

UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
FACULTAD DE QUÍMICA-FARMACIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



Evaluación del Sistema de Lodos Activados de la Empresa textil "Desembarco del Granma"

**Tesis presentada en opción al Grado Académico
de Master en Ciencias Técnicas**

Autor: Ing. María del Carmen Milán Cárdenas

Santa Clara
Enero de 2003

UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
FACULTAD DE QUÍMICA-FARMACIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



Evaluación del Sistema de Lodos Activados de la Empresa textil "Desembarco del Granma"

**Tesis presentada en opción al Grado Académico
de Master en Ciencias Técnicas**

Autor: Ing. María del Carmen Milán Cárdenas

Tutores: Dr. José A. Fabelo Falcón

Dr. Ronaldo Santos Herrero

Consultante: Dr. Alfredo Curbelo Sánchez

Santa Clara
Enero de 2003

A mis hijos, para que se eduquen y
contribuyan al cuidado del medio
ambiente.

Agradecimientos

A **Jesucristo**, por ser la inspiración de mi vida;

A **mi esposo**, por quitarse de su tiempo para hacer posible este trabajo;

A mis padres, **Mercedes** y **Jorge**, por su ayuda incondicional con los niños;

A **mi abuela**: sin ti no hubiera podido llegar hasta aquí;

A **mi tutor**, por su persistencia y ayuda incondicional;

A **Reina, Yazmín** y **Alberto**, por su inestimable y siempre oportuno apoyo;

A **mis tíos y primos**, por su aporte en momentos difíciles;

A **Deisy, Iris** y **Mercedes**, en el Laboratorio de Residuales de la Empresa textil "Desembarco del Granma";

A todos los que me han brindado su apoyo y ayuda: **Guillermi**, **Freddy, Ana Margarita** y mis profesores **Luis Gómez, Agustín, Estupiñán, Alicia Lee, Julio Pedraza** y otros que han seguido de cerca este trabajo y han influido en mi formación medio ambiental;

A todos,

¡MUCHAS GRACIAS!

Resumen

El presente trabajo está relacionado con la planta de tratamiento de residuales de la Empresa textil "Desembarco del Granma", específicamente, con su proceso de tratamiento biológico mediante lodos activados. Luego de caracterizar tanto el afluente como el efluente del sistema, se evalúa el deterioro de los lodos activados de este proceso, así como la eficiencia del mismo, esto último, a partir del recálculo de sus parámetros de diseño/operación. También se analizan variantes de modificación de su unidad de aireación, a fin de reducir el consumo de electricidad de los aireadores y adecuar la planta para los volúmenes y características actuales del residual a tratar. Como principal resultado del trabajo, se propone una variante de modificación de la cisterna de aireación que permite ahorrar el 50% de la electricidad requerida para airear el residual, sin afectar el proceso de depuración ni la vida útil de los lodos y con una inversión razonablemente pequeña, solución que incluye la inoculación de un nuevo lodo, dadas las condiciones deplorables del existente. Este ahorro de electricidad representa un ingreso anual de \$19 058,40 USD para la Empresa textil, demostrando los indicadores económico VAN y TIR, medidos en un período de cinco (5) meses, la aceptabilidad de la inversión y su recuperación en menos de tres (3) meses; la modificación propuesta, además, permite variar la capacidad de tratamiento de acuerdo con las necesidades de la empresa.

Índice

Introducción	1
Capítulo 1. Revisión bibliográfica	4
1.1. Generalidades	4
1.2. Tratamiento de residuales líquidos	7
1.3. Tratamientos biológicos mediante lodos activados	10
1.4. Proceso de aireación	13
1.5. Transferencia de oxígeno	15
1.6. Microbiología de los lodos activados	17
1.7. Parámetros de diseño/operación de un sistema de lodos activados	20
1.8. Conclusiones parciales	24
Capítulo 2. Estado actual del Sistema de Lodos Activados de la Empresa textil	26
"Desembarco del Granma"	
2.1. Generalidades	26
2.2. Breve descripción del flujo tecnológico de la Planta de Tratamiento	27
2.3. Caracterización de las aguas residuales de la Empresa	29
2.4. Valoración de la microbiología del lodo	32
2.5. Recálculo de los parámetros de diseño/operación	34
2.6. Conclusiones parciales	45
Capítulo 3. Análisis de alternativas para adecuar el sistema objeto de estudio	46
a las necesidades actuales de la Empresa textil	
3.1. Generalidades	46
3.2. Variante 1: Disminución de la velocidad de trabajo de los aireadores	47
3.3. Variante 2: Modificaciones constructivas en la cisterna de aireación	50

3.4. Valoración económica	56
3.5. Conclusiones parciales	59
Conclusiones	61
Recomendaciones.....	62
Bibliografía.....	63
Anexos	

Introducción

La cantidad de desechos que se originan actualmente en el planeta es alarmante. El continuo vertimiento de residuos al medio ambiente ha provocado un grado tal de deterioro del mismo, que pone a la humanidad al borde de la autodestrucción [10, 65].

En Cuba, el fenómeno de la contaminación ambiental ha sido identificado como uno de los principales problemas ambientales del país. Hoy existen 2 092 fuentes contaminantes, de las cuales el 29% no poseen sistemas de tratamiento. Éstas producen más de 300 000 toneladas al año de materia orgánica biodegradable, que equivalen a la contaminación generada por una población de unos 22 millones de habitantes [5, 51].

Ante tal reconocimiento, se estableció un programa para su reducción que conjuga un conjunto de mecanismos e instrumentos de gestión ambiental dirigidos a la prevención, reducción y control de la contaminación originada por las principales fuentes identificadas a nivel nacional. Paralelamente, se han ejecutado acciones encaminadas a la rehabilitación y mantenimiento de los órganos y sistemas de tratamiento existentes.

Específicamente en el caso de las aguas residuales industriales, se han desarrollado diversas operaciones capaces de remover gran parte de las sustancias contaminantes presentes en ellas, no sólo con vistas a prevenir los problemas generados por la contaminación, sino para reutilizar el preciado líquido. Todas estas operaciones pueden dividirse en tratamientos físicos, químicos o biológicos [10, 16, 25, 33, 35, 41, 50].

La Industria textil se presenta como una actividad común en la mayoría de los países; en América Latina, por ejemplo, Frey, De Trujillo y Marino (1998) [27] plantean que es uno de los cuatro (4) rubros más representativos y de mayor consumo de agua. Dentro de los procesos

textiles, el mayor uso de agua corresponde a las etapas de teñido y acabado, generándose vertidos de gran variabilidad en cuanto a volumen y composición, los que se ubican, dadas sus características, entre los diez desagües de mayor incidencia en la contaminación hídrica.

El tratamiento de las aguas residuales de la Empresa textil "Desembarco del Granma", está compuesto de un proceso biológico mediante lodos activados (precedido por un tratamiento de homogenización y ajuste de pH, y seguido de uno terciario de coagulación-floculación). Este tipo de proceso es muy eficiente en la remoción de materia orgánica disuelta y en suspensión, muy versátil, ocupa un área relativamente pequeña y no genera subproductos contaminantes, pero posee un alto costo de operación (consumo de energía elevado, sobre todo en los aireadores) y gran sensibilidad a las variaciones en el flujo de agua a tratar [9, 10].

El **objeto de la presente investigación** es, precisamente, el proceso de tratamiento biológico mediante lodos activados de la referida entidad.

Producto de las continuas reducciones en la capacidad productiva de dicha empresa (asociadas a la escasez de materias primas y otros factores), se ha producido una disminución paulatina de los volúmenes de aguas residuales a tratar. Ello, unido a la inestabilidad de funcionamiento de la fábrica, ha afectado grandemente el desempeño y la vida de sus lodos activados. Por otro lado, no se justifica en las condiciones actuales del país, mantener el elevado consumo de electricidad asociado a la operación de los aireadores para tratar volúmenes de residual muy inferiores a los de diseño y con un lodo prácticamente deteriorado. Esta situación constituye el **problema científico** de la presente investigación.

En la empresa textil en cuestión se ha prestado atención a este particular. La solución dada, no obstante, consistente en la reducción de la velocidad de trabajo de los aireadores (Pérez y otros, 1999 [59]) y la operación de éstos alternando períodos de trabajo y de paradas, si bien ha permitido reducir el consumo energético en la aireación, no permite adecuar la planta de tratamiento a los caudales actuales de residual a tratar y ha originado, además, otros problemas (obstáculos) durante la depuración; estos últimos han incrementado el deterioro del lodo y han afectado la eficiencia del tratamiento.

En este trabajo se sostiene como **hipótesis** que *"es posible mejorar la eficiencia de la planta de tratamiento de residuales de la Empresa textil 'Desembarco del Granma' sin afectar la vida útil de sus lodos activados, a partir de modificaciones en la unidad de aireación de la misma"*.

El **objetivo general** de la tesis, por tanto, consiste en *definir una variante de modificación de dicha unidad que permita reducir el consumo de electricidad durante la aireación sin afectar el proceso de depuración ni la vida útil de los lodos, así como una mejor adecuación de la planta de tratamiento a los volúmenes actuales de residual a tratar en la empresa.*

Este objetivo se desglosa en los siguientes **objetivos específicos**:

1. Familiarizarse con las principales particularidades de los sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales, especialmente los tratamientos mediante lodos activados, y definir los parámetros más importantes a considerar para caracterizar su eficiencia.
2. Definir las características actuales de las aguas residuales de la Empresa textil "Desembarco del Granma" y evaluar tanto la eficiencia del proceso de depuración biológica de dicha empresa como el grado de deterioro de sus lodos activados.
3. Analizar posibles variantes de modificación de la unidad de aireación de la planta de tratamiento de residuales mediante lodos activados de la Empresa textil y determinar la más adecuada desde el punto de vista técnico y económico.

Capítulo 1.

Revisión bibliográfica

1.1 Generalidades

En los procesos químicos y físico-químicos comprendidos en el flujo productivo de una empresa textil se generan gran cantidad de sustancias contaminantes, algunas provenientes de la propia materia prima y otras originadas en el desarrollo mismo de dichos procesos. Estas sustancias pasan a formar parte de los residuos líquidos de la empresa, por lo que se hace necesaria, como se ha dicho, su eliminación mediante procesos de depuración, ya sea para evitar la contaminación ambiental o con vistas a la reutilización del preciado líquido.

Y en efecto. Las fibras naturales celulósicas, como el algodón y el lino, contienen pectinas, grasas y ligninas, mientras que en la lana, el principal contaminante es la lanolina. Además están presentes suciedad, restos de plantas, tierra y otros, provenientes del medio natural. En el procesamiento de las fibras químicas, por su parte, se emplean sustancias destinadas a mejorar su manipulación y comportamiento en los procesos textiles, tales como antiestáticos y lubricantes. [6, 27]

De acuerdo con sus características genéricas, se pueden diferenciar dos (2) grupos principales de contaminantes: los físicos y los químicos. En el primer grupo están incluidos los *cambios térmicos* (la temperatura es un parámetro muy importante por su efecto en la vida acuática, las reacciones químicas, velocidades de reacción y en la aplicabilidad del agua a usos útiles), el *color*, que determina cualitativamente el tiempo de las aguas residuales (si el agua es reciente, suele ser gris; cuando los compuestos orgánicos son descompuestos por las bacterias, el oxígeno disuelto en ésta se reduce a cero y su color cambia a negro), la *turbidez* originada por

los sólidos en suspensión, así como *espumas, detergentes* y la *radioactividad*; el segundo grupo está compuesto por productos químicos tanto orgánicos como inorgánicos. [35, 50]

La principal consecuencia de la contaminación con productos orgánicos es la disminución del oxígeno, como resultado de la utilización del existente en el proceso de degradación biológica, lo que conduce a desajustes y a serias perturbaciones en el medio ambiente. En el caso de los compuestos inorgánicos, el resultado más importante es su posible efecto tóxico, aunque en ocasiones suelen representar una demanda adicional de oxígeno, contribuyendo también a la disminución del mismo. [35]

Los contaminantes de las aguas residuales suelen ser una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos. En la Industria textil, la mayor contaminación orgánica se concentra en las operaciones de descolado y descruce, siendo menor en los procesos de teñido y estampado; la inorgánica proviene del lavado con sales de sodio, mercerizado, blanqueado y teñido. Sus efluentes son usualmente alcalinos, coloreados y con una DBO entre los 300 y 1000 mg/l. Los principales contaminantes incluyen: almidones y glucosa, ceras, pectinas, agentes humectantes y auxiliares, sulfuros, sulfitos, ácido acético, detergentes, hipoclorito, agentes reductores y colorantes no biodegradables. Los efluentes provenientes del proceso de acabado en algodón, contienen también fibras finas que ocasionan obstrucciones y diversos problemas tanto mecánicos como de contaminación. [6, 35]

Frey, De Trujillo y Marino (1998) [27] dividen los contaminantes de las aguas residuales textiles en seis (6) grupos principales: *tensoactivos, encolantes y ensimajes, secuestrantes, colorantes, fijadores de colorantes, suavizadores y otros tipos de acabados*.

Los productos **tensoactivos** son mayormente utilizados en los procesos de preparación, para eliminar todas las impurezas naturales o agregadas. También se usan en los procesos de teñido y acabado, aunque en menor cantidad. Su composición química está constituida por una cadena hidrófoba unida a un grupo hidrófilo y pueden tener carácter anión-activo, catión-activo o no-iónico. Su carácter contaminante de los efluentes líquidos está dado por el aporte a la DBO y a su posibilidad de degradación, que depende de su composición química. También

pueden aparecer problemas de toxicidad con los metabolitos, producto de la degradación biológica o química. Otro punto a considerar es el aspecto bactericida de algunos productos catión-activos, que puede afectar la calidad del proceso de tratamiento biológico.

Los **encolantes y ensimajes**, por su parte, son polímeros naturales o sintéticos de peso molecular elevado. Como deben eliminarse totalmente en el proceso de preparación, aportan una importante carga de materiales generalmente biodegradables, es decir que requieren un tratamiento importante e intenso en las plantas de tratamiento biológico de los efluentes. Los productos históricamente más importantes han sido las féculas modificadas químicamente o sin modificar, que se pueden reemplazar por polímeros sintéticos en mucha menor concentración, con la consiguiente disminución de la DBO. En estos productos el punto más importante es la biodegradabilidad, pero debe tenerse en cuenta la posible presencia de pequeñas cantidades de biocidas, aunque normalmente no producen problemas en las plantas de tratamiento.

Los **secuestrantes** (agentes *quelantes* o *acomplejantes*) son moléculas orgánicas capaces de reunir y mantener en solución metales pesados que producen interferencias en los procesos húmedos de tintorería. Se usan en baja concentración, por lo que no provocan problemas especiales de contaminación, ni aumentan significativamente la DBO. Los contaminantes de este tipo son biodegradables.

En el caso de los **colorantes**, no sólo es dañino el porcentaje de los mismos que queda en los baños de tintura (no fijados a las fibras), sino que los restos de colorantes no fijados se siguen eliminando también en los sucesivos pasos de lavados del textil. Las moléculas de colorantes aportan color, DBO y en algunos casos, metales pesados y grupos químicos no aceptados dentro de las legislaciones vigentes. La eliminación parcial o total de estos contaminantes hasta niveles aceptables requiere de tratamientos mecánicos, físicos, químicos y biológicos.

Los **fijadores de colorantes** son productos químicos que, aplicados después de la tintura, mejoran la resistencia del color a los efectos de los lavados y la luz. En la actualidad, los procesos basados en metales pesados han sido sustituidos por productos no tóxicos que sólo aumentan la DBO.

Finalmente, el carácter contaminante de los **suavizantes y otros tipos de acabados** depende de su composición química y de la cantidad aplicada, ya que el residuo se elimina a través de los efluentes y es proporcional a la concentración.

Estos mismos autores (Frey, De Trujillo y Marino) reportan como valores aproximados de la carga orgánica que aportan las distintas fuentes contaminantes a los efluentes textiles, los siguientes porcentajes:

Desencolado	57%	Auxiliares ¹	7%
Productos naturales de las fibras ...	5%	Reductores	3%
Humectantes y detergentes	18%	Ácidos orgánicos	7%
Colorantes y blanqueadores	1%	Aprestos	1%

1.2 Tratamiento de residuales líquidos

Según Degrémont (1973) [21], Chudoba (1986) [17], Díaz y Carrasco (1991) [22], Edwards (1995) [25], Van Breeman (1995) [78] y otros, existen distintos tipos de tratamientos para la depuración de residuos líquidos. En términos generales, los mismos pueden considerarse físico-químicos o biológicos, consistentes los primeros en la coagulación-floculación y separación de los productos que se encuentran en estado de coloide, dispersión y/o suspensión mediante la adición de cloruro de hierro (ClFe_3), sulfato de aluminio $(\text{SO}_4)_3\text{Al}_2$, sulfato ferroso (SO_4Fe), óxido de calcio (CaO), polielectrolitos aniónicos o catiónicos, u otras sustancias similares, y los segundos, en imitar y acelerar el proceso natural ocurrido en los cursos del agua por la acción de microorganismos en condiciones de temperatura, pH y tiempo adecuados, mediante el cual las materias orgánicas solubilizadas o suspendidas en ella son degradadas a fracciones químicas compatibles con la vida natural de las aguas.

Al respecto, Chudoba (1986) [17] plantea, sin embargo, que los tratamientos más usados son los que involucran microorganismos, por ser muy económicos, eficientes y porque no producen

¹ Los *secuestrantes* están incluidos en este rubro, de lo que se deduce su pequeño aporte a la carga contaminante.

subproductos contaminantes, además de utilizarse en lugares donde se generan contaminantes orgánicos, como en el caso de la industria textil.

En definitiva, el efluente se filtra a través de rejillas y tamices, eventualmente se le aplica un tratamiento físico-químico para precipitar parte de la carga y luego se somete a sucesivas aireaciones y decantaciones, que permiten la degradación aeróbica hasta los valores adecuados para su volcado a un curso de agua o desagüe. [9, 10, 38, 44]

En la opinión del propio Hutzinger [38], los procedimientos biológicos deben reunir las siguientes condiciones:

- Degradabilidad rápida y completa.
- No provocar acumulación en la cadena alimenticia.
- Ecotoxicidad escasa o nula.

Los métodos de tratamiento en los que predomina la aplicación de principios físicos se conocen como *tratamientos primarios*, mientras aquellos en los que la eliminación de contaminantes se efectúa por actividad química o biológica son conocidos como *tratamientos secundarios*. Recientemente, el *tratamiento terciario o avanzado* se ha aplicado a las operaciones o procesos utilizados para eliminar contaminantes que no se han visto afectados por los tratamientos antes mencionados. [35, 41, 70]

Para medir la efectividad de los procesos de tratamiento señalados y/o describir la composición de las aguas residuales, se emplean distintas mediciones físicas, químicas y biológicas. Las más comunes incluyen la determinación del contenido de sólidos, las demandas bioquímica (DBO_5) y química (DQO) de oxígeno, el pH, el contenido de nitrógeno y fósforo, el contenido de grasa y otras [1]. En el anexo 1 están contenidos los valores más usuales de estas variables reportados en la literatura consultada para el caso de los residuales textiles.

La inmensa mayoría de los procesos de tratamiento secundarios son biológicos [77]. Su uso, no obstante, así como la selección del método específico de tratamiento a emplear, depende del grado de biodegradabilidad del residual, el que se determina como la relación de la DBO_5 a la DQO. Este índice no solo señala el método de depuración más adecuado, sino que permite

deducir fácilmente el origen de la sustancia a depurar (doméstico o industrial). Así, según Hernández (1994) [34], se tiene que:

$$\text{Si } \frac{DBO_5}{DQO} > 0,4, \tag{1.1}$$

es biodegradable, pudiéndose usar sistemas biológicos por fangos activos o lechos bacterianos;

$$\text{Si } 0,2 \leq \frac{DBO_5}{DQO} < 0,4, \tag{1.2}$$

es biodegradable, recomendándose el empleo de lechos bacterianos;

$$\text{Si } \frac{DBO_5}{DQO} < 0,2, \tag{1.3}$$

no es biodegradable, o lo es muy poco, por lo que no se recomiendan métodos biológicos. Es conveniente recurrir a procesos químicos.

Cuando no se dispone de datos estadísticos suficientes sobre la aptitud de un agua para un tratamiento biológico, es necesario efectuar estudios de laboratorio o emplear plantas pilotos semi-industriales. Díaz Betancourt (1987) [23] plantea que dichos estudios son especialmente recomendables en el caso de las aguas residuales industriales, o las urbanas en las que se vierten desechos industriales.

Los principales procesos biológicos utilizados en los tratamientos de aguas residuales han sido resumidos por Metfcalt & Eddy, Inc. (1995) [50] y otros autores. Según ellos, existen cuatro

Tabla 1.1: Procesos de tratamiento de aguas residuales.

PROCESO DE TRATAMIENTO	REMOCIÓN (%)		REMOCIÓN ciclos log10	
	DBO ₅	Sólidos en suspensión	Bacterias	Helmintos
Sedimentación primaria	25-30	40-70	0-1	0-1
Lodos activados (a)	70-95	70-95	0-2	0-1
Filtros percoladores (a)	50-90	70-90	0-2	0-1
Lagunas aireadas (b)	80-90	(c)	1-2	0-1
Zanjas de oxidación (d)	70-95	80-95	1-2	0-1
Lagunas de estabilización (e)	70-85	(c)	1-6	1-4

(a) precedidos y seguidos de sedimentación; (b) incluye laguna secundaria; (c) dependiente del tipo de lagunas; (d) seguidas de sedimentación; (e) dependiendo del número de lagunas y otros factores como: temperatura, período de retención y forma de las lagunas.

(4) grupos principales: *aerobios, anóxicos, anaerobios y combinaciones de procesos aerobios con anóxicos o anaerobios*; cada uno puede ser, a su vez, de *cultivo en suspensión, de cultivo fijo o combinado* (anexo 2). En la tabla 1.1 se dan algunos valores guías para seleccionar uno u otro proceso, de acuerdo con las recomendaciones de la **Water Pollution Control Federation** (1977) [76].

En los procesos biológicos los microorganismos consumen la materia orgánica biodegradable hasta prácticamente agotarla, oxidación biológica que conduce a la obtención, como productos finales, de las aguas tratadas y los lodos; estos últimos constituidos fundamentalmente por las células microbianas. Hasta cierto punto, pueden considerarse como procesos fermentativos, caracterizados por operar con poblaciones mixtas y sin asepsia. No son, sin embargo, fáciles de operar y controlar, pues dado que operan con poblaciones mixtas y sustratos complejos, resulta más difícil mantener el estado estacionario, sobre todo si el afluente está sometido a fluctuaciones continuas en cuanto a flujo y composición, como en el caso de la Empresa textil "Desembarco del Granma". [23, 67]

1.3 Tratamientos biológicos mediante lodos activados

Los tratamientos por lodos activados se iniciaron en Inglaterra, a principios del siglo pasado, alcanzando una gran difusión con el transcurso de los años [1, 10, 50, 63]. Sus dos objetivos principales consisten en la oxidación de la materia biodegradable en el tanque de aireación y la floculación, que permite la separación de la biomasa nueva del efluente tratado. Su nombre está dado por la producción de una masa activa de microorganismos capaces de estabilizar el residuo en forma aeróbica y aunque se asemejan a los procesos fermentativos, se diferencian de ellos en que los microorganismos no se encuentran dispersos en el medio, sino que forman agrupaciones (flóculos), lo que les permite, una vez metabolizados los compuestos disueltos, sedimentar fácilmente [23, 44, 49, 63].

Básicamente, según Díaz Betancourt (1987) [23], este tipo de tratamientos consiste en una unidad donde se ponen en contacto los lodos activados con las aguas residuales, que contienen

materia orgánica finamente dividida en estado coloidal y en solución; el procedimiento está basado en provocar el desarrollo de un flóculo bacteriano (fango activado) en un depósito de aeración alimentado con el agua a tratar. En dicho depósito, la mezcla (licor mixto) es agitada para mantener los lodos en suspensión y para que el líquido reciba el oxígeno necesario para la proliferación de los microorganismos, que absorben las sustancias orgánicas y las almacenan, oxidándolas a CO_2 , agua y NH_4 para ser descompuestas por la acción de la respiración; la energía resultante de este proceso es usada en el crecimiento y proliferación del lodo activado, con la ayuda de enzimas catalíticas segregadas por los propios microorganismos.

Planteamientos similares al anterior fueron encontrados en la mayor parte de la bibliografía consultada sobre este tema. [3, 10, 11, 17, 21, 22, 25, 26, 34, 41, 57, 64, 67]

El licor mixto se envía a un clarificador con el fin de separar el agua tratada de los lodos, los que son disueltos, en parte o totalmente, en el depósito de aeración (lodo recirculado o de retorno) para mantener en él una concentración suficiente de fangos activados; otra parte se extrae (lodo en exceso) y se evacua hacia el tratamiento de lodos [9, 21, 34, 44, 50]. Los depósitos de aireación y sedimentación (clarificación) suelen estar separados, por lo que se requiere del bombeo de los lodos de retorno entre el clarificador y el depósito de aireación (figura 1.1) [23, 63].

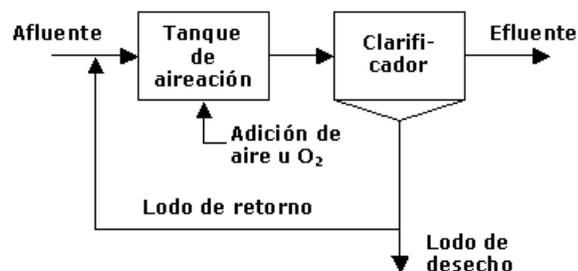


Figura 1.1: Proceso convencional de lodos activados [13].

Así, las sustancias orgánicas disueltas en el residual pasan a los microorganismos en el tanque de aireación y éstos últimos son separados luego del residual durante la sedimentación. Como resultado se obtiene un residual depurado que puede ser vertido a un cuerpo de agua y lodos, que pueden recircularse al proceso o ser tratados para convertirlos en residuo sólido.

Las principales ventajas y desventajas de los procesos de lodos activados, de acuerdo con los criterios de Díaz Betancourt (1987) [23] y Contreras (1997) [18], son las siguientes:

Ventajas:

- ✓ Ocupan pequeña área.
- ✓ La fauna se reduce a organismos sin forma de vida superior.
- ✓ No existen insectos en la superficie.
- ✓ Se consigue oxidación de sustancias químicas (ejemplo: nitrificación, controlable entre límites para evitar eutrofización del receptor).
- ✓ Ausencia de olores.
- ✓ Efluente claro.
- ✓ El lodo producido puede tener valor.

Desventajas:

- ✓ Es sensible a la oscilación de cargas contaminantes, de caudal y compuestos tóxicos.
- ✓ Alto costo de operación por el consumo energético.
- ✓ Gran cantidad de lodos producidos a disponer.
- ✓ Incertidumbre debido a la falta de información relacionada con los resultados a esperarse bajo todas las condiciones.
- ✓ Son técnicamente más complejos que otros procesos de tratamiento.

Otros autores refieren también ventajas y desventajas similares a las anteriores [9, 10, 11], incluso al comparar los procesos aerobios de tratamiento con los anaerobios [44].

En su forma convencional, este tipo de tratamiento se puede llevar a cabo en un reactor de mezcla completa o en uno del tipo flujo-pistón [23, 34, 50]. Tanto Mestcalf & Eddy, Inc. (1995) [50] como Hernández (1994) [34], sin embargo, plantean que, al menos en teoría, el patrón de flujo-pistón es más eficiente que el de mezcla completa, pero su aplicación práctica conduce a grandes alejamientos de la idealidad, además de que los patrones tubulares no asimilan con facilidad los cambios bruscos del afluente, por lo que recomiendan el uso de series de reactores de mezcla completa mediante la subdivisión del tanque de aireación.

Con el transcurso de los años se han ideado diferentes variantes o mejoras de los sistemas de lodos activados [9, 10, 22, 25, 34, 40, 49, 78]. Entre las más importantes, pueden citarse:

- Proceso convencional
- Reactor continuo agitado
- Aireación por etapas
- Aireación extendida
- Proceso de estabilización-contacto
- Proceso de alta velocidad
- Reactor biológico secuencial
- Sistema de oxígeno puro

Las características de diseño del sistema de lodos activados de la Empresa textil "Desembarco del Granma" hacen muy difícil su clasificación a partir de los criterios anteriores. En última instancia, pudiera decirse que se trata de un sistema convencional con características de un proceso de aireación extendida, si bien el caudal de residual a tratar (Q) y la velocidad de los aireadores se corresponden más con uno de alta velocidad. Actualmente, sin embargo, se ha implantado un régimen de operación de los aireadores que comprende la disminución de sus velocidades de trabajo hasta en un 50%, lo que unido a los bajos volúmenes de afluente y de materia orgánica en éste, hacen más notables las características de aireación extendida.

1.4 Proceso de aireación

Degrémont (1973) [21], Díaz Betancourt (1987) [23] y Hairston (2001) [31], aseguran que los sistemas de aireación tienen el doble fin de aportar a los organismos del lodo el oxígeno que necesitan y provocar la agitación y homogeneidad suficientes para un contacto íntimo entre el medio viviente, los elementos contaminantes y el oxígeno que se introduce.

Por lo general, los sistemas que emplean reactores de flujo-pistón usan difusores, mientras los de reactores de mezcla completa, aireación mecánica [23]. Esta última variante, según el criterio Mestcalf & Eddy, Inc. (1995) [50], Hernández (1994) [34] y otros, resulta más sencilla

y económica, aunque también menos eficiente, ya que su funcionamiento depende de la disponibilidad de cantidades de oxígeno suficientes y está afectado por la poca solubilidad del oxígeno y su baja velocidad de transferencia, requiriendo de agitación enérgica del residual para introducir el aire y provocar un rápido cambio de la interfase aire-agua que facilite la disolución del oxígeno; consiste en dispositivos mecánicos (cabezuelas, tubos ranurados o perforados, etc.) situados cerca de la superficie del tanque de aireación o sumergidos profundamente en él.

Los aireadores mecánicos de superficie son los más robustos y sencillos. Pueden construirse en tamaños desde 0,75 a 75 kW. Consisten en rotores sumergidos total o parcialmente, acoplados a motores montados en estructuras fijas o flotantes y su eficiencia suele ser de 1,2÷2,4 kg OD/(kW-h), en condiciones ideales de operación; para las condiciones reales, se recomienda el uso del factor de corrección:

$$f = 0,8 * \frac{C_w - C_L}{C_s} * 1,024^{(T-20)} \quad (1.4)$$

donde: f – Factor de corrección de la eficiencia de los aireadores

C_s – Concentración de oxígeno saturado en agua fresca (ppm)

C_w – Concentración de saturación de oxígeno en agua residual (ppm)

C_L – Concentración de saturación de oxígeno para ser mantenido en la aireación (ppm)

T – Temperatura ambiente (°C)

En el anexo 3 se ofrecen algunos ejemplos de dispositivos utilizados para airear las aguas residuales sometidas a tratamientos biológicos.

En cuanto a los tanques de aireación, éstos son abiertos y por lo general de hormigón armado, con perfil cuadrado o rectangular. Suelen estar divididos en varios depósitos interconectados en serie, capaces de operar independientemente, lo que, en la opinión de Díaz Betancourt (1987) [23] y Mestcalf & Eddy, Inc. (1995) [50], hace más flexible la operación y ayuda a evitar las paradas de todo el sistema por mantenimientos o roturas. Los tanques cuadrados se usan para reactores de mezcla completa y los rectangulares para reactores de flujo-pistón.

1.5 Transferencia de oxígeno

En los últimos 50 años se han propuesto diversas teorías sobre la transferencia de oxígeno en el agua [4, 46, 58]. Mestcalf & Eddy, Inc. (1995) [50] afirman que las más sencillas han probado ser efectivas en el caso de los procesos de aireación, dando resultados muy cercanos a modelos cinéticos más complejidad, y que generalmente brindan predicciones equivalentes de transferencia de oxígeno.

La teoría más simple y utilizada, según estos autores, es la teoría de la doble capa, propuesta por Lewis y Whitman (1924) [42]. El modelo de penetración propuesto por Higby (1935) [37] y el de renovación superficial, de Danckwerts (1951) [20], son más teóricos y tienen en cuenta un número mayor de fenómenos incluidos en el proceso. La teoría de doble capa ofrece resultados esencialmente idénticos a los de las restantes teorías conocidas hasta hoy en más del 95% de los casos; es por ello que sigue siendo tan popular para describir la transferencia de oxígeno en muchas aplicaciones. [4, 58, 71]

La teoría de la doble capa, en definitiva, está basada en un modelo físico que considera la existencia de dos (2) capas en la interfase gas-líquido, una líquida y otra gaseosa. Ambas capas oponen resistencia al paso de las moléculas de gas entre las fases líquida y gaseosa. En la transferencia de moléculas de gases altamente solubles desde la fase gaseosa a la líquida, la resistencia más difícil de vencer es la que opone la capa líquida, pero cuando la solubilidad de los gases es menor, la resistencia de la capa gaseosa se incrementa apreciablemente: los gases de solubilidad intermedia sufren una resistencia importante de ambas capas [50].

De acuerdo con esta teoría, el gas se moviliza por difusión molecular a través de la película líquida y se distribuye por difusión turbulenta a través del líquido. La tasa de transferencia por unidad de área, entonces, puede ser descrita de la manera siguiente:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = K_g * \frac{C_s - C}{L_f} \quad (1.5)$$

donde: $\partial m / \partial t$ – Velocidad de transferencia de masa del gas

A – Área a través de la cual se difunde el gas

K_g – Constante de difusión molecular del gas

C_s – Concentración de saturación del gas disuelto

C – Concentración del gas disuelto

L_f – Grosor de la película líquida

Considerando que $(K_g \cdot A)/L_f = K_L a$, sustituyendo en la ecuación 1.5 e integrando, resolviendo la integral y despejando apropiadamente, el modelo básico de la transferencia de oxígeno durante el proceso de aireación de un sistema de lodos activados queda expresado como:

$$C = C_s - (C_s - C_o) * e^{-K_L a t} \quad (1.6)$$

donde: C – Concentración de oxígeno disuelto (OD) (mg/l)

C_s – Concentración de equilibrio de OD (mg/l); se logra cuando $t \rightarrow \infty$

C_o – Concentración de OD para $t = 0$ (mg/l)

$K_L a$ – Transferencia de masa o coeficiente de re-aireación (h^{-1})

t – Tiempo (h)

La ecuación 1.6 puede ser empleada, y de hecho se emplea, por ejemplo, para estimar el tamaño de los sistemas de aireación.

Por otro lado, la cantidad de oxígeno transferido por unidad de aire introducido en las aguas a tratar en condiciones equivalentes (temperatura y composición del agua, profundidad a la cual se introduce el aire, etc.), suele tomarse como referencia para evaluar la eficiencia de los sistemas de aireación. Los procedimientos normales de análisis pueden incluir la medición de la velocidad de oxidación del sulfito producida al airear una disolución de sulfito de sodio, la medición de la velocidad a la que es añadido el oxígeno al agua, mediante análisis directo de OD, y la medición del oxígeno consumido por los microorganismos [4, 24, 28, 31, 35, 39, 43]; los mismos han sido descritos de forma más o menos detallada en la literatura especializada, por lo que no serán tratados en este trabajo.

Son varios los factores que afectan la tasa de solución del oxígeno en el agua. Truesdale, Downing y Lowden (1955) [74] discutieron muchos de ellos, incluyendo el grado de agitación,

el efecto de la temperatura y la concentración de contaminantes solubles e insolubles; más recientemente, Jackson (1998) [39], al estudiar la influencia del grado de agitación sobre el coeficiente volumétrico de transferencia del oxígeno en un reactor biológico, concluyó que éste era de vital importancia para lograr una adecuada transferencia de oxígeno y garantizar, por tanto, un buen funcionamiento del reactor.

Existen también varios parámetros de calidad del agua que afectan las concentraciones de saturación de los gases disueltos. A modo de ejemplo, en la Tabla 1.2 se ofrecen algunas concentraciones de saturación de OD a distintos valores de temperatura y salinidad [4, 75].

Tabla 1.2: Concentraciones de saturación de OD para distintos valores de temperatura y salinidad.

Temperatura (°C)	Salinidad (ppt)			
	0	10	20	30
5	12,77	11,95	11,17	10,45
10	11,29	10,59	9,93	9,32
15	10,08	9,48	8,92	8,39
20	9,09	8,57	8,08	7,62
25	8,26	7,81	7,38	6,97
30	7,56	7,15	6,77	6,41
35	6,95	6,59	6,25	5,92
40	6,41	6,09	5,78	5,49

Los parámetros mencionados (temperatura y salinidad), pueden afectar también la fisiología de los microorganismos, de acuerdo con los estudios hechos por Haney y Walsh (2003) [32].

Es muy importante mantener concentraciones adecuadas de OD en el proceso que garanticen la acción de los microorganismos sobre la materia biodegradable. Es por ello que la aireación es a menudo la clave para el aumento de la eficiencia de operación de los sistemas aerobios de depuración de residuales. [39, 46, 64]

1.6 Microbiología de los lodos activados

El mecanismo general de un sistema de lodos activados está representado por la siguiente reacción biológica:



donde: *MI* – Materia inerte

MO – Materia orgánica

Org. – Microorganismos

N – Nutrientes

E - Energía

La biodegradación (oxidación de la materia orgánica disuelta en el agua) es realizada por los microorganismos de la balsa de activación (cisterna de aireación) que forman los flóculos. El flóculo individual es, por tanto, la unidad ecológica y estructural del lodo activado y constituye el núcleo alrededor del cual se desarrolla el proceso de depuración biológica. Su tamaño medio es de 100÷500 μm y a medida que aumenta, el oxígeno en su interior disminuye, favoreciendo la formación de zonas de anoxia en las que pueden crecer bacterias anaerobias metanogénicas capaces de arrancar el proceso de digestión anaerobia de lodos. [3, 29, 44, 45, 66]

En el flóculo está presente, además del componente biológico, uno no biológico que comprende tanto a partículas orgánicas e inorgánicas provenientes del agua residual, como a polímeros extracelulares (principalmente polisacáridos producidos por algunos de los microorganismos) que juegan un papel importante en la biofloculación del lodo. [3, 19, 63, 79]

La variedad de microorganismos que pueden integrar el componente biológico principal del flóculo es amplia. El conocimiento del sistema microbiológico predominante en el lodo es de mucha importancia; de hecho, los sistemas de lodos activados suelen ser evaluados por los microorganismos que estén establecidos en ellos y por la movilidad de los mismos [9, 13, 21, 30, 45, 72].

Según Degrémont (1973) [21], resulta normal la presencia de bacterias, hongos, protozoos y rotíferos en la flora de un sistema de lodos activados, aunque las bacterias y los protozoos son los microorganismos que consumen la gran mayoría de la materia orgánica contenida en las aguas residuales. Al respecto, Nyer y otros (1999) [57] afirman que las bacterias constituyen la mayor parte de la biomasa en el lodo, en tanto que López [44] asegura que los lodos activados

no suelen favorecer el crecimiento de hongos y que sólo pueden ser observados en los flóculos, ocasionalmente, algunos hongos filamentosos, como los géneros: **Geotrichum**, **Penicillium** o **Cephalosporium**.

Las bacterias son, sin dudas, los microorganismos más importantes de los lodos activados y la causa principal de la descomposición de la materia orgánica del efluente [13, 19, 35, 72, 79]. De acuerdo con los autores consultados, casi todas las encontradas en lodos activados son heterótrofas Gram negativas, como **Zoogloea** (principalmente la **Ramigera**), **Pseudomonas** o **Comamonas**, **Achromobacter**, **Xocardia**, **Flavobacterium-Cytophaga** (filamentosa sin septos), **Alcaligenes** (protobacteria oxidante del hidrógeno con capacidad desnitrificante), y otras; entre las Gram positivas pueden ser encontradas: **Arthrobacter** y **Bacillus**. También pueden ser halladas gran cantidad de bacterias autótrofas, que suelen ser nitrificantes Gram negativas. Entre ellas: **Nitrosomonas**, **Nitrobacter**, **Rhodospirillum**, **Rhodobacter**, etcétera. [19, 44, 48, 62, 63, 72, 73]

Además de las mencionadas, en un flóculo 'ideal' están desarrollándose una serie de bacterias filamentosas en equilibrio con el resto de las bacterias. Las más frecuentes son: **Beggiatoa**, **Thiotrix**, **Sphaerotilus**, **Anabaena**, **Nostoc** y **Nocardia**. [44, 48, 62, 63]

En cuanto a los protozoos y rotíferos, los primeros consumen las bacterias dispersas que no han floculado y los segundos las partículas biológicas que no hallan sedimentado. Es común encontrar altas densidades de protozoos ciliados libres (**Paramecium**), fijos (**Vorticella**) y/o reptantes (**Aspidisca**, **Euplotes**), así como otros flagelados (**Bodo** o **Pleuromonas**) y dentro del grupo **sarcodina**, el género **Amoeba**; los rotíferos más comunes son: **Lecane**, **Philodina** y **Notommata**. La presencia de estos rotíferos en el efluente es un indicativo de alta eficiencia en el proceso aerobio de purificación biológica. [35, 45, 63, 72, 73]

Degrémont (1973) [21] y López [44], coinciden en que raramente las algas logran estabilizarse como flora de un sistema de lodos activados, dados sus requisitos de luz para el metabolismo. Este último, no obstante, asegura que pueden aparecer en aguas residuales con gran cantidad de materia orgánica, mencionando como las más comunes: **Cosmarium** y **Pediastrum**

(*chlorophyta*), *Euglena* (*Euglenophyta*) y *Pinnularia* (*Chrysophyta*). Tampoco suelen presentarse, según Mestcalf & Eddy, Inc. (1995) [50], cantidades apreciables de crustáceos; su presencia denota un efluente bajo de materia orgánica y que es rico en OD.

La existencia de los diferentes organismos determina el grado de DBO existente en el sistema, ya que cada uno de los grupos vistos requiere condiciones de oxígeno determinadas. Por otro lado, sólo una parte del residuo original es oxidado a compuestos de bajo contenido energético (NO_3^{-2} , SO_4^{-2} y CO_2 , por ejemplo); el resto es sintetizado en materia celular [19, 35, 79].

1.7 Parámetros de diseño/operación de un sistema de lodos activados

La operación y control de un sistema de lodos activados puede resultar confusa y en extremo compleja, pues se trata de cuidar y proteger a un enorme número de microorganismos para que éstos eliminen la contaminación. La evaluación de la eficiencia del proceso es clave en la correcta operación de cualquier planta de tratamiento; es mediante ella que se puede obtener la retroalimentación necesaria en la dinámica del sistema para una acertada y oportuna toma de decisiones.

La eficiencia de un sistema de este tipo en la eliminación de la carga orgánica carbonácea y de nitrificación, puede verse obstaculizada por factores tales como:

- ✓ **Grado de biodegradabilidad de los compuestos orgánicos y de amonio disueltos en el agua residual:** Este aspecto fue abordado en el epígrafe 1.2 del trabajo.
- ✓ **Tiempo de residencia hidráulico (θ):** Tiempo que permanece el líquido residual afluente en el tanque de aireación. Se selecciona en función de la variante de lodo a emplear, con el objetivo de garantizar el tiempo de contacto residual líquido – microorganismos – oxígeno necesario para la remoción de la materia orgánica. Según Chudoba (1986) [17] y Ramalho (1997) [64], puede calcularse por la expresión:

$$\theta = \frac{V}{Qt} \quad (1.8)$$

donde: θ – Tiempo de residencia hidráulico en el tanque de aireación (días)

V – Volumen del tanque de aireación (m^3)

$Q_t = Q + R$ – Flujo volumétrico total que entra al tanque de aireación ($m^3/día$)

Q – Flujo volumétrico del residual afluente ($m^3/día$)

R – Flujo volumétrico del lodo recirculado ($m^3/día$)

- ✓ **Tiempo de residencia medio celular (θ_x):** Se denomina 'edad del lodo' y es el tiempo que permanecen los microorganismos en el sistema. Chudoba (1986) [17] y otros autores plantean que como en estos sistemas se recirculan los lodos, éste será superior al tiempo de residencia hidráulico. Si el mismo es muy prolongado, puede afectarse la actividad de los flóculos a causa de la muerte celular; si es muy corto, no se garantizará una buena formación de flóculos activos. Considerando la cantidad de microorganismos presentes en todo el sistema, puede calcularse como:

$$\theta_x = \frac{V * X + G}{Q_w * X_w + Q_e * X_e} \quad (1.9)$$

donde: θ_x – Tiempo de residencia medio celular (días)

V – Volumen del tanque de aireación (m^3)

X – Sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado (g/m^3)

$Q_w; X_w$ – Flujo de lodos en exceso extraídos del sistema ($m^3/día$) y su concentración de sólidos suspendidos volátiles (g/m^3), respectivamente

$Q_e; X_e$ – Flujo de efluente tratado a la salida de la sedimentación ($m^3/día$) y su concentración de sólidos suspendidos volátiles (g/m^3), respectivamente

$G = S_{TR} + S_{TS} + S_{Sed}$ – Cantidad de sólidos en las tuberías y el sedimentador (kg)

S_{TR} – Sólidos en la tubería de retorno (kg)

S_{TS} – Sólidos en la tubería del sedimentador (kg)

S_{Sed} – Sólidos en el sedimentador (kg)

- ✓ **Factor de carga (A/M):** Determina la relación entre la concentración de sustratos y la de microorganismos, pudiendo calcularse, de acuerdo con el criterio de Chudoba (1986) [17], Ramalho (1997) [64] y otros, por la expresión:

$$A/M = \frac{DBO_5 * Q}{V * X} \quad (1.10)$$

donde: A/M – Factor de carga (días)

DBO_5 – Demanda biológica de oxígeno del afluente (g/m^3)

Q – Flujo volumétrico de residual afluente ($m^3/día$)

V – Volumen del tanque de aireación (m^3)

X – Sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado (g/m^3)

Cuando el valor de este parámetro está por debajo de los rangos establecidos, puede favorecerse la respiración endógena de la biomasa, con la reducción de los volúmenes de lodo, la obtención de rendimientos celulares relativamente bajos y una mayor facilidad de sedimentación de los flóculos; si fuera demasiado pequeño, no obstante, el lodo puede perder sus características de fácil sedimentación. [10, 29, 67]

- ✓ **Concentración de microorganismos presentes en el reactor biológico:** Puede ser estimada por la concentración de sólidos suspendidos volátiles del licor mezclado (SSVLM). El principio que propicia su determinación será abordado más adelante. Su valor debe estar entre 3 000 y 6 000 mg/l [23, 40, 50].
- ✓ **Tipos de microorganismos presentes en el reactor biológico:** La presencia tanto de bacterias como de hongos filamentosos en cantidades inadecuadas puede causar grandes problemas, al interferir mecánicamente la formación de zoogreas y provocar, por tanto, serias dificultades en la sedimentación de los flóculos. La microbiología típica de un sistema de lodos activados fue abordada en el epígrafe 1.6 del trabajo.
- ✓ **Factores de operación del sistema:** Entre estos factores pueden mencionarse: oxígeno disuelto, demanda de oxígeno, concentración de nutrientes, pH y presencia de compuestos tóxicos.
- ✓ **Correcto diseño del flujo de reciclaje (R):** Los sólidos sedimentados en el sedimentador primario, son enviados al tanque de aireación con el objetivo de mantener una correcta concentración de lodos en éste que permita degradar la materia orgánica que ingresa al

sistema. Este flujo se puede determinar por medio de un balance de lodos en el tanque de aireación en la forma siguiente [23, 60, 67]:

$$R * X_R + Q * X_a = (Q + R) * X \Rightarrow R = \frac{Q(X - X_a)}{X_R - X} \quad (1.11)$$

donde: R – Flujo de reciclaje ($\text{m}^3/\text{día}$)

Q – Flujo del residual afluente ($\text{m}^3/\text{día}$)

X – Sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado (g/m^3)

X_a – Sólidos suspendidos volátiles en el afluente (g/m^3)

X_R – Sólidos suspendidos volátiles en la corriente de retorno (g/m^3)

Se dice, por ejemplo, que la relación R/Q debe ser de $0,75 \div 1,5$ en aireación extendida y de $0,25 \div 0,5$ en procesos convencionales. [10, 60, 64, 67]

- ✓ **Índice Volumétrico del Lodo (IVL):** Da una medida del grado de sedimentación del lodo. Se determina realizando una prueba en probeta y es el volumen en ml ocupado por 1 g de lodo luego de 30 min. de sedimentación [40]. La expresión es la siguiente:

$$IVL = \frac{V_S / V_P}{SST_{Sist}} \quad (1.12)$$

donde: IVL – Índice Volumétrico del Lodo (l/mg)

V_S – Volumen sedimentado después de 30 min. de sedimentación (ml)

V_P – Volumen total de la solución (volumen de la probeta) (ml)

SST_{Sist} – Sólidos suspendidos totales a la salida de la cisterna de aireación (mg/l)

El valor recomendado es de alrededor de $2 \cdot 10^{-4} \text{ l}/\text{mg}$. Valores superiores pueden dificultar la separación sólido-líquido en la sedimentación final, ya que disminuye la velocidad de sedimentación trayendo consigo arrastre de sólidos en el efluente. [40]

En la lista anterior están incluidos los parámetros de diseño/operación más importantes de los sistemas de tratamiento biológico mediante lodos activados. Los mismos son extremadamente útiles para evaluar el desempeño (eficiencia) de estos sistemas de tratamiento, cualquiera que sea la variante o modificación instalada (epígrafe 1.3). A modo de referencia, en la tabla 1.3 se

ofrecen los valores más comunes de dichos parámetros para cada una de las variantes o modificaciones mencionadas en el epígrafe 1.3, a partir de los criterios y recomendaciones encontrados en la bibliografía consultada [10, 23, 50].

Tabla 1.3: Algunos de los parámetros de diseño/operación de los sistemas biológicos mediante lodos activados.

Variante	θ_x (días)	A/M (kg _{DBO} / kg _{SSVLM} -día)	Bv (kg _{DBO} / m ³ -día)	SSLM (kg/m ³)	θ (horas)	Qr/Qa
Convencional	5÷15	0,20÷0,40	0,3÷0,6	1,5÷3,0	4,0÷8,0	0,25÷0,50
Aireación gradual	5÷15	0,20÷0,40	0,3÷0,6	1,5÷3,0	4,0÷8,0	0,25÷0,50
Aireación por aliment. Escalonada	5÷15	0,20÷0,40	0,6÷1,0	2,0÷3,5	3,0÷5,0	0,25÷0,75
Reactor de mezcla completa	5÷15	0,20÷0,60	0,8÷2,0	3,0÷6,0	3,0÷5,0	0,25÷1,00
Estabilización-Contacto	5÷15	0,20÷0,60	1,0÷1,2	(1,0÷3,0) ¹ (4,0÷10,0) ²	(0,5÷1,0) ¹ (3,0÷6,0) ²	0,25÷1,00
Proceso Kraus	5÷15	0,30÷0,80	0,6÷1,6	2,0÷3,0	4,0÷8,0	0,50÷1,00
Aireación de alta velocidad	5÷10	0,40÷1,50	0,6÷1,6	4,0÷10,0	0,5÷2,0	1,00÷1,50
Aireación prolongada	20÷30	0,05÷0,15	0,1÷0,4	3,0÷6,0	18,0-36,0	0,75÷1,50
Sistemas de oxígeno puro	8÷20	0,25÷1,00	1,6÷3,3	6,0÷8,0	1,0÷3,0	0,25÷0,50
Aireación modificada	0,2÷0,5	1,50÷5,00	1,2÷2,4	0,2÷0,5	1,5÷3,0	0,05÷0,75

(1) Unidad de contacto (2) Unidad de estabilización de sólidos

1.8 Conclusiones parciales

1. Los parámetros más importantes a considerar para una adecuada caracterización de las aguas residuales textiles son: el pH, los contenidos de sólidos, materia orgánica, nitrógeno y fósforo, el OD, el contenido de grasas (n-hexano) y la conductividad.
2. La efectividad de la depuración biológica mediante lodos activados está estrechamente relacionada con la cantidad de oxígeno suministrado a los microorganismos, siendo el OD un indicador apropiado para evaluar la eficiencia de la transferencia de O₂ y por tanto, de los procesos (sistemas) de aireación.
3. La composición microbiológica de un lodo activado que opera en condiciones normales deberá incluir, básicamente: **Zoogloeas, Pseudomonas, Achromobacter, Xocardia, Alcaligenes, Arthrobacter, Bacillus, Nitrosomonas, Nitrobacter, Rhodospirillum** y/o **Rhodobacter**, entre otras bacterias; también: **Paramecium, Vorticella, Aspidisca**,

Euplotes, Pleuromonas, Amoeba, Lecane, Philodina y/o ***Notommata***. El exceso de microorganismos filamentosos afectará la eficiencia del proceso.

4. Son diversos los parámetros que permiten caracterizar el desempeño (eficiencia) de un sistema de lodos activados. Los más importantes son: Relación alimentos-microorganismos, tiempo de residencia medio celular y de retención hidráulica del líquido, sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado, requerimiento de oxígeno, IVL y flujo de reciclaje.

Capítulo 2.

Estado actual del Sistema de Lodos Activados de la Empresa textil “Desembarco del Granma”

2.1 Generalidades

La Planta de Tratamiento de Residuales de la Empresa textil de Santa Clara fue concebida para operar con dos (2) líneas o procesos: un tratamiento químico de oxidación-reducción (sistema de reacción) y uno biológico (lodos activados), con capacidades de tratamiento de 900 y 10 100 m³/día, respectivamente. En la actualidad, sin embargo, el primero de ellos no se efectúa, por considerarse innecesario al eliminarse los tintes reactivos que se utilizaban en la empresa; como consecuencia, la DQO del afluente del sistema de lodos activados se ha visto alterada (sólo se realiza la homogenización y ajuste de pH previo a dicho tratamiento), afectando la biodegradabilidad del residual y por tanto, el desempeño del sistema.

Por otro lado, la drástica reducción del caudal de aguas a tratar (actualmente de unos 2 000 m³/día) y de la DBO₅ del mismo, así como las continuas fluctuaciones que en ambos provoca la inestabilidad de producción en la entidad, entre otras causales, han propiciado un tiempo de retención en la cisterna de aireación mucho mayor que el considerado por diseño. Ello, unido a la implantación de un programa de ahorro de energía en la planta que comprende la reducción de la velocidad de trabajo de los aireadores en casi un 50% y su operación con períodos de trabajo y de paradas (en horarios ‘picos’ y fines de semanas), así como al deficiente control del lodo en el sistema, han conducido al deterioro paulatino de los lodos y una operación cada vez más ineficiente del sistema, que adolece de incapacidad para asimilar dichas variaciones y está completamente sobredimensionado para las condiciones actuales.

El presente capítulo está dedicado, por tanto, a la caracterización de las aguas residuales de la Empresa textil "Desembarco del Granma" y a la evaluación del grado de deterioro actual de los lodos activados de dicha empresa. En el primer caso, a partir de análisis experimentales apropiados; en el segundo, mediante la valoración de la microbiología del lodo y el recálculo de los parámetros de diseño para las nuevas condiciones de operación del sistema.

2.2 Breve descripción del flujo tecnológico de la Planta de Tratamiento

A la Planta llegan, principalmente, líquidos residuales procedentes de los procesos de blanqueo y preparación de tejeduría, los que traen diversos productos químicos, tales como: almidones, sosa cáustica y peróxido de hidrógeno, entre otros; así como una gran cantidad de sustancias orgánicas, como los tintes tintas dispersos y los pigmentos que son usados en los talleres de teñido, acabado y estampado.

A su llegada al sistema, el residual pasa a través de unas pantallas de barras que eliminan las grandes inclusiones que éste trae consigo; posteriormente, y luego de controlado su flujo con un medidor "Parshall Flume No 2", va a la cisterna de segundo ajuste para su homogenización, de donde es bombeado por las bombas de segundo ajuste hacia la cisterna de neutralización, en la que se controla su pH (6÷7) con ácido sulfúrico (H_2SO_4), para caer por gravedad dentro de la cisterna de aireación. En esta última, se mezcla con el lodo activado procedente de la cisterna de primera sedimentación, requiriéndose el abasto de oxígeno mediante aireadores para el consumo de los microorganismos del lodo, los que digieren gran parte de la materia orgánica del líquido tratado; a la vez, se suministran nitrógeno y fósforo en forma de hidróxido de amonio (NH_4OH) al 30% y ácido fosfórico (H_3PO_4) al 16%, respectivamente, usados como nutrientes para dichos microorganismos.

El líquido mezcla pasa por gravedad a la cisterna de primera sedimentación, donde se separan los sólidos (flóculos) del licor. Estos sólidos sedimentados, como se ha dicho, son devueltos por las bombas de retorno de lodo a la cisterna de aireación, después de pasar por un medidor de flujo para mantener la concentración de sólidos requerida en aquella; el exceso de lodo (si

existiera) es bombeado por las bombas de drenaje hacia el espesador. Por su parte, el sobrenadante es conducido, también por gravedad, a la cisterna de mezcla, en la que se le adiciona sulfato de aluminio ($Al_2SO_4)_3$ para formar flóculos finos que aumentaran su tamaño en la cisterna de coagulación mediante la adición de polímeros como coagulante. Ambas cisternas poseen agitadores que favorecen el proceso de formación de flóculos.

Luego, el residual sufre una nueva sedimentación, en la cisterna de segunda sedimentación. El sobrenadante es descargado como agua residual tratada al exterior de la empresa, en tanto que el sedimento se conduce por las bombas de drenaje de lodo hacia el espesador.

En el espesador se separa nuevamente la fase sólida de la líquida. El sobrenadante pasa por gravedad a la cisterna de segundo ajuste para ser reprocesado y el lodo concentrado se transporta, mediante las bombas de transferencia, al patio de secado, para su secado celular a través de diversas capas de arena y grava que posee un lecho como medio filtrante, hasta convertirse en una torta seca de 60 % de humedad y un espesor de 31 mm.

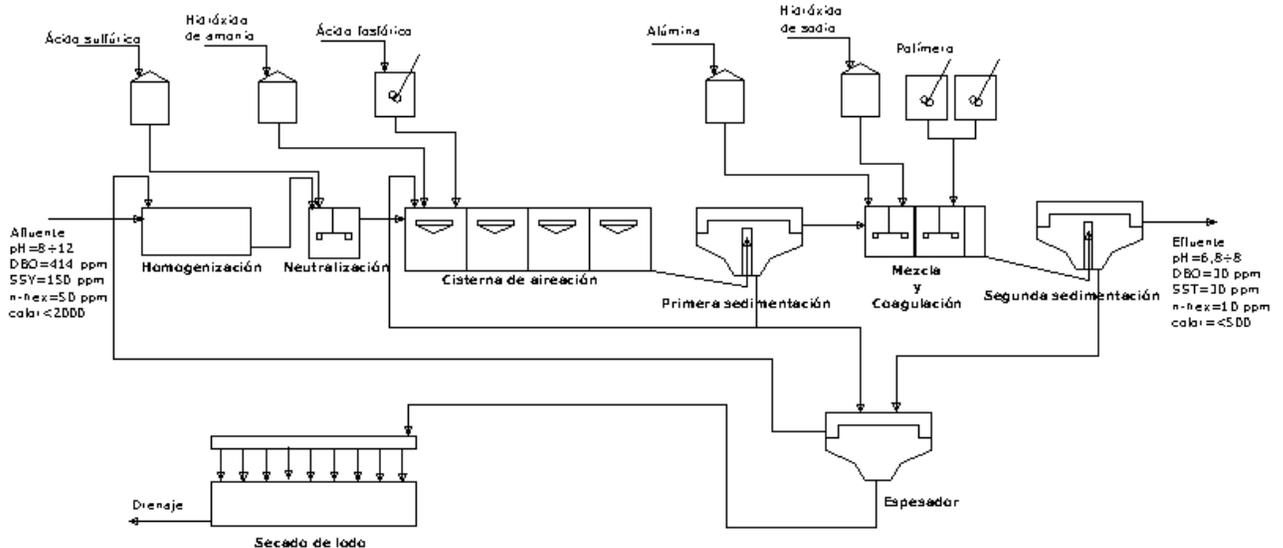


Figura 2.1: Diagrama de flujo de la Planta de Tratamiento de Residuales de la Empresa textil "Desembarco del Granma", de Santa Clara.

Como resultado de todo lo anterior, se obtiene un residual depurado cuyos parámetros de vertimiento deben corresponderse con los mostrados en la tabla 2.1 y lodos que se emplean, después de un tratamiento específico, como residuos sólidos. (figura 2.1)

Tabla 2.1: Características físico-químicas del residual (de acuerdo a criterios de diseño).

Parámetros	U.M.	Afluente a línea de lodo activado	Efluente del sistema
pH	-	8÷12	6,5÷8
DBO	mg/l	5÷400	30
SST	mg/l	3÷300	30
n-Hexano	mg/l	1÷110	10
Color	Unidades	5÷1 750	500 máx.

2.3 Caracterización de las aguas residuales de la Empresa

Como paso inicial para a la evaluación de su sistema de lodos activados, se caracterizan las aguas residuales de la Empresa textil. Los parámetros tomados en cuenta son los mencionados en la primera conclusión parcial del capítulo anterior y los procedimientos analíticos usados, así como la simbología y unidades de medición, se corresponden con lo establecido en “*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*” (1995) [75], de **Water Pollution Control Federation**.

Se caracterizan tanto el afluente como el efluente del sistema, tomándose muestras de residual a la entrada del tanque de aireación (afluente) y a la salida de la Planta (efluente).

En la tabla 2.2 están resumidas las características físico-químicas de estas aguas, promediadas a partir de las mediciones realizadas durante cinco (5) meses de trabajo de la Planta. De acuerdo con los valores de la misma, parámetros como el pH, la conductividad eléctrica, el contenido de grasas (n-Hexano) y de sólidos sedimentables, y la temperatura, no presentan alteraciones con respecto a los valores normados, encontrándose en los rangos establecidos tanto para el efluente como para el afluente y no afectando, por consiguiente, el desarrollo del proceso. Los restantes, sin embargo, muestran algún tipo de anomalía que tiende a favorecer o perjudicar el tratamiento, aún cuando algunos, como la DBO₅ y el nitrógeno total, por ejemplo, cumplen con las restricciones, sobre todo a la salida (efluente).

En el caso de la DBO₅, cuya tendencia en los últimos meses ha sido a disminuir, según el criterio de los especialistas de la propia empresa, su valor en el afluente es de 124 (100÷148)

Tabla 2.2: Caracterización del residual afluente y efluente.

Parámetros	U. M.	Valor promedio			
		Entrada a la Planta		Salida de la Planta	
		Valor real	Según norma	Valor real	Según norma
pH	-	10,20	8÷12	7,90	6÷9
Conduct. Eléctrica	us/cm ²	1 081,00		1 550,00	2 000
DQO de reflujo	mg/l	386,10		100,00	90
DBO ₅	mg/l	124,00	5÷400	5,95	30
Nitrógeno total	mg/l	62,00		3,00	10
SST	mg/l	40,00	3÷300	32,00	30
SSV	mg/l	7,00	-	19,00	-
SSF	mg/l	33,00	-	13,00	-
Fósforo total	mg/l	0,84		0,22	5
n-Hexano	mg/l	7,65	1÷110	4,60	10
Color	Unidades	266,60	5÷1 750	>350,00	500 máx
Temperatura	°C	26,50	40 máx.	26,00	40 máx
Sólidos sedimentables	ml/l			0,10	2

mg/l, que aunque está dentro del rango normado, es extremadamente pequeño comparado con los valores de DQO de éste, afectando la biodegradabilidad del residual, la carga volumétrica del sistema y la relación alimentos/microorganismos en la cisterna de aireación, entre otros indicadores. En el efluente, por su parte, los valores de este parámetro cumplen a cabalidad con las normativas establecidas (80,2% inferior al límite establecido).

Las principales alteraciones en la DQO del residual no se aprecian en la tabla 2.2, ya que los valores de la misma contenidos en ella son promediados, aunque su valor en el efluente (111% del normado) evidencia implicaciones desfavorables para el cuerpo receptor y una aparente incapacidad del sistema para removerla hasta los niveles requeridos. Tanto a la entrada como a la salida de la Planta, la DQO es muy inestable, lo que provoca variaciones significativas del grado de biodegradabilidad del residual y pone en dudas, en ocasiones, lo apropiado del tipo de tratamiento usado; la DBO₅ tan baja en el afluente hace aún más crítico este fenómeno.

La inestabilidad de la DQO tiene su génesis en la inconsistencia productiva de la fábrica, cuyas áreas productivas, algunas generadoras de materia orgánica biodegradable y otras no, trabajan con niveles de producción muy fluctuantes y desiguales entre sí, e incluso con períodos de

paradas por diversos motivos. Esta es también, en cierto modo, unida a la salida de operación de algunas líneas productivas, la causa fundamental de la disminución de la DBO_5 con respecto a los niveles de DQO.

En cuanto al contenido de nitrógeno, los 62 mg/l presentes en el afluente, comparados con las necesidades de los microorganismos (5 mg/l), representan un beneficio para el proceso, pues se garantizan dichas necesidades sin que haya que suministrarlo al residual. El exceso se debe a la presencia de compuestos nitrogenados procedentes de la fábrica, los que son degradados sin dificultad por los microorganismos al punto de que, en el efluente, se alcanza un 70% de esta sustancia por debajo del límite establecido.

El contenido de fósforo total, por el contrario, se encuentra por debajo de los valores máximos establecidos tanto a la entrada como a la salida de la Planta. Ello, por supuesto, es positivo en el caso del efluente, pero implica la necesidad de adicionarlo al afluente en cantidades suficientes para alcanzar un balance nutricional adecuado (1 mg/l de P).

Por último, los sólidos suspendidos en el afluente están bajos, si bien se encuentran dentro de los límites establecidos. En el efluente, sin embargo, superan en un 6,67% el límite normado (aunque son inferiores, claro está, a los valores de entrada), lo que evidencia un pobre nivel de remoción de los mismos, dado por la presencia de compuestos no biodegradables en el residual y/o la ineficiente operación del sistema. Esta alteración en los niveles de sólidos suspendidos del efluente lo hacen inadecuado para su vertimiento al cuerpo receptor.

A partir de los valores expuestos en la tabla 2.2, se pueden determinar los porcentajes de remoción para los parámetros más importantes. Los resultados de este análisis se resumen de forma gráfica en la figura 2.2.

El porcentaje de remoción elevado de la DBO_5 (95,16% como promedio) parece ilustrar un proceso de depuración altamente eficiente. Sin embargo, el mismo está dado más bien por el poco caudal a tratar y la elevada capacidad de tratamiento de la Planta, lo que se traduce en un tiempo de residencia hidráulico mayor, propiciando que los microorganismos estén más tiempo en contacto con la materia orgánica, que siendo tan poca, es degradada casi en su

totalidad por ellos. Una vez agotada la materia biodegradable, los microorganismos comienzan a alimentarse a expensas unos de otros. Inferiores al anterior son los porcentajes de remoción de la DQO (74,1%) y el contenido de fósforo total (78%).

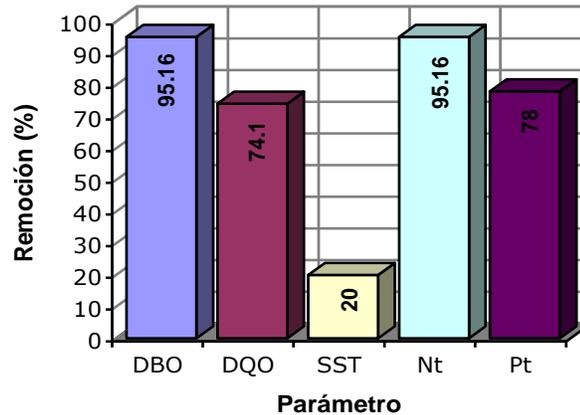


Figura 2.2: Porcentajes de remoción de los parámetros más importantes.

El parámetro más crítico en cuanto a valores de remoción es el contenido de sólidos totales (20% apenas), en tanto que el mayor porcentaje de remoción corresponde al contenido de nitrógeno total (95,2%). Debe recordarse que luego de la primera sedimentación se realiza un tratamiento de coagulación-floculación que ayuda al mejoramiento de la eficacia del sistema en general.

2.4 Valoración de la microbiología del lodo

A partir de la tercera conclusión parcial a que se arribó en el capítulo inicial de este trabajo, que establece o refiere la composición microbiológica típica de un sistema de lodos activados que trabaja en condiciones normales, se decide analizar la microbiología de los lodos activados de la empresa en cuestión, como vía para evaluar el estado operacional de dicho sistema de tratamiento. Para ello, se toman varias muestras de lodo en distintos puntos del tanque de aireación y se identifican y/o caracterizan los microorganismos presentes en ellas.

Para determinar el número de bacterias y hongos, se toma 1 ml de muestra y se preparan diluciones desde 1:10 hasta $1 \cdot 10^{-6}$, se siembran en medios de *agar* y se incuban a 37 °C durante 24÷48 horas; para el conteo de colonias de hongos, se siembran en *agar saburoud*,

incubándose a temperatura ambiente durante 120 horas. En la caracterización e identificación de los hongos filamentosos, se analizan sus características culturales y morfológicas, usándose los criterios taxonómicos establecidos por los manuales de clasificación disponibles: *Barnett y Hunter* (1987) y *Castañeda* (2001). Los caracteres culturales considerados fueron: *Grado de crecimiento, color de la colonia, textura superficial y color del reverso*.

La determinación de los protozoos y rotíferos, por su parte, se realiza mediante examen al microscópico, determinándose el número de individuos por ml de agua. También se observaron directamente tanto el micelio fungoso como las estructuras de reproducción en preparaciones microscópicas con lactofenol.

En todas las observaciones se emplea el microscopio óptico **Olympus** (aumento de 400x).

Se aprecian números de bacterias y hongos de $2 \cdot 10^5$ y $9 \cdot 10^4$ microorganismos por ml, respectivamente. Las bacterias presentan forma de cocobacilos, arriñonadas, Gram negativas, no esporuladas, del género **Acinetobacter**; específicamente las especies **A. haemolyticus**, **Acinetobacter baumannii**, e **Iwoffii**, las que pertenecen a las de tipo filamentosas. En el caso de los hongos, se presenta un crecimiento abundante de micelios color naranja, con textura superficial flocosa y reverso blanco-amarillo, identificados como: **Chrysonilia sitophila**, que pertenece también a los filamentosos.

Dentro de los protozoos, se hallan: **Golpoda cuculus**, un ciliado, **Euglypha tuberculada**, tipo de **testacea (risopodo)**, y **Aspidisca**, pequeño ciliado con aspecto de crustáceo que suele encontrarse en lodos activados adultos. En cuanto a los rotíferos, no se observa ninguno: Generalmente viven en lodos muy eficientes.

Los microorganismos encontrados al analizar la composición de los lodos activados de la Planta de Tratamiento de Residuales de la Empresa textil no sólo difieren de los mencionados en el capítulo 1 (lo que demuestra que se ha producido un cambio en su microbiología), sino que demuestran un grado considerable de deterioro de los mismos. La inmensa mayoría de ellos son de tipo filamentosos, lo que conlleva a la ocurrencia del efecto *bulking* (apreciable en la referida entidad) y por consiguiente, a mayores dificultades en la separación sólido-líquido en

el clarificador, que se traducen, por ejemplo, en la necesidad de un área de sedimentación mucho mayor [17, 40]. Al respecto, en el sedimentador (clarificador) de la empresa está presente el efecto "*sphaerotilus bulking*", que se manifiesta, generalmente, ante IVL elevados, efluentes claros y abundancia de microorganismos filamentosos [10, 67].

De acuerdo con el fenómeno anterior, según Bowen (1973) [13], los organismos filamentosos impiden la fácil sedimentación de los flóculos, pues se enlazan unos con otros a través de sus filamentos formando una especie de malla o filtro que limita el área de sedimentación, con la consiguiente disminución de la velocidad de la misma. Así, los flóculos están obligados a pasar por los orificios originados, lo que resulta mucho más trabajoso y por supuesto, les toma un mayor tiempo.

Por otro lado, la presencia de los protozoos *Aspidisca*, que sólo suelen desarrollarse en lodos adultos, denotan un tiempo de residencia medio celular muy elevado y por consiguiente, un lodo envejecido, lo que también se refleja a través de malos olores en la cisterna de aireación y una espuma excesiva de color café, propia de plantas de tratamiento que operan con bajo nivel de carga orgánica.

Como conclusión de lo antes expuesto, es evidente la necesidad, en primer lugar, de sustituir el lodo existente, y en segundo lugar, de identificar las causas que provocaron su deterioro y proponer soluciones al respecto. Vale aclarar que aunque su composición microbiológica actual no es la adecuada para un lodo activado, estos microorganismos también consumen materia orgánica biodegradable, lo que justifica los niveles de remoción de la materia orgánica a que se hizo referencia en el epígrafe precedente, considerando que la carga orgánica en el afluente es mucho menor que la establecida por diseño.

2.5 Recálculo de los parámetros de diseño/operación

Otro paso importante para evaluar el desempeño del sistema de lodos activados de la Empresa textil, es el recálculo de sus parámetros de diseño/operación. En este caso se consideran, básicamente, los parámetros mencionados en la cuarta conclusión parcial del capítulo inicial del

trabajo; a saber: Relación alimentos-microorganismos, tiempo de residencia medio celular y de retención hidráulica del líquido, sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado, necesidad (requerimiento) de oxígeno, IVL y flujo de reciclaje.

Consideraciones iniciales

El sistema de lodos activados en cuestión se diseñó para operar en las condiciones listadas a continuación. Debe recordarse, no obstante, que el caudal afluente (Q) y la DBO₅ son en estos momentos, como promedio, de apenas 2 000 m³/día y 100÷148 mg/l, respectivamente.

PARÁMETROS DE DISEÑO DEL SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS DE LA EMPRESA TEXTIL DE SANTA CLARA

V	7 890,00	m ³	Volumen del tanque de aireación.
Q	10 100,00	m ³ /d	Caudal afluente.
R/Q	0,45		Razón de recirculación.
θ	13,00	H	Tiempo de residencia hidráulico.
SSLM	4 000,00	mg/l	Concentración de sólidos suspendidos en la cisterna de aireación.
SSVLM	3 200,00	mg/l	Concentración de sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado.
A/M	0,13	kg DBO ₅ / kg SSVLM-día	Relación alimento microorganismos.
OD	(1,5÷4)	mg/l	Concentración de oxígeno disuelto en la cisterna de aireación.
Wsed	< 8·10 ⁻³	m/min	Velocidad de sedimentación
Fsed	1 018,00	m ²	Área de sedimentación.
IVL	200,00	ml/g	Índice volumétrico del lodo.
DBO ₅	414,00	mg/l	DBO ₅ del afluente.

Como paso previo indispensable para los cálculos, les fue solicitado al Laboratorio de Análisis de la propia planta de tratamiento y al Laboratorio de Higiene y Epidemiología Provincial (Villa Clara), la determinación de la concentración de sólidos suspendidos a muestras tomadas en diferentes puntos del sistema. Ambos análisis arrojaron resultados muy similares y están resumidos en la tabla 2.3, donde se aprecia una concentración de sólidos suspendidos volátiles en el punto 3 (SSVLM) menor que la de diseño, achacable al deterioro producido en el lodo por la gran inestabilidad de operación actual de la Planta (presencia de microorganismos no deseados, por ejemplo); los valores de la tabla 2.3 serán utilizados para efectuar los cálculos que se presentan en este epígrafe.

Tabla 2.3: Concentración de sólidos en diferentes puntos de análisis.

Parámetros	Muestras							
	1	2	3	4	5	6	7	8
SST (mg/l)	21	40	1 765	2 105	3 095	581	39	54
SSV (mg/l)	5	7	1 570	1 900	2 765	300	23	50
SSF (mg/l)	16	33	195	205	330	281	16	4
SS (mg/l)				950				

Donde: (1) Entrada al sistema. (2) Entrada al aireador. (3) Compartimento B (primer aireador). (4) Salida de los aireadores. (5) Corriente de retorno del lodo. (6) Salida de primera sedimentación. (7) Salida de segunda sedimentación. (8) Salida al espesador.

Igualmente se midieron los valores de pH y OD en los cuatro compartimentos de la cisterna de aireación, siguiendo las metodologías establecidas por "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" (1995) [75], de **Water Pollution Control Federation**. En la tabla 2.4 están resumidos los resultados de estas mediciones.

Tabla 2.4: Valores de pH y concentración de oxígeno disuelto (OD) en la cisterna de aireación.

Parámetro	U. M.	Según norma	Compartimentos			
			A	B	C	D
pH	-	6÷9	7,70	7,53	7,70	7,71
OD	mg/l	1,5÷4				
- Superficie			5,73	5,80	5,78	5,71
- Medio			5,55	5,54	5,63	5,63
- Fondo			5,48	5,45	5,51	5,57

Como se aprecia en la tabla anterior, el pH no presenta alteración alguna, ya que sus valores se encuentran dentro de los límites establecidos. El OD, por el contrario, cuyas mediciones se realizaron para una velocidad de rotación de los aireadores de 1 000 rpm., resulta elevado, dando lugar a una turbulencia excesiva que tiende a quebrantar los flóculos formados en el lodo, al tiempo que se convierte en un gasto de energía innecesario. Estas cantidades de OD se deben a la baja cantidad de materia orgánica del residual (DBO₅ muy por debajo de los 414 mg/l de diseño) y de microorganismos en el sistema.

En resumen, algunos de los datos más importantes a utilizar en los cálculos son:

$$V = 7\,890 \text{ m}^3 \quad (\text{por diseño})$$

$$R = 1\,312,5 \text{ m}^3/\text{día} \quad (\text{valor fijado en la Planta para el flujo de recirculación})$$

$Q = 2\,007,5 \text{ m}^3/\text{día}$	(flujo afluente promedio enero-mayo/2003)
$DBO_5 = 124 \text{ mg/l}$	(tabla 2.2; DBO_5 del afluente)
$DQO = 386,1 \text{ mg/l}$	(tabla 2.2; DQO del afluente)
$X = 1\,570 \text{ mg/l}$	(tabla 2.3; SSV_3 -- $SSVLM$)
$X_r = 2\,765 \text{ mg/l}$	(tabla 2.3; SSV_5)
$X_a = 7 \text{ mg/l}$	(tabla 2.3; SSV_2)
$X_e = 300 \text{ mg/l}$	(tabla 2.3; SSV_6)
$X_c = 1\,900 \text{ mg/l}$	(tabla 2.3; SSV_4)
$D_T = 0,3 \text{ m}$	(diámetro de las tuberías aireadores-sedimentadores)
$D_p = 0,05 \text{ m}$	(diámetro de la probeta)
$V_{sed} = 3\,563 \text{ m}^3$	(por diseño)

Otros datos también importantes serán mencionados según se haga uso de ellos.

Grado de biodegradabilidad del agua residual (GB)

$$GB = \frac{DBO_5}{DQO} \quad (2.1)$$

Como se ha reiterado, la DBO_5 ha disminuido paulatinamente hasta $100 \div 148 \text{ mg/l}$. La DQO , por su parte, es muy inestable, oscilando entre 273 y 763 mg/l ; su valor promediado es de $386,1 \text{ mg/l}$. Considerando los valores extremos de estos dos parámetros, se tiene que:

$$GB_{\min} = \frac{100}{763} \approx 0,131 \quad GB_{\max} = \frac{148}{273} \approx 0,542 \quad (2.2)$$

Estos resultados dan una idea, al menos en teoría, del intervalo en el que puede fluctuar GB , aunque es poco probable que las condiciones extremas se presenten (DBO_{\max} con DQO_{\min} y viceversa). Desde el punto de vista comparativo, por tanto, resulta más útil su valor calculado para $DBO_5 = 124 \text{ mg/l}$ y $DQO = 386,1 \text{ mg/l}$ (valores promediados).

$$GB_{\text{prom}} = \frac{124}{386,1} \approx 0,321 \quad (2.3)$$

Tiempo de residencia hidráulico del residual (θ)

Este parámetro se determina por la ecuación 1.8. Así, se tiene que:

$$\theta = \frac{V}{Q+R} = \frac{7890}{2007,5+1312,5} \approx 2,377 \text{ días} \approx 57,04 \text{ h} \quad (2.4)$$

Tiempo de residencia medio celular (θ_x)

Para determinar este valor, se utiliza la ecuación 1.9. En el caso específico que nos ocupa, sin embargo, $Q_w = 0$, puesto que no se extrae lodo en exceso de la primera sedimentación; esto implica que $Q_e = Q - Q_w = 2\,007,5 \text{ m}^3/\text{día}$.

$$\theta_x = \frac{V * X + G}{Q_e * X_e} \quad (2.5)$$

La cantidad de sólidos en las tuberías y el sedimentador (G), depende de los volúmenes de las tuberías. Las longitudes de diseño de las tuberías de retorno del lodo (l_{TR}) y de transporte del licor mezcla hacia el sedimentador (l_{TS}) son, respectivamente, 15 y 10 m. De acuerdo con estos valores:

$$V_{TR} = \frac{\pi * D_T^2}{4} * l_{TR} = \frac{\pi * 0,3^2}{4} * 15 \approx 1,06 \text{ m}^3$$

$$V_{TS} = \frac{\pi * D_T^2}{4} * l_{TS} = \frac{\pi * 0,3^2}{4} * 10 \approx 0,71 \text{ m}^3 \quad (2.6)$$

$$S_{TR} = V_{TR} * X_r = 1,06 * 2,765 \approx 2,931 \text{ kg}$$

$$S_{TS} = V_{TS} * X_c = 0,71 * 1,9 \approx 1,349 \text{ kg}$$

$$S_{Sed} = V_{Sed} * X_c = 3563 * 1,9 \approx 6769,7 \text{ kg} \quad (2.7)$$

Y la cantidad total de sólidos en las tuberías y el sedimentador:

$$G = 2,931 + 1,349 + 6769,7 \approx 6773,98 \text{ kg} \quad (2.8)$$

Así, el tiempo de residencia medio celular es:

$$\theta_x = \frac{7890 * 1,57 + 6773,98}{2007,5 * 0,3} \approx 31,82 \text{ días} \quad (2.9)$$

Factor de carga o Relación Alimentos-Microorganismos (A/M)

De acuerdo con la expresión 1.10, y tomando en consideración los valores extremos de la DBO_5 (según lo expuesto en el cálculo de GB), se tiene que:

$$A/M_{\text{mín}} = \frac{100 * 2007,5}{7890 * 1570} \approx 0,016 \text{ kg } DBO_5 / (\text{kg } SSVLM \cdot \text{día}) \quad (2.10)$$

$$A/M_{\text{máx}} = \frac{148 * 2007,5}{7890 * 1570} \approx 0,024 \text{ kg } DBO_5 / (\text{kg } SSVLM \cdot \text{día}) \quad (2.11)$$

De forma análoga a como se hizo para GB , se calcula el valor promediado de A/M , que en este caso es de $0,02 \text{ kg } DBO_5 / (\text{kg } SSVLM \cdot \text{día})$.

Carga volumétrica (B_v)

Este parámetro se puede calcular como:

$$B_v = \frac{DBO_5 * Q}{V} \quad (2.12)$$

El significado de los términos de la ecuación anterior ya ha sido referido. A partir de ésta, y considerando también los valores límites de la DBO_5 ($100 \div 148 \text{ mg/l}$), se obtiene que:

$$B_{v \text{ mín}} = \frac{100 * 2007,5}{7890} \approx 25,444 \text{ mg}/(\text{l} \cdot \text{día}) \approx 0,025 \text{ kg } DBO_5 / (\text{m}^3 \cdot \text{día}) \quad (2.13)$$

$$B_{v \text{ máx}} = \frac{148 * 2007,5}{7890} \approx 37,66 \text{ mg}/(\text{l} \cdot \text{día}) \approx 0,038 \text{ kg } DBO_5 / (\text{m}^3 \cdot \text{día}) \quad (2.14)$$

El valor promediado de este parámetros es: $0,0315 \text{ kg } DBO_5 / (\text{m}^3 \cdot \text{día})$.

Requerimiento teórico de oxígeno (K)

El cálculo del requerimiento teórico de oxígeno en la cisterna de aireación está basado en la siguiente expresión [23, 50]:

$$K = \frac{DBO_R}{f} - 1,42 * F_x \quad (2.15)$$

donde: DBO_R – DBO_5 removida en el tratamiento por lodos activados (kg/h)

f – Factor de corrección para la eficiencia de los aireadores

F_x – Cantidad de lodo en exceso extraído del sistema (kg/h). En este caso $F_x = 0$, pues, como se ha dicho, no se están obteniendo lodos en exceso.

La DBO_R se determina como:

$$DBO_R = Q * (DBO_{inicial} - DBO_{final}) \quad (2.16)$$

Para una DBO_5 del afluente de 124 mg/l (100÷148 mg/l) y una del efluente de 5,95 mg/l (tabla 2.2), se tiene que:

$$DBO_R = 2007,5 * (124 - 5,95) * 10^{-3} \approx 236,985 \text{ kg/día} \quad (2.17)$$

Este resultado, dividido por la cantidad de horas diarias en que afluye residual a la Planta (8 horas), arroja como resultado un promedio de DBO removida de 29,6 kg/h.

El cálculo del factor de corrección se realiza por la ecuación 1.4. La concentración de oxígeno saturado en agua fresca (C_s) es de 9,17 ppm, y la de saturación del oxígeno en agua residual (C_w), de 8,2 ppm (Díaz Betancourt, 1987 [23]). Así mismo, la concentración de saturación de oxígeno para ser mantenido en la aireación (C_L) es de 1,5 ppm (**Mitsubishi Corporation Toyobo Co.**, 1977 [40]). Por último, la temperatura ambiente durante el período analizado ha oscilado alrededor de los 28 °C.

$$f = 0,8 * \frac{8,2 - 1,5}{9,17} * 1,024^{(28-20)} \approx 0,707 \quad (2.18)$$

De acuerdo con todo lo anterior, el requerimiento teórico de oxígeno es:

$$K = \frac{29,6}{0,707} \approx 41,87 \text{ kg } O_2 / h \quad (2.19)$$

Cantidad de oxígeno suministrado por los aireadores

Se calcula a partir de la eficiencia y consumo de energía en la operación de los aireadores. Considerando la eficiencia de los mismos en condiciones ideales de operación como 1,8 kg O_2 /

$kW-h$ (epígrafe 1.4) y conociendo que el consumo de electricidad de los aireadores en las condiciones actuales de operación es de $20 \div 21 kW$, se tiene que:

$$Cant.O_2 = 4 * 0,707 * 1,8 * 20 \approx 101,808 \text{ kg } O_2 / h \quad (2.20)$$

Relación de reflujos (R/Q)

En las condiciones actuales de funcionamiento de la planta,

$$R/Q = \frac{1312,5}{2007,5} \approx 0,654 \quad (2.21)$$

El flujo de retorno debía ser, según la ecuación 1.11, de:

$$R = \frac{2007,5 * (1570 - 7)}{2765 - 1570} \approx 2625,71 \text{ m}^3/\text{día} \quad (2.22)$$

Índice Volumétrico del Lodo (IVL)

Este cálculo está basado en el uso de la expresión 1.12. Los términos que intervienen en dicha ecuación se determinan mediante una prueba de sedimentación en un cono Inhoff; esto es:

$$V_s = 475 \text{ ml (Castañeda, 2003 [15])}$$

$$V_p = 500 \text{ ml}$$

$$SST_{sist} = 2105 \text{ mg/l (tabla 2.3)}$$

O sea que:

$$IVL = \frac{475/500}{2105} * 10^6 \approx 451,31 \text{ ml/g} \quad (2.23)$$

Análisis de los resultados

En la tabla 2.5 están resumidos los principales resultados de los cálculos anteriores, así como los valores de diseño de cada parámetro analizado. También están incluidos los valores típicos o más frecuentes reportados en la bibliografía especializada de dichos parámetros; esto último, tomando el proceso de aireación extendida como variante de comparación (epígrafe 1.3).

Tabla 2.5: Resultados de la evaluación de los parámetros de diseño/operación del Sistema de Lodos Activados de la Empresa textil.

Parámetros	Valor real (2 000 m ³ /día)	Valor de diseño	Reportado en la bibliografía
SSVLM (mg/l)	1 570	3 200	3 000÷6 000
OD (mg/l)	5,45÷5,80	1,5÷4,0	
Grado de biodegradabilidad	0,131÷0,542		0,4 mín.
θ (h)	57,04	13	18÷36
θ_x (día)	31,82		20÷30
A/M (kg DBO ₅ / kg SSVLM-día)	0,016÷0,024	0,13	0,05÷0,15
Bv (kg DBO ₅ / m ³ -día)	0,025÷0,038		0,1÷0,6
K (Kg O ₂ / h)	41,87	(101,808) ¹	
R/Q	0,654	0,45	0,75÷1,5
IVL (ml/g)	451,31	200	-

A partir de la tabla anterior, se obtiene la figura 2.3, en la que se grafican las diferencias entre los valores calculados y los de diseño para cada parámetro. Dichas diferencias se calculan a partir de valores promediados y en los casos en que no se conocen las magnitudes de diseño, se toman como elementos de comparación los valores típicos reportados en la literatura.

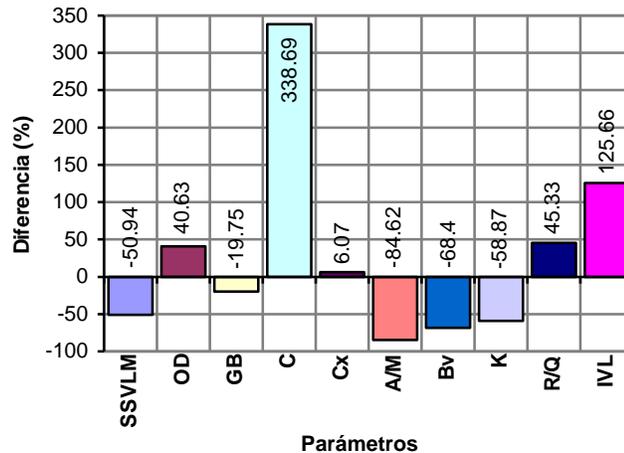


Figura 2.3: Resultados de la evaluación de los parámetros de diseño/operación del Sistema de Lodos Activados de la Empresa textil.

Como puede apreciarse, el grado de biodegradabilidad del lodo (GB) se mueve en un intervalo bastante amplio. Aunque su valor promediado es 0,321 (expresión 2.3), lo que permite seguir empleando el método biológico de tratamiento, éste resulta casi un 20% inferior al mínimo

¹ Cantidad de oxígeno suministrado por los cuatro (4) aireadores de la Planta.

recomendado para un proceso de lodos activados, si bien, y sólo en casos extremos, su valor podría ser superior a dicho límite (tabla 2.5). Este aspecto es de extrema importancia, ya que incide directamente en la calidad del proceso de tratamiento, provocando desajustes en cuanto a la alimentación de los microorganismos y bajos niveles de degradación de la materia orgánica (la mayor parte es no biodegradable), lo que hace cuestionable la conveniencia del tipo de tratamiento actualmente utilizado en la empresa.

Estas fluctuaciones de *GB* se deben a las drásticas reducciones sufridas por la DBO_5 del residual y los constantes altibajos de la DQO (epígrafe 2.3).

En cuanto al tiempo de residencia hidráulico y de residencia medio celular, ambos están por encima de los valores recomendados para procesos de aireación extendida (variante más cercana a las condiciones de la Planta). En el primer caso la diferencia es bastante pronunciada (58,44% con respecto al valor extremo superior del intervalo) y su génesis se asocia al hecho de que el caudal actual de agua a tratar es cinco (5) veces menor que el de diseño (planta sobredimensionada), aspecto que justifica los altos niveles de remoción de DBO_5 a pesar de la ineficiencia de operación de dicha planta de tratamiento; la diferencia con respecto al valor de diseño es nada menos que de un 340% (figura 2.3).

En el caso del tiempo de residencia medio celular, por su parte, su elevado valor (6% por encima del máximo recomendado) estriba en que todo el lodo decantado durante la primera sedimentación se usa para mantener la concentración de microorganismos en la cisterna de aireación, la que se afecta por el constante intercambio de éstos entre las fases endógena y de crecimiento, debido a la escasez de materia orgánica biodegradable en el afluente y a la disminución de su caudal, lo que implica la no existencia de lodos en exceso.

Todo esto, unido al bajo valor de *GB*, trae consigo serias afectaciones en la microbiología del sistema, que implica la estabilización del lodo a expensas de la muerte celular y la extinción de los microorganismos necesarios en el sistema, así como la proliferación de otros que se alimentan del material biológico muerto, lo que implica el deterioro del lodo, el surgimiento de microorganismos filamentosos, y por tanto, problemas en la sedimentación; el elevado tiempo

de residencia medio celular, además, se traduce en un envejecimiento del lodo. Lo descrito concuerda con los resultados alcanzados en el análisis de la microbiología del lodo (epígrafe 2.4) y con el valor del Índice Volumétrico del Lodo (*IVL*), que difiere del de diseño en un 126% (figura 2.3).

El factor de carga (*A/M*) es otro parámetro que dista bastante de los valores de diseño (85% inferior), debido al elevado tiempo de retención hidráulica del residual y la poca concentración de materia orgánica en el mismo. Sus valores tan pequeños están en correspondencia con los problemas y afectaciones ya señalados e influyen en la pérdida de las características de fácil sedimentación del lodo [29, 67]. Como promedio, *A/M* es un 60% menor que el límite inferior recomendado para dicho parámetro en procesos de aireación extendida (tabla 2.5).

Igualmente baja resulta la carga volumétrica del sistema (*B_v*), cuyo valor promediado está un 68% por debajo del límite inferior recomendado para aireación extendida (figura 2.3). Estos valores tan bajos se deben al pequeño flujo de residual afluyente y su baja concentración de materia orgánica, en contradicción con la capacidad del tanque de aireación.

Referido a la cantidad de OD en el licor mezcla, su valor es un 41% superior al límite máximo permitido por diseño (figura 2.3). Ello es perfectamente entendible, si se compara la cantidad de O₂ que suministran los cuatro (4) aireadores (101,808 kg O₂ / h) con el requerido por los microorganismos para oxidar la materia orgánica (41,87 kg O₂ / h); este último, inferior al primero en un 60%, debido, fundamentalmente, a la escasa materia orgánica del residual y por tanto, a la "poca" cantidad de microorganismos en el tanque de aireación. El exceso de aireación (agitación) representa un consumo innecesario de energía eléctrica, a la vez que propicia una turbulencia excesiva que tiende a quebrantar los flóculos que se van formando en el lodo.

Por otra parte, la razón de recirculación del sistema calculada es un 45% mayor que el valor de diseño y un 12,8% inferior al recomendado para procesos de aireación extendida (tabla 2.5), por lo que debe ser un problema a analizar en etapas posteriores de la investigación.

Finalmente, en la figura 2.3 se observa una disminución de la cantidad de sólidos suspendidos volátiles en el licor mezcla (*SSVLM*) en más del 50% con respecto al valor de diseño, lo que se asocia a las drásticas reducciones de la DBO_5 del residual, su bajo caudal, y demás aspectos abordados que afectan la proliferación de los microorganismos.

Todas las valoraciones realizadas denotan un funcionamiento deficiente del sistema de lodos activados estudiado, así como un sobredimensionamiento de la Planta para las condiciones actuales de la Empresa textil. Ello implica la búsqueda de alternativas que permitan una mejor adecuación de dicha planta a los caudales de aguas a depurar y condiciones de trabajo menos nocivas para la vida de los lodos.

2.6 Conclusiones parciales

1. El afluente de la Planta de Tratamiento de Residuales de la Empresa textil "Desembarco del Granma" está caracterizado por una DBO_5 relativamente baja (100÷148 mg/l) y por tanto, su biodegradabilidad suele ser muy pequeña para la depuración mediante lodos activados; los parámetros del efluente, no obstante, se ajustan a las normas de vertimiento, salvo la DQO y los SST (11,11 y 6,67% por encima, respectivamente).
2. Aunque los porcentajes de remoción de las distintas fuentes contaminantes son en general elevados, los valores recalculados de los parámetros de diseño/operación evidencian un mal funcionamiento del sistema y el sobredimensionamiento del mismo para las necesidades actuales de la empresa (caudal afluente pequeño y con baja DBO_5).
3. La microbiología del lodo está completamente alterada, con predominio de microorganismos filamentosos que son capaces de consumir la escasa materia orgánica biodegradable del residual, pero provocan grandes dificultades de sedimentación; además, la cantidad de O_2 suministrada por los aireadores es más de dos (2) veces la requerida por éstos, lo que implica un gasto innecesario de energía eléctrica y crea dificultades de operación.

Capítulo 3.

Análisis de alternativas para adecuar el sistema objeto de estudio a las necesidades actuales de la Empresa textil

3.1 Generalidades

Como quedó expresado en la segunda conclusión parcial del capítulo 1, la eficiencia de la depuración biológica mediante lodos activados está estrechamente relacionada con la cantidad de oxígeno suministrada a los microorganismos; en la propia conclusión se afirma que el OD es un indicador apropiado para evaluar la eficiencia de los procesos de aireación. En este sentido, de acuerdo con la cuarta conclusión parcial del capítulo anterior, la cantidad de oxígeno suministrada por los aireadores de la planta de tratamiento analizada supera en más de dos (2) veces la requerida por los microorganismos para degradar la materia orgánica biodegradable del residual, originando gastos innecesarios de energía eléctrica y dificultades de operación del sistema.

La solución dada a esta problemática por los especialistas de la Empresa textil "Desembarco del Granma", como se ha dicho, incluye la disminución de la velocidad de trabajo de los aireadores en casi un 50%, variante que ha permitido reducir los consumos energéticos asociados a la operación de los mismos, pero ha implicado anomalías en el funcionamiento del sistema de tratamiento (incremento del deterioro del lodo, ocurrencia de sedimentación en la cisterna de aireación, etcétera).

En el presente capítulo se analizan dos (2) posibles variantes para adecuar el Sistema de Lodos Activados de la referida entidad a las necesidades actuales de la misma. La primera de ellas

está relacionada con la solución antes mencionada (disminución de la velocidad de trabajo de los aireadores) y la segunda, consiste en realizar un redimensionamiento del sistema de aireación.

3.2 Variante 1: Disminución de la velocidad de trabajo de los aireadores

A continuación se estudia cómo influye la velocidad de trabajo de los aireadores en la cantidad de OD y sólidos suspendidos en el licor mezcla (SSLM) del tanque de aireación, a partir de mediciones directas de estos indicadores realizadas para diferentes condiciones (velocidades) de aireación.

Teniendo en cuenta que estos equipos pueden actualmente trabajar sólo en el intervalo de velocidades comprendido entre 700 y 1 200 r.p.m., el estudio se realiza para las siguientes velocidades: 800, 900 y 1 000 r.p.m. Las mediciones del OD se realizan en los puntos más alejados del aireador (esquinas), donde se presentan las condiciones de aireación menos favorables (figura 3.1); en cada punto, tres (3) en total, se toman muestras de licor tanto en la superficie como a una profundidad media de la cisterna de aireación, obteniéndose los resultados que se ofrecen en la tabla 3.1.

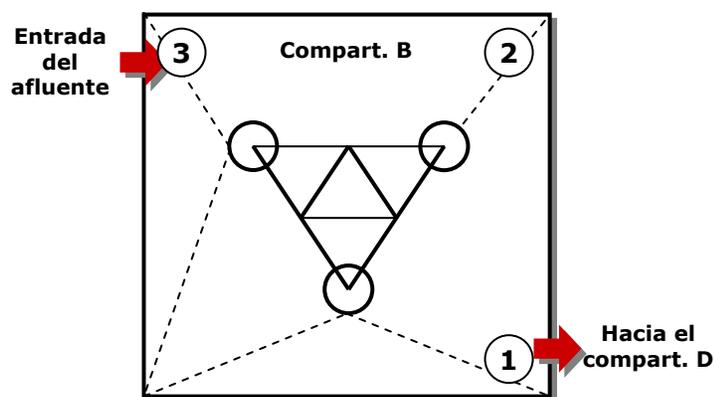


Figura 3.1: Representación esquemática de los puntos de muestreo seleccionados.

En el caso de los SSLM, los valores dados en la tabla 3.1 han sido promediados a partir de los reportes ofrecidos por el Laboratorio de Análisis de la Planta de Tratamiento de Residuales de la propia Empresa textil.

Tabla 3.1: Cantidades de OD y SSLM para distintas velocidades de trabajo de los aireadores del Sistema de Lodos Activados de la Empresa textil "Desembarco del Granma".

Velocidad (r.p.m.)	OD (mg/l)				SSLM (mg/l)
	Prof.	Med. 1	Med. 2	Med. 3	
1 000	Superf.	5,73	5,53	5,48	1 765
	Media	5,60	5,45	5,37	
900	Superf.	3,64	3,58	3,37	975
	Media	3,57	3,45	3,28	
800	Superf.	2,00	1,98	1,95	475
	Media	1,89	1,77	1,74	

El procesamiento estadístico de los valores contenidos en la tabla anterior, realizado con la ayuda del paquete estadístico *STATGRAPHICS PLUS Versión 4.1 para Windows* (1999), de **Statistical Graphics Co.**, muestra, como tendencia, los comportamientos descritos en las figuras 3.2 y 3.3.

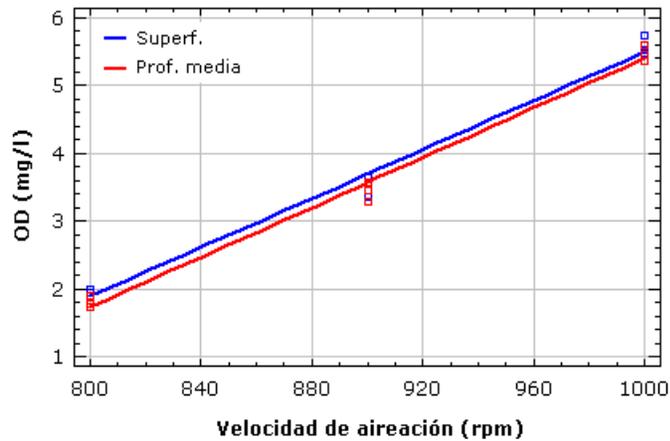


Figura 3.2: Variación de la cantidad de OD en el tanque de aireación del Sistema de Lodos Activados de la Empresa textil, para diferentes velocidades.

En la figura 3.2 se aprecia una disminución de la cantidad de OD en la cisterna de aireación a medida que se reduce la velocidad de trabajo de los aireadores, lo que resulta beneficioso si se toma en cuenta que el requerimiento teórico de oxígeno de los microorganismos (41,87 kg/h) es mucho menor que la cantidad de éste suministrado por los aireadores (101,81 kg/h). La dependencia entre estos dos parámetros es prácticamente lineal ($R^2 \approx 99\%$), como puede comprobarse en los resultados del análisis estadístico que se ofrecen en el anexo 4.

De acuerdo con los datos de diseño de la Planta, la cantidad de OD en la cisterna de aireación debe ser $1,5 \div 4,0$ mg/l, por lo que sería más apropiado operar los aireadores a velocidades inferiores a 920 r.p.m. (figura 3.2).

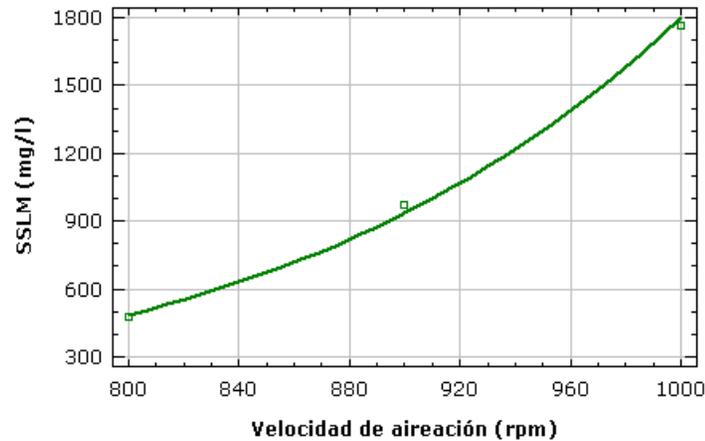


Figura 3.3: Variación de la cantidad de SSLM en el tanque de aireación del Sistema de Lodos Activados de la Empresa textil, para diferentes velocidades.

Por su parte, en la figura 3.3 se observa también una reducción apreciable de los SSLM, ahora exponencialmente, al disminuir la velocidad desde 1 000 hasta 800 r.p.m., pero en este caso ello resulta perjudicial, ya que implica una agitación deficiente y provoca, por tanto, la sedimentación de parte de los sólidos en la propia cisterna de aireación, lo que suele traducirse en una inadecuada depuración y en la posibilidad del surgimiento de un estado anóxico o anaerobio que conlleve a malos olores y la degradación del tratamiento. Considerando los parámetros de diseño de la planta y que la DBO_5 del afluente se ha reducido en un 70% con respecto a la de diseño (124 y 414 mg/l, respectivamente), la cantidad mínima de SSLM estimada para evitar la aparición de las dificultades previamente señaladas es de unos 1200 mg/l, por lo que, de acuerdo con la figura 3.3, la velocidad de trabajo de los aireadores no debe ser inferior a $935 \div 940$ r.p.m.

Como conclusión de lo antes expuesto, aún cuando la disminución de la velocidad de trabajo de los aireadores parece una buena alternativa para disminuir los consumos energéticos asociados a la aireación en la Planta de Tratamiento de Residuales de la Empresa textil "Desembarco del Granma" y adecuar dicha planta a las necesidades actuales de la empresa, afecta la agitación

en la cisterna de aireación y por tanto la eficacia del proceso de depuración, lo cual ha sido palpable en los últimos meses de trabajo del sistema y otra de las causas de la alteración en la microbiología del lodo (capítulo 2). Todo ello ha obligado a los especialistas de la entidad en cuestión a desechar esta solución y operar nuevamente a velocidades de 1 000 r.p.m. o superiores.

3.3 Variante 2: Modificaciones constructivas en la cisterna de aireación

Dadas las inconveniencias de la variante anterior, seguidamente se valora la posibilidad de disminuir en un 50% la capacidad del tanque de aireación utilizando únicamente dos de sus compartimentos, de modo que pueda responder a los requerimientos actuales de la fábrica (pequeño flujo de residual y bajo contenido de materia orgánica en el mismo). Con tal fin, se propone aislar los compartimentos C y D de la cisterna de aireación (figura 3.4) mediante el cierre de las aberturas que comunican al primero con el A y al segundo con el B, abriendo una nueva abertura entre estos dos últimos compartimentos para interconectarlos en serie y garantizar la continuidad del proceso (figura 3.5).

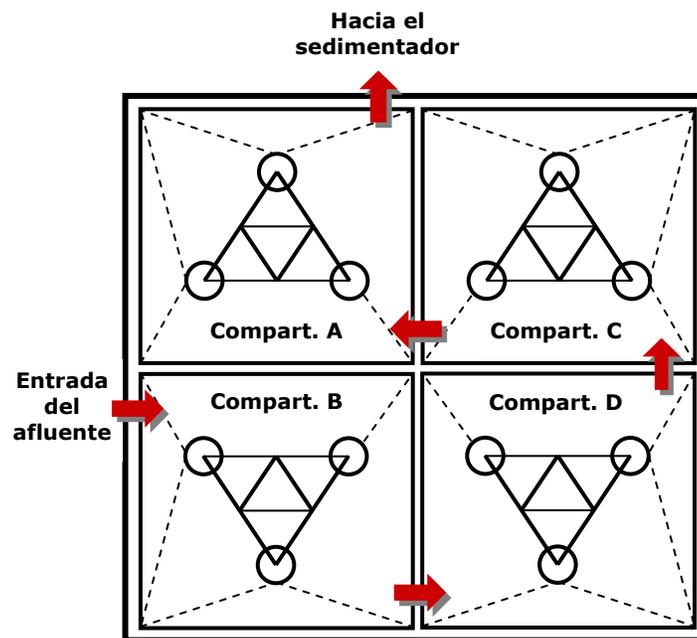


Figura 3.4: Estado constructivo actual de la cisterna de aireación de la Empresa textil.

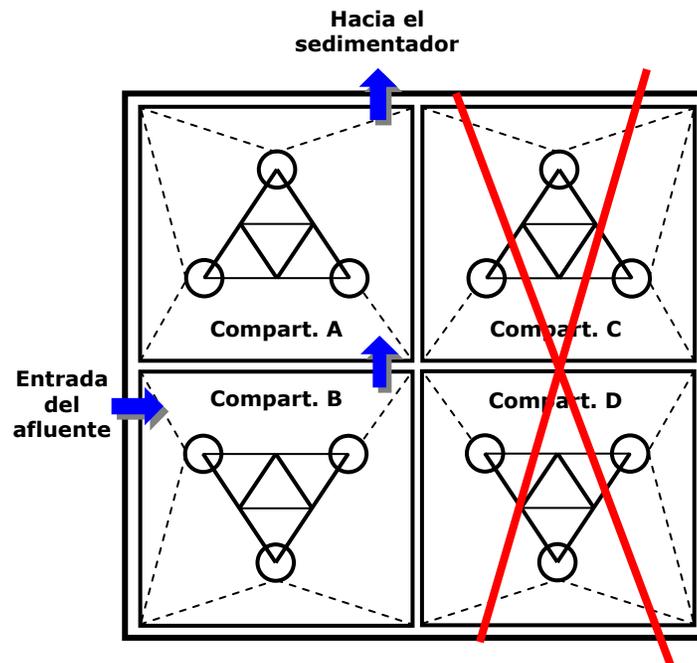


Figura 3.5: Propuesta de modificación para la cisterna de aireación de la Empresa textil.

Para implementar la modificación anterior, se han valorado dos (2) alternativas fundamentales: Cerrar definitivamente las aberturas que unen los compartimentos A-C y B-D con paredes de hormigón armado, o instalar compuertas de acero inoxidable tanto en dichas aberturas como en la nueva que debe abrirse para unir los compartimentos A y B (Castañeda, 2003 [15]). Aunque la segunda variante requiere una mayor inversión inicial, resulta mucho más funcional que la primera, ya que permitiría reajustar la capacidad de tratamiento del sistema con una inversión adicional mínima, en dependencia del caudal afluyente a tratar; por ello, es ésta la alternativa seleccionada en este caso. No obstante, cualquiera de ellas requiere la sustitución de los lodos activados actuales por materia celular nueva (siembra de lodos) para lograr los mejores resultados, ya que éstos han perdido la capacidad para funcionar de modo eficiente, como fue concluido en el capítulo 2.

El análisis sobre la factibilidad tecnológica de la reducción de volumen propuesta está basado en el recálculo, para las nuevas condiciones de operación, de algunos de los parámetros que describen el funcionamiento del Sistema. Para ello, se supone que se han logrado conseguir características del lodo similares a las que tenía éste al diseñarse la Planta, lo que sería

perfectamente posible una vez que se haya inoculado el nuevo lodo y estabilizado el funcionamiento de la Instalación.

Consideraciones iniciales

Muchos de los parámetros de diseño/operación del Sistema conservan sus valores conocidos y/o calculados en el capítulo anterior. Tal es el caso del caudal afluente a tratar ($Q \approx 2\,007,5 \text{ m}^3/\text{día}$), su DBO_5 ($\approx 124 \text{ mg/l}$) y DQO ($\approx 386,1 \text{ mg/l}$), y otros que se referirán a medida que se vaya haciendo uso de ellos.

Al trabajar únicamente dos (2) de los compartimentos de la cisterna de aireación, el volumen de dicho tanque (V) se reduce a unos $3\,945 \text{ m}^3$ (50% del total) y sólo trabajará la mitad de los aireadores. Por otro lado, la suposición hecha con anterioridad referente al nuevo lodo, permite fijar la relación alimentos/microorganismos alrededor de su valor de diseño, lo que debe asegurar un funcionamiento adecuado del lodo y una vida de servicio aceptable del mismo; esto es: $A/M = 0,117 \div 0,143 \text{ kg DBO}_5 / \text{kg SSVLM-día}$.

Determinación de la cantidad de microorganismos en el lodo

Para estimar la cantidad de microorganismos requeridos en el nuevo lodo, se debe partir de la ecuación 1.10, la que puede re-escribirse de la forma:

$$X = \frac{\text{DBO}_5 * Q}{V * A/M} \quad (3.1)$$

Y tomando en cuenta las consideraciones anteriores...

$$X = \frac{124 * 2007,5}{3945 * A/M} \approx \left[41,26 \div 539,32 \right] \text{ mg/l} \quad (3.2)$$

Como promedio, $X \approx 490,29 \text{ mg/l}$.

Cálculo del flujo de reciclaje (R) y su concentración de sólidos suspendidos volátiles (X_r)

Considerando una razón de circulación cercana a la de diseño ($R/Q = 0,45$), y los volúmenes de residual a tratar, se tiene que:

$$\begin{aligned}
 R &= 0,405 \div 0,495 \cdot Q \\
 R &= 0,405 \div 0,495 \cdot 2007,5 \approx 813,04 \div 993,71 \text{ m}^3/\text{día}
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

Para los cálculos se toma el valor promediado de R ; esto es: $R \approx 903,375 \text{ m}^3/\text{día}$.

La concentración de sólidos suspendidos en el lodo recirculado se obtiene por la ecuación 1.11, la que, acomodada convenientemente, queda de la forma siguiente:

$$X_r = X + \frac{Q \cdot (K - X_a)}{R}
 \tag{3.4}$$

Tomando el valor de X_a de la tabla 2.3 y los valores promediados señalados de X y R :

$$X_r = 490,29 + \frac{2007,5 \cdot (490,29 - 7)}{903,375} \approx 1564,27 \text{ mg/l}
 \tag{3.5}$$

Tiempo de residencia hidráulico del residual (θ)

Siguiendo el mismo procedimiento del capítulo anterior (ecuación 2.4) y considerando los valores extremos de R , se tiene que:

$$\theta = \frac{V}{Q + R} = \frac{3945}{2007,5 + R} \approx (314 \div 1,399) \text{ días} \approx (1,54 \div 33,57) \text{ h}
 \tag{3.6}$$

Este resultado implica, como promedio, una reducción del 43% con respecto al de la ecuación 2.4 (57,04 h) y por tanto, la disminución del tiempo necesario para garantizar la degradación de la materia orgánica hasta los valores recomendados para sistemas de aireación extendida (tabla 1.3); aunque el mismo dista mucho aún del valor de diseño de la Planta (13 h), eliminar un tercer compartimento no sólo es poco recomendable, sino que implicaría una remodelación total del sistema e inversiones que la Empresa textil no está en condiciones de asumir.

Tiempo de residencia medio celular (θ_x)

Para determinar este valor, al igual que en el capítulo 2, se emplea la ecuación 1.9. Tampoco en este caso se prevén extracciones de lodo, ya que la carga del sistema sigue siendo baja, a pesar de las transformaciones propuestas; por ello, $Q_w = 0$ y $Q_e = 2\,007,5 \text{ m}^3/\text{día}$.

Se asume una concentración de sólidos suspendidos volátiles en el efluente tratado (X_e) de 70 mg/l (80% de los sólidos suspendidos totales a la salida de primera sedimentación), que es el máximo establecido por diseño para la Planta [40]; la concentración de sólidos suspendidos volátiles a la salida de los aireadores, por su parte, puede estimarse como:

$$X_c = X + 0,2 * DBO_R = 490,29 + 0,2 * (24 - 5,95) \approx 513,9 \text{ mg/l} \quad (3.7)$$

De forma análoga al capítulo anterior,

$$\begin{aligned} S_{TR} &= V_{TR} * X_r = 1,06 * 1,5643 \approx 1,658 \text{ kg} \\ S_{TS} &= V_{TS} * X_c = 0,71 * 0,5139 \approx 0,365 \text{ kg} \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$S_{Sed} = V_{Sed} * X_c = 3563 * 0,5139 \approx 1831,026 \text{ kg}$$

$$G = 1,658 + 0,365 + 1831,026 \approx 1833,049 \text{ kg} \quad (3.9)$$

Y por tanto, el tiempo de residencia medio celular es ahora de:

$$\theta_x = \frac{3945 * 0,4903 + 1833,049}{2007,5 * 0,07} \approx 26,81 \text{ días} \quad (3.10)$$

Aunque la disminución conseguida en este caso con respecto al resultado de la ecuación 2.9 (31,82 días) es de sólo un 15,8%, es suficiente para que el tiempo de residencia medio celular se encuentre dentro de los límites recomendados para evitar la degradación o envejecimiento de los lodos activados (tabla 1.3); su magnitud depende en gran medida de la carga orgánica extremadamente baja que presenta el afluente.

Carga volumétrica (B_v)

El valor de este parámetro, según la ecuación 2.12, es el siguiente:

$$B_v = \frac{124 * 2007,5}{3945} \approx 63,1 \text{ mg/(l} \cdot \text{día)} \approx 0,063 \text{ kg } DBO_5 / (m^3 \text{ día)} \quad (3.11)$$

Promediando los resultados de las ecuaciones 2.13 y 2.14, y comparando con el de la ecuación anterior, la reducción de volumen propuesta permitiría duplicar la carga volumétrica actual. Este incremento, sin embargo, no es suficiente para cumplir la recomendación de la tabla 1.3

($B_v = 0,1 \div 0,4 \text{ kg DBO}_5 / m_3\text{-día}$), debido a que el caudal afluente y la DBO_5 del mismo son, como se ha reiterado, muy pequeños.

Pese a lo anterior, y como se explicó en el caso del tiempo de residencia hidráulico del residual, una reducción de volumen superior a la propuesta no es recomendable.

Cantidad de oxígeno suministrado por los aireadores

Al trabajar sólo dos (2) de los aireadores, la cantidad de oxígeno suministrada al residual se reduce en un 50%. Considerando el resultado de la expresión 2.20 ($101,808 \text{ kg O}_2 / h$), dicha cantidad sería:

$$Cant.O_2 \approx \frac{101,808}{2} \approx 50,904 \text{ kg O}_2 / h \quad (3.12)$$

Comparando este valor con la cantidad teórica de oxígeno requerida por los microorganismos para oxidar la materia orgánica del residual, $K = 41,87 \text{ kg O}_2 / h$ (expresión 2.19), queda claro que dos (2) aireadores son suficientes; incluso, podrían asumir incrementos en la demanda de hasta el 21,6% sin necesidad de aumentar su velocidad de trabajo.

Con respecto a la cantidad de OD en la cisterna de aireación, no es posible una estimación precisa de su magnitud real hasta tanto no se implemente la modificación propuesta (al menos a escala de planta piloto), ya que su determinación se realiza a través de mediciones directas. No obstante, si no se alteraran las características actuales del lodo, ni las condiciones de trabajo del sistema (salvo por la modificación propuesta), el resultado de la ecuación 3.12 representaría la disminución del OD en un 50%, con respecto a la cantidad promedio de éste medida a una velocidad de trabajo de los aireadores de 1 000 r.p.m.

De acuerdo con el razonamiento anterior, la cantidad de OD estimada en el tanque de aireación una vez modificado, para una cantidad actual promediada de $5,5 \text{ mg/l}$ (figura 3.2), es de $2,75 \text{ mg/l}$, valor que cumple las exigencias de diseño de la Planta ($\text{OD} = 1,5 \div 4,0 \text{ mg/l}$). Esta estimación, aunque un tanto imprecisa, da una idea del doble beneficio que representaría para la Planta de Tratamiento la reducción del volumen de la cisterna de aireación, no sólo por el

ahorro de electricidad que significa el operar únicamente con dos (2) aireadores, sino por el mejoramiento de sus condiciones de operación.

En resumen, se aprecia una mejor adecuación de la Instalación a los requerimientos actuales de la empresa, con reducciones apreciables del tiempo de residencia medio celular, y sobre todo, del tiempo de residencia hidráulico del residual y del exceso de oxígeno disuelto en el tanque de aireación, así como la duplicación de la carga volumétrica, si bien esta última sigue siendo baja, debido, en lo fundamental, a los contenidos relativamente bajos de materia orgánica en el residual a tratar.

3.4 Valoración económica

Para evaluar la factibilidad económica de la solución planteada en el epígrafe 3.3, se compara la inversión inicial requerida para su implantación con el ingreso estimado por concepto de ahorro de electricidad que representa el operar sólo con dos (2) aireadores. En la inversión inicial prevista, además, están incluidos los gastos asociados a la limpieza del sistema y la inoculación de un nuevo lodo, ya que dichas acciones serían parte indispensable tanto de ésta como de cualquier otra solución, como se ha venido reiterando.

Gastos de Inversión

El gasto en la limpieza está dado, principalmente, por el consumo de electricidad de la(s) bomba(s) utilizada(s) en el vaciado de la cisterna de aireación y el costo de la mano de obra necesaria. Seleccionando dos (2) bombas con capacidad de bombeo de 50 m³/h y consumos de potencia de 5,5 kW cada una (Rosabal, 1990 [68]) para evacuar los 7 890 m³ de líquido del tanque, son necesarias 78,9 h (casi 10 jornadas de 8 h) de trabajo. Por tanto, el consumo de potencia en el bombeo es de 867,9 kW-h, que a un precio de \$0,09/(kW-h) significan un gasto de \$78,11 MN, aproximadamente.

Por concepto de mano de obra, se considera la necesidad de 12 obreros durante tres (3) días de trabajo, con salario mínimo de \$6,27/día (\$163,00/mes); esto es: \$225,72 MN, que unidos

al resultado anterior, representan un gasto total durante las tareas de vaciado y limpieza de la cisterna de aireación de \$303,83 MN.

En cuanto a la inoculación del nuevo lodo, el mismo se puede adquirir, por ejemplo, a partir del excremento animal de granjas porcinas o de otro tipo. De acuerdo con el análisis realizado en "Alternativa de operación para el Sistema de Lodos Activados de la Empresa textil 'Desembarco del Granma'" (Castañeda, 2003) [15], los gastos mínimos por este concepto, para la variante propuesta, ascienden a \$11,73 USD (\$17,58 si no se modifica la cisterna).

La inversión más importante a realizar para la modificación del tanque de aireación, sin dudas, es el costo de las compuertas de acero inoxidable. El material seleccionado para fabricarlas es el AISI 304, acero inoxidable al cromo-níquel, de estructura austenítica, con resistencia a la corrosión elevada, buena soldabilidad y excelentes propiedades en general, características que le permiten cubrir una amplia gama de aplicaciones, incluidas, por ejemplo, la elaboración de recipientes y/o cámaras de diversa índole (criogénicos, nucleares, a presión, etc.), tuberías, válvulas, equipamiento de distinto tipo y responsabilidad, y otras. [2]

En el anexo 5 se encuentran listadas las propiedades y composición del acero AISI 304, así como una lista bastante amplia de aplicaciones del mismo, según las recomendaciones de la *Material Property Data* (2003) [2].

De acuerdo con las dimensiones de las aberturas a cerrar (2,0 x 3,0 m) y los criterios de los especialistas de la Empresa de Servicios Especializados (EMPSE) de Villa Clara, el costo de una compuerta, incluidas las estructuras para el soporte y el sistema de apertura y cierre de la misma, es de \$400,00 USD. En este caso deben cerrarse tres (3) aberturas: las dos existentes y la que se abrirá entre los compartimentos A y B (figura 3.5); el costo total de adquisición de las compuertas, por tanto, es de \$1 200,00 USD, al que debe adicionársele el costo de instalación de las mismas, estimado en unos \$120,00 MN.

Finalmente, el costo total aproximado de inversión de la variante analizada es de \$1 212,00 USD y \$424,00 MN.

Disminución del consumo de energía en la aireación

El régimen de trabajo de los aireadores A, C y D (figura 3.4) es prácticamente el mismo: 16 h/día de lunes a viernes, 13 h los sábados (14 h el C) y 8 h los domingos, mientras que el B funciona 20 h/día, 16 h y 8 h, respectivamente. Teniendo en cuenta que, como promedio, un año tiene 52 fines de semana (sábados y domingos):

$$\begin{aligned} t_B &= 20 * 261 + 16 * 52 + 8 * 52 \approx 6468 \text{ h/año} && \text{Aireador B} \\ t_{A \text{ y } D} &= 16 * 261 + 13 * 52 + 8 * 52 \approx 5268 \text{ h/año} && \text{Aireadores A y D} \\ t_C &= 16 * 261 + 14 * 52 + 8 * 52 \approx 5320 \text{ h/año} && \text{Aireador C} \end{aligned} \quad (3.13)$$

En correspondencia con lo anterior y recordando que la potencia consumida por los motores eléctricos que impulsan los aireadores, para las velocidades actuales de trabajo de éstos (1 000 r.p.m.), es de unos 20 kW, el gasto anual de cada aireador por concepto de consumo de electricidad es:

$$\begin{aligned} C_B &= 20 * 6468 * \$0,09/(\text{kW} \cdot \text{h}) \approx \$11642,40 && \text{Aireador B} \\ C_{A \text{ y } D} &= 20 * 5268 * \$0,09/(\text{kW} \cdot \text{h}) \approx \$9482,40 && \text{Aireadores A y D} \\ C_C &= 20 * 5320 * \$0,09/(\text{kW} \cdot \text{h}) \approx \$9576,00 && \text{Aireador C} \end{aligned} \quad (3.14)$$

De acuerdo con estos resultados, el gasto en electricidad al operar con todos los aireadores (variante actual) es de \$40 183,20 MN/año, mientras que al trabajar sólo con los aireadores A y B, dicho gasto desciende a \$21 124,80 MN/año, para un ahorro estimado de \$19 058,40 MN/año.

Factibilidad de la Inversión

Como parte final de este análisis, se calculan los indicadores económicos de factibilidad de la inversión, VAN (valor actual neto) y TIR (tasa interna de retorno), para un período de cinco (5) meses. Para ello, se considera una moneda única, así como la tasa de cambio oficial vigente: \$1,00 USD = \$1,00 MN¹; los resultados están resumidos en la tabla 3.2.

Tabla 3.1: Determinación de los indicadores económicos VAN y TIR.

¹ Cuba, Banco Central de Cuba. "Tipo de cambio oficial de monedas extranjeras con relación al peso cubano". En: *Granma*, órgano oficial de Comité Central del Partido Comunista de Cuba, p 2.

Mes de referencia	1	2	3	4	5
Gastos mensuales en miles de pesos (USD)					
Limpieza	0,304	0,000	0,000	0,000	0,000
Siembra de nuevo lodo	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000
Modif. del tanque de aireación	1,320	0,000	0,000	0,000	0,000
Imprevistos y otros gastos	0,164	0,000	0,000	0,000	0,000
Gastos totales	1,800	0,000	0,000	0,000	0,000
Ingresos mensuales en miles de pesos (USD)					
Ahorro de energía eléctrica	0,000	1,588	1,588	1,588	1,588
Ingresos totales	0,000	1,588	1,588	1,588	1,588
Tasa para calcular los beneficios netos					
Beneficio neto	-1,800	1,588	1,588	1,588	1,588
Beneficio neto descontado	-1,525	1,141	0,967	0,819	0,694
Beneficio neto acum. Descontado	-1,525	-0,384	0,583	1,402	2,096
Tasa de descuento (%)	18	12			
Valor Actual Neto (V.A.N.)	2,473	3,024			
Tasa interna de retorno (T.I.R)			47,9%	70,4%	79,8%

Los resultados de la tabla anterior, medidos por los criterios o indicadores antes mencionados, demuestran la aceptabilidad de la inversión, ya que ésta, de acuerdo con el VAN, incorpora valores adicionales de \$2 473,00 USD si se usa una tasa de interés del 18% y de \$3 024,00 USD si se utiliza una del 12%, mientras que el TIR es mayor que el costo de capital (tasa de interés); todo ello, como se ha dicho, en un período de sólo cinco (5) meses.

3.5 Conclusiones parciales

1. Disminuir la velocidad de trabajo de los aireadores no es lo más adecuado para reducir el consumo de electricidad durante la aireación en la Planta de Tratamiento de Residuales de la Empresa textil "Desembarco del Granma", ni para adecuar dicha planta a las necesidades actuales de la empresa, ya que afecta la agitación en la cisterna de aireación y por tanto la eficacia del proceso de depuración.
2. Reduciendo la capacidad de la unidad de aireación de la referida planta en un 50%, se logra una mejor adaptación de la Instalación a los requerimientos actuales, disminuyendo el tiempo de residencia medio celular, el tiempo de residencia hidráulico del residual y el exceso de OD en el tanque de aireación, así como duplicándose la carga volumétrica del sistema; también disminuye al 50% la electricidad requerida para la aireación.

3. Los indicadores económicos VAN y TIR, calculados para un período de cinco (5) meses, demuestran la aceptabilidad de la inversión necesaria para implementar la modificación anterior, ya que, según el primero, incorpora valores adicionales de \$2 473,00 USD si se usa una tasa de interés del 18% y de \$3 024,00 USD si se utiliza una del 12%, mientras que el TIR es mayor que el costo de capital (tasa de interés).

Conclusiones

1. Queda demostrada, tecnológica y económicamente, la posibilidad de mejorar la eficiencia de la planta de tratamiento de residuales de la Empresa textil "Desembarco del Granma" a partir de modificaciones en su unidad de aireación; específicamente, reduciendo al 50% el volumen de la cisterna de aireación y operando sólo con dos (2) de sus aireadores.
2. Para lograr lo anterior, se propone aislar los compartimentos C y D de dicha cisterna de aireación y comunicar directamente los compartimentos A y B (figura 3.5), a través de un sistema de compuertas de acero inoxidable. Esta solución permite, en caso de necesidad, revertir las modificaciones propuestas con una inversión mínima y reajustar así el volumen de aireación a conveniencia de la Empresa.
3. Aunque no se logra una total adecuación de la Planta a las características actuales del afluente, la modificación propuesta permite, entre otros beneficios, disminuir el tiempo de residencia medio celular, el tiempo de residencia hidráulico del residual y el exceso de OD en el tanque de aireación, así como duplicar la carga volumétrica del sistema; también se reduce al 50% la electricidad requerida para la aireación.
4. Desde el punto de vista económico, los ingresos por concepto de ahorro de electricidad en la aireación son de \$19 058,40/año, haciéndose evidente la aceptabilidad de la inversión requerida, ya que, según el VAN, incorpora valores adicionales de \$2 473,00 si se usa una tasa de interés del 18% y de \$3 024,00 si se utiliza una del 12%, mientras que el TIR es mayor que el costo de capital (tasa de interés), ambos calculados para un período de cinco (5) meses.

Recomendaciones

1. Proponer a la Empresa textil "Desembarco del Granma" la inoculación de un nuevo lodo, como alternativa para restaurar, a corto plazo, la microbiología de los lodos activados de su planta de tratamiento de residuales.
2. Proponer a la referida entidad la ejecución total de la solución propuesta, como vía para mejorar el funcionamiento de su planta de tratamiento de residuales y disminuir el consumo de electricidad durante la aireación.
3. Analizar la posibilidad de introducir las aguas albañales de la fábrica al Sistema de Lodos activados, con vistas a incrementar el flujo de residual a tratar y sobre todo, la carga orgánica biodegradable contenida en el mismo.

Bibliografía

1. "Aguas Residuales" [cd-rom]. En: *Enciclopedia Microsoft Encarta 2000*. Microsoft Co., c1999–2000.
2. "AISI Type 304L Stainless Steel" [en línea]. En: *MatWeb: Material Property Data*. 2003.
<<http://www.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=Q304L>>
[Consulta: ene./2004]
3. Alexander, M. "Biodegradation and Bioremediation", 2nd ed., San Diego: Academic Press, 1999.
4. Anónimo. "Aireación para el manejo de Calidad del Agua en la Acuicultura" [en línea].
<http://www.aguamarket.com/temas_interes/012.asp>
[Consulta: dic./2003]
5. _____. "La contaminación ambiental" [en línea].
<<http://www.guerrillero.co.cu/ecosde/trabajos/lacontamina.html>>
[Consulta: sept./2003]
6. _____. "Informe técnico sobre minimización de residuos en la Industria textil" [en línea].
1997.
<<http://www.cepis.org.pe/eswww/fulltext/gtz/minitext/mtexcap3.html>>
[Consulta: sept./2003]
7. _____. "Medio Ambiente y el Agua. Depuración de Aguas." [en línea].
<http://members.es.tripod.de/bern/agua_depuracion.html>
[Consulta: oct./2003]
8. _____. "Microbiology", 2nd ed., Toronto: Brown Publishers, 1997.

9. _____. "Orientaciones para la evaluación de impacto ambiental de proyectos de saneamiento (aguas residuales y residuos sólidos)" [en línea].
<http://www.conama.cl/SEIA/saneam_2.htm>
[Consulta: sept./2003]
10. _____. "Tratamiento de aguas residuales" [en línea].
<<http://www.ingenieroambiental.com/inf/tratamientosindustriales.htm>>
[Consulta: sept./2003]
11. _____. "Tratamientos secundarios" [en línea].
<http://vulcano.lasalle.edu.co/~docencia/IngAmbiental/AR_Trat_secundarios.htm>
[Consulta: sept./2003]
12. Bitton, G. "Wastewater Microbiology", 2nd ed., New York: Wiley-Liss Publishers, 1999.
13. Bowen, W. y otros. "Microbiología general y aplicada", La Habana: Ciencia y Técnica, 1973.
14. Bramucci, M. G. y Nagarajan, V. "Industrial Wastewater Bioreactors: Sources of Novel Microorganisms for Biotechnology". *Trends Biotechnology*. 18(12): 501-5, 2000.
15. Castañeda, Lideiny. "Alternativa de operación para el Sistema de Lodos Activados de la Empresa textil 'Desembarco del Granma'", Santa Clara: UCLV, 2003. (Trabajo de Diploma)
16. Celma, P. J. "Introducción a la gestión de los residuos industriales tóxicos y peligrosos". *Afinidad*. 6: 387, Instituto Químico de Sarria, 1990.
17. Chudoba, J. "Fundamentos teóricos de algunos procesos para la purificación de aguas residuales", La Habana: ISPJAE, 1986.
18. Contreras, Ana M. "Análisis del proceso de tratamiento de residuales del Combinado Textil 'Desembarco del Granma'", Santa Clara: UCLV, 1997. (Tesis de Maestría)
19. Csuros, María y Csuros, Csaba. "Microbiological Examination of Water and Wastewater", New York: Lewis Publishers, 1999.
20. Danckwerts, P. V. "Significance of Liquid-film Coefficients in Gas Absorption". *Industrial Engineering Chemistry*. 43: 1460-8, 1951.
21. Degrémont, G. "Manual técnico del agua", /s.n., 1973.

22. Díaz, L. y Carrasco, J. A. "Depuración de aguas residuales", Madrid: MOPT, 1991.
23. Díaz, R. "Tratamiento de aguas y aguas residuales", La Habana: ISPJAE, 1987.
24. Downing, A. L. "Aireation and Biological Oxidation in the Activated-Sludge Process", Brighton: The Institute of Sewage Purification Annual Conference, 1961.
25. Edwards, J. D. "Industrial Wastewater Treatment: A Guidebook", Boca Ratón: Lewis Publishers, 1995.
26. Fair, G. "Purificación de aguas, tratamiento y remoción de aguas residuales", tomos I y II, Edición Revolucionaria, La Habana: Pueblo y Educación, 1985.
27. Frey, María G.; De trujillo, L. y Mariano, Patricia N. "Impacto ambiental de productos químicos auxiliares usados en la industria textil argentina" [en línea]. 1998.
<<http://www.cepis.org.pe/eswww/repamar/gtzproye/impacto/impacto.html>>
[Consulta: sept./2003]
28. Gauthier, T.; Thibault, J. y LeDuy, A. "Measuring k_{La} with Randomly Pulsed Dynamic Method". *Biotechnology and Bioengineering*. 37: 889-5, 1991.
29. Grady, C. P. L. (ed). y Daigger, G. T. "Biological Wastewater Treatment (Environmental Science & Pollution)", 2nd ed., New York: Marcel Dekker, 1998.
30. Gray, N. F. (ed). "Biology of Wastewater Treatment", England: Oxford University Press, 1992.
31. Hairston, Deborah. "Wastewater Treatment: O₂ to the Rescue". *Chemical Engineering*. 108(1): 35-5, 2001.
32. Haney, D. C. y Walsh, S. J. "Influence of Salinity and Temperature on the Physiology of *Limia melanonotata* (Cyprinodontiformes: Poeciliidae): A Search for Abiotic Factors Limiting Insular Distribution in Hispaniola". *Caribbean Journal of Science*. 39(3): 327-11, 2003.
33. Henze, M. (ed) y otros. "Wastewater Treatment: Biological and Chemical Processes (Environmental Engineering)", 2nd ed., Berlín: Springer Verlag, 1997.
34. Hernández, A. "Depuración de aguas residuales", 3ra ed., Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puentes, 1994.

35. Herrera, L.; Hernández, J. y Bravo, L. "Estimación en línea de la demanda de oxígeno de aguas servidas en un reactor de tratamiento por carga secuencial (SBR)" [en línea]. Laboratorio de Ingeniería de Procesos Ambientales. Universidad de Chile.
<<http://cabierta.uchile.cl/revista/10/articulos/articulo7.f.html>>
[Consulta: oct./2003]
36. Hickey, R. F. y Smith, G. L. (eds). "Biotechnology in Industrial Waste Treatment and Bioremediation", Boca Ratón: Lewis Publishers, 1996.
37. Higbie, R. "The Rate of Absorption of a Pure Gas into a Still Liquid During Short Periods of Exposure". *Transaction of The American Institute of Chemical Engineers*. 31: 365-24, 1935.
38. Hutzinger, O. (ed). "The Handbook of Environmental Chemistry", vol. 3, Berlín: Springer-Verlag, 1995.
39. Jackson, E. "Determination of Volumetric Mass Transfer Coefficient in a Stirred, Sparged Bioreactor" [en línea]. 1998.
<<http://prizedwriting.ucdavis.edu/past/1997-1998/jackson.htm>>
[Consulta: ene./2004]
40. Japón, Mitsubishi Corporation Toyobo Co., Ltd. "Textile Manufacturing Plant for Villa Clara, Cuba", vol. P-119, Tokio, 1977.
41. Kolarik, L. O. y Priestley A. J. "Modern Techniques in Water and Wastewater Treatment", Victoria: CSIRO Publishing, 1995.
42. Lewis, W. K. y Whitman, W. C. "Principles of Gas Absorption". *Industrial Engineering Chemistry*. 16: 1215, 1924.
43. Linek, V.; Vacek, V. y Benes, P. "A Critical Review and Experimental Verification of the Correct Use of the Dynamic Method for the Determination of Oxygen Transfer in Aerated Agitated Vessels to Water, Electrolyte Solutions and Viscous Liquids". *Chemical Engineering Journal*. 34: 11-25, 1987.
44. López, J. A. "Depuración de aguas residuales" [en línea].
<<http://www2.cbm.uam.es/jalopez/personal/SeminariosVarios/ERARtexto.htm>>

[Consulta: sept./2003]

45. López, M. V. "Tratamiento biológico de aguas residuales en perspectiva de la biotecnología en México", México: CONACYT, 1981.-- p 259-284.
46. MacIntyre, Sally; Eugster, W. y Kling, G. W. "The Critical Importance of Bouyancy Flux for Gas Flux Across the Air-Water Interface". En: Donelan, M. A. y otros (eds). *Gas Transfer at Water Surfaces*. 127: 135-5, AGU Geophysical Monograph, 2001.
47. Madigan, M. T.; Martinko, J. M. y Parker, J. "Brock Biología de los Microorganismos", 8va ed., España: Prentice Hall, 1998.
48. Martínez, J. "Microbiología general", La Habana: ISPJAE, 1985.
49. Méndez, R. "Tecnología de tratamiento de corrientes residuales contaminantes", Memorias, Universidad de Santiago de Compostela, 1997. (Curso de Doctorado)
50. Metcalf & Eddy, Inc. "Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización", 3ra ed., vol. I, Madrid: McGraw-Hill, 1995.
51. Molina, Virginia y otros (eds). "Introducción al conocimiento del Medio Ambiente", La Habana: Academia. (Suplemento Especial)
52. NC 27 (1999): Vertimiento de las aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. Especificaciones.
53. NC 93-01-103 (1987): Clasificación de utilización de las aguas interiores.
54. NC 93-01-105 (1987): Especificaciones y procedimientos para la evaluación de objetivos hídricos de uso pequeño.
55. NC 93-11 (1986): Fuentes de abastecimiento de agua, calidad y protección sanitaria.
56. Nyer, E. K. (ed) y otros. "In Situ Treatment Technology", 2nd ed., Boca Ratón: Lewis Publishers, 1999.
57. Otero, J. "Operación y control de plantas de tratamiento e interpretación de resultados de laboratorio", 1999.
58. "Oxygen Transfer" [en línea]. En: *Biochemical Engineering*. School of Life Sciences and Chemical Technology.
<http://www.np.edu.sg/~dept-bio/biochemical_engineering/lectures/oxy_main.htm>

[Consulta: dic./2003]

59. Pérez, V. y otros. "Ahorro de energía mediante convertidores de frecuencia en aireadores de residuales", Santa Clara: XIV Forum de Ciencia y Técnica, 1999.
60. Perry, R. H. y Green, D. W. "Perry's Chemical Engineer's Handbook" [cd-rom]. McGraw-Hill, 1999.
61. Peter, M. S. y Timmerhaus, Klaus D. "Plant Desing and Economic for Chemical Engineers", Edición Revolucionaria, La Habana: Pueblo y Educación, 1980.
62. Prescott, L. M.; Harley, J. P. y Klein, D. A. "Microbiología", 4ta ed., New York: McGraw-Hill, 2000.
63. "Principios y microbiología del tratamiento de aguas residuales" [en línea]. En: *Curso de Microbiología General*. Departamento de Producción Agraria, Universidad Pública de Navarra.
<<http://www.unavarra.es/genmic/curso%20microbiologia%20general/40-tratamiento%20aguas%20residuales.htm>>
- [Consulta: sept./2003]
64. Ramalho, R. S. "Introduction to Wastewater Treatment Processes", New York: Academic Press, 1997.
65. Rodríguez, J. J. "La ingeniería ambiental", Madrid: Síntesis, 2002.
66. Rodríguez, V. J. "Reacciones biológicas: Microorganismos" [en línea]. 2001.
<http://www.terra.es/personal/forma_xxi/cono15.htm>
- [Consulta: dic./2003]
67. Ronzano, E. y Dapena, J. L. (ed). "Tratamiento biológico de las aguas residuales", Madrid: Díaz de Santos, 1995.
68. Rosabal, J. M. "Hidrodinámica y separaciones mecánicas", tomo I, La Habana: Pueblo y Educación, 1990.
69. Santegoeds, C. M.; Schramm A. y De Beer, D. "Microsensors as a Tool to Determine Chemical Microgradients and Bacterial Activity in Wastewater Biofilms and Flocs". *Biodegradation*. 9(3-4): 159-67, 1998.

70. Sanz, J. L. "Curso sobre regeneración de aguas residuales" [en línea]. 1999.
<<http://www.nam.es/fguam/Fse/cursos99/ciencias/ci15.html>>
[Consulta: oct./2003]
71. Schoroeder, E. D. "Water and Wastewater Treatment", New York: McGraw-Hill, 1977.
72. Spellman, R. F. "Microbiology for water/wastewater operators", Lancaster: Technomic Publishing, 1997.
73. Timmis, K. N.; Steffan, R. J. y Unterman, R. "Designing Microorganisms for the Treatment of Toxic Wastes". *Annu Rev Microbiol.* 48: 525-57, 1994.
74. Truesdale, G. A.; Downing, A. L. y Lowden, G. F. "The Solubility of Oxygen in Pure Water and Sea Water". *Journal of Applied Chemistry.* 5: 53-11, 1955.
75. USA, Water Pollution Control Federation. "Standard Methods for the Examination of Water and WasteWater", 19th ed., New York, 1995.
76. _____. "Wastewater Treatment Plant Desing", Washington D.C., 1977. (Manual of Practice No 8)
77. Valdés-Solís, Teresa. "Tratamiento de aguas residuales" [en línea]. 2000.
<http://www.terra.es/personal/forma_xxi/cono12.htm>
[Consulta: dic./2003]
78. Van Breeman, A. "Water Treatment Part Conventional and Advanced. Treatment Methods.", The Nedherland: International Institute for Infraestructural Hidraulics and Enviromental Engineering, 1995. (International Course on Low-Cost Water Supply and Sanitation)
79. Van Loosdrech, M. y otros. "Metabolism of Micro-organisms Responsible for Enhanced Biological Phosphorus Removal from Wastewater. Use of Dynamic Enrichment Cultures." *Anatonie Van Leenwenhoek.* 71: 109-16, 1997.
80. Varela, J. "Datos de las características de las aguas residuales industriales. Industria Textil.", Santa Clara, 1979.

Anexo 1.

Características de las aguas residuales de la Industria textil

Tabla 1: Características de las descargas algodoneras (tejido plano).¹

Proceso	Volumen sobre el total	DBO sobre el total
Engomado y desengomado	15%	50%
Descruce y mercerizado	20%	30%
Lavado, teñido y blanqueo	65%	20%

Tabla 2: Características de las descargas laneras.²

Proceso	agua/lana (l/kg)	DBO (mg/l)	DQO (mg/l)	Sólidos en suspensión (mg/l)	Sólidos Disueltos (mg/l)	Grasas (mg/l)	pH
Lavado	10÷40	5 000 ÷ 25 000	10 000 ÷ 45 000	12 500*	6 600*	4 000*	8 ÷ 9
Batanado	5÷20	4 000 ÷ 24 000	6 000 ÷ 43 000	11 000*	2 800*	3 300*	9 ÷ 12
Carbonizado	30÷80	200 ÷ 500	200 ÷ 700	750*	1 500 ÷ 3 000	-	3 ÷ 10
Tintura	10÷20	200 ÷ 4 000	500 ÷ 5 000	-	-	-	6 ÷ 8

(*) Valor medio o más probable.

Tabla 3: Características de los efluentes de desengomado y lavado (Desencolado enzimático de algodón; Agente encolante: almidón 10%).^{1,2}

PARAMETROS	VALORES
DBO	1 000 ÷ 6 000 mg/l
Sólidos totales	6 000 ÷ 20 000 mg/l
pH	6 ÷ 7 unidades
Cantidad de H ₂ O	5 000 ÷ 20 000 l/ton de producto

Tabla 4: Características de los efluentes de descruce para diversas fibras.³

Fibra	PARAMETROS			
	DBO (mg/l)	Sólidos totales (mg/l)	pH (unidades)	Uso de agua (l/1 000 kg tela)
Algodón	100 ÷ 2 900	2 200 ÷ 17 400	10 ÷ 12	2 500 ÷ 43 000
Rayón	2 800	3 300	8 ÷ 9	17 000 ÷ 33 500
Acetato	2 000	2 000	9 ÷ 10	25 000 ÷ 83 500
Poliamida	1 300	1 800	10 ÷ 11	50 000 ÷ 66 750
Acrílico	2 100	1 800	9 ÷ 10	50 000 ÷ 66 750
Poliéster	500 ÷ 800	600 ÷ 1 400	8 ÷ 10	25 000 ÷ 42 000

Tabla 5: Características de los efluentes de mercerizado (algodón; 2 a 6 % de soda cáustica).^{1,2}

PARAMETROS	VALORES
DBO	500 ÷ 800 mg/l
Sólidos totales	8 000 ÷ 18 000 mg/l
pH	11 ÷ 14
Cantidad de agua	7 000 ÷ 10 000 l/ton de producto

Tabla 6: Características de los efluentes de blanqueo.³

Fibras	PARAMETROS			
	DBO (mg/l)	Sólidos totales (mg/l)	pH	Uso de agua (l/1000 kg del producto)
Algodón	100 ÷ 1 700	800 ÷ 15 000	8 ÷ 12	2 500 ÷ 12 500
Acetato	700	800 ÷ 1 000	7 ÷ 9	33 500 ÷ 50 000

Tabla 7: Características de los efluentes de teñido algodonero.¹

PARAMETROS	VALORES
Color (DHE)	5 ÷ 50
pH	6,9 ÷ 10,7
RTE (mg/l)*	1 565 ÷ 10 570
DBO (mg/l)	52 ÷ 240
DQO (mg/l)	84 ÷ 663
Fenoles (mg/l)	0,03 ÷ 0,056

* Residuo total por evaporación.

Tabla 8: Características de los efluentes de teñido de diferentes tipos de fibras sintéticas.²

Fibra	PARAMETROS			
	DBO (mg/l)	Sólidos totales (mg/l)	pH	Uso del agua (l/1 000 kg del producto)
Poliamida	300 ÷ 1 000	500 ÷ 1 000	2 ÷ 7	10 000 ÷ 35 000
Poliacrílico	200 ÷ 2 000	800 ÷ 2 000	4 ÷ 6	10 000 ÷ 35 000
Poliéster	400 ÷ 25 000	-	4 ÷ 6	10 000 ÷ 35 000

Fuentes:

- (1) Fernández, G. (1981). Referido en "Informe técnico sobre minimización de residuos en la Industria textil" [en línea]. 1997.
<<http://www.cepis.org.pe/eswww/fulltext/gtz/minitext/mtexcap3.html>>
[Consulta: sept./2003]
- (2) Crespi, M. (1995). Referido en Ibidem.
- (3) EPS (1982). Referido en Ibidem.

Anexo 2.

Principales procesos biológicos utilizados en el tratamiento de aguas residuales

Tabla 1. Procesos aerobios.

Tipo	Nombre común	Uso
Cultivo en suspensión	Proceso de lodo activado: Convencional (flujo en pistón) Tanque de mezcla completa Aireación graduada Oxígeno puro Aireación modificada Contacto y estabilización Aireación prolongada Canales de oxidación	Eliminación de la DBO carbonosa, (nitrificación).
	Nitrificación de cultivos en suspensión	Nitrificación.
	Lagunas aireadas	Eliminación de la DBO carbonosa, (nitrificación).
	Digestión aerobia: Aire convencional Aire puro	Estabilización, eliminación de la DBO carbonosa, (nitrificación).
	Estanques aerobios de alta carga	Eliminación de la DBO carbonosa, (nitrificación).
Cultivo fijo	Filtros percoladores: Baja carga Alta carga	Eliminación de la DBO carbonosa, (nitrificación).
	Filtros de pretratamiento	Eliminación de la DBO carbonosa.
	Sistemas biológicos rotativos de contacto (biodisco)	Eliminación de la DBO carbonosa, (nitrificación).
	Reactores de lecho compacto	Nitrificación.
Procesos combinados	Filtros percoladores. Fangos activados.	Eliminación de la DBO carbonosa, (nitrificación).
	Fangos activados. Filtros percoladores.	Eliminación de la DBO carbonosa, (nitrificación).

Nota: El uso principal se presenta en primer lugar, entre paréntesis se presentan otros usos.

Tabla 2. Procesos anóxicos.

Tipo	Nombre común	Uso
Cultivo en suspensión	Desnitrificación con cultivo en suspensión	Desnitrificación.
Crecimiento fijo	Desnitrificación con cultivo fijo	Desnitrificación.

Nota: El uso principal se presenta en primer lugar, entre paréntesis se presentan otros usos.

Tabla 3. Procesos anaerobios.

Tipo	Nombre común	Uso
Cultivo en suspensión	Digestión anaerobia: Baja carga, una etapa Alta carga, una etapa Doble etapa	Estabilización, eliminación de la DBO carbonosa.
Cultivo fijo	Proceso anaerobio de contacto	Eliminación de la DBO carbonosa.
	Filtro anaerobio	Eliminación de la DBO carbonosa, (estabilización).
	Lagunas anaerobias (estanques)	Eliminación de la DBO carbonosa, (estabilización).

Nota: El uso principal se presenta en primer lugar, entre paréntesis se presentan otros usos.

Tabla 4. Crecimiento vinculado.

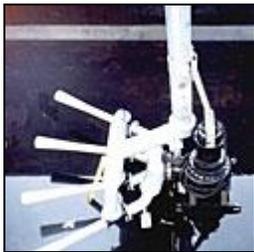
Tipo	Nombre común	Uso
Procesos combinados de cultivo fijo	Nitrificación – desnitrificación	Nitrificación, desnitrificación.
	Estanques facultativos	Eliminación de la DBO carbonosa.
	Estanques de maduración	Eliminación de la DBO carbonosa, (nitrificación).
	Estanques anaerobios – facultativos	Eliminación de la DBO carbonosa.
	Estanques anaerobios – facultativos – aerobios	Eliminación de la DBO carbonosa.

Nota: El uso principal se presenta en primer lugar, entre paréntesis se presentan otros usos.

Anexo 3.

Ejemplos de dispositivos de aireación

Aireación de profundidad



Aireación por eyector de agua: El aire es aspirado por un tubo vertical en la base del recipiente al bombear agua a través de un eyector tipo Venturi.

Estos sistemas casi no necesitan mantenimiento. Combinan una mezcla moderada con una baja transferencia de oxígeno y tienen un precio básico reducido.

Aireación por burbujas gruesas: El aire se inyecta en el agua a través de tubos con orificios relativamente grandes.

Estos sistemas requieren poco mantenimiento, la transferencia de oxígeno es medida y su precio básico es moderado.

Aireación por burbujas finas: El aire se inyecta en el agua a través de membranas de goma (silicona) o cerámica.

Estos sistemas precisan de mantenimiento periódico. Para facilitar dicho mantenimiento se han montado las membranas sobre rejillas individuales, totalmente desmontables. Este sistema permite la máxima transferencia de oxígeno posible y tiene un precio básico elevado.



Aireación de superficie



Aireador de escobilla: El agua es lanzada al aire al girar, paralelamente a la superficie, una escobilla semisumergida en el agua.

Combina una transferencia de oxígeno moderada con una enorme fuerza propulsora, exige mucho mantenimiento y tiene un precio básico alto.

Aireadores de superficie: Aspiran el agua con mucha fuerza hacia arriba y la lanzan al aire.

Dos tipos de aireadores de superficie son: el de propulsión directa (a medias y altas revoluciones) y de propulsión por mecanismo de rueda de engranaje (a bajas revoluciones).

Los modelos de **propulsión directa** son todos aireadores flotantes de superficie. Están dotados de una paleta espiral de propulsión hecha a medida.

Los modelos con **mecanismo de rueda de engranaje** sólo se suministran en su versión flotante cuando el peso del mecanismo de engranaje lo permite. Los modelos más pesados se fijan normalmente a un soporte (a menudo es una plataforma de hormigón). Cuanto más bajo el número de revoluciones, más alta es la transferencia de oxígeno y más elevado el precio.

Anexo 4.

Resultados del procesamiento estadístico: Influencia de la velocidad de trabajo de los aireadores en la cantidad de OD y SSLM en el tanque de aireación.

Regression Analysis - Linear model: $Y = a + b \cdot X$

Dependent variable: ODsup

Independent variable: Velocidad

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
Intercept	-12.5194	0.623306	-20.0855	0.0000
Slope	0.0180167	0.00068973	26.1213	0.0000

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	19.476	1	19.476	682.32	0.0000
Residual	0.199806	7	0.0285437		
Total (Corr.)	19.6758	8			

Correlation Coefficient = 0.99491

R-squared = 98.9845 percent

Standard Error of Est. = 0.168949

Equation of the fitted model: $ODsup = -12.5194 + 0.0180167 \cdot Velocidad$

Analysis of Variance with Lack-of-Fit

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	19.476	1	19.476	682.32	0.0000
Residual	0.199806	7	0.0285437		
Lack-of-Fit	0.123339	1	0.123339	9.68	0.0208
Pure Error	0.0764667	6	0.0127444		
Total (Corr.)	19.6758	8			

Anexo 4. Resultados del procesamiento estadístico...

Comparison of Alternative Models

Model	Correlation	R-Squared
S-curve	-0.9985	99.71%
Square root-Y	0.9983	99.66%
Multiplicative	0.9979	99.59%
Exponential	0.9963	99.26%
Linear	0.9949	98.98%
Square root-X	0.9935	98.71%
Logarithmic-X	0.9919	98.38%
Double reciprocal	0.9888	97.78%
Reciprocal-X	-0.9878	97.57%
Reciprocal-Y	-0.9778	95.61%
Logistic		<no fit>
Log probit		<no fit>

Unusual Residuals

Row	X	Y	Predicted Y	Residual	Studentized Residual
8	900.0	3.37	3.69556	-0.325556	-2.98

Regression Analysis - Linear model: $Y = a + b \cdot X$

Dependent variable: ODmed

Independent variable: Velocidad

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
Intercept	-12.9611	0.56646	-22.8809	0.0000
Slope	0.0183667	0.000626825	29.3011	0.0000

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	20.2401	1	20.2401	858.55	0.0000
Residual	0.165022	7	0.0235746		
Total (Corr.)	20.4051	8			

Correlation Coefficient = 0.995948

R-squared = 99.1913 percent

Standard Error of Est. = 0.15354

Equation of the fitted model: $ODmed = -12.9611 + 0.0183667 \cdot Velocidad$

Anexo 4. Resultados del procesamiento estadístico...

Analysis of Variance with Lack-of-Fit

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	20.2401	1	20.2401	858.55	0.0000
Residual	0.165022	7	0.0235746		
Lack-of-Fit	0.0826889	1	0.0826889	6.03	0.0495
Pure Error	0.0823333	6	0.0137222		
Total (Corr.)	20.4051	8			

Comparison of Alternative Models

Model	Correlation	R-Squared
Square root-Y	0.9979	99.57%
S-curve	-0.9974	99.48%
Multiplicative	0.9960	99.19%
Linear	0.9959	99.19%
Square root-X	0.9948	98.96%
Exponential	0.9935	98.70%
Logarithmic-X	0.9934	98.68%
Reciprocal-X	-0.9898	97.98%
Double reciprocal	0.9819	96.41%
Reciprocal-Y	-0.9689	93.88%
Logistic		<no fit>
Log probit		<no fit>

Unusual Residuals

Row	X	Y	Predicted Y	Residual	Studentized Residual
8	900.0	3.28	3.56889	-0.288889	-2.81

Regression Analysis - Exponential model: $Y = \exp(a + b \cdot X)$

Dependent variable: SSLM

Independent variable: Velocidad

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
Intercept	0.933893	0.3278	2.84897	0.2149
Slope	0.00656296	0.000362732	18.0931	0.0351

Anexo 4. Resultados del procesamiento estadístico...

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	0.861448	1	0.861448	327.36	0.0351
Residual	0.0026315	1	0.0026315		
Total (Corr.)	0.864079	2			

Correlation Coefficient = 0.998476

R-squared = 99.6955 percent

Standard Error of Est. = 0.0512981

Equation of the fitted model: **SSLM = exp(0.933893 + 0.00656296*Velocidad)**

Analysis of Variance with Lack-of-Fit

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	0.861448	1	0.861448	327.36	0.0351
Residual	0.0026315	1	0.0026315		
Lack-of-Fit	0.0026315	1	0.0026315		
Pure Error	0.0	0			
Total (Corr.)	0.864079	2			

Comparison of Alternative Models

Model	Correlation	R-Squared
S-curve	-1.0000	99.99%
Multiplicative	0.9997	99.95%
Square root-Y	0.9993	99.85%
Exponential	0.9985	99.70%
Linear	0.9917	98.34%
Square root-X	0.9895	97.91%
Logarithmic-X	0.9870	97.42%
Double reciprocal	0.9865	97.31%
Reciprocal-X	-0.9814	96.32%
Reciprocal-Y	-0.9739	94.86%
Logistic		<no fit>
Log probit		<no fit>

Anexo 5.

Características y aplicaciones del acero inoxidable AISI 304

AISI Type 304L Stainless Steel

Subcategory: Heat Resisting; Metal; Stainless Steel; T 300 Series Stainless Steel

Key Words: aisi304, aisi 304, T304, T 304, SUS304, SS304, 304SS, 304 SS, T304L, T304 L, 304L, 304 L, UNS S30403, AMS 5647, QQ-S-763, austenitic, Cr-Ni stainless steel, SAE 30304L, DIN 1.4306, X2CrNi189, B.S. 304 S 12, PN 86020 (Poland), OOH18N10, ISO 4954 X2CrNi1810E, ISO 683/13 10, 18-8

<u>Component</u>	<u>Wt.(%)</u>	<u>Component</u>	<u>Wt.(%)</u>
C	Max 0.03	P	Max 0.045
Cr	18 ÷ 20	S	Max 0.03
Mn	Max 2	Si	Max 1
Ni	8 ÷ 12		

Material Notes: Austenitic Cr-Ni stainless steel. Better corrosion resistance than Type 302. High ductility, excellent drawing, forming, and spinning properties. Essentially non-magnetic, becomes slightly magnetic when cold worked. Low carbon content means less carbide precipitation in the heat-affected zone during welding and a lower susceptibility to intergranular corrosion. Applications include beer barrels, bellows, chemical equipment, coal hopper linings, cooling coils, cryogenic vessels, dairy equipment, evaporators, feedwater tubing, flexible metal hose, food processing equipment, hypodermic needles, nuclear vessels, oil well filter screens, refrigeration equipment, paper industry, pressure vessels, sanitary fittings, valves, shipping drums, spinning, still tubes, textile dyeing equipment, tubing.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	8 g/cc	0.289 lb/in ³	

Mechanical Properties

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Knoop	158	158	Converted from Rockwell B Hardness Value.
Hardness, Rockwell B	82	82	
Hardness, Rockwell C	15	15	10% Cold-worked.
Hardness, Vickers	159	159	Converted from Rockwell B Hardness Value.
Tensile Strength, Ultimate	564 MPa	81800 psi	0% Cold-worked.
Tensile Strength, Yield	210 MPa	30500 psi	0% Cold-worked.
Elongation at Break	58%	58%	In 50 mm (2 in.)
Modulus of Elasticity	216÷200 GPa	28000÷29000 ksi	
Charpy Impact	216 J	159 ft-lb	

Anexo 5. Características y aplicaciones del acero inoxidable AISI 304

Electrical Properties

Magnetic Permeability	1.008	1.008	at RT.
-----------------------	-------	-------	--------

Thermal Properties

Heat Capacity	0.5 J/g-°C	0.12 BTU/lb-°F	Estimated based on a comparison with similar stainless steels.
---------------	------------	----------------	--

Melting Point	1400÷1450 °C	2550÷2640 °F	
---------------	--------------	--------------	--

Solidus	1400 °C	2550 °F	
---------	---------	---------	--

Liquidus	1450 °C	2640 °F	
----------	---------	---------	--

Max. Service Temperature, Air	870 °C	1600 °F	Intermittent Service.
-------------------------------	--------	---------	-----------------------

Max. Service Temperature, Air	925 °C	1700 °F	Continuous Service.
-------------------------------	--------	---------	---------------------

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's disclaimer and terms of use regarding this information.