Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Desarrollo de un simulador de una planta de lodos activados.

Autor: Fausto Alonso Díaz

Tutores: M. Sc. José Enrique García Arteaga

Dr. Boris Luis Martínez Jiménez

Consultante: Dr. Abel Goya Valdivia

Santa Clara

2009

"Año del 50 Aniversario del Triunfo de la Revolución "

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Desarrollo de un simulador de una planta de lodos activados.

Autor: Fausto Alonso Díaz

falonso@uclv.edu.cu

Tutores: M. Sc. José Enrique García Arteaga

arteaga@uclv.edu.cu

Dr. Boris Luis Martínez Jiménez

boris@uclv.edu.cu

Consultante: Dr. Abel Goya Valdivia

abelgv@uclv.edu.cu

Santa Clara

2009

“Año del 50 Aniversario del Triunfo de la Revolución "

Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

_____

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

_____ _____

Firma del Autor

Firma del Jefe de Departamento donde se defiende el trabajo

_____

Firma del Responsable de Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

Cuando confrontes problemas con el agua acude primero a la experiencia, después a la razón.

Leonardo da Vinci.

DEDICATORIA

A mi dulce madre que me ha apoyado en todo momento.

A toda mi familia y amigos.

AGRADECIMIENTOS

A mi padre, por hacerme un hombre disciplinado y que desde muy pequeño me exhortó a proponerme metas y el modo correcto de conquistarlas. Gracias a él pronto aprendí que los logros se conquistan con la perseverancia y el esfuerzo verdadero, que lejos de agotar llena de vida.

En especial a mi madre por su cariño inagotable hacia sus hijos. Por estar siempre a mi lado y siempre dispuesta a ayudar. Agradezco sus consejos, interés constante y preocupación en mi vida de estudiante. Fue su amor lo que impulsó y materializó mis estudios.

A mi hermano, que con orgullo me hace mirar en el espejo al saber que me parezco a él.

A mis tíos y primos que son de lo mejor, Siempre he contado con ellos y han sabido responder. He de aclarar que en el grupo de tíos incluyo a Bárbaro Santana (Barbarito), a pesar de ser de un linaje distinto, pues se ha ganado mi admiración con su ejemplo de padre y desvelo por el bienestar de su esposa (mi tía Alina).

A mis abuelos, que me enorgullece ser descendiente de ellos. Son ejemplo de guía y dedicación a los suyos. Hicieron posible que viva en una familia unida en armonía.

Al profesorado de la Facultad Eléctrica, bajo cuyo techo me acogí hace ya cinco años y donde cada día aprendí algo nuevo. Por haber puesto a mi disposición todos sus medios para dar cuerpo a este trabajo. A todos los compañeros de este entrañable lugar de esfuerzo y estudio, que con su amistad y generosidad han hecho más llevadero este tránsito.

A mis tutores José Enrique García Arteaga (Cheo) y Boris Luis Martínez Jiménez por su dirección y apoyo en el desarrollo de esta tesis. La colaboración del Dr. Abel Goya Valdivia, que su experiencia en procesos químicos me sirvió de mucho. A Aramis Alfonso Llanes por facilitarme bibliografías de interés y asesoramiento. Al colega y amigo Yeiniel

Suárez que estuvo velando y aclarándome cualquier duda surgida en la confección del trabajo.

A los samuráis (así nos llamamos entre nosotros) Alexander Naranjo, José Miguel, Grigor, Reibelt, Denis, que compartimos muchos ratos de júbilo practicando deportes.

A los compañeros de cuarto, que de ellos solo me falta por mencionar a Freddy que con su buen humor constante le puso ritmo al rincón.

TAREA TÉCNICA

- Estudio de las diferentes partes de una planta de lodos activados en el tratamiento de aguas residuales.
- Estudio de los diferentes balances de masa dinámicos en un sistema de lodos activados, en la obtención del modelo.
- Desarrollo del simulador mediante MATLAB/SIMULINK, basado en el modelo.
- Simulaciones variando distintos elementos para ver el efecto producido en el sistema.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

El proceso de lodos activados requiere de la combinación adecuada de factores como aireación, recirculación de lodos, flujo de alimentación, etc. para llevar a cabo el tratamiento de aguas residuales, eliminando la mayor cantidad de materia orgánica posible. Los cambios en la composición de alimentación a los reactores de lodos activados repercuten directamente en el proceso desestabilizando el sistema y creando una serie de problemas que difícilmente pueden solucionarse de manera inmediata. Es por ello que en este trabajo se desarrolla un simulador, teniendo en cuenta los modelos matemáticos que representan el proceso de lodos activados. Se realizan simulaciones para observar el efecto producido al realizar cambios en las condiciones de operación, que a la vez permite el análisis del estudio del comportamiento del sistema. Para lograr esto, se hace una búsqueda de los elementos teóricos implicados en el caso de estudio y una selección de las herramientas adecuadas.

Se contribuye al estudio de la tecnología biológica aerobia en nuestro país, y se colabora en mejoras en el sistema de tratamiento de aguas residuales. Con los resultados de la simulación, es posible optimizar el funcionamiento, manejando los datos, en vista de lograr un menor consumo de energía y ahorro en gastos de inversión si se quiere hacer un escalado de la planta.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO i

DEDICATORIA ii

AGRADECIMIENTOS iii

TAREA TÉCNICA v

RESUMEN vi

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA 5

1.1 Aguas Residuales. 5

1.2 Tratamiento de aguas residuales. 6

1.2.1 Tratamiento de aguas residuales en Cuba 7

1.3 Fundamentos de los procesos biológicos aerobios. 7

1.3.1 Los procesos de oxidación biológica 7

1.3.2 Factores que intervienen en la oxidación biológica. 8

1.4 Métodos de Lodos Activos. 10

1.4.1 Parámetros de control. 14

1.4.2 Estrategias de Control. 17

1.5 Estructura y funcionamiento del Reactor Biológico. 17

1.5.1 Descripción de los componentes y variables del proceso. 18

1.6 Modelado matemático de plantas de tratamiento de Lodos Activados. 21

1.6.1 Antecedentes históricos del modelado dinámico del proceso de lodos activados. 22

1.6.2 Ventajas y límites del modelado dinámico. 23

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS 25

2.1 Modelado del Proceso de Lodos Activos. 25

2.1.1 Reactores biológicos con recirculación. 25

2.1.2 Balances de masa en sistemas de lodos activados. 28

2.2 MATLAB como software matemático 30

2.2.1 Simulink. 31

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 33

3.1 Desarrollo del simulador. 33

3.2 Simulación 35

3.2.1 Descarga continua con una concentración de (s) = 1000 mg/L. 37

3.2.2 Efecto de la variación del caudal de desecho (Qw). 38

3.2.3 Efecto de la variación del caudal de reciclo (Qr) 42

3.3 Análisis económico. 47

3.3.1 Análisis de costos-beneficios 48

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 50

Conclusiones 50

Recomendaciones 50

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 51

INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental ha venido presentándose en formas muy diversas con asociaciones y sinergismos difíciles de prever, ocasionando problemas desde la antigüedad. Los cambios que origina al ecosistema, es provocado en gran medida por la acción humana, a través de efectos directos o indirectos que dañan seriamente al planeta.

Aunque durante mucho tiempo la naturaleza purificó sus aguas y diluyó los desperdicios recibidos, el crecimiento demográfico constante y el desarrollo industrial generó la diversificación de las actividades socioeconómicas, produciendo a su vez un aumento inevitable de aguas residuales descargadas en cuerpos receptores sin previo tratamiento, contaminándolos seriamente con el paso del tiempo, debido a la insuficiencia de la autopurificación de los desechos líquidos acumulados. Esto dio lugar a la modificación de sus características propias, dando origen a condiciones insalubres que ocasionan enfermedades graves incluso la muerte.

Es de vital importancia contribuir al saneamiento ambiental, mediante sistemas que permitan afrontar el problema en sus propias y actuales dimensiones, para mantener y mejorar la calidad de vida.

Desde el punto de vista salubre, el uso del sistema de alcantarillado ha sido hasta la fecha el medio más eficaz, higiénico y seguro de transportar las aguas residuales de una población hasta un lugar de deposición final, en el cual, se lleve a cabo un proceso de tratamiento que elimine el poder nocivo del agua, para posteriormente reutilizarla en uso como: agrícola, industrial, recreativo, municipal, acuacultura, recarga de acuíferos e intercambio estatal, o bien se vierta en ríos, lagos o mares sin que cause alguna anomalía al mismo, para lo cual deberá cumplir la normatividad que rige los límites permisibles de contaminantes presentes

en las aguas negras, establecidos y vigilados por las autoridades legislativas correspondientes.

Para la depuración del agua residual actualmente existen diversos métodos, entre los que podemos mencionar al pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario o avanzado, los cuales se complementan dependiendo la contaminación del agua a tratar. Los más utilizados son los que involucran microorganismos por las ventajas que ofrecen.

Uno de los tratamientos secundarios más popularmente utilizado para eliminar los elementos contaminantes más comunes de las aguas residuales es el de “Lodos Activos”. Su nombre proviene de la producción de una masa activada de microorganismos capaz de estabilizar un residuo por vía aerobia. Esta masa de microorganismos se alimenta en un tanque de aireación, donde metabolizan y floculan los compuestos orgánicos. Una vez que los microorganismos (lodos activados) han transformado los compuestos orgánicos son llevados al sedimentador y el sobrenadante clarificado es el efluente del sistema. Para mantener la cantidad adecuada de microorganismos en el líquido mezcla parte de los lodos decantados es retornada al tanque de aireación. En sí, este proceso transforma los desechos orgánicos en nueva biomasa usando un cultivo bacteriano aerobio en suspensión.

Los cambios en la composición de alimentación a los reactores de lodos activados repercuten directamente en el proceso desestabilizando el sistema y creando una serie de problemas que difícilmente pueden solucionarse de manera inmediata. Cuando alguien tiene la responsabilidad de conducir un sistema dado, como el anterior, debe tomar continuamente decisiones acerca de las acciones que ejecutará sobre el sistema. Estas decisiones deben ser tales que la conducta resultante satisfaga de la mejor manera posible los objetivos planteados. Para poder decidir correctamente es necesario saber como responderá el sistema ante una determinada acción. Esto podría hacerse por experimentación con el sistema mismo; pero factores de costos, seguridad y otros hacen que esta opción generalmente no sea viable. A fin de superar estos inconvenientes, se reemplaza el sistema original por otro sistema que, en la mayoría de los casos, es una versión simplificada. Este último sistema, denominado modelo, es utilizado para llevar a cabo las experiencias necesarias sin los inconvenientes planteados anteriormente. Al proceso de experimentar con un modelo se denomina simulación.

Por ello, consciente de la problemática ambiental y la carencia en nuestro país de software destinado a la simulación de plantas de tratamientos, la presente investigación se propone como **objetivo fundamental**:

- Desarrollar un simulador, basado en el sistema de ecuaciones diferenciales que resultan del modelo, que permite el análisis en cuanto al comportamiento de un biorreactor, del sistema de lodos activados.

Para lograrlo se persiguen como **objetivos específicos**:

- Analizar los elementos teóricos implicados en el tratamiento de aguas residuales, de forma general y usando biorreactor de lodos activos.
- Seleccionar las herramientas adecuadas y el modelo para el trabajo de simulación del proceso en cuestión.
- Realizar una serie de simulaciones usando el modelo del comportamiento del biorreactor de lodos activos.
- Analizar el comportamiento del modelo ante los diferentes cambios en las condiciones de operación.
- Elaborar el informe final.

El presente trabajo se encuentra conformado por tres capítulos: el primero consiste en la información recopilada de diversos autores, la cual da cimiento teórico al simulador con los temas referentes a tratamientos de aguas residuales, proceso bioquímico aerobio y estructura y funcionamiento del Reactor Biológico. El segundo establece el modelo del proceso de lodos activos utilizado y la herramienta seleccionada para la simulación como un medio visual. En el tercero se proporciona el desarrollo del simulador y las simulaciones que muestran el efecto producido al variar algún elemento del sistema de lodos activados. Finalmente se dan las conclusiones y referencias bibliográficas que sirvieron de fundamento para la realización del estudio.

Se espera con esta obra, contribuir a una posibilidad modesta pero significativa al estudio de la tecnología biológica aerobia en nuestro país, además de colaborar en mejoras en el

sistema de tratamientos de aguas residuales que permitan coadyuvar y preservar tanto la salud del hombre como la del medio ambiente.

CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capitulo se abordan los aspectos teóricos implicados en el caso de estudio. Para lograrlo se lleva a cabo una intensa búsqueda que permita recopilar información fehaciente de diversos autores sobre el tema, que a la vez sirve de cimiento y sustenta la investigación.

El capitulo queda conformado por seis epígrafes. En donde se abordan los temas referentes al tratamiento de aguas residuales en general y, en específico, usando un biorreactor de lodos activos, un caso de proceso biológico aerobio. También trata aspectos del modelado dinámico del proceso de lodos activados.

1.1 Aguas Residuales.

Las aguas residuales son materiales derivados de residuos domésticos o de procesos industriales, los cuales por razones de salud pública y por consideraciones de recreación económica y estética, no pueden desecharse vertiéndolas sin tratamiento en lagos o corrientes convencionales. Los materiales inorgánicos como la arcilla, sedimentos y otros residuos se pueden eliminar por métodos mecánicos y químicos; sin embrago, si el material que debe ser eliminado es de naturaleza orgánica, el tratamiento implica usualmente actividades de microorganismos que oxidan y convierten la materia orgánica en CO_2 (Milena, 2004).

Cuando un vertido de agua residual sin tratar llega a un cauce produce varios efectos sobre él (Acosta, 2001):

- Tapiza la vegetación de las riberas con residuos sólidos gruesos que lleva el agua residual, tales como plásticos, utensilios, restos de alimentos, etc.

- Acumulación de sólidos en suspensión que sedimentan en el fondo y a orillas del cauce, tales como arenas y materia orgánica.
- Consumo del oxígeno disuelto que tiene el cauce por descomposición de la materia orgánica y compuestos amoniacales del agua residual.
- Formación de malos olores por agotamiento del oxígeno disuelto del cauce que no es capaz de recuperarse.
- Entrada en el cauce de grandes cantidades de microorganismos entre los que pueden haber elevado número de patógenos.
- Contaminación por compuestos químicos tóxicos o inhibidores de otros seres vivos.
- Posible aumento de la eutrofización al portar grandes cantidades de fósforo y nitrógeno.

1.2 Tratamiento de aguas residuales.

Generalmente la industria trata o dispone separadamente los residuos líquidos industriales de los domésticos (producidos en baños y cocina de la planta), que es como la normativa ambiental, en general, lo indica (Guzmán et al., 1998).

Para la depuración del agua residual actualmente existen diversos métodos, entre los que se pueden mencionar al pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario o avanzado, los cuales se complementan en dependencia del grado de contaminación del agua a tratar. El pretratamiento consiste en la eliminación de sólidos gruesos, suspendidos, grasas/aceites, que puedan ocasionar problemas de mantenimiento y funcionamiento de los procesos posteriores; el tratamiento primario reduce alrededor del 30% de la materia orgánica y un 60% de sólidos suspendidos, en el tratamiento secundario se elimina el resto de los compuestos biodegradables y sólidos suspendidos, mediante procesos físico-químicos (precipitación, coagulación, floculación) y biológicos, donde las bacterias son el principal agente purificador en forma de “biomasa”, estos se dividen en convencionales (lodos activados, lagunas aireadas, zanjas de oxidación, filtros rociadores, biodiscos o combinados) y no convencionales. Estos últimos son conocidos como de alta tasa, que a su vez se subdividen en tres generaciones según la manera en que la biomasa se desarrolla

dentro de ellos; en la primera la biomasa se encuentra en suspensión (fosa séptica, tanque Imhoff, lagunas anaerobias, digestores convencionales, etc.); en la segunda, los microorganismos son retenidos dentro del reactor suministrándoles soportes inertes o mediante sedimentación (UASB, FAFA, reactores de lecho fijo, reactores híbridos, etc.); y los de tercera, la masa biológica es retenida mediante un soporte que se expande o fluidifica con altas velocidades de flujo (reactor de lecho expandido). El tratamiento terciario o avanzado, se encarga de la remoción de nutrientes para prevenir eutrofización de las fuentes receptoras, o bien para incrementar la calidad de un efluente secundario para un rehúso adecuado. Sin embargo, para la elección del tipo de sistema a utilizar en el tratamiento de un agua residual debe tomarse en cuenta que este tenga características de costo-beneficio apropiadas que contribuyan a obtener mejores posibilidades de éxito.

1.2.1 Tratamiento de aguas residuales en Cuba

Infraestructura del tratamiento de aguas residuales en Cuba:

- 476 Lugares con alcantarillado
- 3996,0 km de redes de alcantarillado
- 126 Estaciones de bombeo
- 8 Plantas de tratamiento de aguas residuales
- 304 Sistemas de lagunas de estabilización
- 846 813 Fosas sépticas

Con esta Infraestructura se logra dar servicio a una población de 4 356386 habitantes con sistema de alcantarillado (INRH, 2008)

1.3 Fundamentos de los procesos biológicos aerobios.

1.3.1 Los procesos de oxidación biológica

La oxidación biológica es el mecanismo mediante el cual los microorganismos degradan la materia orgánica contaminante del agua residual. De esta forma, estos microorganismos se alimentan de dicha materia orgánica en presencia de oxígeno y nutrientes, de acuerdo con la siguiente reacción:

$$\text{Materia orgánica} + \text{Microorganismos} + \text{Nutrientes} + O_2 == > Productos\ finales + \text{Nuevos microorganismos} + \text{Energía}$$

Para que lo anteriormente expuesto se produzca, son necesarias dos tipos de reacciones fundamentales totalmente acopladas: de síntesis o asimilación y de respiración endógena u oxidación (Metcalf and Eddy, 1995).

Reacciones de síntesis o asimilación:

Consisten en la incorporación del alimento (materias orgánicas y nutrientes) al interior de los microorganismos. Estos microorganismos al obtener suficiente alimento no engordan, sino que forman nuevos microorganismos reproduciéndose rápidamente. Parte de este alimento es utilizado como fuente de Energía. La reacción que ocurre es la siguiente:

$$CHNO\ (materia\ org\text{ánica}) + O_2 + Bacterias + Energía == > C_5H_7NO_2\ (\text{sustancias del interior bacteriano})$$

Reacciones de oxidación y Respiración endógena:

Los microorganismos, al igual que el hombre, necesitan de energía para poder realizar sus funciones vitales (moverse, comer, etc.), dicha energía la obtienen transformando la materia orgánica asimilada y aquella acumulada en forma de sustancias de reserva en gases, agua y nuevos productos de acuerdo con la siguiente reacción:

$$C_5H_7NO_2\ (\text{material celular}) + 5O_2 ==> 5CO_2 + 2H_2O + NH_3 + \text{Energía}$$

Como se puede observar, después de un tiempo de contacto suficiente entre la materia orgánica del agua residual y los microorganismos (bacterias), la materia orgánica del medio disminuye considerablemente transformándose en nuevas células, gases y otros productos. Este nuevo cultivo microbiano seguirá actuando sobre el agua residual.

A todo este conjunto de reacciones se les denomina de oxidación biológica, porque los microorganismos necesitan de oxígeno para realizarlas.

1.3.2 Factores que intervienen en la oxidación biológica.

Los factores principales que hay que tener en cuenta para que se produzcan las reacciones biológicas y por tanto, la depuración del agua residual son:

- Las características del sustrato:

Las características físico-químicas del agua residual, determinan el mejor o peor desarrollo de los microorganismos en este sistema, existiendo compuestos contaminantes que son degradables biológicamente y otros que no lo son.

- Los nutrientes:

  El interior celular, aparte de C, H y O, elementos característicos de la materia orgánica, contiene otros elementos como son el N, P, S, Ca, Mg, etc., denominados nutrientes y que a pesar de que muchos de ellos se encuentran en el organismo sólo en pequeñas cantidades, son fundamentales para el desarrollo de la síntesis biológica.

  Se ha determinado a nivel medio que los microorganismos para sobrevivir necesitan por cada 1000 gr. de C, 43 de N y 6 de P, y que en las aguas residuales urbanas existen por cada 1000 gr. de C, 200 gr. de N y 16 gr. de P.

  Si se compara lo que necesitan los microorganismos para sobrevivir, con las cantidades existentes de dichos elementos en el agua residual, se puede concluir que a título general dichos microorganismos pueden desarrollarse en el agua residual perfectamente.

  Es interesante comentar que en el caso de determinadas aguas con vertidos industriales, las proporciones de dichos elementos no están equilibradas, siendo necesario a veces dosificar N y P en el agua, para que pueda darse el desarrollo bacteriano y exista depuración biológica.

- Aportación de oxígeno:

  Como se ha visto, para el desarrollo de las reacciones biológicas es necesario un medio aerobio, es decir, con oxígeno suficiente que permita el desarrollo y la respiración de los microorganismos aerobios.

- Temperatura:

  A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad con que los microorganismos degradan la materia orgánica, pero a partir de los $37\,^{\circ}C$, dichos organismos mueren.

- Salinidad:

  El contenido en sales disueltas no suele ser problemático para el desarrollo bacteriano en el proceso de fangos activos hasta concentraciones de 3 a 4 g/l. En los procesos de cultivos fijos (lechos bacterianos), la influencia es aún menor, no afectando valores que no superen los 15 g/l. Sin embargo, existen multitud de grupos bacterianos capaces de vivir en aguas saladas, de forma que si al sistema de depuración se le da tiempo de adaptación, pueden desarrollarse bastante bien dichos grupos microbianos a concentraciones salinas superiores.

- Tóxicos o inhibidores:

  Existen una serie de sustancias orgánicas e inorgánicas que, a ciertas concentraciones, inhiben o impiden los procesos biológicos. Este tipo de sustancias, entre las que se encuentran los metales pesados, ejercen un efecto perjudicial sobre los microorganismos encargados de depurar el agua y por tanto, no deben entrar en las plantas depuradoras con el agua residual, o si entran deben hacerlo en concentraciones muy bajas.

Todos estos factores mencionados son de gran importancia, y deben ser controlados si se quiere obtener un rendimiento eficaz de depuración por parte de los microorganismos encargados de degradar la materia orgánica del agua residual.

1.4 Métodos de Lodos Activos.

Uno de los tratamientos secundarios más popularmente utilizado para eliminar los elementos contaminantes más comunes de las aguas residuales es el de “Lodos Activos” (Peguero, 2003 p. 25). Este proceso transforma los desechos orgánicos en nueva biomasa usando un cultivo bacteriano aerobio en suspensión. Una descripción detallada de dicho proceso se muestra a continuación.

El agua de salida de los tanques de sedimentación primaria se pasa a un canal de alimentación central donde se introducen los lodos activos recirculados. Después, ese caudal se reparte entre uno o más tanques de aireación donde un cultivo bacteriano, “biomasa”, degrada la materia orgánica del agua, “substrato”, convirtiéndola en productos inorgánicos, además de biomasa y energía. Se trata de un tratamiento aerobio, por lo que se

requiere la presencia de oxígeno disuelto proporcionado por turbinas de aireación. Los "aireadores" mezclan el oxígeno con el agua a tratar. Al final de este proceso, hay una etapa de aclarado donde los "lodos activos" y el agua limpia se separan por gravedad, vertiéndose ésta última al río. Parte de esos "lodos activos" sedimentados son reciclados para realimentar los tanques de aireación (Peguero, 2001)

Figura 1.1 Planta de tratamiento de agua (Lodos Activos).

Figura 1.2 Sistema de aireación de una Planta de Lodos Activos.

Figura 1.3 Tanques de aireación.

Los elementos básicos de las instalaciones del proceso de lodos activados son:

- Tanque de aireación: estructura donde el desagüe y los microorganismos (incluyendo retorno de los lodos activados) son mezclados.
- Tanque sedimentador: el desagüe mezclado procedente del tanque es sedimentado separando los sólidos suspendidos (lodos activados), obteniéndose un desagüe tratado clarificado.
- Equipo de inyección de oxígeno: para activar las bacterias heterotróficas.
- Sistema de retorno de lodos: el propósito de este sistema es el de mantener una alta concentración de microorganismos en el tanque de aireación.

Su operación básica consiste en:

1) Pre-tratamiento/ajuste de aguas residuales.

   En algunos casos las aguas residuales deben ser acondicionadas antes de pasar al proceso de lodos activados, esto es debido a que ciertos elementos inhiben el proceso biológico. Algunos de estos casos son:

   - Sustancias dañinas a la activación microbiana, tal como la presencia de cloro.

- Grandes cantidades de sólidos. Se utilizan cribas o rejas en un tanque de sedimentación primaria para los sólidos fácilmente sedimentables.
- Aguas residuales con valores anormales de pH. Se debe realizar un proceso de neutralización el cual es indispensable para el desarrollo bacteriano.
- Desagües con grandes fluctuaciones de caudal y calidad de las aguas residuales incluyendo concentración de DBO. Se homogeniza las aguas en un tanque de igualación.

2) Remoción de DBO en un Tanque de Aireación.

   Las aguas residuales crudas mezcladas con el lodo activado retornado del tanque sedimentador final es aireado hasta obtener 2 mg/l de oxígeno disuelto o más. En este proceso, una parte de materia orgánica contenida en los desagües es mineralizada y gasificada y la otra parte es asimilada como nuevas bacterias

3) Separación sólido - líquido en el Tanque de Sedimentación.

   Los lodos activados deben ser separados del licor mezclado provenientes del tanque de aireación. Este proceso se realiza en el tanque de sedimentación, concentrándolos por gravedad. La finalidad de este proceso es conseguir un efluente clarificado con un mínimo de sólidos suspendidos y asegurar el retorno del lodo.

   Descarga del exceso de lodos con la finalidad de mantener la concentración de los lodos activados en el licor mezclado a un determinado valor, una parte de los lodos son eliminados del sistema a lechos de secado o espesadores con filtros mecánicos (filtros prensa, de cinta etc.) para posteriormente disponer el lodo seco como residuo sólido.

Un aspecto importante del proceso de tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados es el uso de flóculos biológicos en los lodos activados compuestos de bacterias heterotróficas, y son el elemento principal para la purificación. El proceso de tratamiento tiene dos importantes características (Carvajal, 2007):

1. Eficiente remoción de materia orgánica.
2. Eficiente separación de sólidos.

El “Proceso de Lodos Activos” obedece a una dinámica claramente no lineal. La respuesta de los sistemas no lineales depende de las condiciones iníciales, así como de la magnitud, la configuración y la forma de las entradas. Ello provoca la ausencia de un cuerpo teórico bien definido capaz de analizar y controlar su comportamiento. Es decir, no existe un método general para afrontar todos los sistemas no lineales porque las ecuaciones diferenciales no lineales que caracterizan su comportamiento carecen de un procedimiento general de solución (Henson and Seborg, 1997). Este carácter no lineal del proceso de lodos activos se ve reforzado por las no linealidades intrínsecas de los actuadores y sensores que intervienen en dicho proceso, los cuales, bien por razones de seguridad y/o de fabricación, tienen rangos limitados de actuación.

Además, los cambios en las condiciones ambientales a los que está sometido un reactor aerobio, cambios de temperatura, humedad, etc., hacen que el “Proceso de Lodos Activos” sea variable en el tiempo, es decir, su comportamiento va a depender del instante en el que tiene lugar una perturbación o en el que se aplica una determinada entrada y, por tanto, de la estacionalidad de su aplicación.

A esta complejidad en el comportamiento dinámico se une la demanda de unas especificaciones de funcionamiento cada vez más exigentes. No sólo se requiere un comportamiento transitorio y estacionario satisfactorio, sino que se busca el mejor comportamiento posible respecto a un cierto índice de calidad en el funcionamiento. Más aún, algunas especificaciones exigen un cierto grado de autonomía en el controlador, en el sentido de capacidad de reacción y replanteamiento de objetivos ante fallos en el sistema.

1.4.1 Parámetros de control.

Existen una serie de variables que hay que controlar para asegurarnos de que el proceso de fangos activos funciona bien. Entre estas variables se encuentran (Metcalf and Eddy, 1995):

- La calidad exigida al efluente:

  La calidad que las autoridades exijan al agua de salida, va a determinar tanto el funcionamiento del proceso como el control del mismo. Si se requiere un alto grado de tratamiento, el proceso deberá estar muy controlado y probablemente se requiera

de un tratamiento adicional. Dicha calidad deberá ser determinada a través del análisis realizado por el laboratorio.

- Características del agua residual a tratar:

  Los caudales y características del influente, se encuentran fuera del campo de actuación del operador, siendo competencia del laboratorio y de las autoridades municipales que controlan los residuos que se vierten en el sistema colector, evitando que determinadas industrias viertan residuos tóxicos para los microorganismos que trabajan en la cuba de aireación.

- Cantidad de microorganismos activos que se necesitan en el tratamiento:

  La proporción entre la cantidad de microorganismos activos y el alimento disponible, es un parámetro decisivo en el control del proceso. Si esta proporción no es equilibrada, aparecerán serios problemas en planta. El número de organismos aumenta también al aumentar la carga de materia orgánica (alimento) y el tiempo de permanencia en la cuba de aireación (edad del fango). El operador deberá eliminar el exceso de microorganismos (fangos en exceso o purga de fangos) para mantener el número óptimo de trabajadores para el tratamiento eficaz de las aguas.

  Por otra parte, es fundamental proceder a una recirculación de fangos desde el decantador hasta la cuba de aireación, para mantener una concentración de organismos suficiente, ya que si no se irían eliminando y se acabaría con un lavado del tanque.

  El fango del decantador debe extraerse tan pronto como se forme la manta de fangos, ya que de permanecer en él, pueden darse fenómenos que hagan que el fango flote. El sistema de bombeo de fangos, por tanto, debe encontrarse en condiciones óptimas para actuar cuando se le necesite.

  Para conocer la concentración de microorganismos del licor de mezcla y de los fangos de recirculación, se determinará el nivel de sólidos volátiles en ambos.

- Nivel de oxígeno disuelto:

  El oxígeno que se aporte a la cuba de aireación debe ser suficiente para que, los microorganismos puedan respirar y se pueda oxidar la materia orgánica.

La relación cantidad de oxígeno / cantidad de alimento debe estar regulada y mantenerse estable. Una descompensación en un sentido o en otro, puede dar lugar a una aparición de organismos filamentosos que tienden a flotar en el decantador secundario, alterando totalmente la separación sólido-líquido y tendiendo a ser lavados con el efluente.

El nivel de oxígeno disuelto suele medirse con sensores que dan información inmediata de las cantidades de oxígeno en cuba, a partir de esta información los sistemas de agitación y de aireación se ponen en marcha o se paran.

La agitación debe estar bien controlada, para que el oxígeno y el alimento se distribuyan homogéneamente por toda la cuba.

- Tiempo de retención:

  Para que se pueda dar el proceso de oxidación biológica, es necesario que los microorganismos permanezcan un tiempo de contacto suficiente con las aguas residuales. Este tiempo de retención es uno de los parámetros que hay que tener en cuenta para diseñar las cubas, ya que en relación con el caudal a tratar y el tiempo que debe permanecer el caudal en la cuba, calcularemos el volumen de la misma.

- Índice volumétrico de fangos:

  Se define como el volumen en ml ocupado por un gramo de sólidos en suspensión del licor de mezcla, tras una sedimentación de 30 minutos en una probeta de 1000 ml. Por lo tanto, se toma 1 litro de licor mezcla y se pone a sedimentar durante 30 minutos, se apunta el volumen que ocupa el fango y se hace la relación:

  IVF = ml sólidos sedimentables * 1000 / ppm de SSLM

  Este valor da el comportamiento de los fangos en el decantador. Si el valor es menor de 100 implica fangos con desarrollo de organismos que sedimentan bien y por tanto buena separación sólido-líquido. Si el valor es superior, se han desarrollado organismos filamentosos con mala sedimentación, lo que lleva a una descompensación en el funcionamiento del sistema.

1.4.2 Estrategias de Control.

Es evidente que, para hacer frente a todas estas circunstancias, la “Teoría Clásica de Control” resulta insuficiente y es necesaria la aplicación de técnicas de “Control Avanzado”. En este sentido cabe mencionar la aparición de numerosas disciplinas en el intento de proponer soluciones novedosas ante problemas de no linealidad, especificaciones exigentes, parámetros variables en el tiempo o modelos con incertidumbre sometidos a perturbaciones. Surgen así el “Control No Lineal”, el “Control Optimo”, el “Control Robusto” y el “Control Adaptativo”, que son técnicas convencionales de control avanzado, en cuanto que utilizan métodos estrictamente matemáticos y algorítmicos.

Una alternativa la constituye el llamado “Control Inteligente” que, a diferencia de los anteriores, utiliza métodos basados en el conocimiento, métodos que incluyen heurísticos, incorporando al proceso de control dos características esenciales de la inteligencia: el razonamiento y la capacidad de aprendizaje (Astrom and Wittenmark, 1995), (White and Sofge, 1992), (Gupta and Sinha, 1996), (Camacho and Arahal, 1994). En términos generales, el control del “Proceso de Lodos Activos” es un proceso regulador consistente en mantener el valor de una o varias variables en torno a un valor de referencia dentro de unos límites establecidos.

1.5 Estructura y funcionamiento del Reactor Biológico.

El proceso de tratamiento biológico de aguas residuales tanto industriales como urbanas, también denominado de “Lodos Activos”, se viene utilizando de forma empírica desde hace aproximadamente un siglo. Desde los años sesenta viene haciéndose de forma más racional. Este proceso nació de la observación realizada, hace mucho tiempo, de que si cualquier agua residual se somete a aireación durante un período de tiempo se reduce su contenido en materia orgánica, formándose a la vez un lodo “floculento”.

El examen microscópico de este lodo revela que está formado por una población heterogénea de microorganismos, que cambian continuamente en función de las variaciones de la composición de las aguas residuales y de las condiciones ambientales.

El proceso de “Lodos Activos”, desarrollado como una operación continua mediante el reciclado del “Lodo Biológico o Biolodos” se representa en el esquema de la figura 1.4

como un diagrama de flujo. Este esquema obedece a una simplificación del proceso que contempla sólo las variables que han sido consideradas objeto de este estudio.

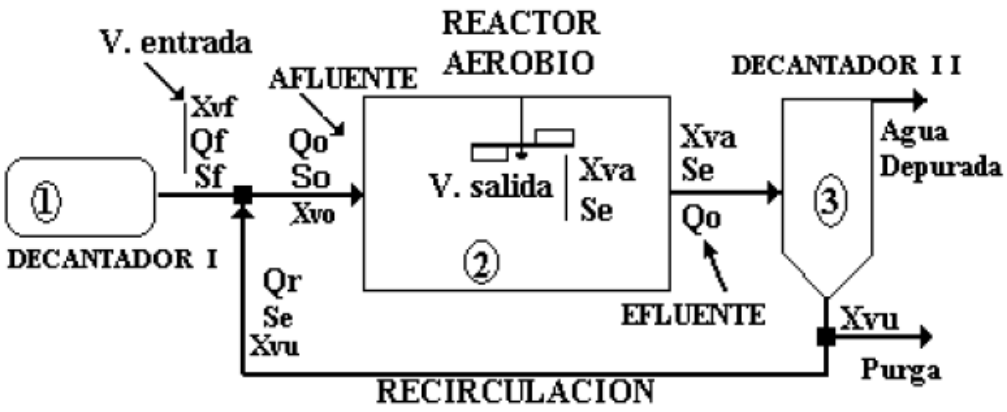

Figura 1.4 Diagrama de flujo de la Planta de Lodos Activos (Peguero, 2003).

1.5.1 Descripción de los componentes y variables del proceso.

En la figura 1.4 se representan las variables de las que depende el sistema así como las diferentes corrientes de relación entre los distintos bloques o componentes, las entradas y las salidas (Peguero, 2003 p. 53).

A continuación se describen los componentes y variables que caracterizan este proceso.

Componentes:

1. El decantador primario:

   Elemento de filtrado inicial, cuya finalidad es eliminar las partículas gruesas presentes en el agua a depurar mediante un proceso de desarenado y desengrasado.

2. El reactor aerobio:

   Se trata de un tanque abierto a la intemperie en el cual se desarrolla el proceso de formación de biolodos y digestión por parte de estos de la materia orgánica que se desea eliminar.

3. El decantador o clarificador secundario:

   Se trata de un tanque de decantación al que llega el flujo de agua ya depurada de sustrato orgánico con una concentración de biolodos procedente del reactor, que

permite la floculación de estos biolodos para su condensación y posterior eliminación. En este elemento, el agua depurada rebosa por la parte superior, quedando los microorganismos en el fondo, parte de los cuales serán recirculados hacia el reactor para mantener la concentración de los biolodos del mismo, dentro de unos límites apropiados.

Variables:

- Concentración de sustrato: se define DBO (demanda bioquímica de oxígeno), como medida de la cantidad de oxígeno requerido para la oxidación de la materia orgánica biodegradable presente en la muestra de agua y como resultado de la acción de oxidación bioquímica aerobia. Es, en realidad, una forma de expresar la concentración de sustrato del agua residual, materia orgánica disuelta en el agua que se desea reducir. Como hipótesis de trabajo se considera que al reactor solo accede la DBO soluble, ya que la DBO insoluble debe haberse quedado en el decantador primario.

  La alimentación inicial, esto es, el agua residual a tratar, entra en el proceso con una concentración de materia orgánica formada por compuestos carbonosos en disolución (valor de la DBO soluble entrante), que se indica por S_f. El objetivo de este tratamiento es reducir este valor a S_e, DBO soluble del efluente o liquido que fluye del reactor, mediante oxidación por degradación biológica aerobia de la materia orgánica del agua residual. Se busca una reducción de la DBO soluble de la alimentación inicial del 5 al 15%, la concentración de DBO soluble S_e en el reactor coincide con la del efluente y pasa al decantador o clarificador secundario.

- Concentración de biolodos: el lodo biológico, constituido por los microorganismos encargados de digerir la materia orgánica o sustrato que llega del exterior, cuya concentración será denominada X_{va}, se forma continuamente en el reactor.

- Caudales: en la entrada del reactor la alimentación inicial (agua residual que entra en la Planta) con un caudal Q_f se combina con un flujo procedente de la propia salida de la Planta que contiene lodos acumulados después de todo el proceso,

caudal Q_r de recirculación, dando lugar a la alimentación combinada que estará denominada por Q_o, afluente o liquido que entra en el reactor.

El modelo de reactor a usar será del tipo R.F.C.T.A. (Reactor de Flujo Continuo en Tanque Agitado), cuyas características vienen impuestas por las siguientes condiciones de trabajo:

Régimen estacionario: cuando el reactor está estable, ajeno a grandes fluctuaciones.

Mezcla completa: cuando se da una mezcla homogénea en el líquido presente en el reactor, de manera que las variables no presentan dependencia de las coordenadas físicas del recipiente.

A continuación se relaciona en detalle el conjunto de variables que operan en el sistema:

- Concentraciones: se refiere a las concentraciones de todos los tipos de materia sólida orgánica presente en los elementos de la Planta.
    - S_f, o DBO soluble de la alimentación inicial; mg/l.
    - S_e, o DBO soluble del efluente; mg/l.
    - X_{va}, o concentración de sólidos volátiles en suspensión VSS en el reactor; mg/l. Representa la concentración de microorganismos en el reactor.
    - X_{vu} , o concentración de sólidos volátiles en suspensión VSS en el decantador secundario; mg/l.
- "Caudales": representan los flujos de líquido que entran y salen de los distintos elementos de la Planta.
    - Q_f, o alimentación inicial; m^3/s.
    - Q_r, o reciclado; m^3/s.
    - Q_o, o alimentación combinada; m^3/s.

Siendo $Q_o = Q_f + Q_r$.

1.6 Modelado matemático de plantas de tratamiento de Lodos Activados.

Uno de los modelos más conocidos y más utilizados para diseñar las plantas de tratamiento por lodos activados es el de MacCarty y Lawrence (1970). El modelo es una simplificación utilizada para diseñar las plantas, considerando un régimen estacionario y la DBO o DQO total como parámetro de caracterización. Este modelo es el expuesto en los libros clásicos de tratamiento de aguas. No permite predecir el comportamiento dinámico de las plantas, ni determinar con exactitud la demanda de oxígeno y producción de lodos (Fall et al., 2006)

En los últimos años, aparecieron cambios importantes en las teorías y prácticas de diseño de los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales, constituyendo claramente un nuevo paradigma entre el enfoque clásico, muchas veces empírico, y las tendencias actuales asentadas en la formulación de modelos más precisos. Estos modelos presentan todas las ventajas de la simulación dinámica, una mayor exactitud de las predicciones y diseño, que vuelven obsoleta una buena parte de las simplificaciones e imprecisiones de los métodos antiguos. Cambian, radicalmente, hasta los métodos de caracterizar las aguas residuales, con la aparición, por ejemplo, de una nueva forma de fragmentar la demanda química de oxígeno. Los modelos para los lodos activados (el más famoso de todos los procesos de tratamiento biológico) fueron desarrollados por un comité científico internacional bajo la responsabilidad de la prestigiosa IAWQ (*Internacional Association of Water Quality*), actual IWA. En el inicio, el esfuerzo de la comunidad científica radicó en llegar a un consenso sobre la forma de presentar los modelos y hacerlos evolucionar o ampliar progresivamente, según los conocimientos que se tienen en el curso de los años. Existen hoy cuatro generaciones de modelos de la IWA, el ASM1 original y el muy reciente ASM3, capaces de predecir la degradación de la materia orgánica, nitrificación y desnitrificación en lodos únicos, y el ASM2 y su versión modificada ASM2d que incluyen además la remoción biológica del fósforo.

En la actualidad, existen una gran necesidad de difusión del tema y actualización de los especialistas en modelación de los procesos de tratamiento de agua. También existen retos bien identificados para la investigación en los aspectos de caracterización y mecanismos bioquímicos así como en lo relacionado con la simplificación de los modelos y protocolos de simulación. El enfoque de la modelación dinámica en tratamiento de aguas está en vía de

generalizarse a muchos otros tipos de sistemas, y constituye, sin duda alguna, uno de los polos con mayor potencial de desarrollo en el futuro para la investigación en tratamiento de aguas residuales.

1.6.1 Antecedentes históricos del modelado dinámico del proceso de lodos activados.

En 1982, la IAWQ incentivó la formación de un grupo de estudio internacional encargado de acelerar el desarrollo de la modelación dinámica de las plantas de tratamiento, crear una plataforma comuna consensual y proponer un modelo simple de inicio. El grupo concentró sus primeros esfuerzos en inventariar los modelos existentes así como los obstáculos a su desarrollo. Se llegó a concluir que los únicos modelos que conocieron una amplia difusión y nivel de utilización, fueron los más simples que consideran una hipótesis de régimen estacionario y mezcla completa para los reactores. Por otra parte, existía un gran número de modelos dinámicos, cuya difusión fue obstaculizada por la complejidad, la falta de orden para presentarlos y las limitaciones en el poder de las computadoras.

En los años 70, la Universidad de Cap Town (Suráfrica) fue una de las pioneras de la modelación dinámica con los trabajos del profesor G.V.R. Marais. Otros trabajos tuvieron lugar después o simultáneamente en un número muy restringido de universidades de Europa y Estados Unidos. Parte de los pioneros fueron juntados luego en 1980 en el primer grupo de estudio de la IAWQ (actual IWA) formado por Henze (Dinamarca), Grady (USA), Gujer (Suiza) y Marais (Suráfrica).

Las conclusiones del grupo fueron publicadas en 1987 en un informe que presentaba lo conocido hoy como el Modelo ASM1, modelo dedicado a describir la degradación de materia orgánica, nitrificación y desnitrificación en un proceso de lodos activados (de tipo lodos únicos). Los logros más destacados del grupo fueron un consenso en los procesos biológicos que integran el modelo, la estandarización de los símbolos, la presentación del modelo utilizando una notación matricial, la propuesta de valores por defecto de los parámetros del modelo, la adopción de la DQO y su fraccionamiento para caracterizar las aguas y lodos, un código de programación para el desarrollo futuro de software de modelización. La última acción propulsó la existencia actual de varios software y programas que tienen implementados, los conceptos del ASM1 original o algunas de sus

modificaciones para fines de diseño, operación de plantas o investigación: Aquasim, Biowin, GPS-X, SSSP, Simba, etc.

En 1995, los trabajos del grupo de estudio renovado se prolongaron para publicar la versión ASM2, la cual está dirigida a predecir el comportamiento del fósforo. En 1999 hubo otras dos modificaciones con la aparición de la versión ASM2d (versión modificada del ASM2) y de la versión ASM3 (alternativa al ASM1).

1.6.2 Ventajas y límites del modelado dinámico.

- La modelación dinámica permite predecir la calidad del efluente, la demanda de oxígeno y la producción de lodo en respuesta a las fluctuaciones en tiempo real de la carga y del caudal del influente.
- Una vez que se tiene modelado y calibrada una planta, el modelo se puede utilizar para fines de diagnóstico, proyección, comparación de variantes, probar cambios en la operación, evaluación de las prácticas actuales, optimización de operación y gastos, así como para la capacitación del personal.
- Aun cuando la planta proyectada no existe todavía físicamente, se puede probar configuraciones innovadas y comparar variantes.
- Se pueden reducir las necesidades de estudio piloto, el tiempo y la inversión que se requiere para esto, realizando primero los estudios por modelación y sólo probar en escala piloto algunas de las soluciones identificadas.
- Se puede optimizar la configuración y el funcionamiento de una planta de tratamiento, así como responder a numerosas preguntas respecto a su capacidad e impactos de modificaciones proyectadas.
- La modelación constituye un instrumento de ayuda a la decisión para los administradores de plantas y un medio de gráfico visual para convencer estos últimos.
- Con la modelación se pueden realizar estudios sin perturbar el funcionamiento de la planta, ni poner en riesgo sus equipos.

- Es también un medio de formación y concientización de los operadores sobre algunos aspectos críticos.
- Como principales límites, se debe notar la necesidad de realizar estudios anteriores para calibrar los modelos Los datos que se necesitan para esto son generalmente diferentes de los datos rutinarios de caracterización que se tienen en las plantas de tratamiento. Todavía falta realizar investigaciones para evaluar la aplicabilidad de los modelos para diferentes efluentes industriales.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El capitulo está conformado por dos epígrafes. En uno se establece el modelo del proceso de lodos activos que se utiliza, dado por las ecuaciones donde se muestran los diferentes balances de masa dinámicos sobre el sistema. En el otro se aborda lo referente a la herramienta seleccionada, MATLAB, para el trabajo de simulación como un medio visual.

2.1 Modelado del Proceso de Lodos Activos.

La depuración del agua residual contaminada con sustancias orgánicas, haciendo uso del "Reactor Biológico", es el resultado de un proceso metabólico en el que una población de seres vivos, Biolodos, se alimenta precisamente de los residuos que se pretenden eliminar. Es evidente que la disminución de la materia orgánica dependerá de la población de microorganismos y, por tanto, de todas las circunstancias que afectan a dicha población. Puesto que se pretende hacer un uso racional de este proceso, será preciso establecer las condiciones que mantienen el equilibrio del mismo. A este proceso se le denomina de "Lodos Activos".

Es deseable representar este proceso mediante modelos matemáticos, que se definen en función de una serie de variables de entrada/salida cuya relación es expresable mediante un sistema de ecuaciones diferenciales. Los parámetros utilizados en dichos modelos se pueden determinar a partir de datos experimentales (Peguero, 2003 p.58).

2.1.1 Reactores biológicos con recirculación.

Tanto los procesos de lodos activados como los sistemas de lagunas aireadas son ampliamente utilizados para el tratamiento de aguas residuales. La principal diferencia entre ellos viene dada por la recirculación de lodos biológicos por birreactor aireado. En el

caso de lagunas aireadas, no existe recirculación de lodos; en cambio, en el sistema de lodos activados se utiliza un sedimentador secundario que clarifica el agua residual tratada que sale del reactor biológico; con ello, el lodo biológico se sedimenta y concentra en forma tal que cierta cantidad es recirculado hacia el biorreactor; este sistema lógicamente permite mantener altas concentraciones de lodos biológicos (SSV) en el biorreactor. Esto trae como consecuencia que los tiempos de residencia, los tamaños de reactores y las áreas de construcción sean menores que si se utilizara el sistema de lagunas aireadas.

En los reactores biológicos sin recirculación, y en estado estacionario, el balance de sólidos es el siguiente (Martínez and Rodriguez, 2005):

Entra en el caudal de entrada = sale del reactor – crecimiento

$$\frac{Q_f}{V} X_f = \frac{Q_f}{V} X - \mu X \quad (I)$$

Donde:

Q_f = caudal de entrada (volumen/tiempo)

μ = velocidad específica de crecimiento $(d^{-1}) = \frac{\mu_{max} S}{K_s + S}$

μ_{max} = velocidad especifica de crecimiento máxima (d^{-1})

X_f = concentración de sólidos suspendidos volátiles (SSV) en el caudal de entrada (mg/L)

X = concentración de sólidos suspendidos volátiles (SSV) en el reactor (mg/L)

K_s = constante de afinidad del sustrato (mg/L)

$D = \frac{Q_f}{V}$ = velocidad de dilución (d^{-1}) $\quad (II)$

Por lo tanto,

$$DX_f = DX - \mu X \quad (III)$$

$$= (D - \mu)X$$

Para concentraciones de biomasa (SSV), a la entrada del reactor, despreciables o cero, es decir $X_f \approx 0$, tenemos que:

$$D = \mu \quad (IV)$$

De aquí se desprende que la velocidad específica de crecimiento de los microorganismos se ajusta a la velocidad de dilución en el reactor. El limite se alcanzaría al pasar la μ_{max}. En estas condiciones, el microorganismo no podrá crecer a velocidades mayores, por lo que la concentración de (SSV) disminuirá rápidamente a cero, quedando el reactor sin biomasa; este proceso es conocido con el término de "lavado" (*wash-out*).

Al procedimiento de reactor con reciclaje (figura 2.1), utilizado para tratar aguas residuales, se le llama sistemas de lodos activados. El caudal reciclado Q_r tendrá una concentración de (SSV) (X_r) que corresponde a la que se alcanza en los fondos del sedimentador; por lo tanto el balance (SSV) en el reactor, en el estado estacionario es:

Entra al reactor + crecimiento – sale del reactor = 0

$$Q_r X_r + \mu XV - \left(Q_f + Q_r\right)X = 0 \quad (V)$$

Reacomodando la ecuación (V) y obtenemos la ecuación (VI):

$$D = \frac{\mu}{1-\alpha(\beta-1)} \quad (VI)$$

$$\propto = \frac{Q_r}{Q_f} \quad y \quad \beta = \frac{X_r}{X}$$

Donde

X_r = concentración de (SSV) en el sedimentador (mg/L)

La ecuación (VI), con reciclaje de biomasa, es diferente a la ecuación (IV). Como se observa, los (SSV) se concentran en el sedimentador $X_r > X$ y por lo tanto $\beta > 1$. Esto quiere decir que, si nos basamos en la ecuación (VI), la velocidad de dilución es mayor que la velocidad específica de crecimiento o sea que los microorganismos soportan velocidades de dilución mayores sin que se lave el cultivo, gracias al reciclaje de biomasa. Por esta razón, se puede procesar, a tiempos iguales, mayor volumen de alimentación que lo que se lograría con un reactor sin recirculación; evidentemente esto es ventajoso para el tratamiento de aguas residuales dado que los volúmenes de alimentación a tratar son muy grandes.

En el caso de que $X_r = X$, $\beta = 1$, o también $Q_r = 0$, se hablaría aquí de un reactor sin reciclaje, donde $D = \mu$.

Con la finalidad de controlar una planta de lodos activados, es necesario prever el comportamiento de estos al cambiarles las condiciones. Para ello, es preciso realizar simulaciones basadas en los parámetros obtenidos experimentalmente, de modo que los resultados sean lo más cercanos a la realidad. Por todo esto, se requiere realizar un balance de masa dinámico en el sistema sobre los diferentes parámetros a medir.

2.1.2 Balances de masa en sistemas de lodos activados.

Para el planteamiento de los diferentes balances de masa dinámicos, se utiliza el diagrama que aparece en la figura 2.1 sobre un sistema de lodos activados.

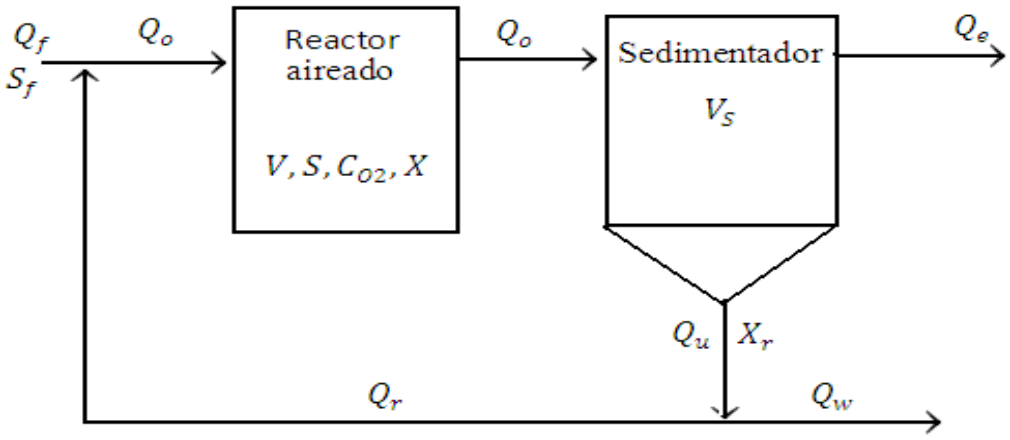

Figura 2.1 Diagrama del sistema de lodos activados o reactor con reciclaje de (SSV).

En las ecuaciones (VII) a (X) se muestran los balances en el sistema para obtener el comportamiento de (DQO) o (DBO) (S), el de los (SSV) (X), así como la concentración de (O_2) disuelto (C_{O2}) en el reactor; y también los (SSV) (X_r) en el sedimentador. Se considera que no escapan (SSV) en el caudal de agua tratada (Q_e); por lo tanto (Martínez and Rodriguez, 2005):

- En el reactor:

  a) (DQO) o (DBO)

  $$\frac{dS}{dt} = \frac{Q_f}{V} S_f - \frac{Q_o}{V} S - \frac{\mu X}{Y} \qquad (VII)$$

  b) Biomasa (SSV)

  $$\frac{dX}{dt} = \frac{Q_r}{V} X_r - \frac{Q_o}{V} X + \mu X - k_d X \qquad (VIII)$$

c) Oxigeno disuelto (O_2)

$$\frac{dC_{O2}}{dt} = \frac{Q_f}{V} C_{O2_f} - \frac{Q_o}{V} C_{O2} - \frac{\mu X}{Y_{O_2}} - b * X + kla_w * (C_{sr} - C_{O2}) \quad (IX)$$

- En el sedimentador:

a) Biomasa (SSV)

$$\frac{dX_r}{dt} = \frac{Q_u}{V_s} X_r - \frac{Q_o}{V_s} X \quad (X)$$

y

$$Q_o = Q_f + Q_r \quad (XI)$$

$$Q_u = Q_w + Q_r \quad (XII)$$

Donde

t = tiempo (d)

Q_f = caudal afluente

Q_r = caudal de reciclaje

Q_w = caudal de desecho

S_f = concentración de (DQO) o (DBO) en el afluente (mg/L)

S = concentración de (DQO) o (DBO) en el reactor (mg/L)

X = concentración de (SSV) en el reactor (mg/L)

C_{O2_f} = concentración de (O_2) disuelto en el afluente (mg/L)

C_{O2} = concentración de (O_2) disuelto en el reactor (mg/L)

C_{sr} = concentración de saturación de (O_2)

k_d = coeficiente de muerte (d^{-1})

$Y_{x/s}$ = coeficiente de rendimiento: mg (SSV) producidos / mg (COD) consumidos

a = Kg de (O_2) en la oxidación de sustrato / kg de (DBO) removida

b = Kg de (O_2) para respiración endógena / día kg (SSV) en el reactor

$Y_{O_2} = a \ / \ Y$ = coeficiente de rendimiento de oxígeno:

mg (SSV) producidos / mg O_2 consumidos

kla_w = coeficiente de transferencia de oxigeno

V = volumen del reactor

V_s = volumen del sedimentador

2.2 MATLAB como software matemático.

Él nombre de Matlab proviene de la abreviación inglesa Matrix Laboratory, (Laboratorio de Matrices) y su código en principio fue escrito para proporcionar un fácil acceso al software de matrices desarrollado en los años 70's, dentro de los proyectos Linpack y Eispack, que fueron librerías desarrolladas en Fortran (The Mathworks, 2004a).

Es un entorno de computación y desarrollo de aplicaciones totalmente integrado, orientado para llevar a cabo proyectos en donde se encuentren implicados un gran número de cálculos matemáticos y se requiera la visualización gráfica de los mismos, Matlab integra un análisis numérico, cálculo matricial, proceso de señales y visualización gráfica (The Mathworks, 2004b).

Lo podemos considerar como un lenguaje de programación interpretado. Estos lenguajes interpretados o "*scripting*" no deben ser compilados. Un script es una serie de órdenes que se pasan a un intérprete para que las ejecute. Estas órdenes están escritas en un lenguaje de programación propio del intérprete que ejecuta lo pedido en una línea y no ejecuta la siguiente hasta que haya terminado la anterior, siempre que esta sea correcta.

Existe una gran variedad en los lenguajes de *scripting* orientado a fines matemáticos. Como son Matlab, Maple, Mathematica, Scilab, etc.

De éstos los más conocidos son Matlab y Mathematica, en parte debido a que son programas comérciales. No debemos considerar a Matlab como único lenguaje sujeto a un fin. El *scripting* científico es una gran herramienta que nos puede ser de mucha ayuda en la solución de problemas científicos y la visualización de resultados.

La sintaxis de Matlab es muy simple y cuenta con una gran biblioteca de funciones matemáticas. Es un lenguaje muy cómodo si se desea escribir pequeños programas no muy complejos o para guardar instrucciones y después ejecutarlas en secuencia con el fin de mostrar los resultados sobre algún problema complejo. Matlab es ante todo un lenguaje, más que un programa en sí.

Desde sus inicios, Matlab ha estado renovándose. Producto del interés en distintas áreas han surgido gran cantidad de funciones específicas para cada área que vienen agrupadas en paquetes denominados toolbox. Estas “toolboxes” o “cajas de herramientas” consisten en ser colecciones de funciones para Matlab desarrolladas para resolver problemas de un tipo particular. De entre esa área podemos citar, sistemas de control, estadística, procesamiento de imágenes, realidad virtual, economía, adquisición de datos, desarrollo de algoritmos entre otros (García and Rodriguez, 2006)

Algunas de las aplicaciones de Matlab pueden ser:

Análisis matemáticos.

Simulaciones y Modelado.

Cálculo simbólico.

Desarrollo de algoritmos.

Modelado.

Exploración, visualización y análisis de datos.

Creación de gráficas.

Estas características que se han comentado hacen de Matlab una herramienta de trabajo muy extendida entre los estudiantes, técnicos e investigadores (Campillo, 2004).

2.2.1 Simulink.

Simulink es una extensión de Matlab que permite realizar simulaciones y análisis de sistemas dinámicos. Permite construir diagramas de bloques de manera gráfica, evaluar el desempeño del sistema y hacer modificaciones en su diseño. Es necesario que se entienda que Simulink no es completamente un programa separado de Matlab, sino una herramienta

de él. La ventana de Matlab estará siempre disponible mientras se ejecute una simulación en Simulink.

Tiene un entorno parecido a las demás herramientas de Matlab, en la forma que se ejecuta de una manera independiente de la ventana principal de comandos, pero sigue siendo la mejor herramienta para aprovechar toda la potencia de Matlab (The Mathworks, 2004a).

Existen dos fases importantes en la simulación, la construcción del sistema y su análisis de este.

El análisis del modelo significa realizar la simulación, y determinar el punto de equilibrio del sistema que previamente se ha definido.

Simulink posee una amplia gama de bloques, fuentes, componentes lineales y no lineales y conectores. Da la opción de poder personalizar y crear bloques propios. Se pueden crear bloques de una manera jerárquica en donde un solo bloque (subsistemas) pueda contener, dentro de si, más de un block, de esta forma se puede ver un sistema desde un nivel superior y entrando en los bloques se puede ir descendiendo a través de los niveles para ver con más detalle.

Además, existen los Demos (demostraciones en el menú Help) y funciones complementarias. Después de definir un modelo, se puede Simular, desde el menú de órdenes de Simulink introduciendo órdenes directamente desde la línea de comando de Matlab. Con los bloques de visualización se pueden ver los resultados de la simulación mientras se está ejecutando. Además, los resultados de la simulación se pueden transferir al espacio de trabajo de Matlab para su posterior tratamiento. También se pueden usar las utilidades de los Toolbox’s de aplicación de Matlab (Campillo, 2004).

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capitulo se presenta el desarrollo del simulador del sistema de lodos activados. Se muestran las simulaciones que resultan al variar distintos elementos como la concentración de sustrato en la entrada (S_f), el caudal de desecho (Q_w) y el caudal de reciclo (Q_r) y se analiza el efecto producido. Al final se hace un breve análisis económico del producto de software.

3.1 Desarrollo del simulador.

En los últimos años se ha incrementado la posibilidad de simular eficientemente el proceso de fangos activados debido al desarrollo, por una parte, de computadores más veloces y, por otra, de modelos matemáticos mucho más aproximados a la realidad.

Se dispone de un sistema de 4 ecuaciones diferenciales, donde se muestran los balances de masas en sistemas de lodos activados, para obtener el comportamiento de (DQO) o (DBO) (S), el de los (SSV) (X), así como la concentración de (O_2) disuelto (C_{O2}) en el reactor; y también los (SSV) (X_r) en el sedimentador, el cual se describe en el capitulo anterior.

El desarrollo del simulador del sistema de lodos activados se ha llevado a cabo en el entorno MATLAB/SIMULINK (véase figura 3.1), que se utiliza como herramienta informática. La simulación esta basada en archivos con extensión .mdl (de *model*) generados por Simulink que permite resolver las ecuaciones de los diferentes balances de masa dinámicos y a la vez evaluar el comportamiento del reactor.

En la figura 3.1 se muestra como queda implementado el simulador, que está estructurado por dos bloques, uno consiste en el reactor aireado y el otro en el sedimentador, cada cual guarda dentro de si las ecuaciones que describen sus comportamientos. También se puede

notar las variables de entradas a los bloques y la conexión entre ambos, así como las salidas que se tienen en cuenta para analizar el comportamiento del sistema en cuestión, que van a parar a un Scope (osciloscopio), que es un dispositivo de visualización/almacenamiento de variables del sistema.

Los datos necesarios para la corrida son guardados en un fichero .m como el que aparece en la figura 3.2. Aquí van a estar reflejadas las condiciones iníciales, parámetros cinéticos y las condiciones de operación del sistema que se han usado en los cálculos.

A continuación se procede a realizar una serie de simulaciones para evaluar el efecto que se tendría al realizar cambios en las variables del sistema de lodos activados.

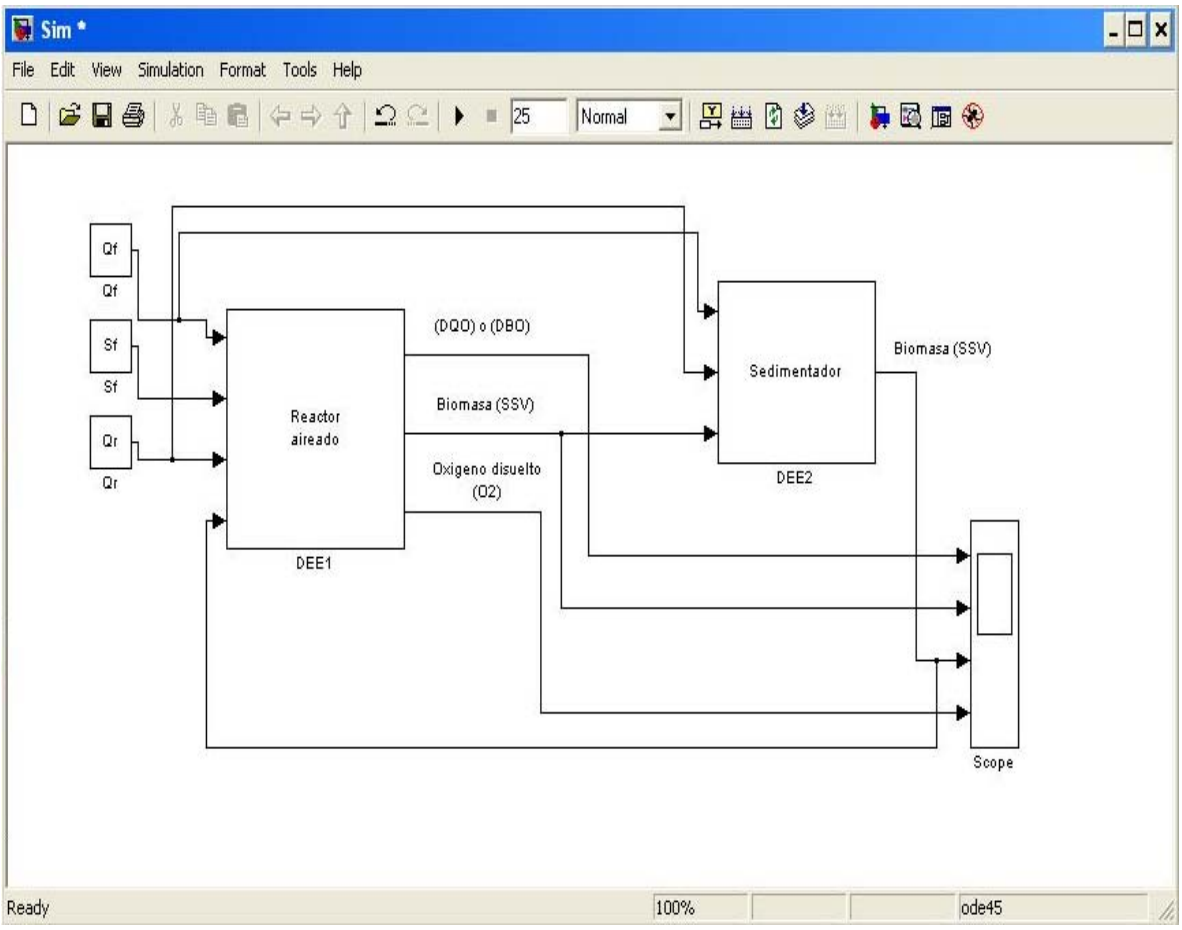

Figura 3.1 Ventana del simulador.

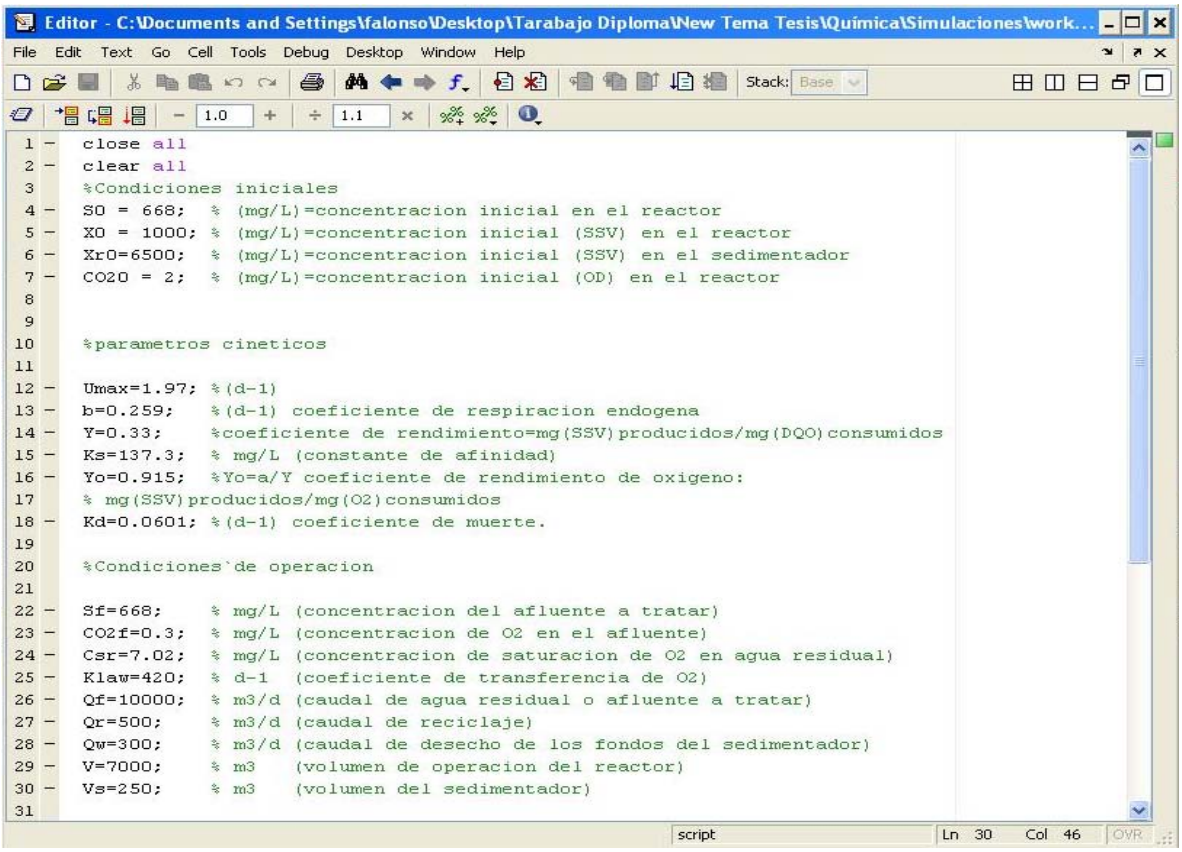

Figura 3.2 Archivo de los datos.

3.2 Simulación.

Se comienza con la introducción de los parámetros cinéticos, obtenidos experimentalmente, así como con los datos sobre condiciones de operación del sistema que se han usado en los cálculos (ver figura 3.2).

Se define el tiempo en el que se desarrolla el proceso, en el presente ejemplo de 0 a 25 días. Adicionalmente se tiene que introducir las condiciones iníciales de las 4 variables, en el reactor y en el sedimentador, es decir:

$S_0 = 668\ (mg/L)$, que en este caso es la misma que presenta el agua residual de entrada (S_f). Esto no necesariamente debe ser así, pudo haberse escogido otra (S_0) ya que es la concentración inicial en el reactor. Lo que si es importante señalar es que la (S_f) (concentración en la alimentación) no se puede cambiar a menos que se cambie su valor en el archivo de los datos.

$X_0 = 1000\ (mg/L)$, concentración inicial (SSV) en el reactor.

$X_{r0} = 6500\ (mg/L)$, concentración inicial (SSV) en el sedimentador.

$C_{02_0} = 2.0\ (mg/L)$, concentración inicial (OD) en el reactor.

En la figura 3.3 se observa la simulación.

Las condiciones cuando se alcanza el estado estacionario se muestran en la tabla 3.1

Tabla 3.1 Datos al alcanzar el estado estacionario:

t (días)	S (DQO) en el reactor	X (SSV) en el reactor	Xr (SSV) en el sedimentador	C_{02} (OD) en el reactor
25	63.445 mg/L	455.38 mg/L	5976.9 mg/L	6.2232 mg/L

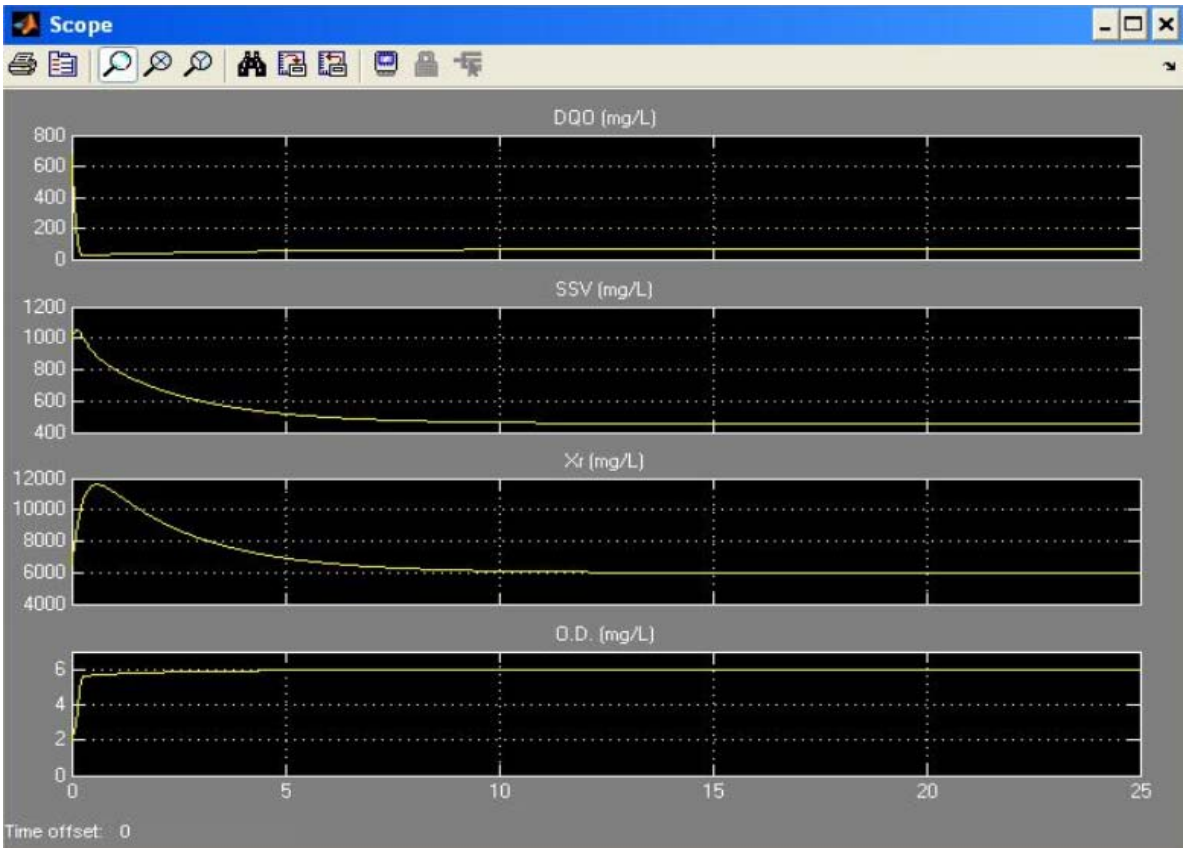

Figura 3.3 Comportamiento dinámico del sistema de lodos activados donde se muestra la variación de la (DQO), (SSV) en el reactor, (SSV) en el sedimentador y (OD) en función del tiempo.

En estas condiciones, se puede reducir la (DQO) de 668 mg/L a 63.4 mg/L; como se observa en los resultados, 15 días después de iniciado el proceso todavía no se alcanza el estado estacionario, pero ya después de ese tiempo de iniciado el proceso, el sistema se encuentra en estado estacionario.

3.2.1 Descarga continua con una concentración de (s) = 1000 mg/L.

En este otro caso de simulación se va a evaluar el efecto que se tendría, después de haber alcanzado el estado estacionario, si la concentración del sustrato en la entrada (S_f) incrementara y se mantuviera a 1000 mg/L. (Es preciso señalar que, en las condiciones iníciales se cambió la condición inicial de $(S_0 = 668)$ a la de $S_0 = 1000$, con la finalidad de simular una descarga instantánea.)

Se generan las gráficas que se muestran en la figura 3.4 con el efecto de una descarga continua con una concentración de $S = 1000\ mg/L$, para las 4 variables del ejemplo que se vienen trabajando.

Es posible ver que, después de que la concentración de la (DQO) de entrada (S_f) a 1000 mg/L pasa al reactor, la concentración en el reactor sufre un pequeño pico que alcanza cerca de los 100 mg/L. También que, aproximadamente a los 10 días de haber comenzado el evento, la concentración vuelve a recuperar el estado estacionario, valor que tenia anteriormente. Recuperar la concentración de (DQO) con los mismos valores que cuando la concentración de entrada era de 668 mg/L es posible porque el sistema se ajusta a las nuevas condiciones, es decir, aumenta la concentración de (SSV) en el reactor, de 455 mg/L hasta mas de 700 mg/L, y en el sedimentador pasa de cerca de 6000 mg/L hasta mas de 9000 mg/L; las concentraciones se estabilizan después de 10 días. El (O.D.) sufre un ligero descenso, pero se mantiene suficientemente alto para mantener el sistema con el oxigeno requerido (> 2.0 mg/L). En la tabla 3.2 se reflejan los valores.

Tabla 3.2 Datos al alcanzar el estado estacionario, para cambios en S_f.

S_f	t (días)	S (DQO) en el reactor	X (SSV) en el reactor	Xr (SSV) en el sedimentador	C_{02} (OD) en el reactor
668mg/L	20	63.445mg/L	455.5mg/L	5978.7mg/L	5.988mg/L

1000mg/L	30	63.445mg/L	703.32mg/L	9224.1	5.422mg/L

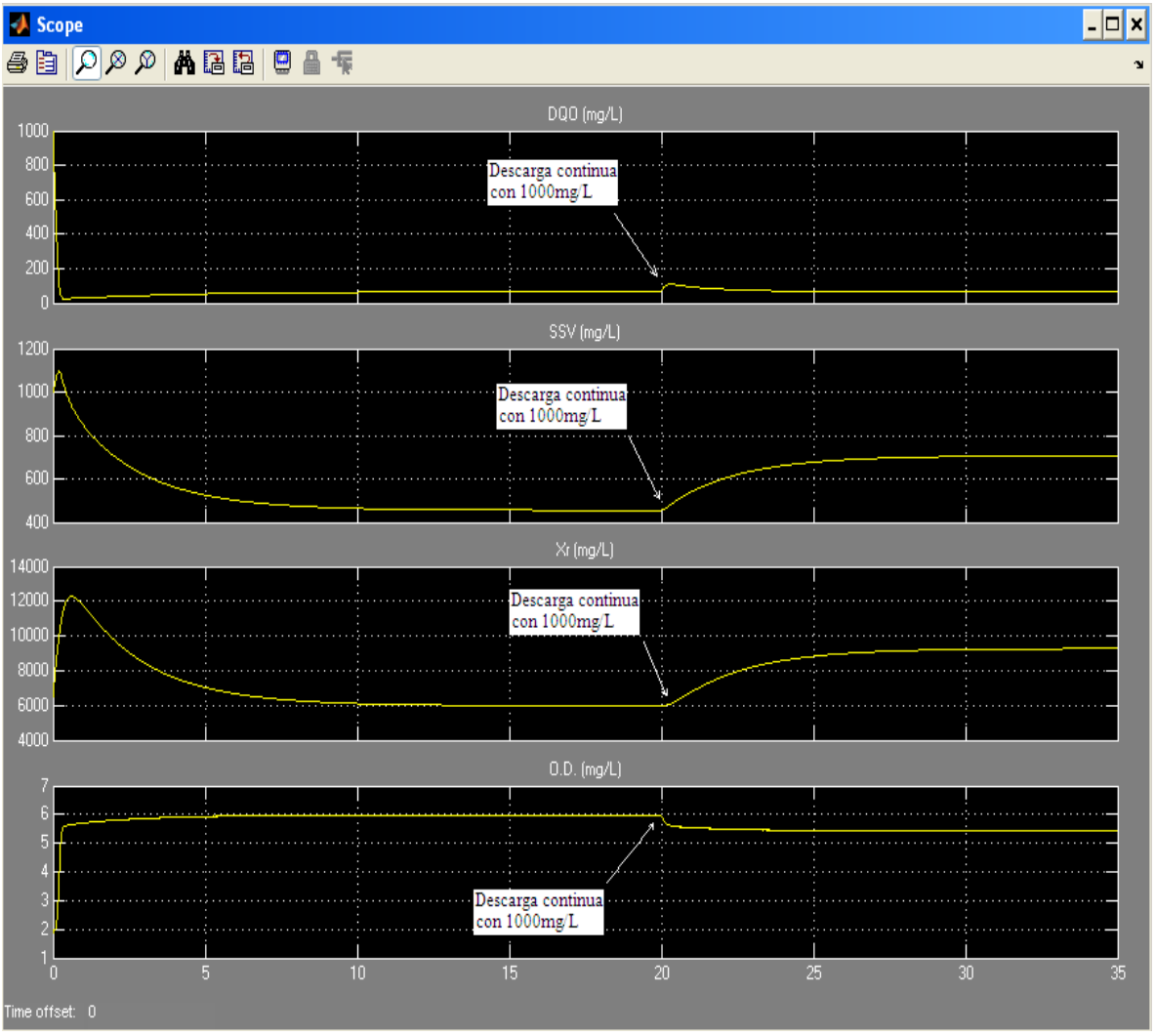

Figura 3.4 Efecto de una descarga continua con una concentración de (S) = 1000 mg/L, en el comportamiento del sistema de lodos activados.

3.2.2 Efecto de la variación del caudal de desecho (Qw).

En el siguiente ejemplo, se ha cambiado el caudal de desecho (Qw) el cual proviene de los fondos del sedimentador.

Las gráficas 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 muestran los resultados obtenidos para las cuatro variables: (DQO) en el reactor; sólidos en el reactor (SSV); en el sedimentador (Xr); y oxigeno disuelto en el reactor; siempre referente al sistema de lodos activados, pero variando el

caudal de desecho, es decir, modificando el $(Q_w) = 300\ m^3/d$ de forma que sea $(Q_w) = 1200\ m^3/d$, en incrementos de 300.

Como se puede observar en la figura 3.5, al aumentar el caudal de desecho de lodos del sedimentador provoca que la concentración de la (DQO) en el reactor biológico también sea mayor. Para un $(Q_w) = 300\ m^3/d$, la (DQO) en el estado estacionario es de cerca de 70 mg/L, mientras que con un $(Q_w) = 1200\ m^3/d$ es de cerca de 180 mg/L. El sistema alcanza el estado estacionario cerca de los 6 días para el primer caso mientras que para la (Qw) mayor se requieren cerca de 10 días.

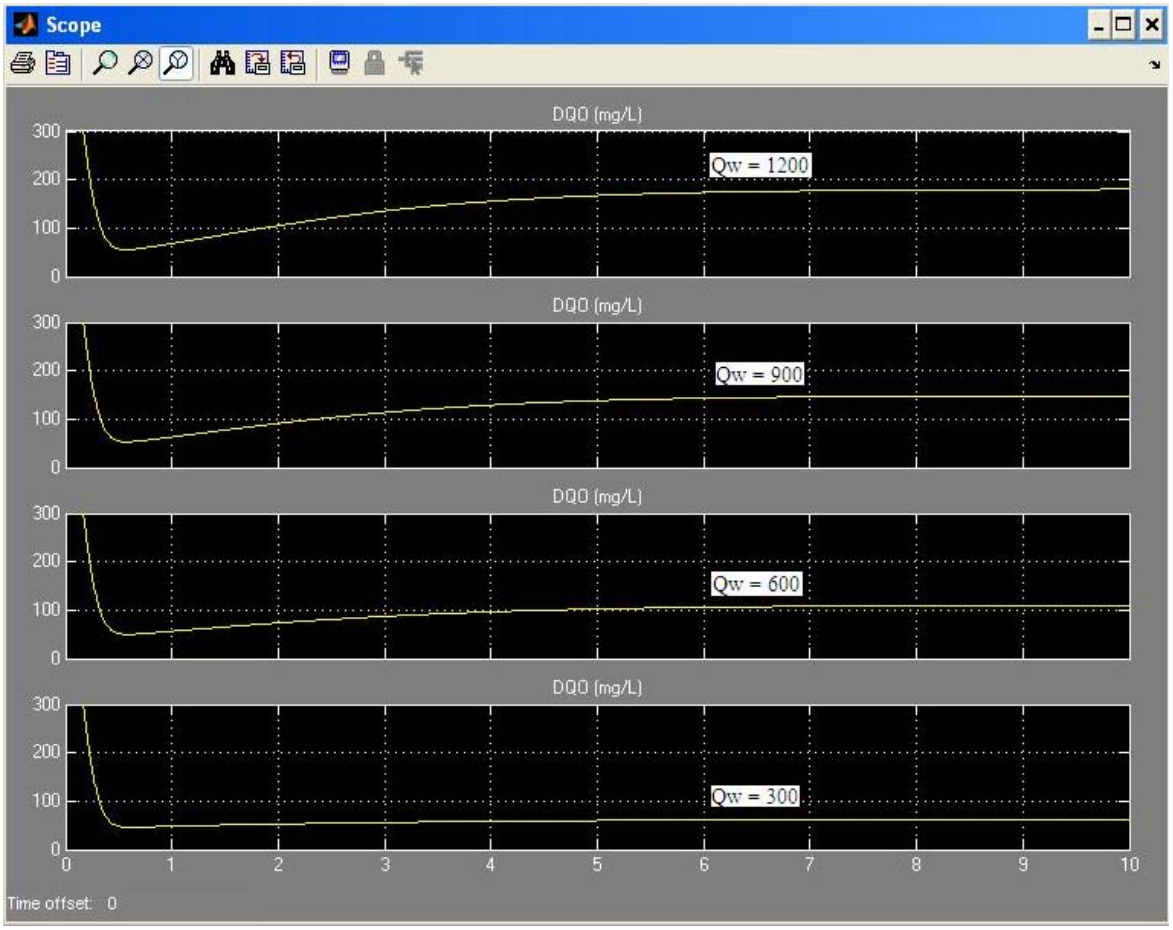

Figura 3.5 Efecto del caudal de desecho (Q_w), en la (DQO) del reactor biológico del sistema de lodos activados.

Lo anterior se puede complementar con la figura 3.6 que muestra la variación de los (SSV) en el reactor. Puede verse que, a mayor (Qw), menor será la concentración de microorganismos en el reactor biológico. También que, debido a que se eliminan más

(SSV) en el desecho, su concentración en el sedimentador disminuye al aumentar el caudal de desecho (véase ahora la figura 3.7).

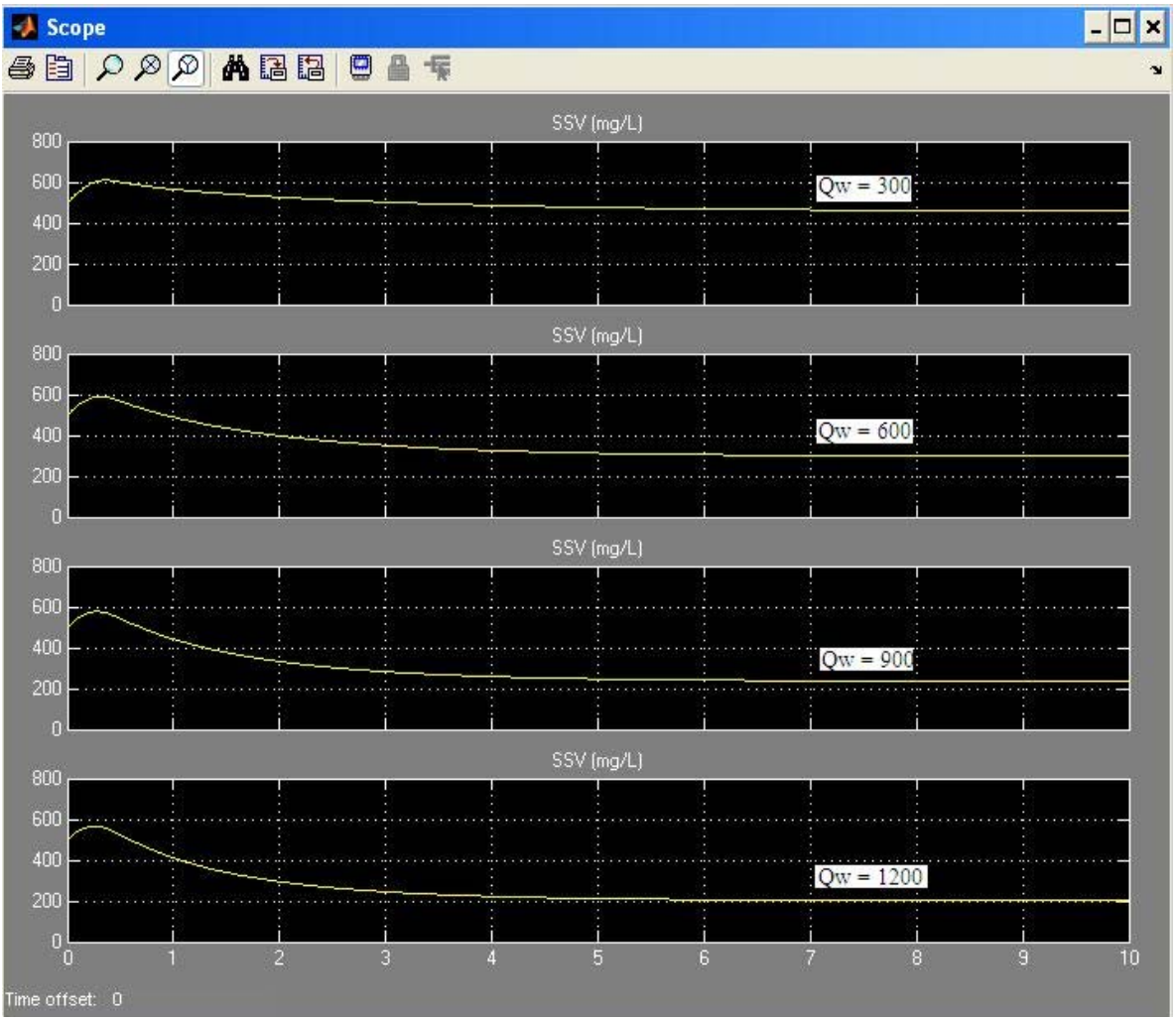

Figura 3.6 Efecto del caudal de desecho (Q_w), en los (SSV) del reactor biológico del sistema de lodos activados.

Es valido recalcar que la degradación depende de la concentración de microorganismos (reacción auto-catalítica), la velocidad de degradación disminuirá al disminuir la concentración de (SSV) en el reactor; al aumentar (Qw), disminuye la concentración de (SSV) en el reactor y se incrementa la (DQO).

Al desechar mayor carga de (SSV) (kg/h) del sedimentador, se recircula menor carga de sólidos al reactor. Esto quiere decir que la edad de lodos disminuye al aumentar el (Qw) (véase la ecuación (XIII)).

$$\theta_c = \frac{X_{va}V}{Q_w X_{vu} + Q_e X_e} \qquad (XIII)$$

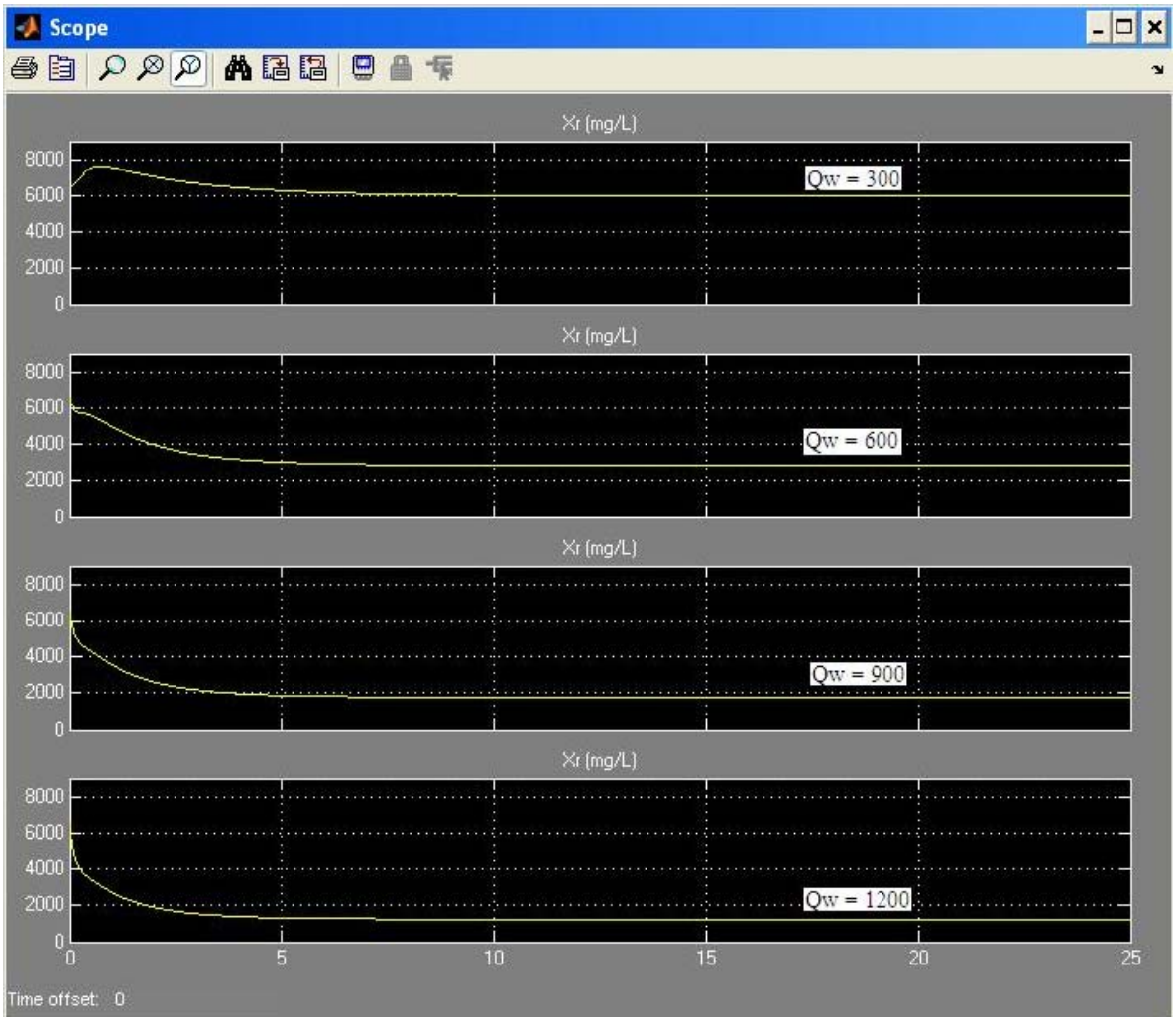

Figura 3.7 Efecto del caudal de desecho (Q_w), en los (SSV) (X_r) del sedimentador (sistema de lodos activados).

En el caso del oxígeno, el efecto no es tan drástico (véase la figura 3.8).

La cantidad de oxigeno disuelto en el reactor (6.2955 mg/L), que se alcanza con $(Q_w) = 1200\ m^3/d$, es mayor que la concentración en el caso de un $(Q_w) = 300\ m^3/d$ (6.2 mg/L) debido a que, a altos caudales de desecho, disminuyen los (SSV) en el reactor; siendo así, disminuye la velocidad de consumo de oxígeno y por lo tanto se incrementa la concentración del (O_2) disuelto en el reactor, como se muestra en la 3.8.

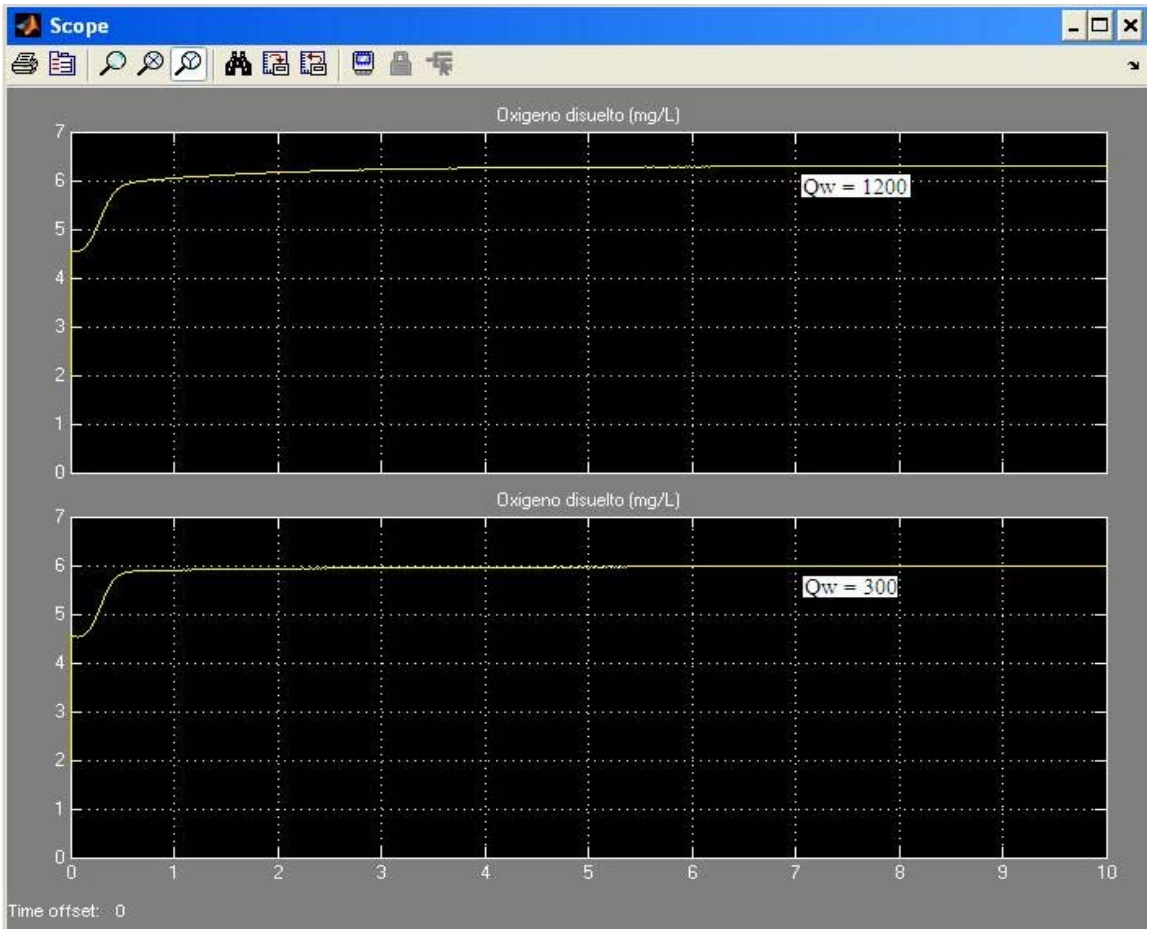

Figura 3.8 Efecto del caudal de desecho (Q_w), en el oxígeno disuelto del reactor biológico (sistema de lodos activados).

3.2.3 Efecto de la variación del caudal de reciclo (Qr).

En el ejemplo de ahora, se realizó el mismo procedimiento anterior para Q_w; pero se cambio, obviamente, el valor de Q_r. El Q_r de $500\,m^3/d$ se pasó hasta un Q_r de $10000\,m^3/d$, con la finalidad de evaluar este nuevo efecto en el sistema de lodos activados. Los resultados se muestran en las figuras 3.9, 3.10, 3.11, 3.12.

La figura 3.9 muestra que efecto tuvo en la DQO del reactor. Al aumentar el caudal de reciclaje (Q_r), disminuye la concentración de DQO. En un Q_r de $500\,m^3/d$ la concentración está por arriba de los 60 mg/L; esta concentración de DQO, en un Q_r de $10000\,m^3/d$, disminuye: llega a ser menor que 15 mg/L. También se observa que, según va bajando, los primeros niveles de DQO del reactor, al aumentar el Q_r, son mayores, con bastante diferencia entre ellos, que los que corresponden a valores mas bajos de Q_r; es

decir, observamos 60 mg/L para los $500\,m^3/d$ y 21 mg/L para $2500\,m^3/d$; que sin embargo, a valores más altos del Q_r (por ejemplo: desde 5000 hasta $10000\,m^3/d$), la diferencia de concentración de DQO entre uno y otro caso no es muy diferente (15 mg/L y 13 mg/L, respectivamente).

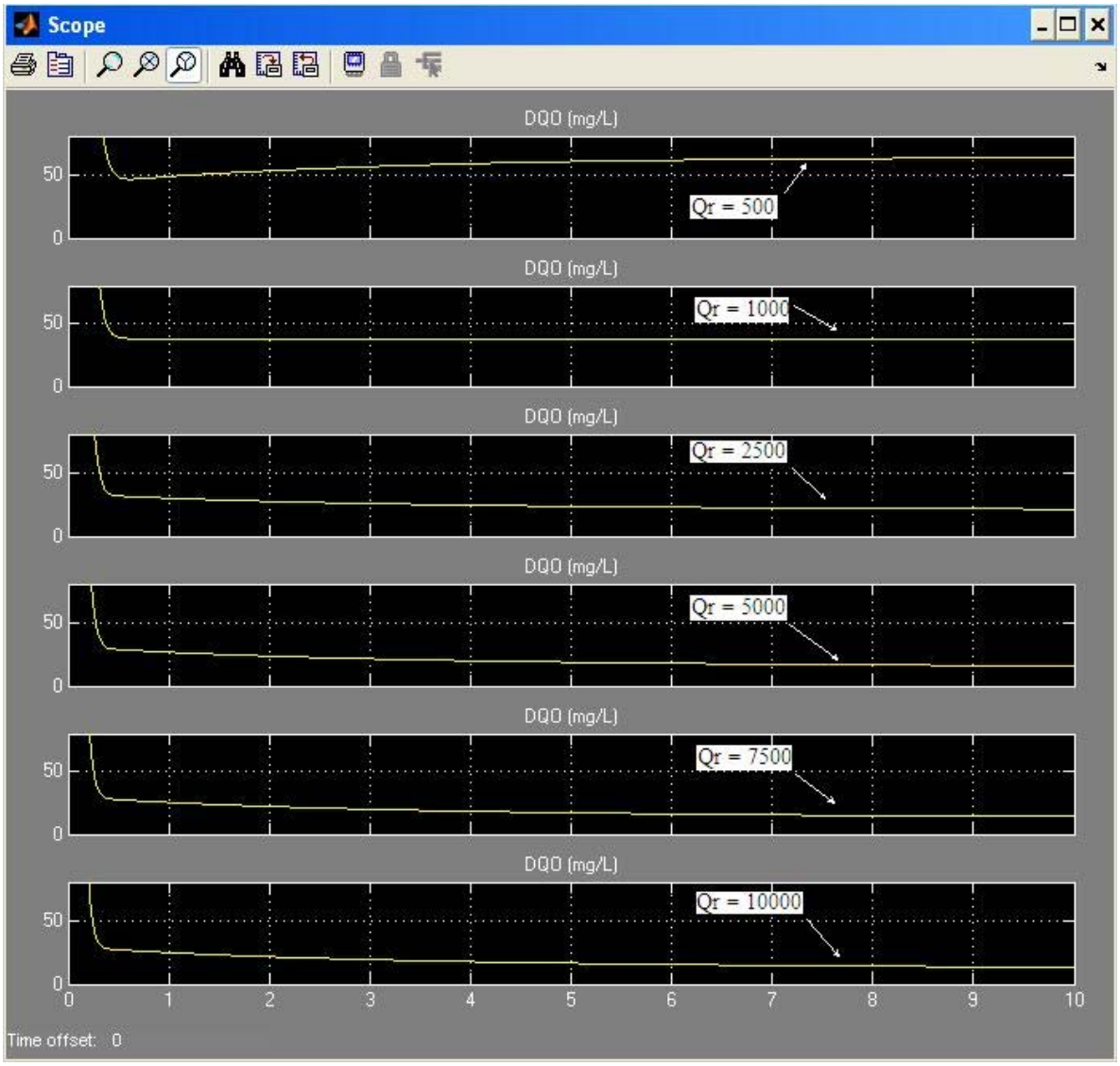

Figura 3.9 Efecto del caudal de reciclaje (Q_r) en la (DQO) del reactor biológico (sistema de lodos activados).

Este dato es útil a la hora de que se decida reducir, en ciertas circunstancias, la DQO: el bombeo para el reciclaje sería posible con menor capacidad de las bombas y menor consumo de potencia, al manejar un menor reciclaje (hasta $2500\,m^3/d$), que en el caso de manejar uno más alto (>$5000\,m^3/d$).

El incremento en el reciclaje trae como consecuencia el aumento en los sólidos suspendidos volátiles del reactor, como lo muestra la figura 3.10.

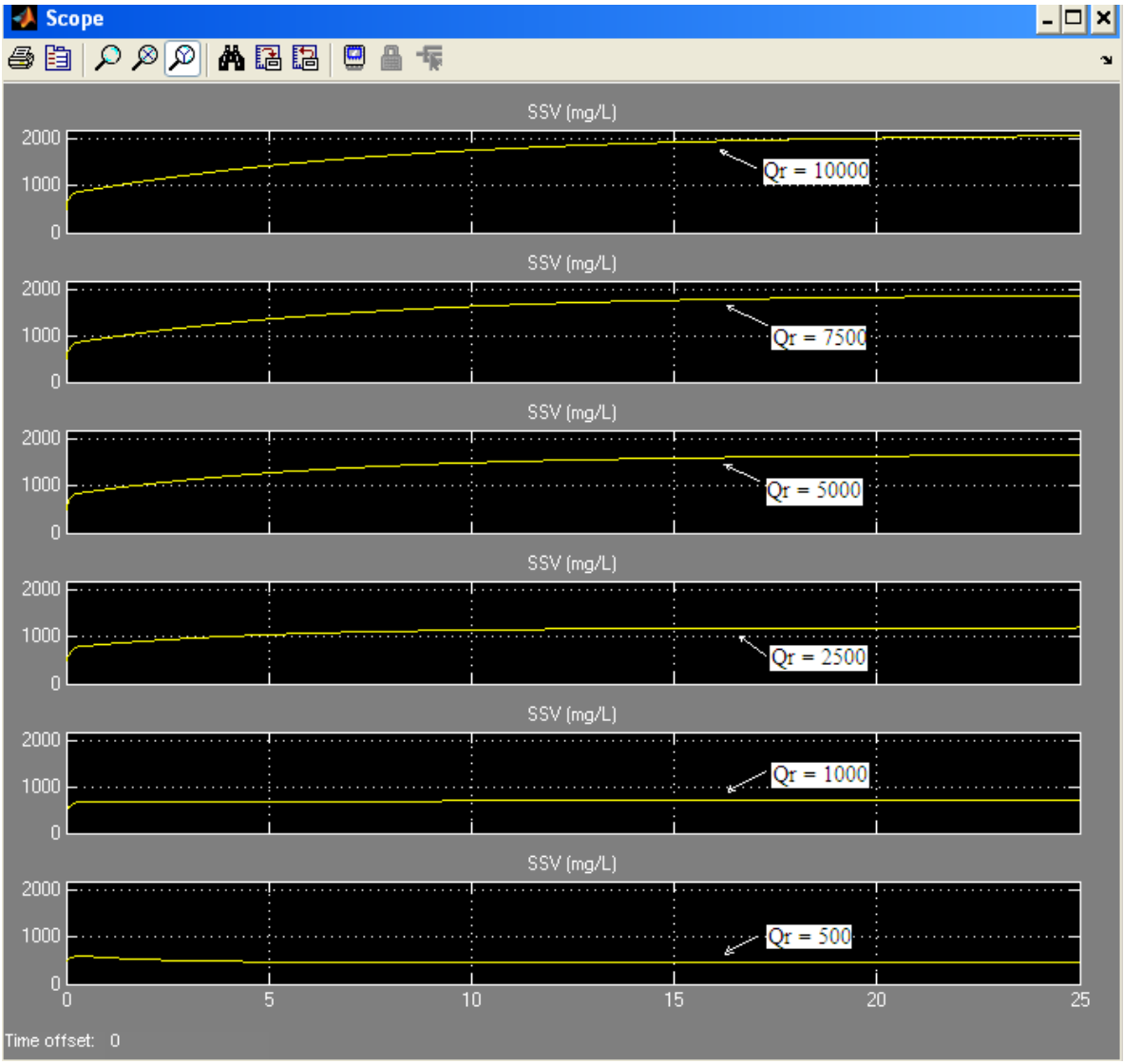

Figura 3.10 Efecto del caudal de reciclaje (Q_r) en los (SSV) del reactor biológico (sistema de lodos activados).

Con un menor reciclaje ($Q_r = 500\, m^3/d$) se tienen aproximadamente 400 mg/L de (SSV); en cambio, con el máximo caudal probado ($Q_r = 10000\, m^3/d$), la concentración de biomasa alcanza valores mayores a 2000 mg/L, lo que favorece que incremente la velocidad de consumo de sustrato. Esto provoca a su vez que la velocidad de degradación de contaminantes (DQO) por los microorganismos (SSV) se incremente y también que la concentración de DQO en el reactor biológico sea menor a mayor (Q_r).

Por otro lado, al incrementar el caudal de reciclaje se disminuye la concentración de sólidos volátiles en el sedimentador, como se muestra en la figura 3.11.

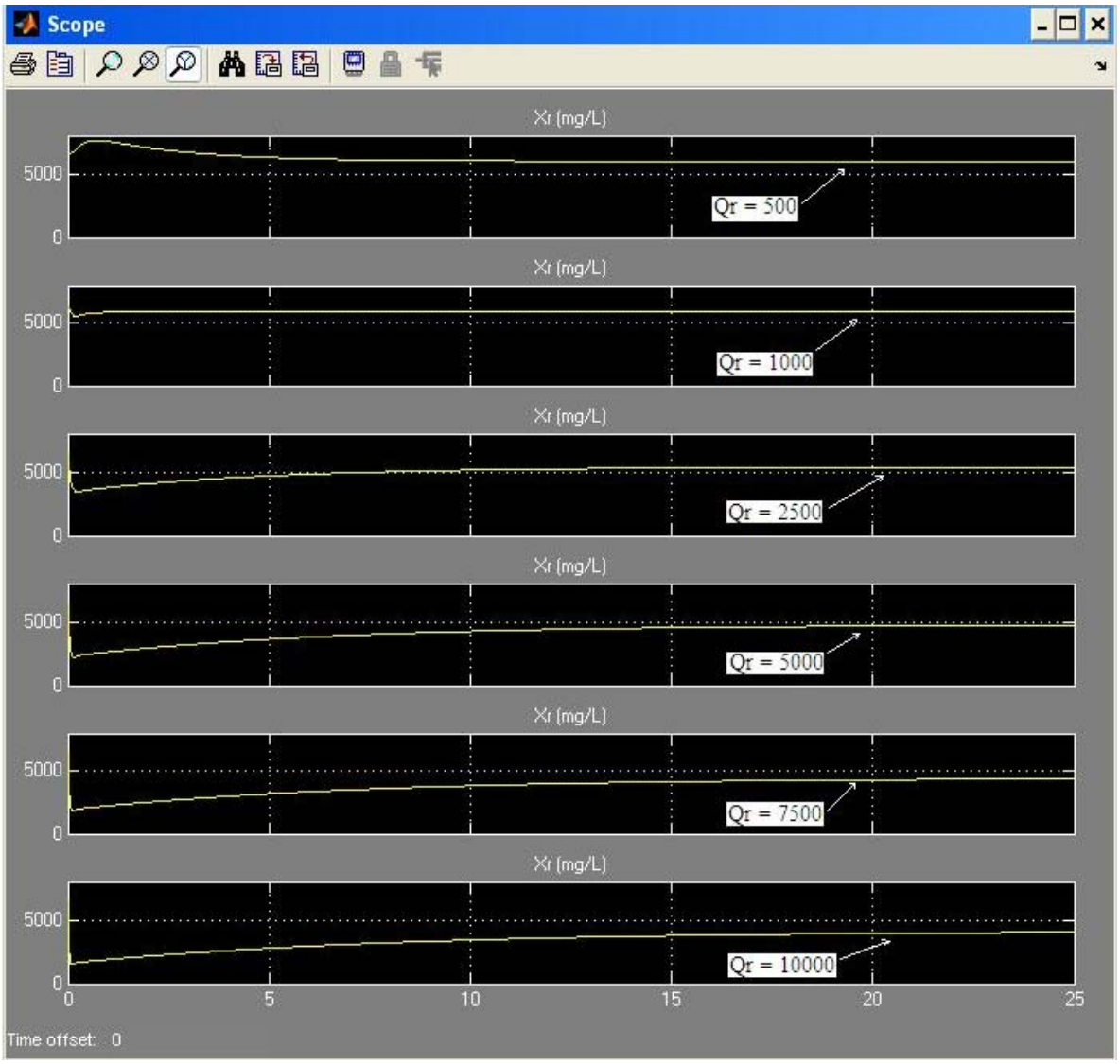

Figura 3.11 Efecto del caudal de reciclaje (Q_r) en los (SSV) del sedimentador (sistema de lodos activados).

Cuando se trata de un $(Q_r) = 500\ m^3/d$, la concentración de X_r es de 6000 mg/L, mientras que con un (Q_r) máximo de $10000\ m^3/d$, se reduce la concentración de X_r hasta valores cercanos a 4000 mg/L.

En el caso de oxígeno disuelto, los resultados se muestran en la figura 3.12. Aquí siempre el sistema alcanza el estado estacionario con valores de concentración de oxigeno disuelto

de alrededor de 6.0 mg/L. En el caso de menor (Q_r), el estado estacionario se alcanza en mayor tiempo que a mayores valores de (Q_r), esto se debe a que, si bien el reciclaje es bajo, el oxigeno es consumido a menor velocidad por ser menor la concentración de microorganismos (SSV) en el reactor.

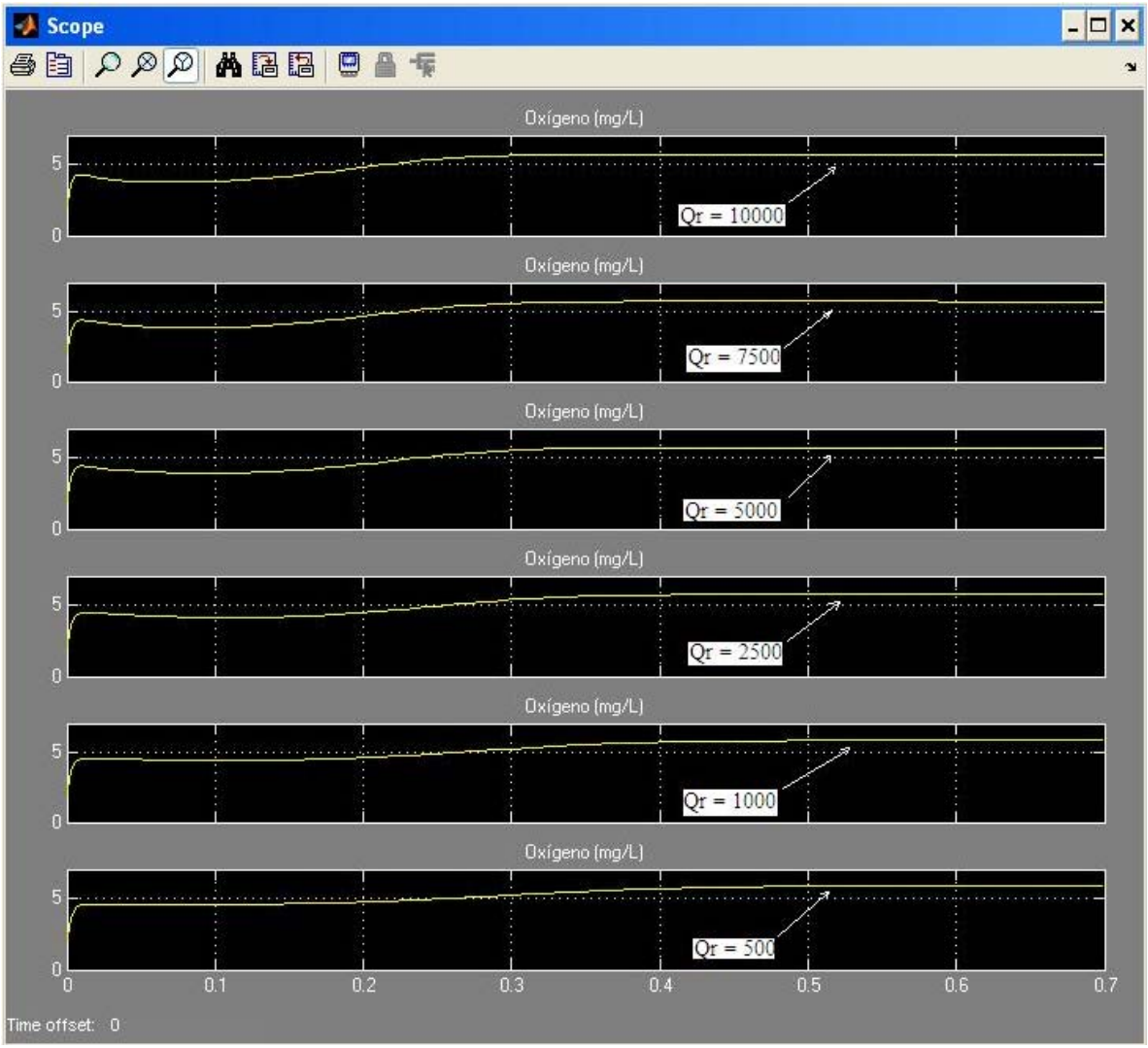

Figura 3.12 Efecto del caudal de reciclaje (Q_r), en el oxígeno disuelto del reactor biológico (sistema de lodos activados).

3.3 Análisis económico.

Los costos de inversión (gastos) van a estar dado por la compra de la licencia de MATLAB que incluya los "toolboxes", simulink, en fin, las funciones necesarias para el trabajo. El valor es de 2480 cuc, según el listado de precios consultado (Engr, 2009). Se tiene en cuenta el costo que se requiere en la obtención de una PC, monitor, mouse óptico, teclado, UPS que es de 648 cuc (Cimex, 2009). También el salario del trabajador que se estima en 430 cuc. Todos estos valores provocan que el gasto total de la inversión sea de 3558 cuc.

Los beneficios que va a obtener la implementación del software, van a estar dados por los costos anuales de operación.

Para determinar los costos anuales de operación se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Costos de personal: se necesitaría un operario para la supervisión.
- Costos de mantenimiento: corresponden a los repuestos mecánicos, eléctricos y equipo de instrumentación que pueden ascender un 2% del costo total de instalación por año.
- Costos de energía: la planta consume 17971 kw para el funcionamiento de las bombas, sistemas de control, instrumentación e iluminación al año.
- Costos de materiales: estos costos incluyen el valor de los materiales y el de los suministros químicos utilizados.

La tabla 3.3 presentan los costos anuales de operación.

Tabla 3.3. Costos anuales de operación.

Especificación	Valor (cuc)
Costos de energía eléctrica	1362,6
Costos de mantenimiento	50

Costos de personal	210.12
Costos de materiales	864.97

Los beneficios suman un total de 2487.69 cuc.

Con todos estos datos se puede hacer un análisis de costos-beneficios.

3.3.1 Análisis de costos-beneficios

El método utilizado va a ser retorno de la inversión. Esta tècnica se emplea cuando los beneficios tangibles se espera que mejoren y de este modo exista un argumento convincente para el sistema propuesto (ver tabla 3.4).

Tabla 3.4 VAN-TIR.

Año	Costos	Costos acumulados	Beneficios	Beneficios acumulados	Flujos de caja	Flujo acumulado
0	3558	3558	0	0	-3558	-3558
1	860	4418	2487.69	2487.69	1627.69	-1930.31
2	860	5278	2487.69	4975.38	1627.69	-302.62
3	860	6138	2487.69	7463.07	1627.69	1325.07
4	860	6998	2487.69	9950.76	1627.69	2952.76
5	860	7858	2487.69	12438.45	1627.69	4580.45
6	860	8718	2487.69	14926.14	1627.69	6208.14

VAN (valor actual neto) = 3210 cuc; TIR (tasa interna de rendimiento) = 40%

$PRI = N - 1 + abs(FAN - 1/FN) = 2.2283804\ años$

La figura 3.13 muestra de forma gràfica el retorno de la inversión.

Por tanto el proyecto resulta rentable porque el VAN > 0 y su TIR > 8%.

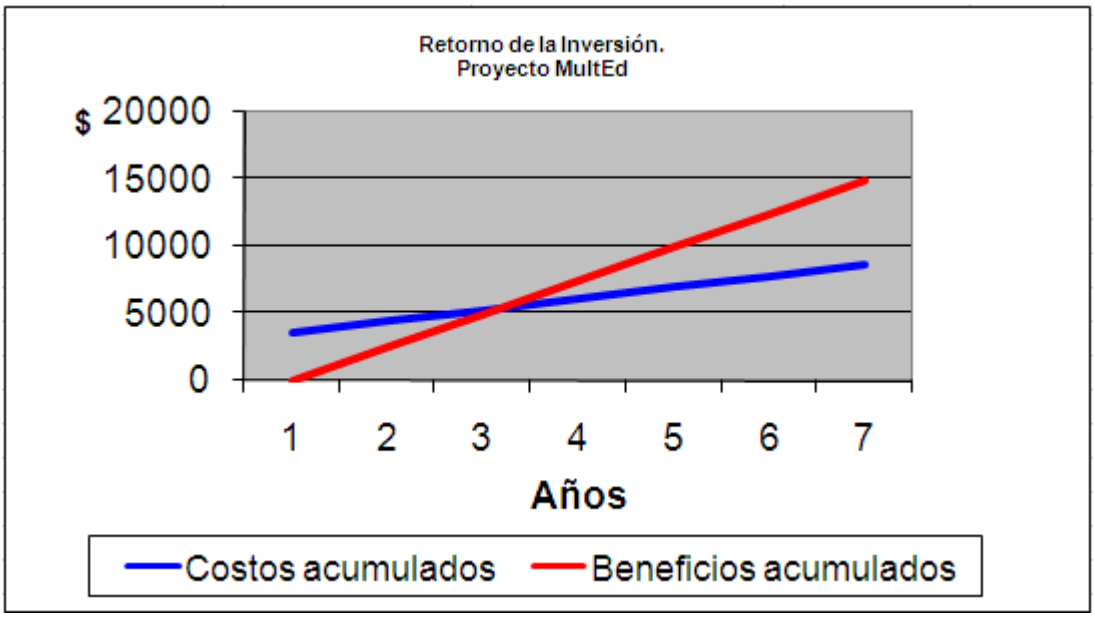

Figura 3.13 Retorno de la inversión.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

A continuación se presentan las conclusiones que, en el desarrollo del trabajo, su posterior ordenamiento y redacción, han suscitado un especial interés.

1 Es imprescindible llevar a cabo la caracterización del agua residual a tratar, para obtener los parámetros de DBO, DQO, sólidos, nitrógeno, fósforo, pH, alcalinidad, coliformes totales, especificamente, con la finalidad de dar la pauta para elegir el tratamiento más acorde al residuo líquido.

2 El simulador desarrollado en MATLAB cumple todas las especificaciones del sistema y permite un análisis eficiente del comportamiento de la planta de lodos activados.

3 Con el simulador propuesto se logra un efecto económico significativo al no tener que analizar el comportamiento en un ciclo de trabajo real.

4 Se observó en las simulaciones que cambios en la composición de alimentacion a los reactores de lodos activados repercuten directamente en el proceso desestabilizando el sistema.

5 Ante perturbaciones, debido a cambios en las condiciones de operación, el sistema se ajusta a las nuevas condiciones.

Recomendaciones

1 Llevar a cabo simulaciones de nuevos cambios en las condiciones de operación y analizar su efecto en comparación con datos experimentales..

2 Proponer un control para el sistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACOSTA, J. (2001) Aguas residuales. [Internet] Disponible en: http://www2.cbm.uam.es/jalopez/personal/ERAR/Resumen.htm. [Consultado:1 de marzo del 2009]

ASTROM, K. J. & WITTENMARK, B. (1995) **Adaptive Control**. Addison-Wesley.

CAMACHO, E. F. & ARAHAL, M. R. (1994) Neural Network Based Adaptive Control. *IFAC Artificial Intelligence in Real-Time Control.* Valencia.

CAMPILLO, R. (2004) Apuntes de Sistemas de Control. [Internet] Disponible en: www.uv.mx. [Consultado:2 de marzo del 2009]

CARVAJAL, G. (2007) Ingieneria Sanitaria. [Internet] Disponible en: http://www.enziclean.com/articulos/sistema_de_tratamiento_de_aguas_residuales_por_lodos_activados.html. [Consultado:22 de febrero del 2009]

CIMEX (2009).**Listado de precios**.[Internet]. Disponible en:http://tecun.cimex.com.cu. Consultado:11 de junio del 2009

ENGR (2009).**MATLAB Campus License Pricing**.[Internet]. Disponible en:http://support.engr.washington.edu. Consultado:11 de junio del 2009

FALL, C., CHAVEZ, R. & DÍAZ, R. (2006) Modelación matemática de plantas de tratamiento de lodos activados. *Retema: Revista técnica de medio ambiente.*

GARCÍA, J. & RODRIGUEZ, J. I. (2006) Aprenda Matlab 7.0 cómo si estuviera en primero. [Internet] Disponible en: www.tayuda.com. [Consultado:2 de marzo del 2009]

GUPTA, M. M. & SINHA, N. K. (1996) Intelligent Control Systems: Theory and Applications *IEEE.*

GUZMÁN, KARIN & GUERRERO (1998) CO-TRATAMIENTO AEROBIO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES Y DOMESTICAS. **Asociación Peruana de Ingenieria Sanitaria y Ambiental**, pp.1-16

HENSON, M. A. & SEBORG, D. E. (1997) **Nonlinear Process Control**. Prentice-Hall.

INRH (2008) Organización y Funciones del Grupo Empresarial de Acueducto y Alcantarillado. Villa Clara.

MARTÍNEZ, S. & RODRIGUEZ, M. (2005). Tratamiento de aguas residuales con MATLAB En: 1ra Edición ed. México, REVERTE.

METCALF & EDDY (1995) **Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, Vertido y Reutilización**.3ra Edición. Madrid, McGraw Hill.

MILENA, L. (2004) Aguas Residuales. **Publicaciones cientificas** [Internet] Disponible en: http://www.revistaciencia.com. [Consultado: 15 de febrero del 2009]

PEGUERO, J. C. (2001) **Identificación y Control de una Planta de Aguas Residuales Mediante Redes Neuronales**. Tesina, Universidad de Extremadura

PEGUERO, J. C. (2003) **CONTROL DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE REDES NEURONALES**. Doctorado, Universidad de Extremadura

PEGUERO, J. C. (2003) Diagrama de flujo de la Planta de Lodos Activos. Badajoz, Tesis de doctorado.

THE MATHWORKS, I. (2004a) *La edición del estudiante de Simulink.* Madrid, Editorial: Prentice Hall.

THE MATHWORKS, I. (2004b) *Matlab, Edición del estudiante. Guía del usuario.* Madrid, Editorial: Prentice Hall.

WHITE, D. & SOFGE, A. (1992) Handbook of Intelligent Control: Neural, Fuzzy and Adaptive Approaches. *Multiscience.*