l = 54.2 \text{ m}$$

Para fines constructivos las dimensiones quedan como sigue:

$$a = 27.5 \text{ m}$$
$$l = 55 \text{ m}$$
$$h = 3.7 \text{ m}$$
$$B.L. = 1 \text{ m}$$



V.1.3 CONSIDERACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL TANQUE DE AIREACIÓN

El material de construcción más utilizado es el concreto, el cual es un material particularmente adecuado para las estructuras sanitarias, ya que en condiciones de servicio no se alabea ni sufre cambios dimensionales significativos y, si se le ha diseñado y colado de manera adecuada, es casi impermeable y extremadamente resistente a la corrosión.

Como se puede apreciar la calidad del concreto es muy importante, por lo que se deberá ejercer un control de calidad muy cuidadoso durante la construcción, con el objeto de obtener un concreto impermeable.

Las cargas de diseño se determinan a partir de la profundidad y peso específico del líquido o sólidos retenidos, de la presión externa del suelo y del equipo que va a instalarse.

La capacidad de una estructura para retener líquidos estará razonablemente asegurada si cumple con lo siguiente:

- a) La mezcla de concreto se encuentra bien proporcionada y el concreto está bien consolidado sin segregación.
- b) Se reduce al mínimo el ancho de las grietas.
- c) Las juntas tienen el tamaño adecuado y están apropiadamente espaciadas, diseñadas y construidas.
- d) Se usan revestimientos impermeables de protección cuando sean necesarios.
- e) Se proporciona el acero de refuerzo adecuado.

Por lo general resulta más económico y confiable contrarrestar la infiltración de los líquidos mediante el uso de concreto de buena calidad, el diseño apropiado de las juntas y un refuerzo adecuado, que mediante barreras o recubrimientos impermeables.

El tipo de cemento debe cumplir lo siguiente:

- a) Cemento Portland (ASTM C 150 ó NOM-C-1), tipos I, IA, II, IIA, III, IIIA o V.
- b) Cemento hidráulico combinado (ASTM C 595 ó NOM-C-300), tipos I (PM), I(SM), IP y sus modificaciones con aire incluido.
- c) Cemento hidráulico expansivo (ASTM C 845 ó NOM-C-133), tipo E-1K.

Para este tipo de estructuras se recomienda que debido a la cantidad de concreto que se necesita y al control de calidad que se debe tener se utilice concreto premezclado y no, fabricado en obra.

Se obtendrá una permeabilidad mínima en el concreto si se utilizan las más bajas relaciones agua/cemento que sean compatibles con una trabajabilidad satisfactoria además de una buena compactación. Conforme transcurre el tiempo la impermeabilidad del concreto aumenta y mejora con periodos prolongados de curado húmedo. Además, el acabado de las superficies es muy importante y se obtienen buenos resultados mediante el uso de llana y de cimbras lisas.

Un aditivo inclusor tiene efectos benéficos, además de mejorar la resistencia a los efectos de los ciclos de congelación y deshielo que se sufren en los climas fríos; mejora la trabajabilidad con un revenimiento constante, disminuye el sangrado y se obtiene una mejor estructura de la pasta, además de reducir la contracción.

Otros aditivos tales como los agentes reductores de agua y las puzolanas, son útiles cuando tienden a aumentar la trabajabilidad y compactación con relaciones de agua/cemento menores. Las puzolanas además provocan una disminución en la permeabilidad.

La cimentación va de acuerdo al tipo de suelo en que se vaya a construir el tanque. Los tanques de aireación no toleran asentamientos diferenciales ya que estos pueden causar un agrietamiento en la estructura y por consecuencia fugas. Los tipos de cimentación pueden ser pilotes, pilas de cimentación, losas de cimentación o por medio de zapatas aisladas o continuas.

De ser necesario, las losas podrán cubrir los espacios entre las contratraves, los muros de cimentación y las pilas. Las estructuras adyacentes con cargas y funciones diferentes deberán estar separadas físicamente o por medio de juntas de expansión y/o construcciones de doble pared.

En el diseño de las cimentaciones construidas en suelos granulares u otros suelos compresivos o elásticos, deben tomarse en cuenta, no sólo las variaciones de compresibilidad de los materiales del suelo y los diferentes espesores de los estratos del mismo, sino también las variaciones en la carga producidas por el llenado y vaciado alternados de los tanques, recipientes o depósitos adyacentes.

Estos datos los proporciona un especialista en mecánica de suelos, mediante pruebas que determinan la resistencia del suelo.

La elevación del nivel del manto de aguas freáticas y las condiciones del agua provocada por inundaciones, son aspectos básicos para el diseño, y tales cargas deben considerarse de la misma manera que las cargas del líquido interno. El nivel del manto de aguas freáticas local se puede elevar por debido a fugas de agua de tanques o tuberías cercanas.

Los muros que soportan tanto las cargas interiores del agua como las exteriores de tierra deben diseñarse para soportar el efecto máximo de presión interna y externa, sin considerar una disminución de carga por efecto de una sobre la otra. Esta estructura, si está confinada, debe ser capaz de soportar un probable fenómeno de flotación.

Los tanques de gran diámetro se expanden y se contraen de manera considerable, a medida que se llenan o vacían; la conexión entre la cimentación y el muro debe permitir este tipo de movimientos, o bien ser lo suficientemente fuerte para soportarlos sin agrietamiento, por lo que es necesario la construcción de juntas de movimiento.

La cantidad de acero de refuerzo por contracción y temperatura que se deba suministrar está en función de la distancia entre las juntas de movimiento, que disiparán la contracción y los esfuerzos causados por la temperatura en dirección del refuerzo.

En términos generales, las juntas de dilatación deben colocarse cerca de los cambios abruptos en la configuración de la estructura y, de preferencia, a intervalos no mayores de 36.6 m, aunque en la práctica se han realizado hasta de 100 m o más. En lo que se refiere a un relleno premoldeado ideal para las juntas, éste deberá alcanzar la mitad de su ancho original y dilatarse, para rellenar la junta cuando se contraigan los elementos adyacentes. El caucho, la espuma, o el neopreno se utilizan comúnmente como rellenos. (IMCYC, 1992).

Antes de colar concreto nuevo sobre la superficie de una junta, es necesario prepararla para asegurarse de que haya buena adherencia.

Las juntas de movimiento, particularmente las de expansión deben tener los extremos de concreto reforzados para resistir las cuarteaduras que se puedan producir en el concreto debido al contacto accidental con el concreto en el otro lado de la junta. El refuerzo no debe ser menor a varillas del No. 3 espaciadas 30 cm en el centro, a lo largo de cada cara de la junta y debe estar anclado a lo largo del acero de refuerzo normal del acero.

Cuando la altura del muro es mayor a 2.45 m, el concreto nuevo debe colarse sobre una capa de mortero de cemento esparcida uniformemente sobre el concreto colado con anterioridad. El mortero debe estar compuesto en la misma proporción utilizada en el concreto pero omitiendo los agregados gruesos. Además se utiliza una banda de neopreno para facilitar la adherencia del concreto y el uso de aditivos.

Para evitar la segregación del concreto, éste debe depositarse en capas casi horizontales de 30 a 60 cm, colocadas lo más cerca posible de la posición final en que vaya a quedar. No debe permitirse una caída libre de más de 1.2 m o a través del armado de acero de refuerzo.

Cada una de las capas horizontales debe compactarse por medio de un equipo mecánico vibratorio aprobado. El vibrador debe llegar a la capa subyacente para dar adherencia a las capas entre sí. Para no ejercer una presión que puede ser excesiva para las cimbras, el vibrador no debe penetrar más de 60 cm dentro de la capa subyacente.

No se debe permitir el uso de los vibradores para mover el concreto horizontalmente dentro de la cimbra. Para compactar el concreto dentro de la cimbra, es preferible utilizar los vibradores mecánicos de alta frecuencia de 8000 revoluciones por minuto.

Los vibradores pegados a las cimbras proporcionan un excelente medio para vibrar muros altos y columnas. Las cimbras deben ser diseñadas para soportar toda la presión del líquido producida por el uso de vibradores de cimbras.

Por razones arquitectónicas las esquinas superiores de los muros se redondearan para lograr una mejor presentación del tanque.

En las cuatro esquinas inferiores del tanque de aireación suelen colocarse deflectores a 45 ° de inclinación con respecto a la horizontal, esto para evitar en lo posible que se presenten zonas muertas cuando se realice el proceso de aireación y de esta forma facilitar el diseño y el mezclado.

V.2 CÁLCULO DEL OXÍGENO REQUERIDO DURANTE EL PROCESO

Para el cálculo de la cantidad de oxígeno varios investigadores han propuesto sus métodos, pero para este ejemplo en particular se utilizará el criterio que se propone a continuación: (Metcalf & Eddie, 1991)

$$\frac{\text{kgO}_2}{\text{día}} = \frac{Q(S_i - S_e)}{f(1000)} - 1.42P_x$$

Donde:

Q = Gasto medio (m³/día).

S_i = DBO₅ del influente (mg/l).

S_e = DBO₅ del efluente (mg/l).

f = factor de conversión de DBO₅ a DBO última (DBO_L).

Además:

$$P_x = \frac{Y_{obs}Q(S_i - S_e)}{1000}$$

Donde.

P_x = Lodos activados de desecho producidos por día medidos en términos de sólidos volátiles.

$$Y_{obs} = \frac{Y}{1 + K_d \theta_c}$$

K_d, Y = Constantes cinéticas del proceso.

K_d = Coeficiente de decaimiento endógeno (d^{-1}).

Y = kg de células producidas/ kg de materia orgánica removida.

Para fines de este ejercicio, el parámetro tomará un valor de $f = 0.68$.

Así que sustituyendo los valores en sus respectivas ecuaciones quedan los siguientes resultados.

$$Y_{obs} = 0.441$$

$$P_x = 2172.7$$

$$\frac{kgO_2}{día} = \frac{(25920)(220 - 30)}{1000(f)} - 1.42(2172.7) \approx 4157$$

V.3 DISEÑO DE LOS EQUIPOS DE AIREACIÓN

Es necesario cubrir el requerimiento de oxígeno del proceso mediante un equipo de aireación adecuado. Para completar el ejemplo y atendiendo a las consideraciones hechas en los capítulos anteriores se procederá a diseñar con un equipo de aireación mecánica y otro equipo de aireación por difusión. Ambos equipos se eligieron a través de estudios previos y tomando como referencia información otorgada por diferentes proveedores de equipos de aireación que cumplen con las condiciones que exige un sistema completamente mezclado.

V.3.1 EQUIPO DE AIREACIÓN MECÁNICA

Para este ejemplo se decidió utilizar un aireador de eje vertical del tipo radial o de baja velocidad. El motor que utiliza es del tipo " F" teniendo un rango de 2 a 75 hp. Estos equipos son de tipo flotante y pueden trabajar de manera continua.

Otros datos que otorga el fabricante y el proceso mismo de lodos activados son:

$$\alpha = 0.85$$

$$\beta = 0.95$$

$$C_L = 2.0 \text{ mg/l}$$

$$N_0 = 2.27 \text{ kg de O}_2/\text{hr}^*\text{hp}$$

Calculo de las condiciones de verano.

Utilizando el anexo 2 como referencia, la presión atmosférica a 1200 m.s.n.m:

$$P_a = 657.74 \text{ mm de Hg.}$$

$$P_a = 760(1 - 2.26 \times 10^{-5}(1200))^{5.256}$$

Utilizando el Anexo 1 para determinar C_{Walt} . $C_{Walt} = 8.24 \text{ mg/l}$.

$$K_v = \left(0.9 \left[\frac{8.24 \left(\frac{657.5}{760} \right) - 2.0}{9.17} \right] \right) 1.024^{(25-20)} (0.85)$$

$$K_v = 0.4610$$

Calculo de las condiciones de invierno.

Utilizando el Anexo 1 para determinar C_{Watt} .

$$K_w = \left(\frac{0.9 \left[11.28 \left(\frac{657.5}{760} \right) - 2.0 \right]}{9.17} \right) 1.024^{(10-20)} (0.85)$$

$$K_i = 0.4906$$

Comparando ambos parámetros, se determina que rigen las condiciones de verano, ya que va a presentarse una menor transferencia de oxígeno.

Utilizando la ecuación de Eckenfelder, para aireadores mecánicos, (ver apartado III.1.1).

$$N = 2.27 (0.4610)$$

$$N = 1.0465 \text{ kg de } O_2/\text{hp}^*\text{hr}$$

La cantidad de oxígeno requerido por hora.

$$\frac{4157}{24} = 173.21 \text{ kg } O_2 / \text{hr}$$

Potencia requerida para la aireación.

$$\frac{173.21}{1.0465} = 165.5 \text{ hp}$$

Transformando a kW/hr para revisar la energía requerida para el mezclado.

$$165.5 * 0.7457 = 123.41 \text{ kW/hr}$$

$$123.41 / 5.432 \times 10^3 = 22.72 \text{ kW}/10^3 \text{ m}^3$$

Valor que se encuentra dentro del rango recomendado que es de 19 – 39 kW/10³m³ (ver apartado III.3.2).

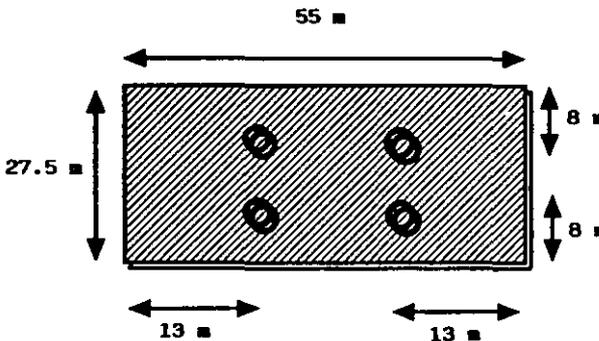
Como recomendación (Metcalf & Eddie, 1991) se propone que para equipos de aireación mecánica, se utilice como referencia que se presente en el proceso de 1 a 1.2 lb O₂ / lb de DBO₅ removida.

Para ajustarse a las potencias comerciales de los aireadores, se propone un valor de 200 hp y se verifican los posibles arreglos. Confrontando los tamaños de los aireadores que maneja el proveedor, revisando la zona de completo mezclado y comprobando que la profundidad de operación del aireador pueda cumplirse, se decidió analizar 3 opciones.

TABLA 10

Tamaño de la unidad (hp)	20	25	50
r.p.m.	30	45	45
Zona de completo mezclado (m)	20	24.5	32
Profundidad de operación (m)	2.50	3.70	3.70

De lo anterior se consideró que es más conveniente es utilizar 4 aireadores de 50 hp c/u para lograr reunir los 200 hp que se necesitan en el proceso y se les dio la distribución que se muestra para reducir la posible presencia de zonas del tanque en las cuales se presente nula o escasa concentración de oxígeno, conocidas como "zonas muertas".



V.3.2 EQUIPO DE AIREACIÓN POR DIFUSIÓN

Para este ejemplo se decidió utilizar difusores del tipo poroso, que consisten en discos de difusión de tipo membrana con un diámetro efectivo de 13 " y una capacidad de manejo de caudales en un rango 3 a 10 CFM y se les dará un acomodo siguiendo un patrón en malla.

Otros datos que otorga el fabricante y el proceso de todos activados son:

$$\begin{aligned}\alpha &= 0.5 \\ \beta &= 0.95 \\ C_L &= 2.0 \text{ mg/l} \\ C &= 0.0042 \\ n &= 0.95\end{aligned}$$

SOTE = 1.65 % / ft para un caudal de 4 CFM, verificando en la gráfica otorgada por el distribuidor (Anexo 3)

La altura del tanque de aireación descontando el bordo libre es de 3.7 m que equivale a casi 12.14 ft, por lo que el SOTE queda expresado como:

$$\begin{aligned}1.65 * 12.14 &= 20.03 \% \\ \text{SOTE} &= 20.03 \%\end{aligned}$$

El factor de corrección por presión se determina como la presión local / presión a nivel de mar:

$$657.74 / 760 = 0.86$$

Se determina C_{ST} con ayuda del anexo 1, siendo el valor para 25 °C de 8.24 mg/l.

Se procede a sustituir los valores en la ecuación propuesta en la página 73 para determinar el rendimiento en campo del difusor.

$$OTE = \frac{20.03[(8.24)(0.95)(0.86) - 2.0]}{9.17} (0.5)(1.02)^{(25-20)}$$

$$OTE = 5.71 \%$$

Para calcular el flujo de aire requerido se sustituye en la ecuación que propone el Departamento del cuerpo de Ingenieros, (ver apartado IV.1.2). Para esto es necesario realizar la conversión de algunos datos al sistema inglés.

Convirtiendo el oxígeno que requiere el proceso a lb de O₂/día resulta:

$$4157 / 0.454 = 9156.39 \text{ lb de O}_2/\text{día}$$

El volumen del tanque de aireación se requiere en millones de galones, por lo que:

$$5432000 \text{ litros} / 3.7854 = 1434987.06 \text{ galones}$$
$$1.4350 \times 10^6 \text{ galones}$$

Se sustituyen los valores en la ecuación quedando:

$$Ra = \frac{9156.39 \cdot 10^3 (7.48)}{5.71 (0.0176) (1440) (1.4350 \cdot 10^6)}$$

$$Ra = 32.98 \text{ CFM}/1000 \text{ ft}^3$$

Se sabe que el volumen por airear es de 5432 m³, que equivalen a 191829.3 ft³ ó 191.83 miles de ft³.

Por lo que el volumen de aire requerido por todo el proceso es de:

$$32.98 \cdot 191.83 = 6326 \text{ CFM (pies cúbicos por minuto).}$$

Por lo que utilizando el otro método de cálculo que propone WPCF:

$$A.R. = \frac{9156.39}{1440} \cdot \frac{13.34}{0.232 \cdot 0.0571}$$

$$A.R. = 6403.15 \text{ CFM}$$

Utilizando el criterio de Eckenfelder-Ford:

$$N = 0.0042 \cdot 4^{(0.95)} \cdot 12.14^{(0.67)} \cdot (8.24 - 2) \cdot 1.02^{(25-20)} \cdot 0.5$$

$$N = 0.2876 \text{ lbO}_2/\text{hr}$$

$$V_1 = \frac{9156.39/24}{0.2876}$$

$$V_1 = 1326.55 \text{ dif} \cdot 4 \text{ CFM} \approx 5306.2 \text{ CFM}$$

Ahora:

$$V_2 = \frac{14.7}{12.64} \times \frac{537}{528} \times 5306.2$$

$$V_2 = 6276.2 \text{ CFM}$$

Para este ejemplo se usara el valor más desfavorable que es de **6404 CFM**.

El número de difusores que se van a necesitar se calcula de la siguiente manera:

$$6404 \text{ CFM} / 4 \text{ CFM} = 1601 \text{ difusores como mínimo.}$$

Se analizó a distribuidores de sopladores y equipos de compresión y se optó por un compresor de desplazamiento positivo con una capacidad de 1432 CFM, una potencia de 54.3 hp y una presión de descarga de 7 psi, suficiente para superar la elevación del tanque y las pérdidas sufridas en la tubería que ascienden a 6.1 psi (5.1 psi por la elevación y 1 psi por pérdidas en la tubería).

Por lo que el número de sopladores que se necesita es de $6404 / 1432 = 4.5$ sopladores.

Se utilizarán 5 sopladores de desplazamiento positivo + 1 de reserva.

Es necesario mencionar que para efecto de este problema se concluirá con el diseño de los difusores y con la determinación del número de sopladores, pero falta aún diseñar la tubería de conducción de aire y cuantificar las pérdidas que ocasionan los accesorios y la fricción del fluido, que para este ejemplo se supusieron.

Ahora se procede a revisar la energía requerida para el mezclado.

$$6404/191.83 = 33.38 \text{ ft}^3 / \text{min} / 10^3 \text{ ft}^3$$

Valor que cumple con los requerimientos que establece esta revisión, ya que como se había decidido se colocarán los difusores siguiendo un patrón de malla cuyo valor mínimo debe estar en el rango de $10 \text{ a } 15 \text{ ft}^3 / \text{min} / 10^3 \text{ ft}^3$ (ver apartado IV.3.2).

Ahora para elegir el acomodo de los difusores es necesario saber que se tienen como restricciones una separación física mínima de 15 cm y una máxima de 75 cm. Además cada difusor tiene un rango de influencia de 2 a 14 ft² del área del tanque.

El área del tanque es de $90.22 \text{ ft} \times 188.45 \text{ ft} = 16280.4 \text{ ft}^2$

Para revisar que cumplan con el área de influencia de cada uno, se determina la relación:

$16280.4 / 1601 = 10.16 \text{ ft}^2$ por cada difusor.

Valor que se encuentra comprendido entre el rango por lo cual cumple con este requisito.

Debido a las dimensiones del tanque, se decidió colocar 35 líneas de 55 m cada una separadas a una distancia de 0.75 m.

Para lograr dar una mayor uniformidad en el suministro de aire, cada una de estas líneas contendrá 72 discos de membrana, separados a una distancia de 75 cm, cubriendo con esto toda la longitud sin que se presenten zonas muertas.

La cantidad final de discos difusores que se va a utilizar será:

72 difusores * 35 líneas = 2520 discos de membrana de 13", operando a 4 CFM c/u.

Como recomendación (Metcalf & Eddie, 1991), se propone que para equipos de aireación por difusión, que se utilice como referencia que se presenten de 0.5 a 2.0 ft³ / gal.

Es conveniente recalcar que para cualquier caso que se presente en la práctica profesional, es necesario comparar las propuestas que concursen con los diferentes equipos de aireación y preferentemente tener referencias de su funcionamiento en otras plantas.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VI.1 CONCLUSIONES

Al término del presente trabajo se obtuvieron las siguientes conclusiones principales, las cuales mencionan los conocimientos básicos de la aireación en el proceso biológico aerobio de tratamiento de aguas residuales utilizando el sistema de lodos activados.

1. El tratamiento de las aguas residuales tiene una gran importancia para la humanidad, ya que el agua al ser un bien escaso, ocasiona que se vea la manera de poder usarlas de nueva cuenta en actividades que no requieran una calidad de agua tan estricta como la potable.
2. Es necesario conocer las fuentes de contaminación que ocasionan que el agua pierda su calidad inicial, haciéndola inadecuada para determinadas actividades.
3. Es necesario llevar a cabo estudios de caracterización de las aguas residuales, a fin de conocer sus propiedades físicas, químicas, biológicas y energéticas para poder compararlas con los parámetros que se tienen para su uso.
4. Es necesario saber qué componentes o elementos le fueron agregados al agua limpia, dependiendo del ramo de la industria que la utilice en sus procesos. Todo esto para determinar los procesos que puedan ser más eficientes para remover esos contaminantes.
5. Se resalta la importancia que tiene la aireación dentro del proceso de tratamiento de aguas residuales como un concepto de operación unitaria que se lleva a cabo para lograr la transferencia de gases.
6. Se determina la importancia que tiene el proceso biológico aerobio denominado como lodos activados dentro de los procesos biológicos que se utilizan para el tratamiento de aguas residuales y la dependencia que tiene este proceso con la aireación.

7. Para comprender el funcionamiento del proceso de transferencia de gases en el cual se basa la aireación, es necesario comprender cómo afecta la solubilidad de un gas en un líquido, en este caso en específico, del oxígeno.
8. Para entender cómo se ve afectada o alterada la transferencia de oxígeno, hay que conocer los diversos factores que intervienen en el proceso y además realizar las correcciones pertinentes a la ecuación de transferencia de oxígeno para obtener un resultado más preciso.
9. Es preciso conocer las principales modificaciones hechas al proceso convencional de lodos activados y qué diferencias tienen entre sí, además de exponer sus parámetros de diseño, todo esto para saber cual es el proceso más adecuado en función del problema afrontado.
10. La aireación en el proceso de lodos activados proporciona:
 - a) El oxígeno requerido por el metabolismo de los microorganismos encargados de degradar la materia orgánica.
 - b) La circulación y agitación necesaria para prevenir la sedimentación de los sólidos, permitiendo que estén el mayor tiempo posible en contacto con los microorganismos.
 - c) El medio propicio para la liberación de productos de desecho de los microorganismos.
11. Es importante conocer el desarrollo, principios y características de los dos diferentes sistemas de aireación que se utilizan en el proceso de lodos activados: la aireación mecánica y la aireación por difusión.
12. Para los equipos de aireación mecánica se debe tener en cuenta que:
 - a) La medición del rendimiento de los equipos de aireación mecánica se realiza en función a la tasa de transferencia de oxígeno al agua residual y se determina comúnmente con la fórmula propuesta por Eckenfelder y Ford.

- b) La transferencia de oxígeno en los aireadores mecánicos se consigue mediante dos fenómenos: el de turbulencia y el de dispersión.
 - c) Los aireadores mecánicos se clasifican como de eje vertical o de eje horizontal y a su vez cada uno se divide en superficiales y sumergidos.
 - d) Los aireadores mecánicos varían sus características dependiendo del fabricante, por lo que es necesario llevar a cabo un exhaustivo estudio de mercado para determinar cuál aireador es el más adecuado dependiendo de la problemática que se presente.
 - e) Muchos de los equipos de aireación mecánica presentan problemas en su funcionamiento en climas fríos, debido a la escarcha que se forma, pero a cambio ofrecen un bajo costo inicial ya que no necesita instalaciones de equipo complementario.
 - f) Es necesario comparar los diferentes rendimientos que tienen los equipos de aireación mecánica en condiciones estándar mediante gráficas o tablas proporcionadas por el fabricante y a partir de eso determinar la transferencia de oxígeno en campo.
 - g) Existen efectos que modifican el comportamiento de la transferencia de oxígeno, los cuales necesitan tener un mayor estudio: efecto químico, el efecto geométrico, el efecto debido al incremento de la tasa de reacción biológica y el equilibrio dinámico.
 - h) Es importante exigir al fabricante los manuales de mantenimiento y operación de los equipos de aireación adquiridos y seguirlos detalladamente para lograr una mayor vida de los equipos.
13. Para los equipos de aireación por difusión se debe tener en cuenta que:
- a) La medición del rendimiento de los equipos de aireación por difusión se realiza en función a la eficiencia de transferencia de oxígeno al agua residual expresándose en un porcentaje que va de acuerdo al caudal que se maneja.

- b) Hay que tener cuidado al seleccionar los valores del parámetro alfa, ya que tiene un amplio rango y es necesario realizar pruebas de laboratorio para determinarlo; mismas que deben considerar los factores que se encuentran involucrados. Hay que tener en cuenta que cada equipo tiene un funcionamiento distinto y eso hace variar este parámetro.
- c) Los equipos de aireación por difusión se dividen en difusores porosos, no porosos y otros equipos de aireación.
- d) En los sistemas de aireación por difusión es necesario filtrar el gas, comprimirlo y distribuirlo por medio de una tubería de distribución que va al tanque de aireación.
- e) Los equipos de difusión se clasifican también debido al tamaño de las burbujas que producen: de burbuja fina (1.5 a 2 mm o menores a éste) y de burbuja gruesa (3 a 5 mm o mayores a éste). Las burbujas finas tienen una mayor eficiencia en la transferencia de oxígeno que las burbujas gruesas.
- f) Los difusores porosos producen generalmente burbujas finas por lo que tienen una mayor eficiencia de aireación, se puede variar el flujo de aire dando una buena flexibilidad en la operación, pero requieren de elaborados sistemas de filtración de aire y tienen un alto costo inicial y de mantenimiento.
- g) Los difusores no porosos trabajan con burbujas de mayor diámetro por lo que tienen una menor eficiencia en la transferencia de oxígeno. Tienen un alto costo inicial y un alto costo energético, pero tienen un bajo costo de mantenimiento debido a que no se tapan.
- h) Los otros equipos de aireación por difusión presentan una alta transferencia de oxígeno, una fácil instalación, un bajo consumo de energía, pero actualmente son menos utilizados, ya que presentan problemas debido a que limitan la geometría del tanque de aireación y presentan un costo de moderado a alto, tanto inicial como de mantenimiento.
- i) En los sistemas de aireación por difusión es necesario utilizar equipo adicional como sopladores, filtros de aire y tubería de distribución de aire.

- j) Es importante exigir al fabricante los manuales de mantenimiento y operación de los equipos de aireación adquiridos y del equipo adicional utilizado y seguirlos detalladamente para lograr una mayor vida de los equipos.
14. Es necesario contar con la información básica determinada en función de estudios previos que comprenden datos de aforos, características del agua, datos geográficos y climáticos de donde se va a ubicar la planta, etc. Todos los datos se utilizan para determinar la variante del sistema de lodos activados que se va a utilizar y para determinar correctamente el volumen del tanque de aireación que se necesita construir.
15. Es imprescindible revisar todos los parámetros de diseño que implica la variante del sistema de lodos activados elegido y coordinar la geometría del tanque con el equipo de aireación que se va a utilizar. Además es necesario tener en consideración el bordo libre del tanque para efectos del salpiqueo y las consideraciones constructivas pertinentes.
16. Es importante tener en cuenta las consideraciones constructivas que se dan, para lograr un correcto funcionamiento del tanque de aireación y que no se presenten fallas en la operación o por descuidos cometidos en el proceso constructivo.
17. Es necesario resaltar la importancia que tiene la correcta determinación del requerimiento de oxígeno por el proceso seleccionado, ya que a partir de éste se diseñan los sistemas de aireación.
18. A partir de la ejemplificación numérica de un sistema de aireación mecánica y de un sistema de aireación por difusión, se tiene la noción de cómo proceder para diseñar de manera correcta estos sistemas, atendiendo a las características propias de cada equipo que como se sabe varían dependiendo del fabricante.
19. Con la determinación del número y colocación de los aireadores o difusores dentro del tanque se concluye con lo que respecta a los aspectos que intervienen para un correcto diseño y construcción del tanque de aireación.

VI.2 RECOMENDACIONES

A continuación se proponen ciertas recomendaciones que sería adecuado que se tuvieran en consideración ya sea por alumnos, investigadores o ciertas organizaciones, ya que están orientadas al posible desarrollo de futuros trabajos tanto en el aspecto académico, profesional y técnico. Estas se encuentran basadas en los problemas que se encontraron al realizar ésta tesis o las limitaciones que tiene la misma debido a la relación que presenta con otros temas.

Sería conveniente que se desarrollaran trabajos que complementen ciertos aspectos sobre los cuales no hay suficiente información disponible y que en ésta obra se hace referencia como son:

1. Tratar los equipos de aireación por separado, detallando su funcionamiento, evolución y generalidades desde el punto de vista puramente mecánico ya que los proveedores de los equipos de aireación no dan mucha información referente a estos aspectos y no hay tampoco la suficiente información bibliográfica.
2. Desarrollar un trabajo especializado en compresores y sopladores destinados a utilizarse en el proceso de tratamiento biológico de lodos activados, detallando sus características, ventajas y limitaciones.
3. Proponer diversos ejercicios y ejemplos resueltos que tomen en cuenta las diferentes variantes que tiene el proceso de lodos activados y que se mencionan en esta obra, siguiendo la metodología expuesta.
4. Completar el ejemplo propuesto detallando el diseño de la tubería de conducción de aire con todos los aspectos que se encuentran involucrados y de esta manera concluir lo que se refiere al equipo adicional del sistema de aireación.
5. El desarrollar una investigación y recopilación, presentando los resultados en forma de un catálogo que contenga los equipos de aireación vigentes en el mercado nacional, sus aspectos técnicos y especificaciones, todo esto para facilitar la selección del equipo más adecuado.

6. Desarrollar investigaciones por parte de instituciones gubernamentales o privadas para determinar los parámetros α y β pero experimentando con aguas nacionales.

7. Elaborar una profunda investigación acerca de los factores que modifican el comportamiento de la transferencia de oxígeno como lo son: el efecto químico, el efecto geométrico, el efecto debido al incremento de la tasa de reacción biológica y el equilibrio dinámico.

8. Detallar todo lo referente al aspecto estructural que interviene en el diseño del tanque de aireación, de acuerdo a los estudios de mecánica de suelos, exponiendo cuidadosamente los diversos tipos de cimentación y consideraciones realizadas según el tipo de suelo en que se encuentre. Los armados de refuerzo atendiendo a la geometría que presente el tanque de aireación y los factores involucrados como los fenómenos de flotación, presiones hidráulicas y efectos sísmicos.

9. Elaborar un trabajo exhaustivo que especifique detalladamente las consideraciones que se deben tener en la instalación de los equipos de aireación y equipos anexos o auxiliares, mencionando los métodos de anclaje de los diferentes sistemas de difusión, las diferentes conexiones y piezas especiales que se utilizan para unir y asegurar el sistema completo de aireación.

ANEXOS

ANEXO 1

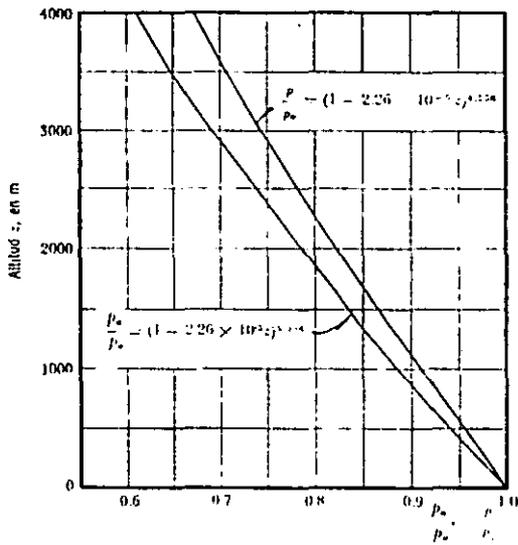
	Concentración de oxígeno disuelto en mg/l			
	Salinidad partes por millar			
	0	5	10	15
0	14.60	14.11	13.64	13.18
1	14.20	13.73	13.27	12.83
2	13.81	13.36	12.91	12.49
3	13.45	13.00	12.58	12.16
4	13.09	12.67	12.25	11.85
5	12.76	12.34	11.94	11.56
6	12.44	12.04	11.65	11.27
7	12.13	11.74	11.37	11.00
8	11.83	11.46	11.09	10.74
9	11.55	11.19	10.83	10.49
10	11.28	10.92	10.58	10.25
11	11.02	10.67	10.34	10.02
12	10.77	10.43	10.11	9.80
13	10.53	10.20	9.89	9.59
14	10.29	9.98	9.68	9.38
15	10.07	9.77	9.47	9.19
16	9.86	9.56	9.28	9.00
17	9.65	9.36	9.09	8.82
18	9.45	9.17	8.90	8.64
19	9.26	8.99	8.73	8.47
20	9.08	8.81	8.56	8.31
21	8.90	8.64	8.39	8.15
22	8.73	8.48	8.23	8.00
23	8.56	8.32	8.08	7.85
24	8.40	8.16	7.93	7.71
25	8.24	8.01	7.79	7.57
26	8.09	7.87	7.65	7.44
27	7.95	7.73	7.51	7.31
28	7.81	7.59	7.38	7.18
29	7.67	7.46	7.26	7.06
30	7.54	7.33	7.14	6.94
31	7.41	7.21	7.02	6.83
32	7.29	7.09	6.90	6.72
33	7.17	6.98	6.79	6.61
34	7.05	6.86	6.68	6.51
35	6.93	6.75	6.58	6.40
36	6.82	6.65	6.47	6.31
37	6.72	6.54	6.37	6.21
38	6.61	6.44	6.28	6.12
39	6.51	6.34	6.18	6.03
40	6.41	6.25	6.09	5.94

Adaptado de colt, J Computation of dissolved gas concentrations in water as functions of temperature, salinity and pressure. American Fishener Society Special Publication 14, Bethesda, MD. 1984

ANEXO 2

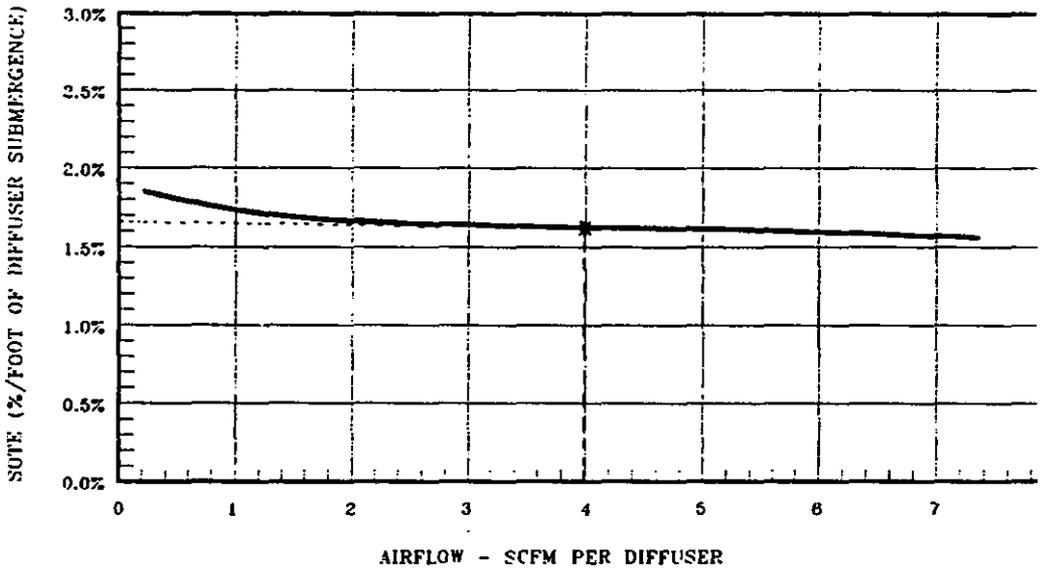
VARIACIÓN DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA CON LA ALTITUD UTILIZANDO PARA SU CÁLCULO LA FÓRMULA

$$\frac{P_a}{P_0} = \left(1 - 2.26 \times 10^{-5} z\right)^{5.256}$$



ANEXO 3

GRÁFICA DE CAUDAL DE AIRE (CFM) VS SOTE (%)
EN UN DISCO DIFUSOR DE MEMBRANA EPDM
DE DIÁMETRO EFECTIVO DE 13"



BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, "Water treatment plant design", Ed. McGraw-Hill, second edition, 1990.
- CNA, "Diseño de instalaciones mecánicas y selección de equipo mecánico", libro V, 4.1, tomo II, 1994.
- CRANE Co., "Flujo de fluidos en válvulas accesorios y tuberías", Ed. McGraw-Hill, 1989.
- DEPARTAMENTO DE SANIDAD DEL EDO. DE NUEVA YORK, "Manual de tratamiento de aguas", Ed. Limusa, 1994.
- DEPARTMENT OF THE ARMY CORPS OF ENGINEERS, Engineer manual EM 1110-2-S01 part 1, "Design of wastewater treatment facilities major systems", 1978.
- DROSTE L., RONALD, "Theory and practice of water and wastewater treatment, Ed. John Wiley & Sons, 1997.
- FAIR, GEYER & OKUN, "Purificación de aguas, tratamiento y remoción de aguas residuales", Ed. Limusa, 1994.
- GREENE, RICHARD W., "Compresores, selección, uso y mantenimiento", Ed McGraw-Hill, 1989
- IMCYC, "Estructuras de concreto para el mejoramiento del medio ambiente", 1984.
- IMCYC, "Estructuras sanitarias de concreto para el mejoramiento del ambiente", 1992
- KIRKPATRICK, "Advanced Mathematics for water and wastewater treatment plant operators", Book two, Technomic Publishing Co., 1990
- METCALF & EDDIE INC., "Wastewater engineering: Treatment, disposal & reuse, Ed. McGraw-Hill, third edition, N.Y. 1991.
- MONTGOMERY, JAMES M., "Water Treatment principles and design, Ed John Wiley & Sons, 1985.
- RAMALHO, R.S., "Tratamiento de aguas residuales", segunda edición, Ed. Reverté, Barcelona, 1993.
- REYNOLDS & RICHARDS, "Unit Operations and Processes in Environmental Engineering, second edition, PWS Publishing Company, 1995.
- RUSSELL H. BABCOCK, "Instrumentación y control en el tratamiento de aguas potables, industriales y de desecho", Ed. Limusa, 1974.
- SAHOP, "Normas técnicas para el proyecto de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, 1985.
- SALLE, D.J., " Fundamental principles of bacteriology", Ed. McGraw-Hill, 1990.
- SEDUE, "Operación y mantenimiento de sistemas de lodos activados, fascículo 6, 1985.
- SOTELO ÁVILA, GILBERTO., "Hidráulica general", Ed. Limusa, México, 1997.
- T.H.Y. TEBBUTT, "Fundamentos de control de la calidad del agua", Ed. Limusa 1990
- WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION, ASCE, "Aeration in wastewater treatment, WPCF manual of practice No. 5, 1971.
- WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION, ASCE, "Aeration: a wastewater treatment process", WPCF manual of practice No. FD-13, 1998.