



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE
OXÍGENO EN AGUAS RESIDUALES COMO PARÁMETRO PARA
EL DIMENSIONAMIENTO DEL EQUIPO DE AIREACIÓN DE UN
BIODIGESTOR AERÓBICO**

María Paula Chávez Paredes
Asesorada por Ing. Rodolfo Espinosa Smith

Guatemala, agosto de 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE
OXÍGENO EN AGUAS RESIDUALES COMO PARÁMETRO PARA
EL DIMENSIONAMIENTO DEL EQUIPO DE AIREACIÓN DE UN
BIODIGESTOR AERÓBICO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA POR

MARÍA PAULA CHÁVEZ PAREDES

ASESORADA POR ING. RODOLFO ESPINOSA SMITH

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, AGOSTO DE 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
EXAMINADOR	Ing. Jorge Rodolfo García Carrera
EXAMINADOR	Ing. Victor Herbert de León Morales
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE OXÍGENO EN AGUAS RESIDUALES COMO PARÁMETRO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL EQUIPO DE AIREACIÓN DE UN BIODIGESTOR AERÓBICO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química con fecha julio de 2003.

María Paula Chávez Paredes

ACTO QUE DEDICO A

Los tesoros de mi vida

Mi esposo

Mis padres

Mis hermanos

Quienes con su amor incondicional, su comprensión y apoyo constante han hecho que mi vida haya estado y esté llena de amor y felicidad.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco mucho a:

- Dios Por mis 24 años de vida llenos de felicidad y por hacerme saber que siempre hay algo mejor en mi porvenir.
- Mis padres Que con su amor, guía, educación y dedicación han sido mi ejemplo personal, espiritual y profesional y a quienes entrego hoy el fruto a sus esfuerzos y sacrificios. ¡Gracias, los quiero mucho!
- Mi esposo Quien ha complementado mi existir, con su amor, comprensión y sabiduría. Quien me ha apoyado desde el momento en que lo conocí y quien es mi orgullo y símbolo de admiración. Gracias por enseñarme que: “El amor todo lo puede...”.
- Mi tía Mery Quien con su amor y dulzura ha llenado mi vida.
- Mi familia Con quienes tengo tantos recuerdos que han sido pieza clave en mi vida y quienes han sido de apoyo en mi existir.
- Mis hermanos Con quienes aprendí lo que es la lealtad y amor incondicional. Gracias por la ternura, paciencia y amor que siempre me han brindado.
- Mis amigos Con quienes he compartido la gloria de la amistad, riendo, llorando, viviendo...gracias a Dios por ustedes.

Mi asesor Ing. Rodolfo Espinosa por su incondicional apoyo y su ayuda en el desarrollo de este trabajo, así como por todos los conocimientos compartidos y su gran corazón.

Ing. Posadas Por el apoyo brindado y su gran disposición de ayudarme.

Todos Aquellos que han tocado y enriquecido mi vida.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1 Aguas receptoras	1
1.2 Aguas residuales	2
1.2.1 Constituyentes	2
1.2.1.1 Sólidos suspendidos	4
1.2.1.2 Materia orgánica	4
1.2.1.3 Nitrógeno	5
1.2.1.4 Fósforo	5
1.2.1.5 Alcalinidad	6
1.2.2 Control y tratamiento de aguas residuales	6
1.2.2.1 Recolección de las aguas residuales	7
1.2.2.2 Tratamiento	8
1.2.2.3 Disposición de aguas residuales	8
1.2.2.4 Manejo de biosólidos	9
1.3 Los microorganismos en el tratamiento del agua	9
1.3.1 Cinética del crecimiento biológico	10
1.3.2 Tasa de crecimiento	12
1.3.3 Métodos de recuento de microorganismos	13

1.3.4 Factores que afectan el crecimiento microbológico	14
1.4 Aireación	15
1.4.1 Teorías de la transferencia de oxígeno en el agua	17
1.4.2 Equipos de aireación	19
2. RESULTADOS	21
3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	25
CONCLUSIONES	39
RECOMENDACIONES	41
BIBLIOGRAFIA	43
ANEXOS	45

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figuras

1. Comportamiento de la concentración de oxígeno disuelto en el tiempo al interrumpir la aireación 26
2. Relación entre la cantidad de microorganismos y el tiempo de aireación en el agua residual 27
3. Relación entre la cantidad de microorganismos y el tiempo de aireación en el agua residual 28
4. Correlación de la concentración de oxígeno disuelto en el agua residual al interrumpir aireación con el tiempo para la muestra 1 29
5. Correlación de la concentración de oxígeno disuelto en el agua residual al interrumpir aireación con el tiempo para la muestra 2 30
6. Correlación de la concentración de oxígeno disuelto en el agua residual al interrumpir aireación con el tiempo para la muestra 3 30
7. Correlación de la concentración de oxígeno disuelto en el agua residual al interrumpir aireación con el tiempo para la muestra 4 31

8. Correlación de la concentración de oxígeno disuelto en el agua residual al interrumpir aireación con el tiempo para la muestra 5	31
9. Correlación de la concentración de oxígeno disuelto en el agua residual al interrumpir aireación con el tiempo para la muestra 6	32
10. Correlación de la concentración de oxígeno disuelto y $dC/dt+rt$ al reincorporar la aireación para la muestra 1	33
11. Correlación de la concentración de oxígeno disuelto y $dC/dt+rt$ al reincorporar la aireación para la muestra 2	33
12. Correlación de la concentración de oxígeno disuelto y $dC/dt+rt$ al reincorporar la aireación para la muestra 3	34
13. Correlación de la concentración de oxígeno disuelto y $dC/dt+rt$ al reincorporar la aireación para la muestra 4	34
14. Correlación de la concentración de oxígeno disuelto y $dC/dt+rt$ al reincorporar la aireación para la muestra 5	35
15. Correlación de la concentración de oxígeno disuelto y $dC/dt+rt$ al reincorporar la aireación para la muestra 6	35
16. Relación entre el coeficiente de transferencia de oxígeno y la presencia de microorganismos	36
17. Curva de desempeño de una bomba o aireador	36

Tablas

I. Importancia del estudio de los constituyentes de las aguas residuales	3
II. Resultados de las mediciones de oxígeno disuelto (en ppm's) en el agua residual analizada	21
III. Cantidad de microorganismos presentes en la muestra de agua residual al aplicarle aireación a diferentes intervalos de tiempo	22
IV. Variación de la cantidad de microorganismos con el tiempo (dX/dt) y tasa específica de crecimiento de microorganismos (μ)	22
V. Velocidad de consumo de oxígeno por los microorganismos en el agua residual	22
VI. Variación de la concentración de oxígeno disuelto al reincorporar la aireación	23
VII. Coeficiente de transferencia de oxígeno	23

LISTA DE SÍMBOLOS

K_{la}	Coeficiente de transferencia de masa
μ	Tasa específica de crecimiento
C	Concentración de oxígeno disuelto
t	Tiempo
X	Cantidad de microorganismos
dC/dt	Variación de la concentración de oxígeno disuelto en el tiempo
r_x	Velocidad de consumo de oxígeno

GLOSARIO

- Aguas residuales** Son todos los efluentes de agua provenientes de industrias, ciudades o de cualquier lugar en donde exista actividad humana; esta agua contiene compuestos que al llegar a la fuente receptora la contaminan.
- DBO 5 ó demanda bioquímica de oxígeno** Es la cantidad de oxígeno disuelto en una muestra de agua, que se consume durante 5 días como consecuencia de la acción de los microorganismos presentes (natural o artificialmente) sobre el contenido de materia orgánica. También se le conoce como el índice de la cantidad de materia biodegradable presente en la muestra. Se reporta en partes por millón o mg/l. Los valores permisibles dependen del uso que se le vaya a dar al efluente.
- DQO ó demanda química de oxígeno** Es la cantidad de oxígeno que sería necesaria para oxidar mediante reacciones químicas todos los compuestos inestables presentes en una muestra de agua, incluyendo el material biodegradable. Es un índice de la cantidad de compuestos orgánicos e inorgánicos (no necesariamente dañinos o tóxicos) presentes en un efluente. Se reporta en ppm o mg/l. Aunque los valores de DQO no son concluyentes para determinar contaminación, su determinación se hace por un método relativamente rápido y como guarda relación con el DBO se usa como un indicador para caracterizar aguas de desecho.

pH	Indica una relación de contenido de iones libres en solución y representa el grado de acidez o basicidad del efluente. Un pH debajo de 5, además de indicar presencia fuerte de ácidos puede ser un indicador de descomposición de materia orgánica y presencia de actividad microbiana. Un pH arriba de 8 indica fuerte concentración de álcalis y puede requerir neutralización. Un pH neutro (6.5-7.5) no necesariamente indica ausencia de contaminantes, ya que éstos pueden estar neutralizados.
Sólidos disueltos	Se obtienen por diferencia, después de determinar los sólidos insolubles. Indican el contenido de materiales que no pueden separarse por medios físicos. Parte de DBO y DQO corresponden a sólidos disueltos.
Sólidos insolubles	Son todos los sólidos que podrían removerse de un efluente por medios físicos (flotación, sedimentación, filtración, centrifugación, etc.). Se determinan por evaporación y secado a peso constante. En la práctica (a escala industrial) no es posible separar todos los sólidos insolubles en forma económica.
Sólidos totales	Incluye todo el material disuelto y en suspensión en una muestra de agua. Se reporta en mg/l. Generalmente se determina como parámetro de referencia para establecer por diferencia los sólidos disueltos o los sólidos en suspensión.

Sólidos sedimentables Es la fracción de sólidos insolubles que se depositan por la acción de la gravedad en un recipiente cónico estándar, en un tiempo determinado. Indican la cantidad de lodos que podrían separarse por sedimentación de un efluente. Se mide en ml/l-hr. Es importante mencionar que los sólidos sedimentables no son un indicador de masa seca. La sedimentación puede acelerarse con la adición de un floculador y su efecto se mide de la misma manera.

Temperatura Temperaturas arriba de 35°C afectan negativamente a la fauna de un cuerpo de agua. Pero temperaturas menores a 90°C aunque temporalmente inhiben la actividad microbiana también propician la esporulación en algunas especies de microorganismos, provocando mayor proliferación cuando la temperatura baja a la temperatura ambiente.

RESUMEN

En la actualidad, el tratamiento de las aguas residuales industriales ha adquirido mayor importancia, ya que el mismo permite que el impacto ambiental de las industrias se disminuya y que la contaminación producida se encuentre dentro de los límites aceptables. Sin embargo, los tratamientos también tienen diversos costos asociados, por lo cual las industrias se encuentran en la necesidad de optimizar este proceso, estudiando las posibilidades para utilizar el tratamiento de aguas residuales que se adapte mejor a sus necesidades y utilizar el equipo adecuado, de tal forma que el costo para el tratamiento de agua sea el menor posible.

El presente trabajo de graduación se centra en la determinación y el estudio del coeficiente de transferencia de oxígeno y de la potencia del aireador de una planta de tratamiento de aguas residuales provenientes de una industria guatemalteca de alimentos, con la finalidad de determinar la potencia óptima a utilizar para proporcionar la cantidad de oxígeno necesaria para el crecimiento de los microorganismos responsables de la degradación biológica.

Previo a la ejecución de la parte experimental, fue necesario contar con la información bibliográfica necesaria, la cual se encuentra recopilada en el marco teórico del presente trabajo. Dicho marco teórico está compuesto por 4 capítulos: en el primer capítulo se describe lo que son las aguas receptoras, mientras que en el segundo se describen las aguas residuales, sus principales constituyentes, los controles y tratamientos que deben de aplicárseles a esta agua para eliminar los residuos biológicos, los métodos de reutilización y manejo de biosólidos.

En el capítulo tres se abarcan algunos de los aspectos más importantes de la influencia de los microorganismos en el tratamiento aeróbico de aguas residuales, como lo son la cinética del crecimiento biológico, la tasa de crecimiento, los métodos de recuento de microorganismos y los factores que afectan el crecimiento microbiológico.

En el último capítulo del marco teórico se describen las diferentes teorías de la transferencia de oxígeno en el agua, así como los diferentes equipos de aireación que pueden utilizarse en el tratamiento de aguas residuales.

La parte experimental está basada en la determinación de la cantidad de oxígeno disuelto en el agua a diferentes intervalos de tiempo, después de haberle aplicado aireación, al interrumpir la misma y al reincorporársela de nuevo. Adicional, se realizó un recuento microbiológico, por medio del cual fue posible determinar las tendencias del crecimiento microbiológico al aplicar la aireación por diferentes intervalos de tiempo.

A partir del análisis de los resultados obtenidos en la parte experimental se determinó que el coeficiente máximo de transferencia de oxígeno de la planta de tratamiento de aguas residuales de la planta de alimentos estudiada es de 4.3kg/kg-min , tendiendo este coeficiente a disminuir al aumentar la cantidad de microorganismos presentes.

Se determinó a su vez el tiempo óptimo de aireación del agua residual de esta planta de tratamiento, siendo éste de 15 a 20 horas, debido a que en este punto la tasa específica de crecimiento de microorganismos se encuentra en su punto máximo. Para proveer la cantidad de oxígeno necesaria para el tratamiento de esta agua residual es necesario contar con una bomba cuya potencia sea de 2.5HP.

OBJETIVOS

General

Determinar el coeficiente de transferencia de oxígeno en una planta de tratamiento aeróbico de agua residual proveniente de una planta de alimentos.

Específicos

1. Determinar el tamaño óptimo del aireador a utilizar para suplir la demanda de oxígeno en el tratamiento de aguas residuales de una planta guatemalteca de alimentos.
2. Determinar la demanda de oxígeno de los microorganismos presentes en el agua residual de una planta de alimentos.
3. Determinar la tasa específica de microorganismos (μ) del agua residual de una planta de alimentos.
4. Determinar la relación entre el coeficiente de transferencia de oxígeno y el crecimiento celular (dx/dt).
5. Determinar el comportamiento existente entre la cantidad de microorganismos presentes y el tiempo en el agua residual al aplicar aireación.

INTRODUCCIÓN

Actualmente uno de los problemas que más preocupa a la humanidad es la gran cantidad de contaminantes que se desechan en el agua, ya que el agua es un compuesto vital que está escaseando debido a la contaminación de las fuentes. A pesar de que un 70% de la superficie de la tierra es agua, la mayor parte de ella es salina, siendo sólo aproximadamente 3% de toda el agua del mundo agua dulce. Además de esto, la mayor parte de esta agua dulce no se encuentra generalmente disponible, ya que aproximadamente unas tres cuartas partes de toda el agua dulce se encuentra inaccesible, en forma de casquetes de hielo y glaciares situados en zonas polares muy alejadas de la mayor parte de los centros de población; sólo un 1% es agua dulce superficial fácilmente accesible.

Debido a esta baja cantidad de agua, ha surgido la necesidad de tratar las aguas residuales. Para que esto se logre se recurre a muchos métodos de los cuales los más utilizados son los que involucran microorganismos debido a que son económicos, eficientes y no generan subproductos contaminantes.

Dada la importancia del tratamiento del agua residual, surge la necesidad de realizar estudios que sean de ayuda para mejorar este proceso. Muchos tratamientos biológicos se realizan en condiciones aeróbicas, en las cuales los microorganismos utilizan el oxígeno para degradar la materia orgánica, surgiendo la necesidad de suplir esta demanda de oxígeno por medio de aireadores.

El propósito del presente trabajo es determinar el coeficiente de transferencia de oxígeno en una planta de tratamiento de las aguas residuales provenientes de una fábrica de alimentos localizada en Guatemala, así como determinar la potencia del aireador requerida para el proceso de aireación y de esta manera optimizar el proceso de tratamiento de aguas de la planta estudiada.

Para realizar esto, es preciso determinar la demanda de oxígeno de los microorganismos, lo cual se realizó mediante un medidor de oxígeno disuelto, aplicándose aireación por diferentes períodos de tiempo, después del cual se interrumpió la misma y se midió la variación de la concentración de oxígeno disuelto con el tiempo. Adicional, se realizó un recuento microbiológico de cada una de las muestras y se determinó la tasa específica de crecimiento, mediante las cuales fue posible determinar el tiempo óptimo de aireación en la planta de tratamiento analizada, siendo este de 20 horas.

Para la determinación del coeficiente de transferencia de oxígeno, se reincorporó la aireación a las muestras, encontrándose la variación ascendente de la concentración de oxígeno al transcurrir el tiempo. A partir del manejo de estos resultados, se determinó que el coeficiente de transferencia de oxígeno en el agua residual proveniente de la planta de tratamiento aeróbica de la industria de alimentos es de 4.33kg/kg-min, encontrándose que al aumentar la cantidad de microorganismos presentes en el agua residual disminuye el coeficiente de transferencia.

Para finalizar, se determinó la potencia del aireador necesario para satisfacer los requerimientos de los microorganismos, responsables de la degradación de la materia orgánica, siendo esta de 2.5HP.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Aguas receptoras

El objetivo general de las normas de calidad para las aguas que sirven primordialmente como receptoras de aguas residuales, es la prevención de molestias y la conservación de la belleza de las masas de agua naturales. Para esto, las entidades que controlan la contaminación de las aguas prescriben generalmente que las aguas receptoras no deberán recibir cargas muy altas que les impartan olores ofensivos, ni contener sólidos visibles flotantes o sedimentables, aceite o depósitos de lodos. Puesto que la descomposición anaeróbica desprende olores objetables, las descargas de residuos no deben agotar el contenido de oxígeno disuelto de las aguas receptoras.

Existe una clasificación de las corrientes. Se encuentran clasificadas como A, las corrientes de características uniformes excelentes y adecuadas para cualquier uso a que se destine el agua. Los valores de saturación del oxígeno disuelto no deben disminuir de 75% y deben de estar ausentes del agua las siguientes sustancias: aceite o grasa; olor, natas, sólidos flotantes o basuras; depósitos de lodos; color o turbidez; fenoles u otras sustancias productora de sabores; sustancias potencialmente tóxicas. Se encuentran establecidas como D, las corrientes adecuadas para el transporte de aguas negras y residuos industriales, sin originar molestias, así como para usos de generación de energía, navegación y ciertos fines industriales. Siempre debe de estar presente el oxígeno disuelto y la concentración de otras sustancias a que hace referencia la clasificación de corrientes del tipo A, deberá ser aceptable.

1.2 Aguas residuales

Las aguas residuales son todos los efluentes de agua provenientes de industrias, ciudades o de cualquier lugar en donde exista actividad humana; esta agua contiene compuestos que al llegar a la fuente receptora la contamina.

Las corrientes de aguas residuarias no son uniformes ni permanentes, sino que varían de un momento a otro. En el momento de crear o analizar el funcionamiento de una planta de tratamiento de agua, es importante conocer los volúmenes de agua residual a tratar y sus posibles variaciones y características, razón por la cual es necesario realizar varios estudios para obtener esta información y buscar maneras para optimizar el proceso.

Sin considerar su tamaño, es de fundamental importancia para la implementación de las instalaciones de manejo de aguas residuales conocer tanto los constituyentes encontrados en las aguas residuales, como el destino de tales constituyentes una vez son liberados al ambiente.

1.2.1 Constituyentes

Los constituyentes encontrados en las aguas residuales pueden ser clasificados como químicos, físicos y biológicos. Los principales contaminantes que deben de ser removidos de las aguas residuales son: residuos sólidos, DBO, DQO, acidez, alcalinidad, grasas, aceites, grasas animales, gases, solventes, nutrientes, metales pesados y compuestos orgánicos persistentes. Esta materia orgánica es el contaminante que se encuentra en mayor cantidad en las aguas residuales y está necesita de oxígeno, siendo por tanto un agente desoxigenador del agua cuando entran en descomposición, generando olores desagradables.

La razón por la cual estos constituyentes encontrados en las aguas residuales son de gran interés se presenta en la tabla I.

Tabla I Importancia del estudio de los constituyentes de las aguas residuales

CONSTITUYENTE	IMPORTANCIA DE SU ESTUDIO
Sólidos suspendidos totales	Formación de depósitos de lodos y condiciones anaerobias.
Compuestos orgánicos biodegradables	Agotamiento del oxígeno en fuentes naturales y desarrollo de condiciones sépticas.
Constituyentes inorgánicos disueltos (por ejemplo: sólidos disueltos totales)	Constituyentes inorgánicos adicionados por el uso. Aplicaciones en el reciclaje y en la reutilización de aguas residuales
Metales pesados	Constituyentes metálicos adicionados por el uso. Muchos metales se clasifican como poluyentes de prioridad.
Nutrientes	Crecimiento excesivo de la vida acuática indeseable, eutroficación, concentración de nitratos en agua para consumo.
Microorganismos patógenos	Transmisión de enfermedades.
Poluyentes orgánicos prioritarios	Sospechosos de ser carcinogénicos, mutogénicos, teratogénicos o de toxicidad aguda alta. Muchos poluyentes prioritarios son resistentes a los métodos de tratamiento tradicionales.

La materia orgánica en aguas residuales se constituye básicamente de proteínas (40-60%), carbohidratos (25-50%), grasas y aceites (8-12%). La urea, el mayor constituyente de la orina, es otro componente orgánico importante que hace parte de las aguas residuales frescas.

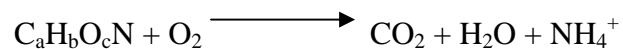
En la actualidad, diferentes métodos analíticos de diversos orígenes son utilizados para la caracterización de las aguas residuales, de los cuales la mayoría se han desarrollado para plantas de tratamiento. A continuación se presenta una breve descripción de los principales contaminantes del agua residual.

1.2.1.1 Sólidos suspendidos

Los sólidos totales presentes en el agua y que provocan parte de la contaminación de la misma pueden ser divididos en sólidos disueltos y suspendidos, siendo los disueltos los que al pasar por un proceso de filtración pasan a través del filtro, y los suspendidos los que quedan en éste. Otra forma de dividir a los sólidos es en sedimentables y no sedimentables, encontrándose que normalmente los sólidos sedimentables se depositan en el fondo después de haber transcurrido 2 horas, aproximadamente. Esta última división es útil en el caso en el cual se vaya a utilizar un proceso de separación y precipitación, en el cual las partículas de tamaño mayor o igual a $0.1\mu\text{m}$ pueden precipitarse y luego hacerse la determinación de sólidos suspendidos a través de filtración.

1.2.1.2 Materia orgánica

Las aguas residuales normalmente contienen una gran cantidad de diferentes tipos de materia orgánica, por lo que realizar una medición individual de cada una sería imposible. Esta es la razón por la que se realizan varios análisis colectivos para determinación de esta materia orgánica. Los posibles análisis colectivos pueden ilustrarse a través de la siguiente reacción de oxidación de la materia orgánica (no balanceada).



Si toda la materia orgánica es oxidada, la cantidad de oxígeno consumido puede ser medido a través de los análisis de DBO (demanda bioquímica de oxígeno), DQO (demanda química de oxígeno), DTO (demanda total de oxígeno), así como la cantidad de dióxido de carbono puede medirse a través del análisis COT (carbono orgánico total). Cada método tiene un campo de aplicación distinto, los resultados de éstos difieren, por lo que uno no puede reemplazar al otro.

1.2.1.3 Nitrógeno

De manera similar que la materia orgánica, los compuestos nitrogenados en las aguas residuales pueden dividirse en diferentes fracciones: nitrógeno total, nitrito y nitrato, amonio y amonía, nitrógeno orgánico inerte, nitrógeno orgánico suspenso fácilmente degradable y nitrógeno orgánico suspenso inerte. Cada una de estas fracciones es determinada por diferentes métodos analíticos convencionales, o se determinan como componente de las partículas orgánicas.

1.2.1.4 Fósforo

El fósforo es también esencial para el crecimiento de las algas y otros organismos biológicos. Debido a los crecimientos explosivos nocivos que tienen lugar en las aguas superficiales, existe mucho interés en la actualidad en controlar la cantidad de los compuestos de fósforo que entran en las aguas superficiales a través de los vertidos de aguas residuales. Las formas más frecuentes en que se encuentra el fósforo en soluciones acuosas son ortofosfato, polifosfato y fosfato orgánico.

1.2.1.5 Alcalinidad

La alcalinidad de las aguas residuales es un factor importante por su habilidad para resistir las influencias ácido/base. La alcalinidad es medida por la titulación convencional con ácido hasta llegar a un pH de 4.5; entre más grande es el valor, mayor es la capacidad del *buffer*. Diferentes procesos para el tratamiento de aguas residuales cambian la alcalinidad; esto es aplicado a la nitrificación, desnitrificación y la precipitación química.

1.2.2 Control y tratamiento de aguas residuales

Las aguas residuales industriales deben controlarse para evitar la inutilización del agua receptora, para lo cual generalmente deben de recibir un tratamiento específico. Para proteger el ambiente, los requerimientos de descarga para aguas residuales tratada son cada vez más estrictos. En la mayoría de las situaciones, se requiere la eliminación de sólidos en suspensión en la corriente de evacuación de aguas residuales industriales. Esto se logra por retención en tanques de sedimentación proyectados según el carácter de los sólidos. Por otro lado, los coagulantes, tales como sales trivalentes y los polímeros iónicos, contribuyen materialmente a hacer efectivas las técnicas de separación de sólidos.

Cuando los materiales residuales orgánicos pueden ser metabolizados por bacterias, se les aplica un tratamiento biológico. Los procesos anaeróbicos convierten los compuestos de carbono en proteínas con producción de CH_4 , CO_2 , H_2S y NH_3 .

El proceso aeróbico transforma el carbono soluble en proteínas insolubles, CO₂, H₂O, NO₃ y SO₄ (estas proteínas quedan atrapadas en los filtros). El proceso anaeróbico no se considera económico, excepto en caso de residuales concentrados (3% de materia orgánica).

En los procesos biológicos para residuales industriales se trata de convertir un material orgánico en proteína y que el nitrógeno en forma de amoníaco y el fósforo como fosfato son elementos nutritivos esenciales. Estos procesos se proyectan para conseguir un desarrollo máximo de bacterias en un tiempo mínimo; procurando que el suministro de oxígeno sea superior a su consumo (aunque no en exceso por fines económicos) y controlando la temperatura, que también afecta la velocidad de crecimiento.

A continuación se presenta la secuencia de pasos a seguir para el tratamiento de las aguas residuales, así como algunos aspectos relacionados con los tratamientos existentes.

1.2.2.1 Recolección de las aguas residuales

Las aguas residuales deben de recolectarse en sitios adecuados, debiéndose realizar estudios previos para la elección y adaptación del lugar para tratar el agua residual de la mejor forma posible.

1.2.2.2 Tratamiento

Para depurar el agua, generalmente es preciso combinar varios tratamientos elementales, cuyas bases pueden ser físicas, químicas o biológicas, y cuyo efecto es eliminar en primer lugar las materias en suspensión, a continuación las sustancias coloidales, y después las sustancias disueltas (minerales u orgánicas), para que el agua quede apta para la reutilización de efluentes. Existen tres tipos de tratamiento de agua, siendo estos el tratamiento primario, secundario y terciario.

- a) **Tratamiento primario o pretratamiento:** el objetivo del pretratamiento de las aguas residuales es remover sólidos, grasas y aceites y otros materiales flotantes o sedimentables para que el agua residual pueda ser tratada eficientemente y reutilizada o vertida sin ningún riesgo. Por ejemplo, el uso de trampas.
- b) **Tratamiento secundario:** este tratamiento comprende procesos biológicos de digestión, como lo son los lodos activados y procesos químicos, como la desinfección.
- c) **Tratamiento terciario:** el tratamiento terciario o avanzado está dirigido a la reducción final de la DBO, la disminución de nutrientes y la eliminación de patógenos y parásitos.

1.2.2.3 Disposición de aguas residuales

Algunos ejemplos de métodos para disponer de las aguas residuales tratadas son

- Descarga a cuerpos de agua (corrientes, lagos, estanques, reservorios, bahías, diques, ríos, océanos).

- Humedales artificiales (con sistema de flujo libre o subsuperficial).
- Sistemas de evaporación (lechos y lagunas de evapotranspiración).
- Aplicaciones en el suelo (aplicación superficial, por aspersión y por goteo).
- Aplicaciones de reutilización (riego agrícola, abastecimiento de agua no potable, abastecimiento industrial, lagos recreacionales, aumento del agua para abastecimiento).
- Disposición subsuperficial en el suelo (sistemas de absorción en el suelo, campos de infiltración).

1.2.2.4 Manejo de biosólidos

Los sólidos removidos de las aguas residuales requieren estabilización antes de ser dispuestos o reutilizados, normalmente para compostaje y aplicación en el suelo.

1.3 Los microorganismos en el tratamiento del agua

La estabilización de materia orgánica es lograda biológicamente utilizando una variedad de microorganismos, los cuales convierten la materia orgánica coloidal y carbonácea disuelta en una gran variedad de gases y tejidos celulares. Estos tejidos son removidos por sedimentación debido a que su densidad es mayor que la del líquido.

La meta en el proceso de tratamiento de aguas residuales es convertir el carbono y la energía del agua residual en material que pueda ser removido por sedimentación. Por tanto, se desea fortalecer el crecimiento de microorganismos autótrofos, los cuales utilizan dicha materia orgánica para suplir sus necesidades de carbono y energía. La población mayor de microorganismos que se encuentran en una planta de tratamiento de agua pertenece a las bacterias, las cuales son protistas unicelulares que utilizan comida soluble.

Debido a la importancia que tiene la presencia de los microorganismos en el tratamiento de aguas residuales, es necesario describir su cinética de crecimiento, así como los factores que intervienen en ésta.

1.3.1 Cinética del crecimiento biológico

El crecimiento de un cultivo bacteriano comprende cierto número de fases, cada una de las cuales posee una velocidad diferente. Estas fases son las siguientes.

- Fase latente, durante la cual se produce la aclimatación de los microorganismos al medio nutritivo, por modificación del sistema enzimático del cultivo. Esta fase es especialmente importante cuando no se produce una siembra previa del agua residual (vertidos industriales) por gérmenes adaptados.
- Una fase a velocidad constante de crecimiento, generalmente denominada fase exponencial.
- Una fase de moderación de la velocidad de crecimiento.
- Una fase con velocidad de crecimiento nula (de equilibrio).
- Una fase de decrecimiento.

El crecimiento celular engloba la conversión metabólica de un sustrato en sus productos, lo que hace que se libere energía en forma de ATP (ruta catabólica), que será utilizada para la síntesis celular (ruta anabólica).

Catabolismo: sustrato \longrightarrow productos + energía

Anabolismo: sustrato + energía + nutrientes \longrightarrow masa celular

Resultado global: sustrato + nutrientes \longrightarrow masa celular + productos

La cantidad de masa celular o biomasa formada es proporcional a la cantidad de sustrato y de producto. Se puede definir un coeficiente para cada tipo de bacterias, llamado coeficiente de producción que puede ser determinado experimentalmente:

$$\begin{aligned} \text{Producción de biomasa : } Y_{X,S} &= \frac{\Delta X}{\Delta S} \\ \text{Producción de producto : } Y_{P,S} &= \frac{\Delta P}{\Delta S} \end{aligned} ,$$

donde

Y: coeficiente de producción

S: Sustrato

X: Biomasa

P: Producto.

El rendimiento de utilización de diferentes sustratos puede ser diferente, variando entre los diferentes microorganismos, en función de las condiciones ambientales o fisiológicas y en función de que el metabolismo sea oxidativo o fermentativo.

Con la finalidad de asegurar que los microorganismos crezcan, se les debe permitir que permanezcan en el sistema el tiempo suficiente para que se reproduzcan. Este período depende de la tasa de crecimiento, la cual está en relación directa con la tasa a la que metabolizan o utilizan el residuo. Por tanto, la presencia de un compuesto tóxico para los microorganismos se refleja en una menor tasa de crecimiento de los mismos. No todos los microorganismos se ven afectados de la misma forma por los mismos compuestos.

1.3.2 Tasa de crecimiento

En condiciones ideales, el crecimiento de las poblaciones bacterianas sigue un crecimiento exponencial en el tiempo. Puesto que el crecimiento de la población ocurre por división de las células individuales, la tasa de crecimiento bacteriano es proporcional al tamaño de la población. Esto lleva a la reacción autocatalítica descrita mediante la cinética de primer orden definida por Monod en 1950.

$$\frac{dX}{dt} = \mu X ,$$

donde

μ = la tasa de crecimiento específica (masa/unidad de volumen*tiempo).

X = concentración de microorganismos (masa/unidad de volumen).

La tasa de crecimiento puede considerarse algo así como la probabilidad de que una célula se divida en un tiempo determinado. La velocidad de crecimiento μ se relaciona fácilmente con el tiempo de división celular, denominado también tiempo de duplicación de la biomasa t_d .

$$\mu = (1/S)(dS/dt) = (d \ln S/dt) = 0,693/t_d$$

siendo 0,693 el valor de $\ln 2$.

1.3.3 Métodos de recuento de microorganismos

Los métodos para el seguimiento de la evolución de un cultivo microbiano *pueden clasificarse en directos e indirectos*. Los métodos directos se basan en la medida de la evolución del número de células vivas (técnicas de plaqueo) o del número de partículas (técnicas microscópicas y de contadores de partículas). Los métodos indirectos se basan en la medida de algún parámetro del cultivo que permite deducir información sobre la evolución del número de microorganismos. La elección de un método de seguimiento del cultivo en concreto depende de las características del cultivo y del proceso.

Entre los métodos principales de recuento de microorganismos se encuentran los siguientes

- Las técnicas de recuento microscópico de células sin fijar usando microscopía de contraste de fase (utilizando una célula de *Petroff-Hauser* o de *Neubauer*).
- Contaje de partículas utilizando sistemas automáticos del tipo *Coulter Counter*.
- Técnicas de recuento en placa, basadas en colocar en un medio de cultivo adecuado un volumen determinado de muestra. Cada una de las células aisladas dará lugar, después de la incubación correspondiente, a una colonia de forma que el número de éstas nos permitirá estimar el número de células presentes en la muestra plaqueada (sembrada).
- Técnicas turbidométricas basadas en la medida de la turbidez de los medios de cultivo, la cual es proporcional a la masa de las partículas en suspensión (células).

- Medida de peso seco, por medio de la filtración del cultivo y su posterior desecación.
- Medida del ATP.

1.3.4 Factores que afectan el crecimiento microbiológico

Las condiciones ambientales pueden controlarse mediante la regulación del pH, de la temperatura, adición de nutrientes o elementos de traza, o exclusión de oxígeno y también mediante una mezcla correcta de todos los componentes del agua residual. El control de las condiciones ambientales asegurará que los microorganismos tengan el medio indicado donde poderse desarrollar.

Hay que considerar que, como consecuencia del metabolismo, el pH del medio de cultivo suele bajar. Por consiguiente, es necesario controlar el pH de los cultivos industriales para evitar que un descenso excesivo pueda producir la autoesterilización del cultivo. La bajada del pH se puede deber a varios factores, uno de los cuales es la liberación de ácidos orgánicos de cadena corta (fórmico, acético, láctico) por ciertas bacterias. En este sentido, hay que tener en cuenta que la acción bactericida de estos ácidos orgánicos de cadena corta es más potente que la debida únicamente a la bajada del pH que producen. Esto es, los ácidos orgánicos de cadena corta son tóxicos para algunas bacterias.

El intervalo adecuado de pH para la existencia de la mayor parte de la vida biológica es relativamente estrecho, en general entre pH 5 y 9. Las aguas residuales con valores de pH menores a 5 y superiores a 9 son de difícil tratamiento mediante procesos biológicos.

Por otro lado, se tiene que los procesos biológicos están afectados por la temperatura. De forma general, al aumentar la temperatura aumenta la tasa específica de crecimiento, hasta llegar al óptimo valor, siendo este diferente para cada grupo de microorganismos. A partir este valor óptimo, la velocidad disminuye.

Los microorganismos, como los seres superiores, exigen una alimentación equilibrada. Se ha dado como composición global de las células sintetizadas la fórmula: $C_{106}H_{180}O_{45}N_{16}P$. El nitrógeno y el fósforo son, por tanto, elementos esenciales. Las aguas residuales domésticas contienen una alimentación equilibrada, pero no sucede lo mismo con las aguas industriales, que generalmente son pobres en N y P. Para conseguir una depuración biológica correcta de estos vertidos, es necesario, por tanto, añadir a los mismos nitrógeno y fósforo en forma de sales minerales asimilables, o nutrientes.

Numerosas sustancias tienen un efecto tóxico sobre la actividad de los microorganismos. Pueden dar lugar a una inhibición parcial o total de la depuración, según la naturaleza de la sustancia o su concentración. La presencia accidental de metales pesados: Cu^{2+} , Cr^{6+} , Cd^{2+} , aun en cantidades pequeñas (0,1 mg/l) puede anular la acción de las bacterias.

1.4 Aireación

El oxígeno es un componente esencial en el metabolismo de microorganismos aerobios y éste debe disolverse en soluciones acuosas junto con otros nutrientes con el fin de ser asimilados. La aportación de oxígeno a un agua se efectúa por contacto íntimo entre el aire y el agua. En la superficie de contacto de los dos fluidos, la capa límite monomolecular se satura de oxígeno desde el momento de su formación, al mismo tiempo que se inicia la difusión de gas hacia capas de agua más profundas.

El propósito de la aireación y agitación en una planta de tratamiento de agua es proporcionarle a los microorganismos el oxígeno necesario y mezclarlos de tal forma que se forme una suspensión uniforme de microorganismos y sólidos. Por otro lado, a través de la aireación y agitación, la velocidad de transferencia de masa y la obtención del producto metabólico pueden aumentar.

En la industria, trabajar en las mejores condiciones de mezcla puede ser la clave para una productividad y calidad mejor. El diseño de tanques agitados incluye equipos de construcción aparentemente simples y de costos relativamente reducidos en relación a otros equipos en una planta industrial. Además, en algunos casos la agitación representa la etapa controladora del proceso y, por eso, esos sistemas de agitación deben ser adecuadamente dimensionados para llevar a un buen desempeño del mismo. Por tanto, el diseño de un sistema de agitación consiste en la determinación de sus dimensiones, la elección del impeler y la determinación del consumo de potencia requerida.

En los procesos aerobios convencionales, como los utilizados en el tratamiento biológico de las aguas residuales, el oxígeno es suplido por medio de aireación y agitación continua. El objetivo principal de la agitación y de la aireación es suplir a las células presentes en el medio de una cantidad de oxígeno necesaria, a fin de hacer posible la realización de sus actividades metabólicas. La segunda función es la de mantener a los microorganismos en suspensión, obteniéndose así una buena mezcla del medio y dispersión de las células, procurando mejorar los procesos de transferencia de la cantidad de movimiento, calor y masa del sistema.

1.4.1 Teorías de la transferencia de oxígeno en el agua

Existen varias teorías que han sido propuestas para el mecanismo de transferencia de oxígeno en el agua. Estas teorías son ampliamente utilizadas al modelar la cinética de la transferencia de oxígeno. De manera interesante, las formas más sencillas han probado ser efectivas en el diseño de aireación, cediendo resultados cercanos a modelos más complejos y que, por lo general, proporcionan predicciones equivalentes de transferencia de oxígeno.

La primera ley de Fick describe la tasa de movimiento de gas dentro de un líquido. Esta relación describe la tasa de transferencia de masa como directamente proporcional al gradiente de la concentración. Esto se expresa de la manera siguiente

$$\frac{dm}{dt} = D_m A \cdot \frac{dC}{dt}$$

En la ecuación anterior, dm/dt es la tasa de transferencia de masa en gramos por segundo (g/s), D_m es el coeficiente de difusión molecular del gas en centímetros cuadrados por segundo (cm^2/s), A es el área a través de la cual ocurre la transferencia (cm^2), y dC/dt es el gradiente de concentración del gas.

Uno de los modelos iniciales para la transferencia de gas es el conocido modelo de dos películas, o modelo de Lewis y Whitman. Este modelo sugiere que existen dos películas laminares de gas y líquido en la interfase, movilizándose el gas por difusión molecular a través de la película líquida y distribuyéndose por difusión turbulenta a través del líquido. El modelo de dos películas para la transferencia de oxígeno describe la tasa de transferencia de la manera siguiente:

$$\frac{dm}{dA} = \frac{D_m \cdot (C_s - C)}{L_f}$$

En esta ecuación, $dm/dt/A$ es la tasa de transferencia por unidad de área, C_s es la concentración de saturación de gas, L_f es el grosor de la película líquida, y C es la concentración de gas. El modelo está basado en una película laminar estable en la interfase, requiriendo condiciones de flujo tranquilo. Estas condiciones rara vez se encuentran en el campo; aún así, la ecuación planteada ha sido ampliamente utilizada para describir efectivamente la transferencia de oxígeno y el diseño de aireación para muchas aplicaciones.

El modelo básico de transferencia de oxígeno, utilizado para determinar el tamaño de los sistemas de aireación, está basado en el modelo de Lewis y Whitman. Las siguientes ecuaciones presentan el modelo en formato diferencial

$$\frac{dC}{dt} = K_L a \cdot (C_s - C)$$

$$C = C_s - (C_s - C_0) \exp(-K_L a \cdot t)$$

En estas ecuaciones, C es la concentración de oxígeno disuelto (OD) en miligramos por litro (mg/L), C_s es la concentración de equilibrio de OD que se logra cuando el tiempo se acerca al infinito, C_0 es la concentración de OD en el tiempo cero, y $K_L a$ es el coeficiente de transferencia de masa definido como la tasa de transferencia de masa por unidad de volumen dividida entre el gradiente diferencial de concentración ($C_s - C_0$), y t es el tiempo en horas (h).

Los datos recolectados a través de experimentos de transferencia de oxígeno pueden ser analizados a través del modelo de transferencia de masa, para calcular el coeficiente de transferencia de masa, K_{La} y la concentración de saturación, C_s .

El coeficiente de transferencia de oxígeno K_{La} es función de la naturaleza del agua (agua limpia, agua residual con materias en suspensión o disueltas; presencia de materias tenso-activas), del sistema de aeración empleado y de la forma geométrica del reactor.

1.4.2 Equipos de aireación

Los dos métodos básicos para airear agua residual son

- Introducir aire u oxígeno puro por medio de difusores porosos sumergidos o boquillas.
- Agitar mecánicamente el agua residual de modo que se promueva la disolución del aire de la atmósfera.

Un sistema de aireación por difusores está formado por difusores sumergidos en el agua residual, brazos de aireación, conducciones de aire, y soplantes y accesorios a través de los cuales pasa el aire.

Los difusores más frecuentemente utilizados en los sistemas de aireación están diseñados de tal forma que produzcan burbujas pequeñas o relativamente grandes. Es esencial que el aire suministrado a los difusores porosos sea limpio y esté exento de partículas de polvo que puedan obstruirlo. Por ello, es muy frecuente el uso de filtros, como lo son el de aire y los filtros electrostáticos. El problema del polvo se reduce utilizando difusores con orificios grandes.

La cantidad de aire utilizada por kilogramo de DBO eliminado varía mucho de una a otra planta, existiendo cierto riesgo al comparar el uso del aire en distintas plantas, no sólo por los factores de diseño de cada una como lo son el tipo y porosidad del equipo de aireación (difusor), del tamaño de las burbujas producidas y de la profundidad de la submergencia, sino también por las diferentes cargas, criterios de control y procedimientos operatorios. La aplicación de caudales de aire sumamente elevados a un lado del tanque puede disminuir la eficiencia de la transferencia de oxígeno e incluso reducir la transferencia neta de oxígeno al aumentar las velocidades de circulación. El resultado de todo ello será un tiempo menor de residencia de las burbujas de aire así como la creación de burbujas mayores con menor superficie de transferencia.

2. RESULTADOS

Los resultados obtenidos a partir de la experimentación y cálculos realizados son los que se presentan a continuación. Estas tablas son analizadas en la sección de discusión de resultados.

Tabla II. Resultados de las mediciones de oxígeno disuelto (en ppm's) en el agua residual analizada

TIEMPO (s)	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	MUESTRA 4	MUESTRA 5	MUESTRA 6	
	Tiempo transcurrido= 0 horas	Tiempo transcurrido= 4.5 horas	Tiempo transcurrido= 15.25 horas	Tiempo transcurrido= 20.5 horas	Tiempo transcurrido= 25 horas	Tiempo transcurrido= 28.25 horas	
10	3.08	4.5293	6.346	4.67	4.60	4.02	SIN AIREACIÓN
20	2.71	3.7513	5.506	4.26	4.27	3.90	
30	2.35	3.3733	4.766	3.85	4.05	3.72	
40	2.13	3.0953	3.926	3.44	3.52	3.55	
50	1.72	2.8173	3.186	3.02	3.49	3.32	
60	1.51	2.7393	2.646	2.71	2.97	3.00	
70	1.25	2.5613	2.406	2.52	2.84	2.57	
80	1.14	2.3833	2.316	2.47	2.66	2.35	
90	1.12	2.2053	2.226	2.38	2.53	2.12	
100	1.11	2.1273	2.186	2.26	2.46	2.02	
110	4.10	4.26	3.65	3.52	3.33	3.38	CON AIREACIÓN
120	5.85	5.59	4.73	4.78	4.68	4.39	
130	6.14	6.75	5.77	5.71	5.18	5.40	
140	6.34	6.79	5.83	5.82	5.45	5.59	
150	6.47	6.84	5.86	5.88	5.67	5.73	
160	6.58	6.86	5.88	5.90	5.75	5.79	
170	6.60	6.88	5.91	5.91	5.81	5.82	
180	6.62	6.89	5.93	5.92	5.86	5.84	

Tabla III. Cantidad de microorganismos presentes en la muestra de agua residual al aplicarle aireación a diferentes intervalos de tiempo

TIEMPO (horas)	CANTIDAD MICROORGANISMOS *
0	504
4.5	648
14.75	1044
20	2322
24.5	3456
27.75	4050

* Estas cantidades deben multiplicarse por 1000, debido a la dilución

Tabla IV. Variación de la cantidad de microorganismos con el tiempo (dX/dt) y tasa específica de crecimiento de microorganismos (μ)

TIEMPO (horas)	dX/dt	Tasa específica de crecimiento (μ)
0 - 4.5	144	0.25
4.5 - 15.25	396	0.468085106
15.25 - 20.5	1278	0.759358289
20.5 - 25	1134	0.392523364
25 - 28.25	594	0.158273381

Tabla V. Velocidad de consumo de oxígeno por los microorganismos en el agua residual

MUESTRA	VELOCIDAD DE CONSUMO (-rx)
1	0.0229
2	0.0237
3	0.0471
4	0.0272
5	0.0248
6	0.0246

Tabla VI. Variación de la concentración de oxígeno disuelto al reincorporar la aireación

TIEMPO (s)	dC/dt					
	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	MUESTRA 4	MUESTRA 5	MUESTRA 6
110-120	0.175	0.133	0.108	0.126	0.135	0.102
120-130	0.029	0.116	0.104	0.093	0.050	0.100
130-140	0.020	0.004	0.006	0.011	0.027	0.019
140-150	0.013	0.005	0.003	0.006	0.022	0.014
150-160	0.011	0.002	0.002	0.002	0.008	0.006
160-170	0.002	0.002	0.003	0.001	0.006	0.003
170-180	0.002	0.001	0.002	0.001	0.005	0.002

TABLA VII. Coeficiente de transferencia de oxígeno

MUESTRA	Kla	
	(Kg/Kg-s)	(Kg/Kg-min)
1	0.07105805	4.26348327
2	0.06237136	3.74228154
3	0.06138359	3.68301516
4	0.05941065	3.56463878
5	0.05289886	3.17393144
6	0.05148535	3.08912115

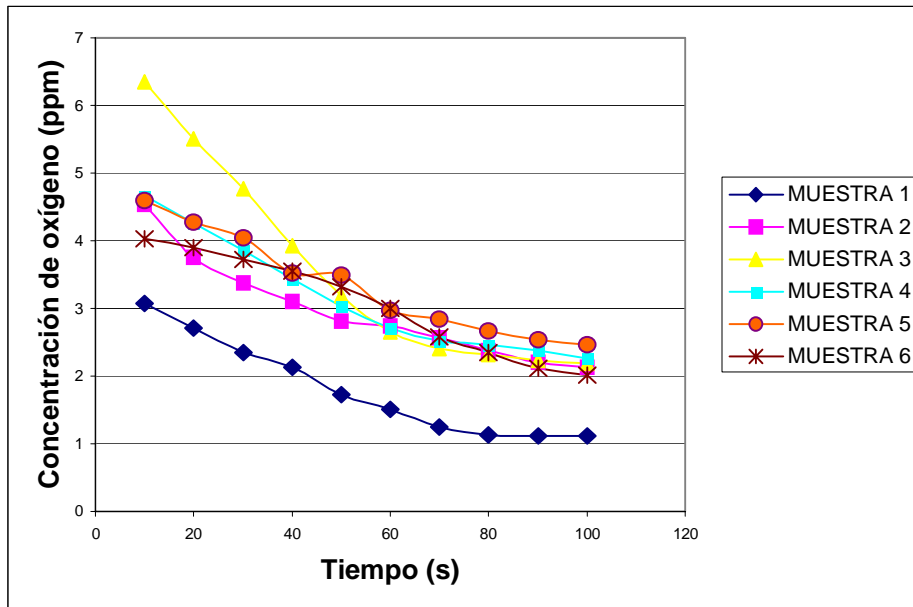
3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El objetivo del presente trabajo es determinar el coeficiente de transferencia de oxígeno del agua residual proveniente de una industria alimenticia guatemalteca, así como determinar la potencia óptima de la bomba a utilizar para proporcionar la cantidad de oxígeno necesaria para el tratamiento aeróbico de dicha agua. Para esto, se planteó la metodología que se describe a continuación, obteniéndose los datos necesarios para la determinación de las variables requeridas.

La parte experimental se dividió principalmente en dos etapas: en la primera etapa, se colocó el aireador en la muestra de agua, dejándose éste funcionando por diferentes períodos de tiempo, períodos después de los cuales se suspendió la aireación, midiéndose la concentración de oxígeno disuelto (en ppm) durante 100 segundos. Por otro lado, en la segunda parte, se reincorporó la aireación a las muestras antes de alcanzar la concentración crítica de oxígeno, anotándose el aumento de la concentración de oxígeno disuelto con el tiempo. En la tabla II se presentan los resultados obtenidos para la concentración de oxígeno disuelto al suspender la aireación después de haberla aplicado por: 0, 4.5, 15.25, 20.5, 25 y 28.25 horas, y el aumento de la misma al reincorporar la aireación.

Como primer paso, se relacionaron los valores de la concentración de oxígeno disuelto con el tiempo, al interrumpir la aireación en el agua residual, encontrándose que existe una disminución en la concentración de oxígeno con el tiempo.

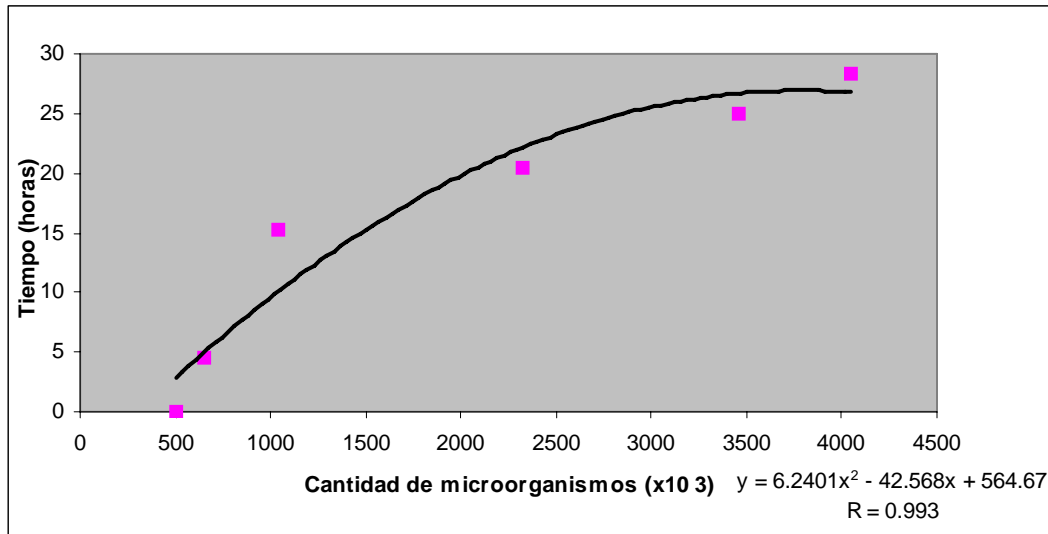
Figura 1. Comportamiento de la concentración de oxígeno disuelto en el tiempo al interrumpir la aireación



Esta disminución es provocada por la presencia de microorganismos en el agua, los cuales consumen oxígeno para vivir y reproducirse. Estos microorganismos son los responsables de la degradación de la materia orgánica presente en el agua residual, colaborando al tratamiento de la misma. Debido a la influencia significativa que tiene la presencia de microorganismos en el agua residual para su tratamiento, se procedió a determinar la cantidad presente en cada muestra por medio de una siembra y un recuento microbiológico con una dilución 0.0001. Esta dilución se seleccionó, luego de realizarse pruebas con 4 diluciones diferentes (0.1, 0.01, 0.001 y 0.0001), determinándose que la dilución 0.001 facilitaría el recuento microbiológico.

Con la finalidad de describir el comportamiento del crecimiento microbiológico en el agua residual, se graficó la relación existente entre la cantidad de microorganismos presentes al transcurrir el tiempo de aireación correspondiente, obteniéndose que los datos se ajustan a un modelo matemático de correlación logarítmica con un coeficiente de correlación de 0.993.

Figura 2. Relación entre la cantidad de microorganismos y el tiempo de aireación en el agua residual



En esta Figura es perceptible la similitud que tiene la misma con la curva de crecimiento microbiológico, observándose que en las muestras de la 1 a la 4, los microorganismos estaban en su fase de crecimiento, siendo en las muestras 3 y 4 donde el crecimiento fue mayor, mientras que en las muestras 5 y 6 se alcanzó la fase de equilibrio, por lo que el crecimiento fue menor.

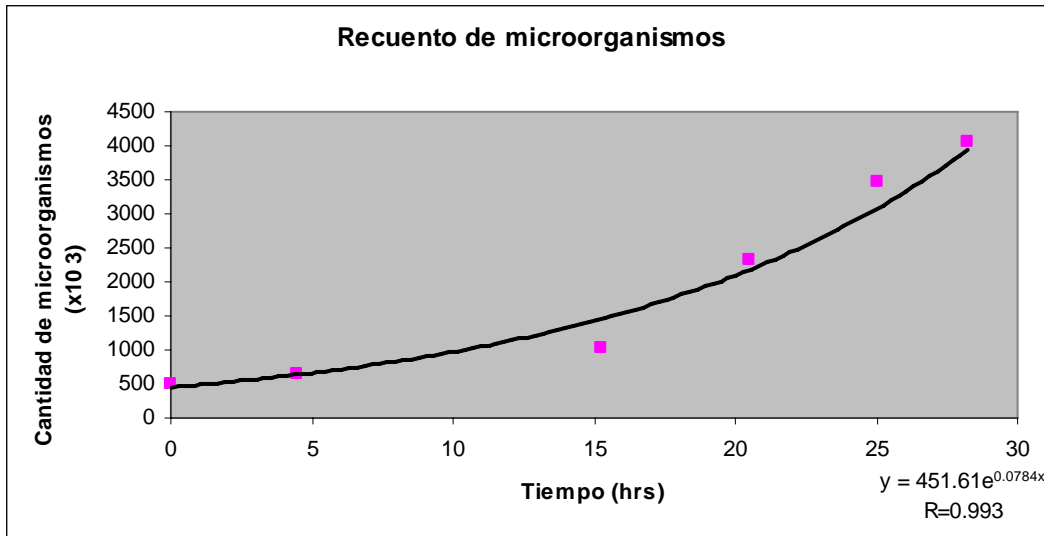
La razón por la cual la muestra 1 presenta la menor cantidad de microorganismos (504,000) es que a la misma no se le aplicó aireación, por lo que la concentración de oxígeno disuelto inicial era considerablemente menor que la de las otras muestras, lo cual no permite un crecimiento microbiológico acelerado.

Adicional, se determinó la tasa específica de crecimiento de los microorganismos (μ) por medio de la ecuación

$$\mu = (dX/dt) * (1/X)$$

donde dX/dt es la variación de la cantidad de microorganismos al transcurrir el tiempo, obtenida al correlacionar la cantidad de microorganismos (X) y el tiempo (t).

FIGURA 3. Relación entre la cantidad de microorganismos y el tiempo de aireación en el agua residual



En la tabla IV, que se encuentra en el capítulo de resultados, se encuentran los valores obtenidos para la relación dX/dt y de la tasa específica de crecimiento. En ella se observa que la tasa específica de crecimiento mayor es de 0.76 y corresponde al crecimiento obtenido entre la muestra 3 y 4; es decir, después de aplicar entre 15 y 20 horas la aireación al agua residual. Esto comprueba la observación realizada anteriormente de la Figura 2, en la cual se mencionó que el mayor crecimiento es entre las muestras 3 y 4.

A partir de lo anterior, se determina que para el tratamiento aeróbico eficaz del agua residual analizada, es necesario aplicar una aireación por un período de 20 horas, período en el cual la velocidad de reproducción de los microorganismos es mayor y los recursos son mejor utilizados. No se recomendaría aplicar la aireación por un período mayor a las 30 horas, pues es probable que los microorganismos se encuentren en la fase de muerte y el oxígeno no sea bien aprovechado.

Otro factor importante es la velocidad de consumo de oxígeno (rx), ya que ésta nos ayuda a determinar la cantidad de oxígeno necesaria para satisfacer las necesidades de los microorganismos. Para determinar la velocidad de consumo de oxígeno a los diferentes períodos de aireación, fue necesario correlacionar la concentración de oxígeno disuelto al interrumpir la aireación con el tiempo, encontrándose un comportamiento lineal. En las Figuras de la 4 a la 9 se ilustra la relación entre la concentración de oxígeno disuelto y el tiempo al suspender y reincorporar la aireación.

Figura 4. Correlación de la concentración de oxígeno disuelto en el agua residual al interrumpir la aireación con el tiempo para la muestra 1

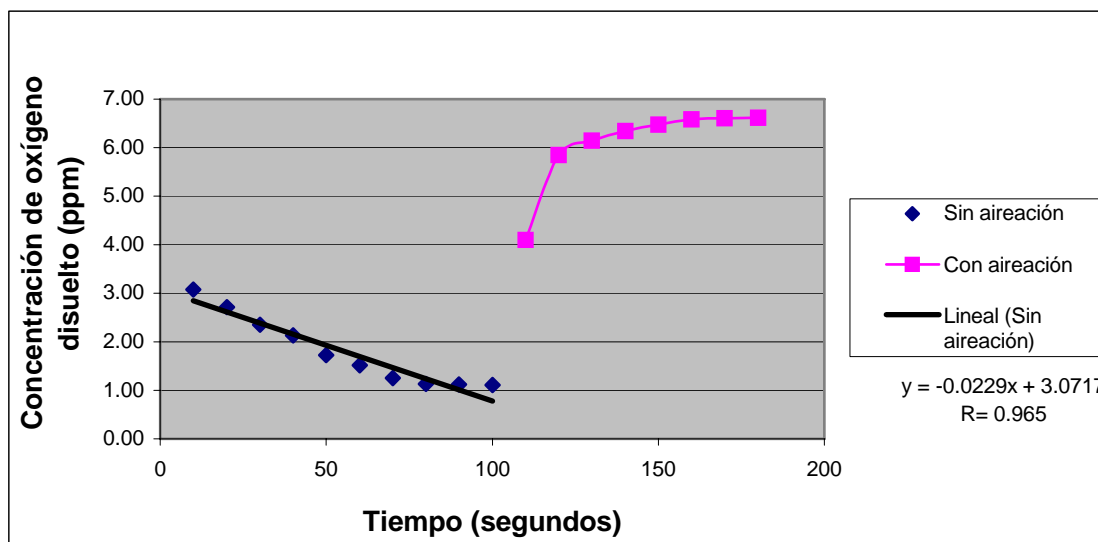


Figura 5. Correlación de la concentración de oxígeno disuelto en el agua residual al interrumpir la aireación con el tiempo para la muestra 2

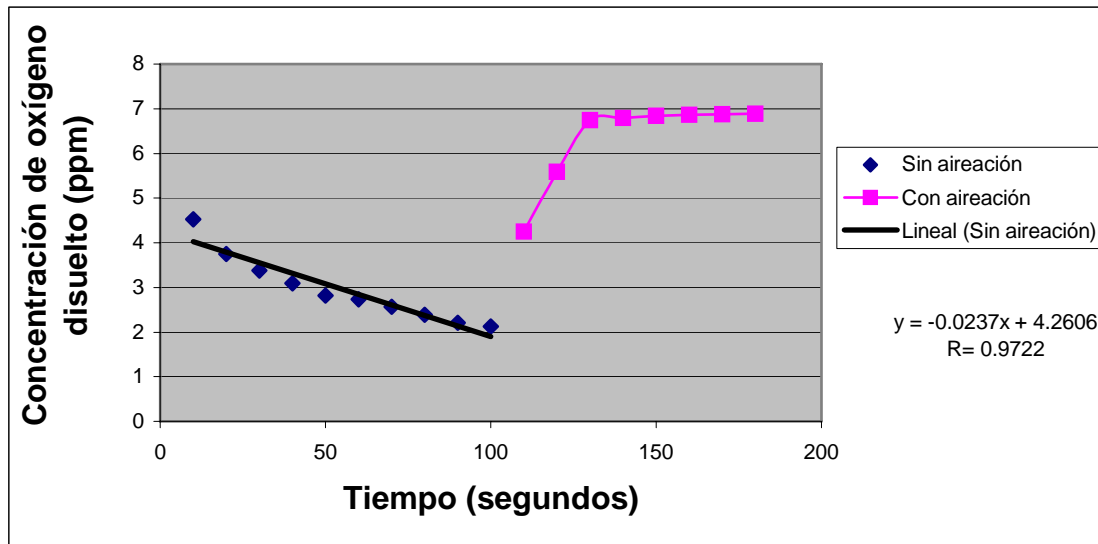


Figura 6. Correlación de la concentración de oxígeno disuelto en el agua residual al interrumpir la aireación con el tiempo para la muestra 3

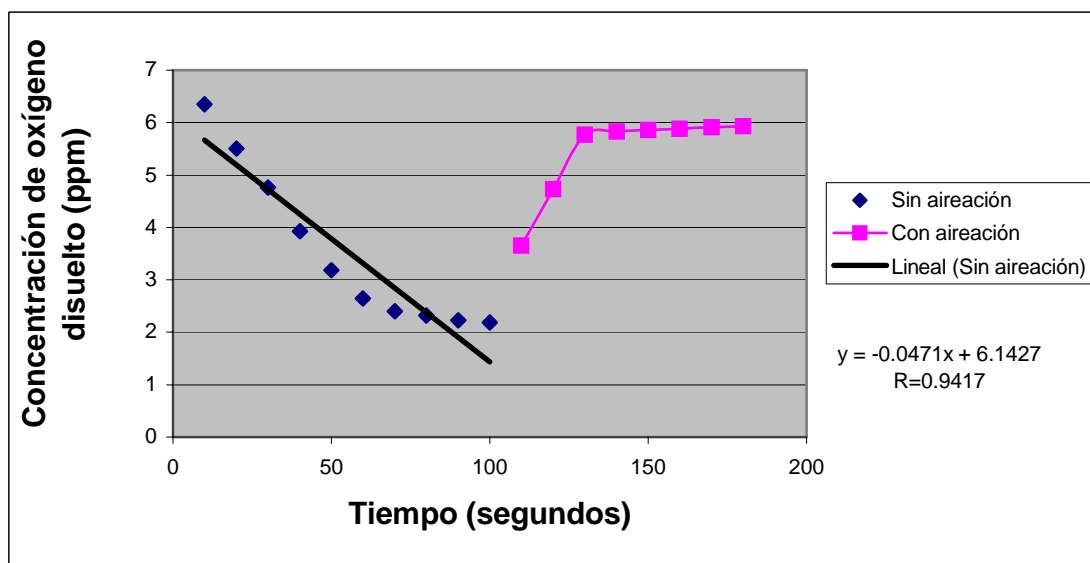
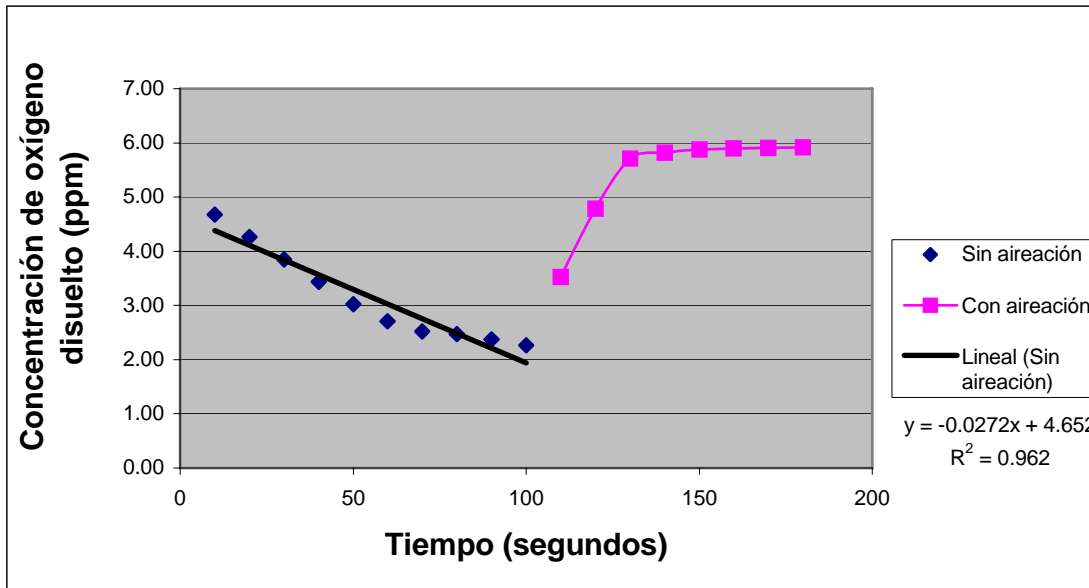


Figura 7. Correlación de la concentración de oxígeno disuelto en el agua residual al interrumpir la aireación con el tiempo para la muestra 4



GRAFICA No. 8 Correlación de la concentración de oxígeno disuelto en el agua residual al interrumpir la aireación con el tiempo para la muestra 5

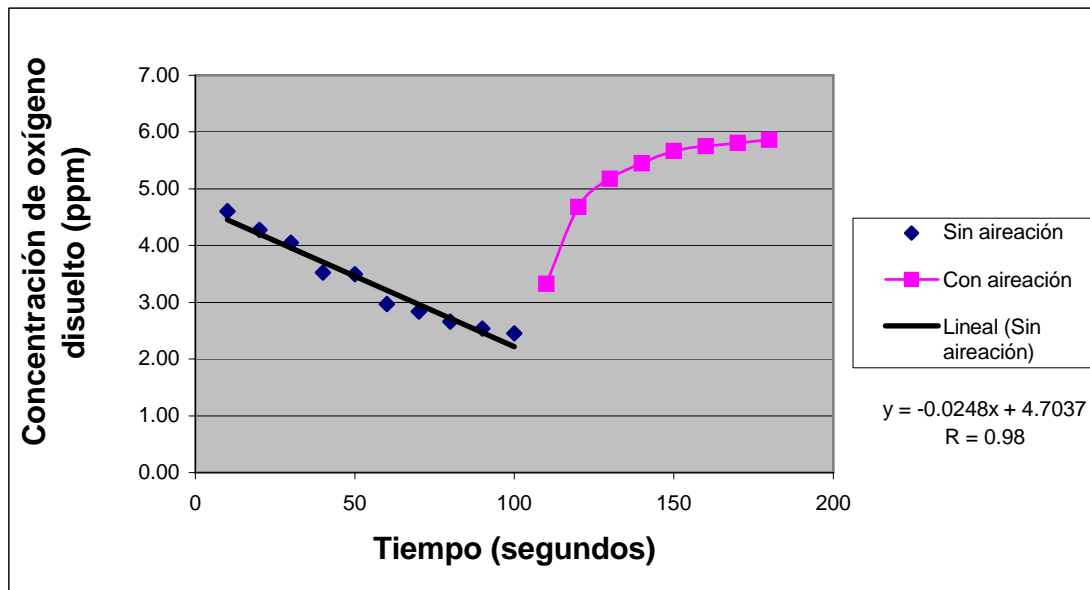
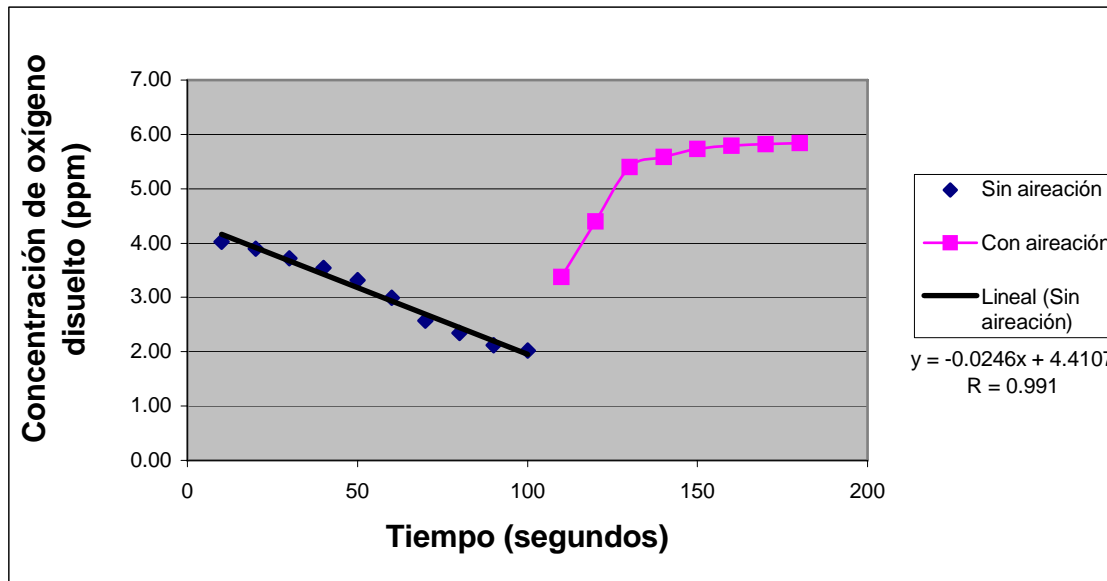


Figura 9. Correlación de la concentración de oxígeno disuelto en el agua residual al interrumpir la aireación con el tiempo para la muestra 6



La velocidad de consumo de oxígeno por los microorganismos es la pendiente de la ecuación obtenida al correlacionar los datos de concentración de oxígeno y el tiempo con un modelo lineal (ver figuras 4-9). Las velocidades de consumo obtenidas se presentan en la tabla V, que se encuentra en el capítulo de resultados.

La muestra que presentó la velocidad de consumo de oxígeno mayor fue la muestra No.3, la cual, como se discutió anteriormente, es en la que el crecimiento microbiológico fue más acelerado. En la muestra 1 y 2, la velocidad de consumo fue pequeña, pues aún no habían suficientes microorganismos que consumieran el oxígeno disuelto en el agua residual.

Un criterio de diseño importante es el coeficiente de transferencia de oxígeno. Para su determinación, es necesario relacionar la concentración de oxígeno disuelto en el agua residual al reincorporar la aireación con la velocidad de cambio de dicha concentración ($dC/dt + rt$). En las siguientes figuras (de la 10 a la 16), se ilustra la relación entre estas dos variables.

Figura 10. Correlación de la concentración de oxígeno disuelto y $dC/dt+rt$ al reincorporar la aireación para la muestra 1

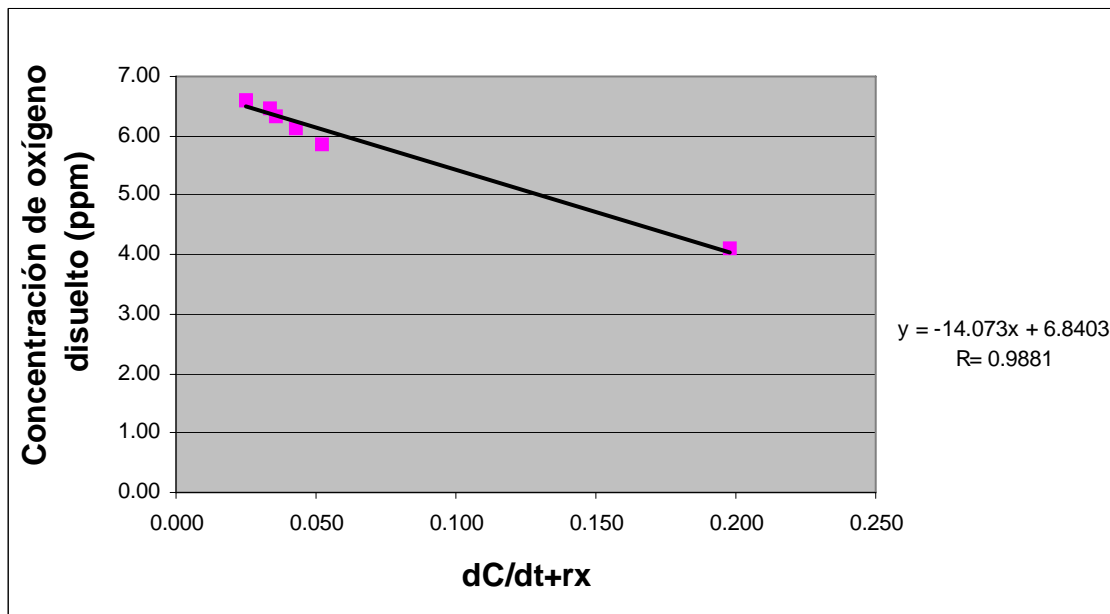


Figura 11. Correlación de la concentración de oxígeno disuelto $dC/dt+rt$ al reincorporar la aireación para la muestra 2

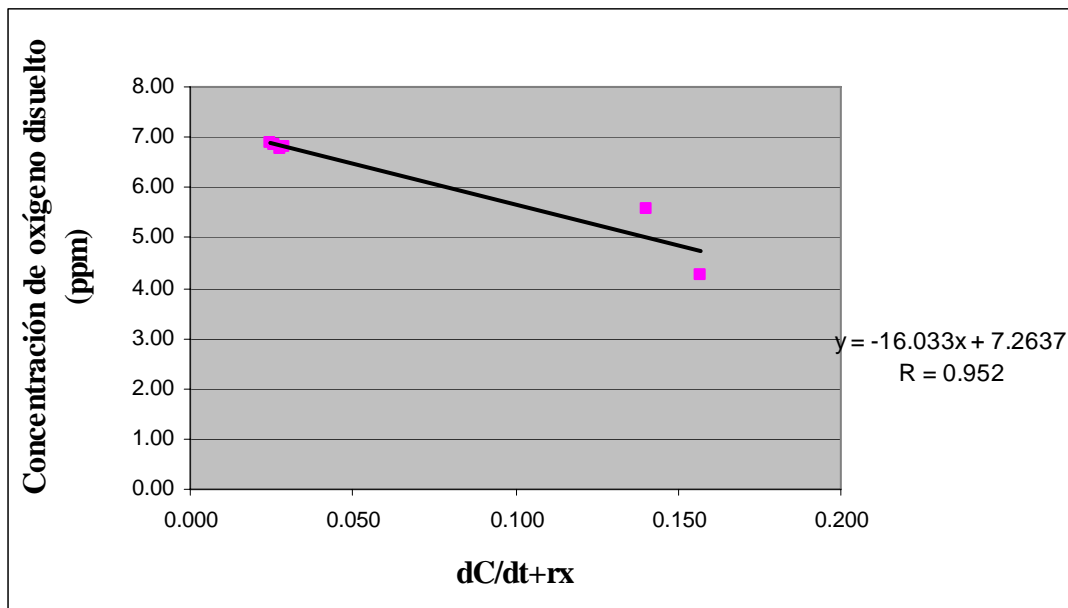


Figura 12. Correlación de la concentración de oxígeno disuelto y $dC/dt+rt$ al reincorporar la aireación para la muestra 3

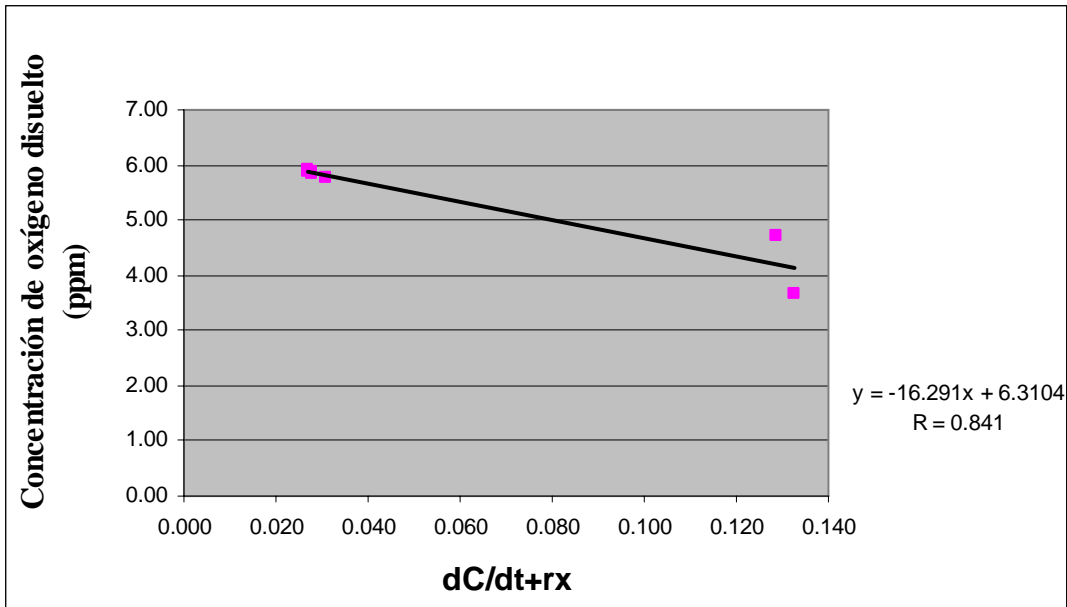


Figura 13. Correlación de la concentración de oxígeno disuelto y $dC/dt+rt$ al reincorporar la aireación para la muestra 4

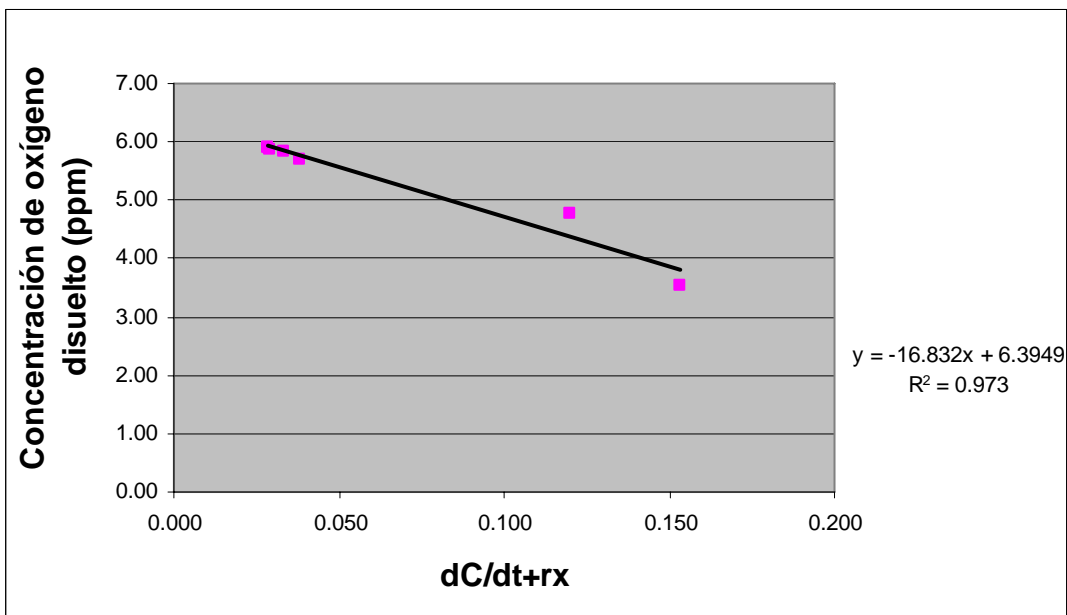


Figura 14. Correlación de la concentración de oxígeno disuelto y $dC/dt+rt$ al reincorporar la aireación para la muestra 5

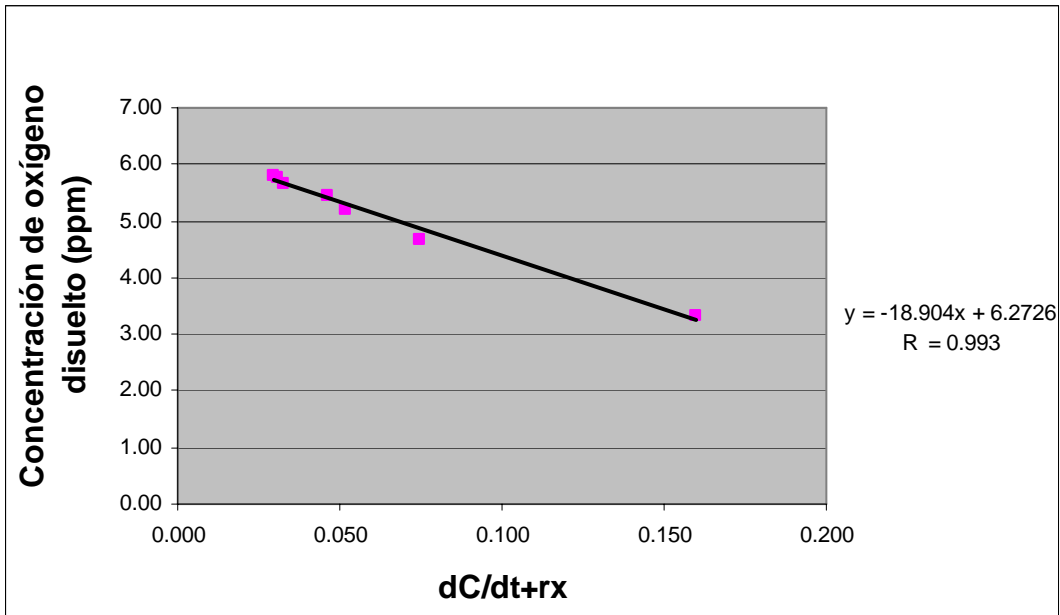
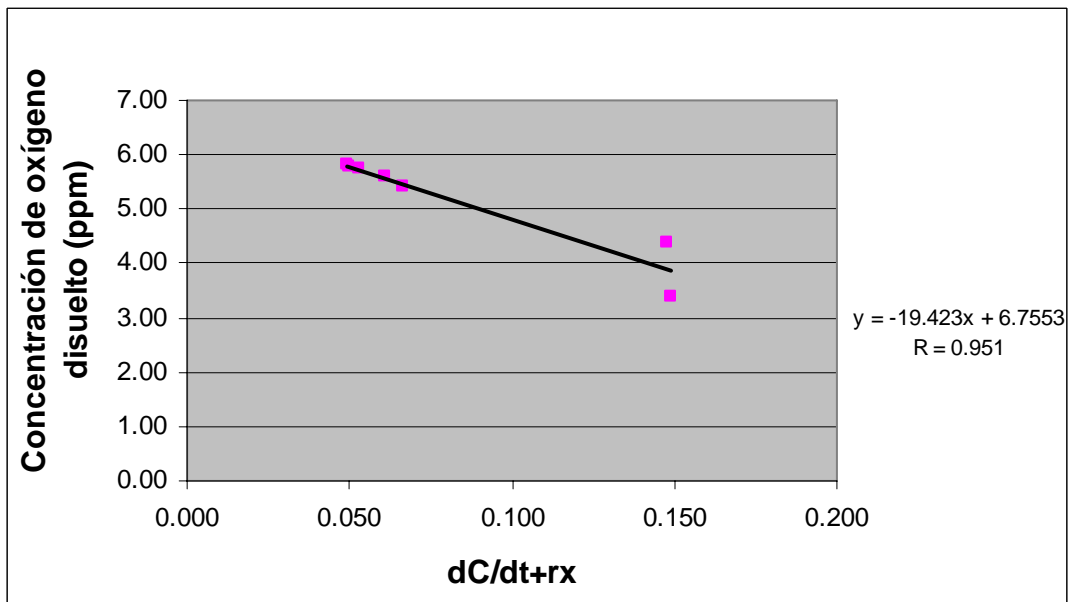


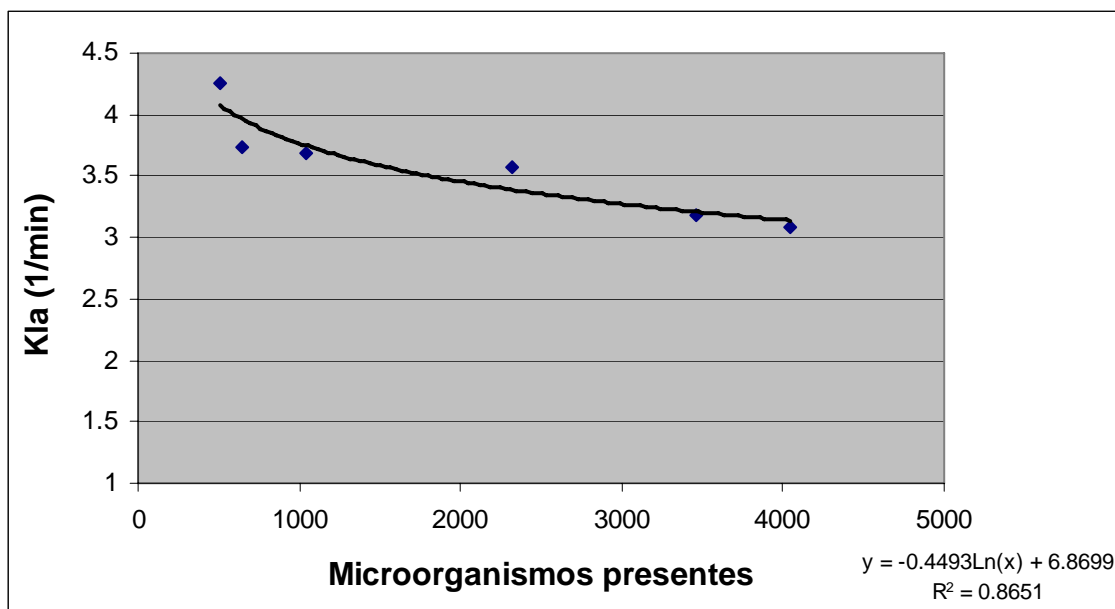
Figura 15. Correlación de la concentración de oxígeno disuelto y $dC/dt+rt$ al reincorporar la aireación para la muestra 6



Es perceptible que los datos se ajustan a un modelo de correlación lineal, siendo el inverso negativo de la pendiente el coeficiente de transferencia de oxígeno. Los valores relacionados para cada una de las muestras se presentan en la tabla VII.

El coeficiente de transferencia de oxígeno varía dependiendo de la cantidad de microorganismos presentes en el agua residual, como puede observarse en la figura 16, en donde el coeficiente mayor corresponde a la muestra 1, la cual tiene la menor cantidad de microorganismos, mientras que el coeficiente menor corresponde a la muestra 6, en la cual se encuentra la mayor cantidad de microorganismos.

Figura 16. Relación entre el coeficiente de transferencia de oxígeno y la presencia de microorganismos



Esto se debe a que en las muestras en las cuales hay gran cantidad de microorganismos, éstos interfieren en la transferencia ya que consumen oxígeno en forma considerable, por lo que al airear la muestra, consumen parte de este oxígeno adicionado, el cual se pierde y no se encuentra como oxígeno disuelto, afectando esto la transferencia del oxígeno en el agua.

El último criterio de diseño a determinar es la potencia de la bomba, para lo cual es necesario utilizar la figura que se encuentra en los anexos, el cual relaciona la velocidad (en rpm) y potencia (en HP) de la bomba o aireador con el consumo de oxígeno de los microorganismos al reincorporar la aireación (expresado como dC/dt o CFM). Debido a que el aireador debe de ser capaz de cumplir con los requerimientos máximos de oxígeno, es necesario utilizar el consumo máximo de oxígeno para el cálculo de la potencia del equipo. En la tabla 6, en la sección de anexos, se encuentra que el valor mayor de cambio en la concentración de oxígeno disuelto en el tiempo (dC/dt) es al inicio de la muestra 1, siendo este de 0.175 ppm/s o 11ppm/min. La mayoría de motores trabajan a una velocidad de 3500rpm, por lo que al localizar la concentración de oxígeno y la velocidad a una presión de 5 psi, se tiene que el aireador debe de tener una potencia de 2.5 HP.

CONCLUSIONES

1. El coeficiente de transferencia de oxígeno máximo en el agua residual proveniente de una planta guatemalteca de alimentos es de 4.33kg/kg-min.
2. El coeficiente de transferencia de oxígeno disminuye al aumentar la cantidad de microorganismos presentes en el agua residual.
3. La tasa específica de crecimiento de microorganismos mayor del agua residual proveniente de una planta guatemalteca de alimentos es de 0.76 y se obtiene al aplicar aireación por 20 horas.
4. El período de tiempo óptimo de aireación del agua residual de la industria guatemalteca de alimentos es de 15 a 20 horas.
5. La potencia de la bomba a utilizar en la planta de tratamientos de la industria guatemalteca de alimentos analizada es de 2.5HP.
6. La velocidad máxima de consumo de oxígeno en la planta de tratamiento de aguas residuales analizada es de 0.0471 ppm/s.

RECOMENDACIONES

1. Utilizar los valores del coeficiente de transferencia de oxígeno calculados en el presente trabajo como base para el diseño de plantas de tratamiento aeróbico de aguas residuales con diferentes dimensiones.
2. Utilizar una bomba de 2.5HP para la aireación del agua residual de industrias alimenticias que cuenten con tanques de 180m³.
3. Realizar el cálculo previo de la tasa específica de crecimiento, basándose en los resultados del presente trabajo, para así determinar el tiempo óptimo de aireación al diseñar una planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales.

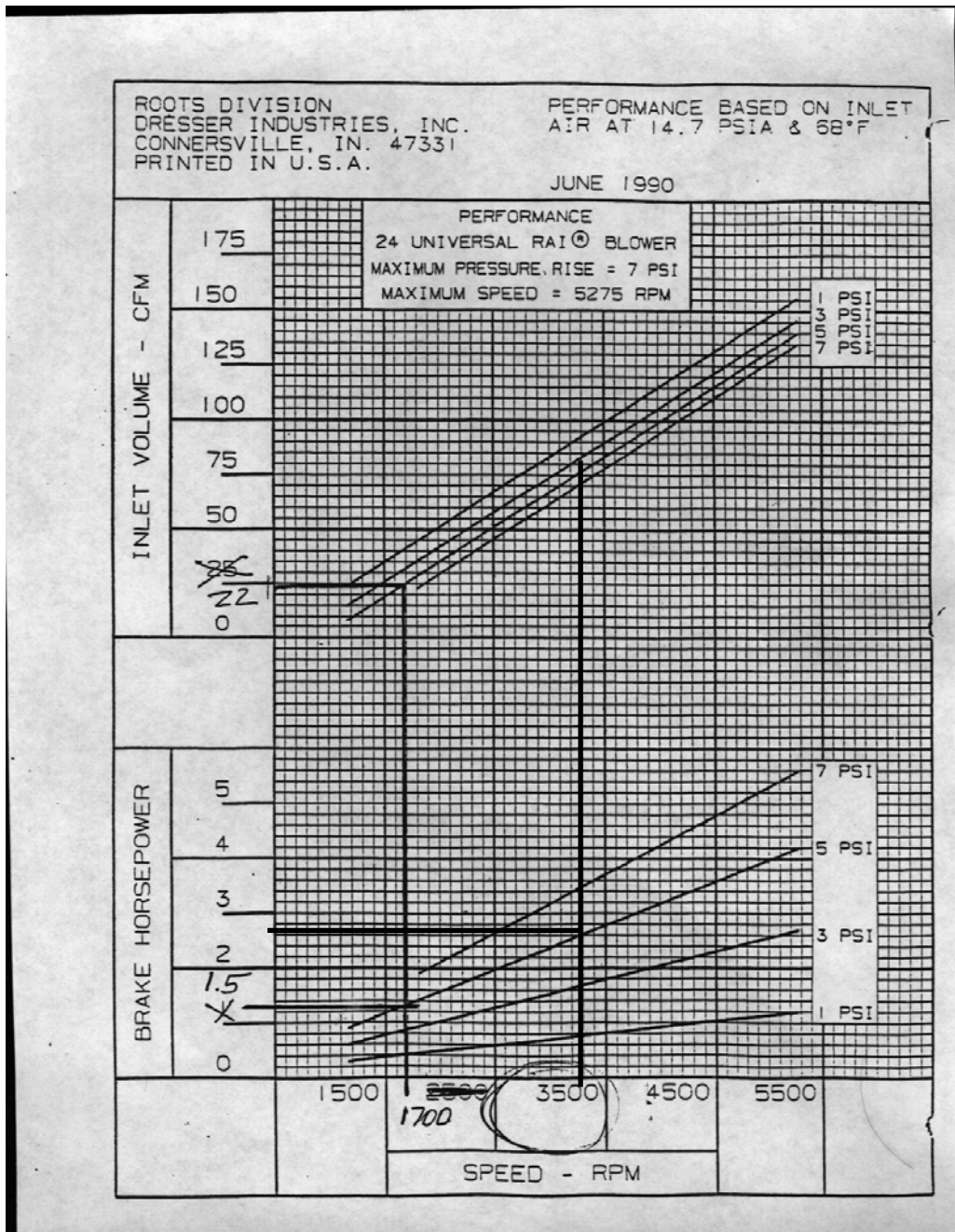
BIBLIOGRAFÍA

1. COLLI Badino Júnior, Alberto y Antonio José Gonçalves da cruz. *Agitação e aeração em tanque cilíndrico em sistema automatizado*. Brasil, São Paulo: Depto de Ingeniería Química de la Universidad de São Carlos, 2002.
2. CRITES, Ron y George Tchobanoglous. **Sistema de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados**. Tr.: Miller Camargo y otros. Colombia: Editorial McGraw-Hill, 2000.
3. DAVIS, Mackenzie y David A. Cornwell. *Introduction to Enviromental Engineering*. Estados Unidos de Norte América: Editorial McGraw-Hill, Inc, 1991.
4. Departamento de la Producción agraria, Universidad Pública de Unavarra, Grupo de investigación de microbiología y genética. **Microbiología**. <http://www.unavarra.es/genmic/micind-2.htm>
5. ESPINOSA, Rodolfo Francisco. *Dynamic correlations for aeration in stirred vessels. Master of science thesis*, Universidad de Denver. 26 de Julio de 1973.
6. FAIR, Gordon, Hohn Charles Geyer y Daniel Alexander Okun. **Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales**. (Volumen 2). México: Editorial LIMUSA, S.A., 1984.
7. HENZE, Mogens y otros. *Wastewater Treatment: Biological and Chemical Proceses*. 2ª ed. Alemania: Editorial Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1997.
8. KENT, James A. **Química Industrial**. Tr. Dr. José M. Costa. España: Ediciones Grijalbo, S.A., 1964.
9. METCALF y Eddy. **Tratamiento y depuración de las aguas residuales**. Trad.: Juan de Dios Trillo Monsoriu y Luis Virto Albert. España: Editorial Labor, S.A., 1977.
10. Tratamiento de agua. http://www.aguamarket.com/temas_interes/027.asp 8 de diciembre del 2002

11. Universidad de Salamanca, Centro de investigación y desarrollo tecnológico del agua. Pretratamientos. http://cidta.usal.es/Unidad_H/ETAP/unidades/documentos/MTDA/caphtm/cap3-1.htm 17 de enero del 2003
12. Universidad de Salamanca, Centro de investigación y desarrollo tecnológico del agua. Pretratamiento. http://cidta.usal.es/Unidad_H/ETAP/unidades/documentos/MDU/CAPHTM/CAP2-1.htm 17 de enero del 2003

ANEXOS

Figura 17. Curva de desempeño de una bomba o aireador



* Fuente: Dresser Industries, Inc. **Equipment Design**. Pp. 106