



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

***PUESTA EN MARCHA DE UNA PLANTA
PROTOTIPO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES TÓXICAS***

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A:

LUIS RODRIGO CERVANTES QUIROZ

ASESOR: DR. GERMÁN BUITRÓN MÉNDEZ



MÉXICO, D.F.,

2005

m. 346435



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
FING/DCTG/SEAC/UTIT/025/05

Señor
LUIS RODRIGO CERVANTES QUIROZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. GERMÁN BUITRÓN MÉNDEZ, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"PUESTA EN MARCHA DE UNA PLANTA PROTOTIPO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TÓXICAS"

- INTRODUCCIÓN
- I. ANTECEDENTES
- II. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL
- III. PUESTA EN MARCHA DE LA PLANTA PROTOTIPO
- IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS
- V. CONCLUSIONES

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

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 4 de Marzo de 2005.
EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB/AJP/crc.

No. Bo.
RICARDO PARIKLA V.

No. Bo.
[Handwritten signature]

No. Bo.
[Handwritten signature]

[Handwritten signature]
No. Bo.

[Handwritten signature]

AGRADECIMIENTOS

A mi madre

Por su amor y apoyo insustituible que fueron un motor muy importante para la conclusión de esta etapa de mi vida, y que sin duda, es la persona a quien le debo, en gran medida, que yo haya logrado llevar a buen puerto mis estudios universitarios .

A mi padre

Por su presencia, aunque no siempre física, pero sé que en todo momento fue parte de mis alegrías y tristezas. Creo que estuvimos juntos en este largo camino, y sé que él me apoyaba y animaba con su amor desde la distancia.

A Liliana y José Alberto, mis hermanos

Les agradezco muchas cosas, pero especialmente, su amor, amistad y consejos, que siempre sirvieron para que yo fuera mejor ser humano.

A mis camaradas

Me da gusto contar con amigos verdaderos, que han sido a lo largo de mi vida parte importante en mi crecimiento como individuo, que me han ayudado a comprender la amistad sincera.

A Ana, tomate rojo

Celebro contigo este gran logro, porque ambos fuimos partícipes de este trabajo que ha terminado. Hasta la victoria siempre.

RECONOCIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México

Agradezco profundamente el poder haber formado parte de nuestra máxima casa de estudios, Mi Alma Mater. En ella aprendí, junto con maestros y compañeros, el gusto por el saber y el conocer más allá de lo que dicen los libros y lo que dicen las personas

A mi querida Facultad de Ingeniería

Porque en ella viví, goce, aprendí y discerní no solo las ecuaciones de 2do. Grado y las derivadas parciales, sino también discerní, o por lo menos trate de entender y comprender "La ecuación de la vida"

A mis maestros

No me queda más que sentirme afortunado por haber conocido y aprendido de grandes maestros, tanto por las enseñanzas en el aula como por los consejos de vida.

Al Instituto de Ingeniería y al Dr. Germán Buitrón

Por haberme brindado la oportunidad de adquirir y desarrollar el conocimiento necesario para poder graduarme. Agradezco, en especial, a Germán por su apoyo y consejos para el buen término de este arduo trabajo.

A los ingenieros

Que busquemos, más allá de la sapiencia ingenieril, integrar un conocimiento que coadyuve, junto con otras disciplinas, a construir un México más justo y más humano.

"Por mi raza hablará el espíritu"

ÍNDICE

ÍNDICE	i
Índice de Figuras	iv
Índice de Tablas	v
GLOSARIO	vi
RESUMEN	vii
INTRODUCCIÓN	viii
I. ANTECEDENTES	1
I.1. Origen de las aguas residuales y objetivos de tratamiento.....	1
I.1.1. Aguas municipales	2
I.1.2. Aguas industriales	2
I.1.3. Objetivos de tratamiento.....	2
I.2. Clasificación de los métodos de tratamiento	3
I.2.1. Métodos Físicos (operaciones unitarias)	3
I.2.2. Métodos Químicos (procesos unitarios).....	4
I.2.3. Métodos Biológicos (procesos unitarios)	4
I.3. Procesos biológicos para el tratamiento de aguas residuales	5
I.3.1. Principales reacciones en los procesos aerobios	5
I.3.1.1. Respiración	6
I.3.1.2. Reacciones de oxido-reducción celular	6
I.3.1.3. Factores que afectan a los microorganismos	8
I.3.2. Sistemas continuos	8
I.3.3. Sistemas discontinuos.....	8
I.4. Tratamiento de aguas residuales tóxicas	9
I.4.1. Generación.....	9
I.4.2. Inhibición	9
I.4.2.1. Ley de Haldane	10
I.5. Reactores discontinuos secuenciales	11
I.5.1. Características generales de un reactor discontinuo secuencial (SBR)	11
I.5.2. Operación y aplicaciones del SBR.....	12
I.5.3. Uso del SBR en el tratamiento de aguas residuales tóxicas	13
I.5.4. Estrategias de control del SBR.....	13
I.5.4.1. Usual	14
I.5.4.2. Óptima.....	14
I.6. Automatización y control del sistema de tratamiento de aguas residuales	19
I.6.1. Teoría de control	19
I.6.2. Sistemas de control	20
I.6.3. Ventajas del control de sistemas	21
I.7. Objetivos y metas del trabajo de tesis	22
I.7.1. Objetivo general	22
I.7.2. Objetivo particulares.....	22
I.7.3. Metas	22

II. METODOLOGÍA.....	23
II.1. Estrategia de trabajo.....	23
II.2. Descripción de la estrategia óptima	24
II.2.1. Comportamiento de la estrategia óptima	26
II.2.2. Condiciones de operación	27
II.3. Aplicación de la estrategia óptima.....	27
II.3.1. Reactor piloto de laboratorio.....	27
II.4. Configuración de la planta prototipo.....	29
II.4.1. Descripción de la planta prototipo.....	29
II.4.1.1. Biorreactor SBR	30
II.4.2. Equipo e instrumentación	30
II.4.3. Control automatizado	33
II.5. Funcionamiento de la planta	33
II.5.1. Organización de actividades.....	34
II.5.2. Mantenimiento.....	34
II.5.3. Seguridad.....	36
III. PUESTA EN MARCHA DE LA PLANTA PROTOTIPO	37
III.1. Arranque de la planta prototipo.....	37
III.1.1. Pruebas del funcionamiento eléctrico y de control.....	37
III.1.2. Pruebas del funcionamiento hidráulico	38
III.1.2.1. Prueba del régimen de mezclado	38
III.1.3. Pruebas de caracterización y calibración.....	38
III.1.3.1. Prueba del K_La	39
III.2. Ajustes en el funcionamiento de la planta <i>in situ</i>	40
III.2.1. Revisión general.....	40
III.2.2. Monitoreo de las principales variables	40
III.2.3. Rectificación de procedimientos	42
III.3. Protocolo para la operación de la planta	43
III.3.1. Aclimatación.....	43
III.3.1.1. Características experimentales	43
III.3.1.2. Estrategia de aclimatación	44
III.3.2. Modus operandi de la planta prototipo.....	44
IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS	48
IV.1. Pruebas de equipo e instrumentación.....	48
IV.1.1. Formato de conformidad (Checklist)	48
IV.2. Pruebas hidráulicas	50
IV.2.1. Propuesta para la comprobación del régimen de mezclado del reactor	50
IV.3. Método para el cálculo del K_La	52
IV.4. Determinación de las condiciones iniciales de operación de la planta	54
IV.5. Instrumentación.....	55
IV.5.1. Pruebas.....	55
IV.5.2. Calibración de instrumentos	55
IV.6. Control.....	57
IV.7. Trabajo a futuro	58

CONCLUSIONES.....	60
REFERENCIAS.....	62
ANEXO I.....	64
ANEXO II.....	65
ANEXO III.....	66
ANEXO IV.....	67

Índice de Figuras

Figura I.1. Sistema continuos	8
Figura I.2. Curva de la ley de Haldane	11
Figura I.3. Fases típicas de un reactor SBR	12
Figura I.4. Suma de volúmenes de cada sub-ciclo que integran el volumen de tratamiento	15
Figura I.5. Comportamiento de las concentraciones de 4CF, DQO y COD (Buitrón, et. al., 2004).	16
Figura I.6. Cinética de reacción para una concentración de fenol de 385 mg/L	18
Figura I.7. Cinética de reacción para un pico de concentración de fenol de 723 mg/L	19
Figura II.1. Diagrama de la secuencia para la puesta en marcha de la planta prototipo	23
Figura II.2. Comportamiento del consumo de sustrato con base en el control del flujo del flujo de entrada utilizando la estrategia ED-TOC	26
Figura II.3. Disposición de los componentes de la experimentación	28
Figura II.4. Arreglo experimental del sistema experimental	28
Figura II.5. Planta prototipo	29
Figura II.6. Biorreactor SBR con dispositivos de operación	32
Figura II.7. Esquema general del funcionamiento de una PTAR	34
Figura III.1. Sistema de control para monitorear variables	41
Figura III.2. Componentes de un sistema de control típico	42
Figura III.3. Diagrama del protocolo de operación	45
Figura IV.1. Formato de conformidad para soplador	49
Figura IV.2. Modelado para sistemas con flujo continuo	50
Figura IV.3. Curva del trazador en el mezclado	51
Figura IV.4. Arreglo experimental para los estudios de trazado	52
Figura IV.5. Curva de OD para el cálculo del K_La	53
Figura IV.6. Formato de conformidad para el sensor de pH	56
Figura IV.7. Pantalla de control	57
Figura IV.8. Monitoreo gráfico de los comportamientos de las variables	58

Índice de Tablas

Tabla I.1. Clasificación de los procesos biológicos	4
Tabla I. 2. Estudio comparativo del desempeño de estrategias de control bajo picos de concentración	17
Tabla I.3. Ventajas del control de sistemas	21
Tabla II.1. Valores de operación del reactor SBR	30
Tabla II.2. Lista de equipo con sus características principales y su función	31
Tabla II.3. Instrumentos para la medición de los parámetros del proceso	32
Tabla II.4. Sugerencias para el mantenimiento y operación de un reactor SBR	35
Tabla III.1. Elementos medidos	41
Tabla III.2. Plan de funcionamiento general	46
Tabla IV.1. Resultados de las pruebas de K_{La} para volumen máximo	54
Tabla IV.2. Duración de las fases de los ciclos de tratamiento	55

GLOSARIO

ADP	Adenosín Difosfato
ATP	Adenosín Trifosfato
COD	Carbono Orgánico Disuelto
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DTI	Diagrama de Tuberías e Instrumentación
ED-TOC	Control de Tiempo Óptimo Dirigido por Eventos
FTC	Control por Tiempos Fijos
IVL	Índice Volumétrico de Lodos
I/O	Entradas/Salidas
K_{La}	Coefficiente de Transferencia de Oxígeno
OD	Oxígeno Disuelto
O_s	Oxígeno a la saturación
PC	Computadora personal
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
S^*	Concentración de sustrato para una μ^*
SBR	Reactor discontinuo secuencial
SST	Sólidos Suspendidos Totales
SSV	Sólidos Suspendidos Volátiles
TECO	Tasa Específica de Consumo de Oxígeno
TRC	Tiempo de Retención Celular
μ^*	Tasa máxima de crecimiento de los microorganismos
γ	Velocidad de Consumo Másico de Oxígeno
4CF	4-Clorofenol

RESUMEN

El objetivo de este trabajo de tesis es la *Puesta en Marcha de una Planta Prototipo para el Tratamiento de Aguas Residuales Tóxicas*, escalada a partir de un reactor piloto de laboratorio, para lo cual se llevaron a cabo una serie de actividades de investigación y de trabajo de campo enfocadas a la supervisión y corrección de las instalaciones, así como de cada componente de dicha planta, es decir, en poner a punto las instalaciones, el equipo, el material, los instrumentos y el control automatizado que dirigirá el proceso de tratamiento. Tal propósito se cumplió mediante pruebas del funcionamiento eléctrico y de control, pruebas hidráulicas, calibración y caracterización de equipo e instrumentación.

Para poder realizar una verificación a detalle del estado de la planta, se elaboraron listas de conformidad tanto de sensores como de equipo en general, cuya finalidad fue documentar y solucionar anomalías detectadas por medio de estos checklist.

Asimismo, se propone un protocolo de operación, que comprende el arranque y la operación estándar de la planta prototipo, desde la aclimatación hasta la implementación de una estrategia óptima, desarrollada en la Coordinación de Bioprocesos Ambientales del IIUNAM. En este sentido, se usará un sistema de control automatizado que comande el funcionamiento de la planta de tratamiento, el cual está soportado por el software especializado LabView 7.0 de National Instruments, de manera que se hicieron diversas pruebas de Entradas/Salidas que asegurarán un control eficiente a partir de la entidad Beckhoff/Modbus/PC.

Con el fin de garantizar las condiciones mínimas de arranque, se propone la metodología del cálculo de dos factores clave para un buen funcionamiento del tratamiento biológico, como son:

- Evaluación del régimen de mezclado del biorreactor
- Determinación del coeficiente de transferencia de oxígeno ($K_L a$)

De este último, se hicieron las pruebas experimentales con el equipo de sopladores y difusores, responsables de la aireación del sistema, dando como resultado que para un volumen máximo, el valor del flujo de aire que cumple con el límite mínimo, mayor a 13 h^{-1} , recomendado por las prácticas experimentales efectuadas en laboratorio del IIUNAM es de 150 L/min que produce un $K_L a$ igual a 14.55 h^{-1} .

INTRODUCCIÓN

La historia del tratamiento de las aguas residuales ha evolucionado tanto en sus técnicas como en los objetivos que persigue. En un principio, el objetivo principal fue la protección de la salud humana, así como la consideración de algunas características estéticas del agua. Luego, la preocupación abarcó a la calidad de los cuerpos de agua receptoras del agua residual con una visión de cuidado ambiental, con el objetivo de mantener una concentración de oxígeno adecuada, lo que condujo al desarrollo de sistemas de tratamiento biológico para la remoción de componentes demandantes de oxígeno, como lo son la materia orgánica y el amonio.

En la actualidad, los objetivos del tratamiento de las aguas residuales son diversos, inclusive siendo vigente los objetivos originarios de esta materia, ahora se han ampliado las exigencias de los procedimientos de eliminación sustancias nocivas, por lo que se han desarrollado nuevas tecnologías de tratamiento avanzado. El enfoque industrial del tratamiento va orientado a la remoción de compuestos contaminantes específicos, así como se ha remarcado la necesidad de tratar adecuadamente los subproductos de los procesos de tratamiento.

A partir de la necesidad de mitigar los efectos que acompañan los diversos tipos de descargas de aguas residuales en corrientes tanto superficiales como subterráneas se ha puesto de manifiesto, desde hace ya algunas décadas, la obligación de controlar la contaminación indiscriminada producida por actividades domésticas e industriales que desarrollamos los seres humanos. En este sentido, el desarrollo industrial junto con el crecimiento demográfico se cuentan como dos de los factores principales que inciden en la necesidad de manejar de manera óptima los recursos hídricos en sus diversos usos y reusos.

Es por ello, que el tema de la contaminación del agua sea una prioridad para buscar un equilibrio biosistémico, donde el impacto causado por el hombre se ajuste a la preocupación, y a su vez a una legislación adecuada y emergente en el tema de protección al ambiente y de los recursos naturales, así como a la salud. Por lo tanto, desde el punto de vista de salud pública y saneamiento ambiental, en cualquier población humana, es esencial un adecuado **tratamiento y disposición de las aguas de desecho**.

Dentro del área ambiental, se encuentra la ingeniería sanitaria que se encarga, bajo fundamentos básicos de procesos analíticos, de generar metodologías y técnicas que se alinien a enfoques de control buscando la optimización de las estrategias empleadas, para desarrollar nuevas tecnológicas basadas en el conocimiento, cada vez más perfeccionado, del funcionamiento de los procesos de tratamiento.

Desde un enfoque general, la ingeniería ambiental tiene un interés creciente sobre reacciones físicas, químicas y biológicas, que se llevan a cabo dentro del aire, tierra y agua. Asimismo, pretende desarrollar tecnologías cada vez más precisas y eficientes, en busca de mejorar las metodologías con sus correspondientes técnicas para la generación de los nuevos conocimientos.

Particularmente, el origen industrial de las aguas residuales plantea una dificultad especial debido a los efectos tóxicos que provocan los efluentes de esta fuente. Por lo que, las soluciones dadas para los procesos de tratamiento industrial deben estar dispuestas en métodos eficaces y confiables, que permitan transformar el desecho crudo en un efluente final que sea inocuo, basándose en la norma oficial mexicana.

El planteamiento de este trabajo recae, fundamentalmente, en el arranque operacional de una planta piloto, y todas las actividades que conllevan la puesta en marcha de una planta prototipo para el tratamiento de aguas residuales tóxicas.

Asimismo, el contenido de este documento se divide en cuatro capítulos. El Capítulo I habla sobre los antecedentes del tratamiento de aguas residuales, diferentes métodos de tratamiento, así como de los problemas inherentes a las aguas residuales tóxicas. También se aborda el uso de reactores discontinuos y los modos de operación de éstos. En el Capítulo II se plantea la metodología en la cual se basa el trabajo de esta tesis, el uso de una estrategia óptima, la configuración de la planta prototipo, así como un panorama general del funcionamiento de la planta.

Por otro lado, en el Capítulo III se describen las diferentes pruebas realizadas a equipos y sensores de la planta, un protocolo de la operación estándar de la planta y una descripción del funcionamiento del proceso de tratamiento utilizando un control automatizado. Por último, en el Capítulo IV, se exponen los resultados obtenidos de las pruebas hechas a los componentes de la planta, de la interfase de control y las propuestas para el trabajo futuro dentro de la planta prototipo.

I. ANTECEDENTES

El interés por el tratamiento de las aguas residuales se ha incrementado en la medida que el deterioro ambiental y ecológico ocasionado ha adquirido niveles irreversibles para diversas zonas afectadas por distintos tipos de descargas de desechos, ya sean municipales, industriales e incluso nucleares.

Sin duda, los procesos de tratamiento están sometidos a exigencias cada vez mayores por parte de la legislación ecológica, así como también la economía de la industria demanda bajos costos de construcción y operación.

Es por ello, que la atención en el tema de tratamiento de aguas residuales adquiera una importancia creciente tanto en el sector público como en el privado, debido a que tiene implicaciones económicas, sociales, y obviamente ecológicas. En suma, la solución se debe proponer de manera integrada con las necesidades que se pretenden satisfacer, partiendo de tecnologías accesibles y eficientes, que ayuden a mitigar el impacto que toda actividad humana tiene, en busca de un mejor bienestar.

I.1. Origen de las aguas residuales y objetivos de tratamiento

Las aguas residuales son todas las aguas ya utilizadas para alguna actividad productiva, doméstica, industrial, etc., cuya evacuación se hace a través de la red de alcantarillado. Una vez recolectadas, su tratamiento consiste en la remoción de contaminantes que pueden dañar tanto la salud humana como el ambiente acuático donde son depositadas, debido a que la presencia de diversos contaminantes favorecen la disminución del nivel de concentración del oxígeno disuelto, causada por la actividad de diversos microorganismos que utilizan como alimento a los materiales oxidables que están en el agua residual, requiriendo así oxígeno para su metabolismo microbiano.

Este tipo de aguas suelen contener materia tanto orgánica como inorgánica, y de no darle un tratamiento y disposición apropiadas, pueden generar serios riesgos e incomodidades. Asimismo, por la naturaleza de esta clase de residuos son vehículo de virus, bacterias y otros organismos que pueden ser peligrosos para el hombre, inclusive pueden contener compuestos tóxicos, agentes carcinógenos y otras sustancias dañinas para los seres vivos en general.

Por otro lado, aunada a la remoción de materia orgánica se han reconocido nuevos problemas causados por las grandes ciudades y su industria, la eutroficación, debida a las descargas excesivas de nutrientes inorgánicos tales como nitrógeno y fósforo, cuya remoción es ya considerada en el diseño de los procesos de tratamiento (Metcalf & Eddy, 2003).

Finalmente, entre los objetivos principales del tratamiento de aguas residuales está el convertir los componentes contaminantes crudos, con características típicamente dañinas, en componentes inocuos dentro del agua para su descarga o reuso, además de realizar una disposición segura de los sólidos, subproducto de los procesos biológicos.

1.1.1. Aguas municipales

Las aguas residuales municipales están compuestas por una mezcla de materia orgánica e inorgánica, ya sea disuelta, coloidal o en partículas, cuya cantidad depende de las características horarias, diarias y estacionarias del agua residual. La finalidad del tratamiento de aguas residuales municipales es reducir el contenido orgánico y, en muchos casos, controlar los nutrientes tales como el nitrógeno y el fósforo, producidos por actividades domésticas. Y en caso de ser necesario, remover algún elemento contaminante específico no considerado en el tratamiento convencional.

Las descargas domésticas son las producidas por el uso del agua en viviendas, oficinas y establecimientos comerciales, donde el residuo sólido ocupa el 0.1% del total de la masa de agua residual. De este porcentaje, del 40 al 70% son residuos orgánicos, los cuales implican la importancia principal en la generalidad de los trenes de tratamiento municipales.

Dentro de los compuestos orgánicos en el agua residual municipal están: proteínas (40-60%), carbohidratos (25-50%), grasas y aceites (10%); siendo las proteínas y los carbohidratos los más fácilmente biodegradables, a diferencia de las grasas y los aceites que son más estables.

1.1.2. Aguas industriales

La composición de este tipo de aguas está sujeta a la actividad de cada industria en particular, por lo que no se puede hablar de condiciones de operación típicas, ni generalizar los procedimientos de remoción de los contaminantes.

Así que, el objetivo de este trabajo es enfocarse sobre los contaminantes tóxicos, de origen orgánico. En tal caso, el propósito primordial del tratamiento de las aguas residuales industriales es eliminar la contaminación efectuada por dichos compuestos.

Por la naturaleza de las aguas residuales Industriales, se debe contemplar que su caracterización es altamente variable (Buitrón, *et. al.*, 2004a) y muy susceptible a análisis estadísticos, pero resulta indispensable considerar todas las variaciones posibles que estos análisis aportan para el diseño de los procesos.

Los problemas de nuevos contaminantes de la industria moderna plantean fronteras novedosas en los sistemas de tratamiento de agua residual, donde los contaminantes se han vuelto más difíciles de remover y más costosos en su tratamiento por medio de los procesos de tratamiento convencionales, así que están emergiendo nuevas tecnologías en el tratamiento de aguas residuales industrial, cuyo objetivo es resolver eficientemente la remoción de contaminantes a un costo apropiado para la economía de la industria.

1.1.3. Objetivos de tratamiento

En un principio, con el surgimiento del tratamiento de las aguas residuales, los objetivos estaban basados en preocupaciones ambientales y estéticas. En la actualidad los objetivos involucran la reducción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), de los Sólidos Suspendidos Totales (SST) y de microorganismos patógenos. También, la

remoción de nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo, es ya un alcance para los procesos de tratamiento hoy en día. Así, se busca proteger la salud pública y el ambiente

Las operaciones y procesos unitarios de tratamiento proporcionan diferentes niveles de remoción: preliminar, primario, primario avanzado, secundario y terciario (tratamiento avanzado), en los cuales se pueden remover o modificar compuestos contaminantes como son:

- Sólidos suspendidos
- Compuestos orgánicos biodegradables
- Nutrientes: nitrógeno y fósforo
- Organismos patógenos
- Sólidos disueltos y coloidales,
- Compuestos tóxicos, entre otros

Sin embargo, es conveniente aclarar que los objetivos particulares del tratamiento están ligados con las requerimientos de descargas y los estándares establecidos por la Norma Oficial Mexicana.

1.2. Clasificación de los métodos de tratamiento

Dentro de los procesos de tratamiento de aguas residuales se cuentan con componentes que, según los principios que rigen su funcionamiento, se dividen en tres métodos: físicos, químicos y biológicos. De hecho, en la actualidad todavía es aceptada ampliamente esta clasificación de operaciones y procesos unitarios por parte de la ingeniería ambiental (Grady, *et. al.*, 1999; Metcalf, *et. al.*, 2003).

Aunque existen casos particulares que sería difícil catalogar con base en esta clasificación, para efectos prácticos y de manera general, la diferenciación de tales métodos conviene con el objetivo de comprender la correlación de fenómenos. De tal manera, se tienen procesos que no son puramente químicos, físicos o biológicos, sino que están compuestos por características mixtas.

1.2.1. Métodos Físicos (operaciones unitarias)

Método de tratamiento en el cual la aplicación de fuerzas físicas predominan en la remoción de componentes del agua residual. Tal que las operaciones realizadas se rigen por leyes de la física.

Las operaciones físico-mecánicas están dirigidas, principalmente, a la remoción de la materia suspendida, donde se incluye el cribado, la trituración, la filtración y floculación mecánica, sedimentación de partículas con densidad relativa mayor a la del líquido tratado, y la flotación de partículas de baja densidad: aceites, grasas y otras impurezas.

La materia suspendida que se elimina con este método se divide en granular y floculante: la primera sedimenta por sí sola, debido a sus propiedades físicas; la segunda no sedimenta libremente, se requiere de ciertas condiciones (químicas o biológicas) que favorezcan el tamaño y densidad de la aglomeración de las partículas. Ésta última es un ejemplo de las condiciones mixtas de los procesos de tratamiento.

1.2.2. Métodos Químicos (procesos unitarios)

Método de tratamiento en el cual la remoción de los compuestos contaminantes es realizada por la adición de químicos que producen reacciones dentro del agua residual, con lo que se propicia la eliminación de los contaminantes.

Este tipo de método se enfoca a partículas muy finas (materia coloidal) que se sedimentan muy lentamente, siendo de origen orgánico e inorgánico. De tal manera, estos sólidos son tratados con coagulantes químicos, a partir de lo cual la materia disuelta se precipita por una reacción química, con lo cual se favorece la sedimentabilidad y la filtrabilidad.

Algunas aplicaciones comunes son: la desodorización, la neutralización según el pH y oxidación química (remoción de materia orgánica, amonio, destrucción de microorganismos, remoción de compuestos orgánicos resistentes), así como el intercambio iónico.

Otras utilidades de los métodos químicos, se implementan para la desinfección y esterilización, que sirven para destruir organismos peligrosos y controlar el crecimiento de patógenos.

1.2.3. Métodos Biológicos (procesos unitarios)

Método de tratamiento en el cual la remoción de compuestos orgánicos contaminantes es realizada por la actividad biológica de microorganismos, es decir, el tratamiento se lleva a cabo por una población mixta de microorganismos que utiliza como alimento sustancias que contaminan el agua. Normalmente, los microbios que actúan de manera decisiva en el tratamiento del agua residual son la población bacteriana, pero no debemos olvidar que hay una variedad de microorganismos presentes en el proceso, que gracias a su interrelación en el consorcio microbiano se logran mejores eficiencias en comparación con las cepas puras.

La tabla I.1 esboza un panorama general de las diferentes condiciones en las que trabaja un sistema biológico para el tratamiento de aguas residuales, a partir de lo cual se dan diversas combinaciones entre el ambiente y el modo de crecimiento de la biomasa.

Tabla I.1. Clasificación de los procesos biológicos

Característica	Condición	Especificaciones
<i>Ambiente</i>	Aerobio	Cuando se cuenta con suficiente oxígeno libre disponible en el ambiente, donde se efectúa el tratamiento
	Anóxico	Cuando los microorganismos utilizan el oxígeno combinado o asociado en los compuestos presentes del agua residual, como es el caso del nitrato (NO ₃)
	Anaerobio	Cuando no hay presencia de oxígeno, ni libre ni asociado, dentro del proceso de tratamiento
<i>Crecimiento</i>	Cultivo suspendido	Cuando los microorganismos están en suspensión dentro del medio en el cual se efectúa el tratamiento
	Cultivo fijo	Cuando los microorganismos crecen adheridos a algún material de soporte, ya sea móvil o fijo

Las principales aplicaciones de un tratamiento biológico son:

- Oxidación de partículas y compuestos disueltos biodegradables.
- Captura e incorporación de los sólidos orgánicos suspendidos y coloidales no sedimentables en un floculo biológico o una biopelícula, los cuales son eliminados o disminuidos durante el proceso.
- Nitrificación o desnitrificación,
- Estabilización de lodos biológicos.
- Remover compuestos orgánicos particulares (tendencia actual).

En cualquier sistema biológico aerobio, se da un balance entre procesos de oxidación y reducción en diferentes etapas, por lo cual el tratamiento biológico a través de un sistema de bacterias/enzimas lleva a cabo una serie de reacciones bioquímicas para modificar y eliminar los contaminantes, es decir, la biodegradación de las sustancias nocivas. El principal objetivo es la remoción de materia orgánica soluble, de manera que ésta sea utilizada por los microorganismos como fuente energética y de alimento, convirtiendo el carbón orgánico (contaminante) en nueva biomasa y el resto en bióxido de carbono, agua, bióxido de nitrógeno, sulfatos, etc.

De esta manera, los procesos biológicos efectúan una mineralización del contaminante, a diferencia de los métodos físicos y químicos que únicamente remueven el contaminante.

En el caso específico de ambientes aerobios, los microorganismos son particularmente convenientes en la remoción de materia orgánica en concentraciones entre 50 y 4000 mg/l como Demanda Química de Oxígeno (DQO) biodegradable (Grady, *et. al.*, 1999).

1.3. Procesos biológicos para el tratamiento de aguas residuales

1.3.1. Principales reacciones en los procesos aerobios

El conocimiento de la forma, estructura y actividades biológicas de los microorganismos son fundamentales para un entendimiento profundo de los procesos que se están empleando para el tratamiento de aguas residuales. Los factores clave bajo los cuales funcionan los procesos biológicos son: el crecimiento biológico y la cinética de las reacciones, con el objeto de utilizarlos para la optimación del proceso.

Dentro de los ambientes aerobios, se encuentran cadenas alimenticias completas desde bacterias hasta rotíferos, a diferencia de los procedimientos anaerobios/anóxicos donde prevalecen principalmente bacterias.

La energía que los microorganismos usan para su crecimiento y reproducción, la extraen de moléculas orgánicas por medio de un proceso de oxido-reducción. Las reacciones comprendidas en estos procesos son las que se consideran en el metabolismo de las células.

1.3.1.1. Respiración

Cuando la célula obtiene energía de algún compuesto orgánico, cuyos átomos de carbono e hidrógeno se combinan con el oxígeno para producir CO_2 y H_2O , se le conoce como **respiración**. En términos bioquímicos, la respiración es el proceso metabólico generador de energía en el cual compuestos orgánicos e inorgánicos sirven como donadores de electrones, siendo los compuestos inorgánicos como el O_2 , NO_2 , NO_3 , y SO_4 los principales aceptores de electrones; si el O_2 es el aceptor, la respiración es aerobia.

La respiración de un consorcio microbiano está dada por el consumo de oxígeno necesario dada la fisiología de los microorganismos, para lo cual se utiliza la Tasa Específica de Consumo de Oxígeno (TECO), que se mide en miligramos de oxígeno consumido por gramo de Sólidos Suspendedos Volátiles (SSV) por hora.

1.3.1.2. Reacciones de oxido-reducción celular

Dentro del tratamiento biológico de aguas residuales, las bacterias son los microorganismos más utilizados en los procesos de remoción, por lo que, si bien se puede hablar de manera general de células vivientes, también es cierto que existen características particulares que nos interesan de los organismos bacterianos.

La célula, como entidad viva, tiene un complejo sistema químico, lo cual la diferencia de otras entidades vivas e inertes. A continuación se mencionan sus características principales:

- Capaces de crecer y reproducirse.
- Altamente organizadas
- Autoalimentación: consumen los elementos necesarios (electrones) y la energía suficiente del ambiente externo. De tal suerte, son organismos que se crean y se mantienen como entidades reproductivas, organizadas y reductoras.

Las células vivas, o biomoléculas, deben su capacidad reactiva a las enzimas, que son catalizadoras de las reacciones bioquímicas que las células realizan para vivir y reproducirse, tanto para la captación de energía como para la síntesis de nuevo material celular. Las enzimas juegan un papel fundamental en el metabolismo microbiano, ya que sin la presencia enzimática, estas reacciones se efectuarían a velocidades extremadamente reducidas.

El metabolismo de las células bacterianas consiste en dos reacciones bioquímicas: de energía y síntesis celular. La primera libera energía para que se pueda crear nuevo tejido celular. Ambas reacciones son el resultado de numerosos procesos dentro de la célula y cada proceso consiste en diversas reacciones catalizadas por enzimas.

Para obtener energía, los microorganismos transforman químicamente el sustrato, fuente de alimento y energía en el agua residual, a través de reacciones de oxidación y reducción, lo que les sirve para su propia reproducción. Desde un enfoque de ingeniería ambiental, dichas reacciones así como la producción de nueva biomasa conllevan a que los microorganismos remuevan sustancias contaminantes.

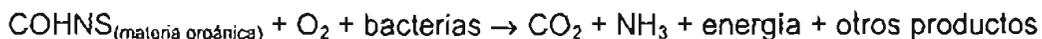
La transferencia de energía utilizada por los organismos se lleva a cabo por medio de un compuesto orgánico que se encuentra en las enzimas llamado adenosín trifosfato (ATP), que actúa como transportador de energía hacia los procesos endergónicos de síntesis, de movilidad y de mantenimiento de la célula. Conforme las moléculas de ATP transfieren su energía a otras moléculas, pierden su fosfato terminal y se transforman en adenosín difosfato (ADP), con lo cual vuelven a estar disponibles para la transferencia de energía al estar en posibilidad de recuperar un grupo de fosfato, y así recobrar su estado energético.

Las reacciones de oxidación/reducción, principal fuente de energía, implican la transferencia de electrones de un átomo a otro, o de una molécula a otra. Los portadores de electrones llevan a éstos de un compuesto a otro: al donante inicial se le conoce como *donante de electrones primario*, y al aceptor final, *aceptor de electrones terminal*. A partir de la liberación de energía de las reacciones ya citadas, los microorganismos la captan por medio de compuestos enzimáticos, de tal manera, que los electrones son removidos de un donador de electrones, y transferidos a un portador intracelular de electrones. A su vez, estos portadores llevan los electrones al aceptor terminal, el cual es reducido.

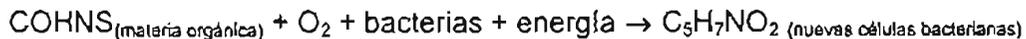
Reacciones en los procesos biológicos aerobios

Las tres reacciones principales simplificadas que se llevan a cabo en los procesos aerobios son:

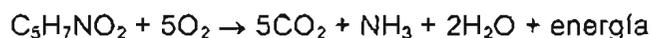
- Oxidación:



- Síntesis:



- Respiración endógena:



En la última ecuación, a falta de alimento disponible (sustrato) los microorganismos empiezan a consumir su propio protoplasma para obtener energía para las reacciones de mantenimiento celular, y por lo tanto, disminuyen su masa celular.

Como se observa en las tres reacciones, el consumo de oxígeno está presente, por lo que la velocidad de respiración es importante como indicadora de las condiciones saludables del proceso biológico. Así que, el crecimiento de la biomasa y la remoción (oxidación) del sustrato, variables de interés para el tratamiento, están sujetas a la velocidad de respiración.

De esta manera, se deduce que el crecimiento de la biomasa y el consumo de sustrato están unidos, de hecho son proporcionales, lo cual se refleja en el resultado de la remoción de una unidad de sustrato equivalente a cierta producción de biomasa.

1.3.1.3. Factores que afectan a los microorganismos

El comportamiento de los microorganismos está regulado por los cambios en concentraciones, las condiciones ambientales, y las necesidades de energía para su movimiento, crecimiento y su reproducción. La temperatura influye en las actividades metabólicas, inclusive afecta a factores como la velocidad de transferencia de gases y las características de sedimentación de los sólidos biológicos.

Algunos factores como la temperatura y el pH inciden en el proceso vital de los microbios, y por consiguiente en su mortalidad. El pH óptimo para el crecimiento bacteriano se encuentra entre 6.5 y 7.5

1.3.2. Sistemas continuos

Existen una gran variedad de modos de operación de los procesos de lodos activados, la forma convencional más usada es en un sistema continuo.

Los reactores que trabajan con este sistema operan con un flujo estable tanto de entrada de reactantes como de salida de productos. El gasto de entrada (Q_e) es igual al gasto de salida (Q_s).

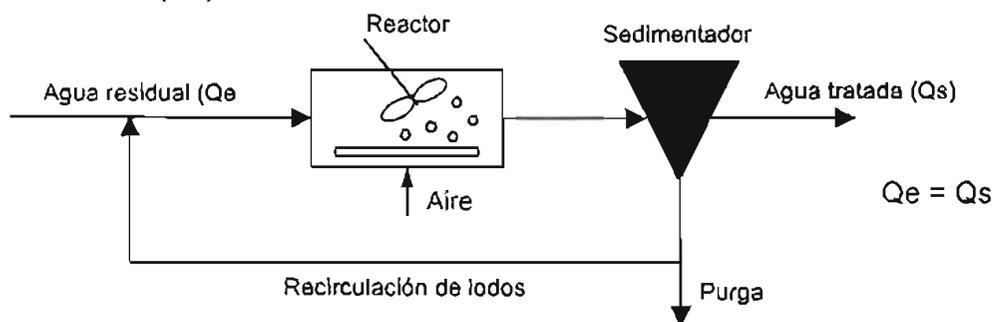


Figura I.1. Sistema continuos

Los sistemas con flujo continuo, adquieren un grado de reacción que puede variar con respecto a la posición del reactor, pero no en función del tiempo.

En estos sistemas se alcanza una mezcla completa, cuando las partículas que entran en el tanque, se dispersan inmediatamente por todo el volumen del reactor, para alcanzar así una homogeneidad uniforme en el interior del mismo.

1.3.3. Sistemas discontinuos

Como alternativa de los procesos de flujo continuo convencionales, los cuales se han visto poco robustos en su aplicación en la industria, y han generado dificultades inherentes a sus regímenes de continuidad, se han usado los procesos de flujo discontinuo, ya que ofrecen ventajas en cuanto a su flexibilidad de operación bajo condiciones diversas, además de permitir la implementación de estrategias de control completamente automatizadas (Betancur, *et. al.*, 2004a). El uso de este tipo de procesos es cada vez más considerado debido a que su implementación proporciona resultados inmejorables.

Por medio de un balance de masa, los procesos discontinuos se pueden definir como aquellos sistemas que durante un lapso de tiempo dado, no entra ni sale nada del sistema ($Q_{in}=0$ & $Q_{out}=0$, para un $t = t_{reacción} - t_{llenado}$), creando condiciones similares a las de un sistema cerrado, o también conocidos como sistemas **batch**.

El reactor típico que se utiliza en los sistemas de flujo discontinuo, es el reactor discontinuo secuencial (SBR, por sus siglas en inglés), el cual mantiene, por su modo de operación, un comportamiento de sistema cerrado durante un intervalo de tiempo.

1.4. Tratamiento de aguas residuales tóxicas

Recientemente, se ha enfocado parte de la investigación a las aguas residuales contaminadas con compuestos tóxicos de origen orgánico, las cuales pueden ser procesadas usando los métodos para la remoción de materia oxidable. Aunque no es una idea aceptada de manera general, cuando se van a tratar compuestos que ejerzan una demanda de oxígeno, el método de tratamiento de agua industrial más apropiado para remover los contaminantes oxidables es el tratamiento biológico (Grady, *et. al.*, 1999).

Es por ello, que los compuestos orgánico tóxicos al presentar riesgos en su tratamiento y disposición, así como dificultades para ser tratados por métodos convencionales, sea recurrido a los procesos de flujo discontinuo, los cuales han sido evaluados para incrementar la eficiencia del tratamiento biológico de manera satisfactoria (Buitrón *et. al.*, 2004b).

1.4.1. Generación

Los compuestos tóxicos orgánicos son producidos por la mayor parte de las industrias plástica, farmacéutica, química y petroquímica, cuyos gastos de descarga tienen una gran variabilidad con respecto al tiempo y a la composición del agua residual.

En la industria se tienen dificultades extremadamente complejas para mantener condiciones aceptables en el funcionamiento de los procesos de tratamiento, esto obedece a las operaciones particulares y altamente variables que cada industria desarrolla, siendo común enfrentarse durante la marcha del proceso de tratamiento a picos de concentración de compuestos tóxicos, equivalentes a altas cargas de contaminantes que entran de manera puntual al tratamiento, complicando así la remoción de los contaminantes. Incluso, los compuestos tóxicos dependiendo de su concentración, inhiben o pueden llegar a matar a los microorganismos encargados de la tarea del tratamiento. De esta manera, la variabilidad del agua residual industrial, típica de un comportamiento inestable (no estacionario), tanto en su composición como en su flujo, traen consigo inconvenientes y retos para las nuevas tecnologías y metodologías empleadas para el tratamiento de este tipo de influentes.

1.4.2. Inhibición

Los compuestos tóxicos que se manejan en un tratamiento biológico, por su naturaleza son inhibitorios para los microorganismos encargados de efectuar el tratamiento, lo que se refleja en la disminución de la actividad bacteriana.

La actividad enzimática de las bacterias puede ser inhibida por la concentración excesiva de ciertos tipos de reactivos químicos específicos, que afectan las rutas metabólicas de las células, y para el caso de un proceso de tratamiento biológico, los microorganismos *dejan de consumir sustrato*, por lo tanto, se pierde la eficiencia en la remoción de los compuestos orgánicos que se desean eliminar.

Es necesario llevar a cabo una etapa de aclimatación o adaptación de los microorganismos a las aguas residuales tóxicas, con el fin de asegurar un tratamiento eficiente (Moreno-Andrade y Buitrón 2004).

Desaclimatación

La desaclimatación se debe a la disminución de la capacidad de los microorganismos para efectuar la degradación de cierto sustrato debido al ayuno, el cual es causado por la falta de sustrato durante períodos largos de tiempo, es decir, cuando los tiempos de reacción se fijan muy grandes.

Normalmente, el operador de un reactor desconoce el momento en el cual termina la reacción, por lo que debe fijar un tiempo de reacción lo suficientemente largo para garantizar la degradación del sustrato presente en el influente a tratar, y evitar los problemas de acumulación de contaminantes que se registran cuando no se completa la reacción del ciclo anterior. Sin embargo, un periodo demasiado largo puede someter a la biomasa a períodos de ayuno no deseados, lo que podría disminuir su afinidad a consumir el compuesto tóxico.

1.4.2.1. Ley de Haldane

Se sabe que para compuestos tóxicos, el comportamiento de la tasa de crecimiento específica de la biomasa (μ), o la *tasa de degradación del sustrato*, se puede describir en función de la concentración del sustrato (S) por medio de la ley de Haldane (Fig. 1.2), que se expresa así: (Metcalf & Eddy, 2003)

$$\mu(S) = \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S + S^2 / K_i} \quad \dots\dots\dots (1.1)$$

Donde:

μ_{\max} : Tasa específica de crecimiento máximo

K_s : Constante de afinidad

K_i : Constante de inhibición

S: Concentración de sustrato tóxico

Para poder modelar condiciones inhibitorias provocadas por un sustrato tóxico dentro de un proceso biológico, se emplea el modelo de Haldane que se muestra en la fig. 1.2. Esta curva indica que existe un máximo en la tasa de crecimiento de los microorganismos en función de la concentración del sustrato, pero se observa que al cruzar ese máximo, la actividad de crecimiento disminuye, lo que refleja que los microorganismos están siendo inhibidos en proporción al aumento de la concentración de sustrato.

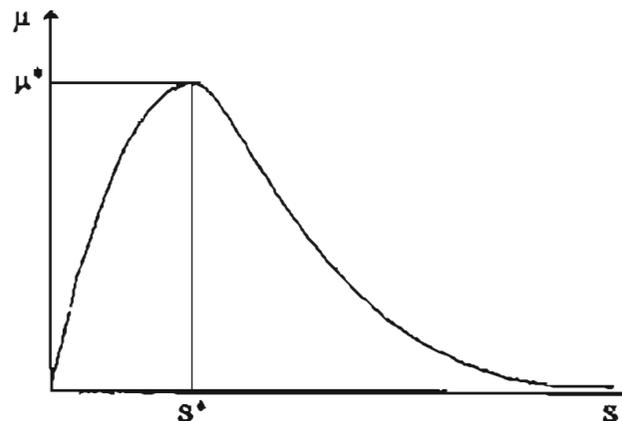


Figura I.2. Curva de la ley de Haldane

1.5. Reactores discontinuos secuenciales

1.5.1. Características generales de un reactor discontinuo secuencial (SBR)

El término Sequencing Batch Reactor (SBR) se debe a la configuración típica del proceso de tratamiento, que está compuesto por la secuencia de pasos o eventos que ejecuta un reactor desde que recibe el agua residual, la trata y finalmente descarga el líquido tratado. Todo el proceso se ejecuta de manera secuencial, conforme a ciclos de tratamiento, repitiendo una serie de fases bien definidas.

El orden de las etapas típicas, como se ve en la figura I.3., de un reactor SBR son:

- **Llenado** (Inicio del ciclo): período que comprende la entrada del agua residual al biorreactor, en el cual la mezcla y/o la aireación se llevan a cabo como requerimiento para la reacción biológica que realizan los microorganismos en suspensión.
- **Reacción**: lapso donde la biomasa actúa sobre los contaminantes del agua, así los microorganismos crecen y utilizan los contaminantes como sustrato alimenticio y energético. El reactor opera completamente mezclado sin flujo continuo a través del dispositivo, con lo cual se supone que el contenido entero del reactor es homogéneo en cualquier instante dado.
- **Sedimentación**: en este período se detiene la aireación y la agitación, por lo que se produce la sedimentación de la biomasa, dando como resultado la clarificación del agua tratada apta para ser descargada.
- **Vaciado**: se descarga el líquido clarificado, es decir, el efluente tratado, que en términos del proceso, comprende el volumen de intercambio para cada ciclo. En este caso, el líquido y la biomasa retenida, no intercambiada, constituyen el material biológico que se reutilizará para el siguiente ciclo, cuyo control de crecimiento, es decir, la tasa de purga de lodos, está dado por el Tiempo de Retención Celular (TRC).
- **Tiempo muerto**: (opcional) a partir de este momento el reactor está listo para recibir el nuevo influente.

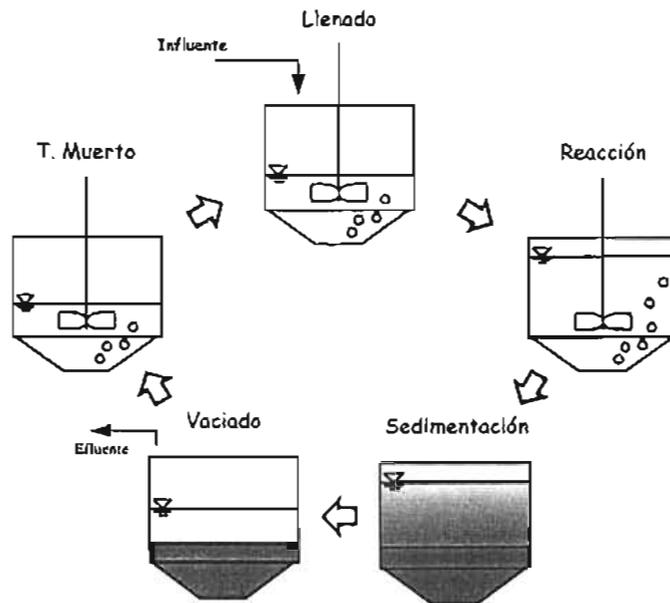


Figura I.3. Fases típicas de un reactor SBR.

La purga de lodos va encaminada a controlar el crecimiento microbiano neto del reactor, dado que el mantenimiento de cierto nivel de masa biológica influirá en la eficiencia deseada del tratamiento, por lo que es imprescindible analizar la cinética de crecimiento de los microorganismos, para poder determinar un Tiempo de Retención Celular (TRC).

Asimismo, la secuencia de las etapas anteriores constituyen un ciclo de tratamiento, pero antes de iniciarse cada ciclo se parte de que el reactor contiene un volumen mínimo de agua con biomasa en alta concentración, en condiciones de pre-aireación (opcional), según la metodología del proceso.

La importancia principal del período de llenado, según Grady *et. al.* (1999), va correlacionada con las características hidráulicas del biorreactor. De tal manera, el lapso de llenado influye, si es rápido o es lento, en la carga orgánica que se necesita remover dentro del reactor, donde el volumen es un factor a tomar en cuenta en estas variaciones, o visto desde un enfoque de control, el flujo de llenado será determinante en la cantidad de sustrato, y por lo tanto, en el crecimiento de la biomasa encargada de degradar los contaminantes (Betancur *et. al.*, 2004).

1.5.2. Operación y aplicaciones del SBR

Debido a la naturaleza de flujo-pistón que tiene un reactor SBR es posible realizar mejor la remoción de los componentes solubles, y se ha visto, según lo documentado por Grady *et. al.* (1999), que el TRC no debe excederse entre 4 y 8 días, dentro de lo cual se obtiene una remoción alta de Demanda Química de Oxígeno (DQO), se evita la generación desmedida de lodos, así como, se puede tener un efluente sin nutrientes pero con amonio para un TRC = 4 d, o en el caso de un TRC = 8 d sucede lo contrario, se produce un efluente sin amonio pero con exceso de nutrientes, lo que podría ser bueno

dependiendo de la disposición final que se le vaya a dar al líquido tratado. También, con un mayor TRC se mejoran las características de sedimentación del floculo biológico, debido a que se llegan a producir polímeros extracelulares que favorecen la aglutinación de partículas.

Adicionalmente, Grady *et.al.* (1999) al igual que otros grupos de investigación, plantean la conveniencia de operar los biorreactores en dualidad de etapas, aerobia/anóxica, con el fin de mejorar y controlar los efectos que se presentan al operar de manera aislada cada condición, obteniendo un factor óptimo de tiempo que oscila entre el 60 y 70% de fracción aerobia, y el restante de fracción anóxica. Esta última está basada en el cambio temporal de la naturaleza del aceptor de electrones durante las reacciones bioquímicas, tomando el oxígeno del nitrato (NO_3) en lugar del Oxígeno Disuelto (OD), con lo cual es posible lograr la remoción de nutrientes.

Según Rittman y McCarty (2001), las aplicaciones típicas de los SBR son: pruebas de DBO, y la remoción altamente eficiente de compuestos contaminantes específicos presentes en el agua residual, como podría ser algún compuesto tóxico. Se ha comprobado que este tipo de reactor mantiene un alto grado de control sobre el desarrollo de los microorganismos, ya que por su secuencia con régimen no estacionario, favorece a una *selección y multiplicación de microorganismos especializados en la degradación de compuestos tóxicos* (Moreno-Andrade, *et. al.*, 2004).

1.5.3. *Uso del SBR en el tratamiento de aguas residuales tóxicas*

Los procesos discontinuos, y en particular los reactores SBR han demostrado su eficiencia y flexibilidad en el tratamiento de aguas residuales con altas concentraciones de tóxicos (Moreno y Buitrón, 2002), debido a que se logra un alto grado de control en la selección de los microorganismos encargados de la degradación.

Dada la naturaleza de las aguas residuales industriales tóxicas, se debe considerar que su caracterización es altamente variable, además de que se presentan dificultades extremadamente complejas para mantener condiciones aceptables en el funcionamiento de los procesos de tratamiento (Moreno y Buitrón, 2002). Por ello, los procesos discontinuos se han utilizado para biodegradar los compuestos tóxicos orgánicos, ya que los métodos convencionales como lodos activados presentan problemas de operación por la toxicidad de las aguas residuales. Buitrón *et. al.* (2004) evaluaron los sistemas discontinuos concluyendo que son eficientes en la degradación de fenoles (ver apartado 1.5.4.2).

1.5.4. *Estrategias de control del SBR*

Considerando la duración de cada una de las fases típicas de un reactor SBR (ver fig. 1.2.), llamaremos *Forma de Operación o Estrategia de Control* a la manera en la que se determina la duración de cada fase, lo que tendrá gran impacto en los resultados obtenidos del tratamiento (Moreno y Buitrón, 2002).

A pesar de los beneficios inherentes de los procesos discontinuos cuando se trata de biodegradar sustancias tóxicas, existen diferentes formas de operar un SBR, dependiendo si la estrategia de control se basa en la forma usual, por tiempos fijos, o cuando la estrategia se fundamenta en el control óptimo del proceso.

1.5.4.1. Usual

La forma de operación usual típica de un reactor SBR, se le conoce como estrategia por tiempos fijo, FTC (Fixed Timing Control), la cual se ejecuta sin optimización de ningún tipo, solo es relevante la experiencia del operador y/o diseñador que fijan los tiempos de cada fase del ciclo de tratamiento, de acuerdo a los resultados que se vayan obteniendo en el funcionamiento del proceso, considerando cuáles son los objetivos del tratamiento.

La estrategia inicia con la alimentación de aguas residuales al biorreactor, utilizando la máxima capacidad de la bomba de suministro para alcanzar, en un mismo período, el volumen máximo de operación. El tiempo de reacción se suele establecer, normalmente, mucho más grande que el necesario para prevenir cualquier posible pico de concentración, que resultaría inhibitorio para los microorganismos del tratamiento. En tal caso, con una biomasa muy inhibida el efluente del proceso sería vaciado todavía con características contaminantes, debido a que la reacción no lograría completar la degradación deseada. Por otro lado, de no existir inhibición, la biomasa entraría a una etapa de ayuno, ya que esperarían demasiado tiempo para el siguiente ciclo de alimentación.

En suma, cuando un biorreactor SBR es operado bajo una estrategia FTC se presentan una serie de problemas durante el proceso de tratamiento de aguas residuales tóxicas, como son:

- Inhibición aguda de los microorganismos
- Perturbaciones del proceso debido a choques de carga causados por compuestos tóxicos
- Desaclimatación y ayuno, motivo de bajas eficiencias con respecto a la remoción de contaminantes tóxicos.

1.5.4.2. Óptima

La estrategia óptima (ED-TOC, Control de Tiempo Óptimo Dirigido por Eventos) que se propone en este trabajo se basa en la optimización de la reacción biológica en el reactor, con lo cual se consigue una *velocidad máxima de degradación del sustrato*. Para tal fin, se emplearon técnicas de la teoría de control para establecer que el tiempo de reacción sea tan corto como sea posible (Betancur, *et. al.*, 2004).

El beneficio que trae consigo la implementación de la estrategia óptima propuesta, es la *reducción de los tiempos de tratamiento*, lo cual origina que la cantidad de agua tratada por unidad de tiempo sea mayor. Dado que para un SBR los períodos de sedimentación, vaciado y tiempo muerto son fijos, es decir, que sus variaciones no son considerables ni controlables, independientemente de la estrategia empleada, el interés primordial de la estrategia óptima se centra en el tiempo de degradación, en tanto que la reacción se puede optimizar por medio del control de flujo que está alimentando al biorreactor con agua residual. De tal manera, se debe considerar que al crear un medio ambiente controlado, así como seleccionar determinada comunidad biológica (biomasa), se favorece las condiciones para la implementación estrategias de control.

Es necesario precisar, que la cantidad de OD en el reactor debe ser suficiente para que los microorganismos realicen sus actividades metabólicas, y por consiguiente la tasa de degradación del sustrato dependa exclusivamente de la concentración del mismo.

La estrategia inicia con la alimentación de aguas residuales al biorreactor, siguiendo un patrón de control, el cual es gobernado por la medición en línea de oxígeno. El flujo de llenado se detiene cada vez que el control registre la inhibición de la biomasa dentro del biorreactor, reiniciando su flujo cuando se detecta el consumo de sustrato reflejado por la caída del nivel de OD. De esta manera, el reactor se alimenta con pequeños volúmenes hasta alcanzar el máximo fijado (Fig. 1.4). A este modo de operación también se le conoce como Fed-batch.

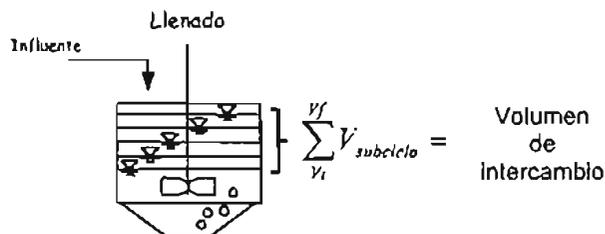


Figura 1.4. Suma de volúmenes de cada sub-ciclo que integran el volumen de tratamiento

En seguida, se explican los principales resultados obtenidos en la Coordinación de Bioprocesos del IIUNAM en relación a la operación de un reactor piloto de laboratorio, el cual operó con dos tipos de influentes: agua sintética con 4-clorofenol (4CF) y agua residual con fenol.

Aclimatación

La aclimatación es una etapa previa a la operación de un proceso de tratamiento, cuyo objetivo es seleccionar a los microorganismos aptos para degradar el compuesto tóxico modelo. El inicio de la aclimatación se realizó con una concentración del compuesto tóxico, 4-clorofenol (4CF), de 175 mg/L aumentando hasta llegar a un valor de 350 mg/L, el cual fue la concentración estándar de operación del trabajo experimental.

Los resultados obtenidos fueron una eficiencia promedio del 99% como DQO y del 100% como 4CF; los SST en el efluente fueron menores a 14 mg/L. En cuanto a la sedimentabilidad, se obtuvo un Índice Volumétrico de Lodos (IVL) de 38 mL/g y una velocidad de sedimentación 6 m/h. De tal forma, dichos resultados de la aclimatación reflejan un buen funcionamiento del biorreactor, con los cuales se dio inicio a la operación estándar del proceso de tratamiento bajo las condiciones de control óptimo.

Degradación de 4-clorofenol

El trabajo experimental se basa en el uso de 4CF como sustrato para el sistema, ya que es un compuesto tóxico, capaz de inhibir la actividad enzimática de las bacterias, y su detección es común en las descargas industriales.

Mediante la operación del biorreactor del modo Fed-batch, la cual consiste en alimentar por tandas, dependiendo de como la biomasa vaya asimilando y consumiendo el sustrato, se observa en la fig. 1.5. la disminución del OD como resultado de la actividad bioquímica (metabólica) de los microorganismos para llevar a cabo la degradación del 4CF, lo que significa que al consumir sustrato, los microorganismos también demandan oxígeno, ya que estamos hablando de un proceso de tratamiento aerobio.

Se busca no exceder cierta concentración de sustrato dentro de biorreactor, para que la biomasa no se inhiba, y se mantenga, según la ley de Haldane apegada a la estrategia óptima, oscilando en un valor máximo de velocidad en la degradación del compuesto tóxico.

El comportamiento de las concentraciones en la fig. 1.5, son muestra del modo de alimentar al biorreactor por tandas, de manera que, los valores mayores son los estados en que entra el influente tóxico al sistema, y el paso de estos valores a los más bajos es el signo del consumo de sustrato, que al llegar a un valor mínimo significa que los microorganismos necesitan más sustrato para mantener una velocidad de degradación máxima. Esto sucede hasta que esos pequeños gastos de cada subciclo integrados suman el volumen máximo de trabajo del biorreactor.

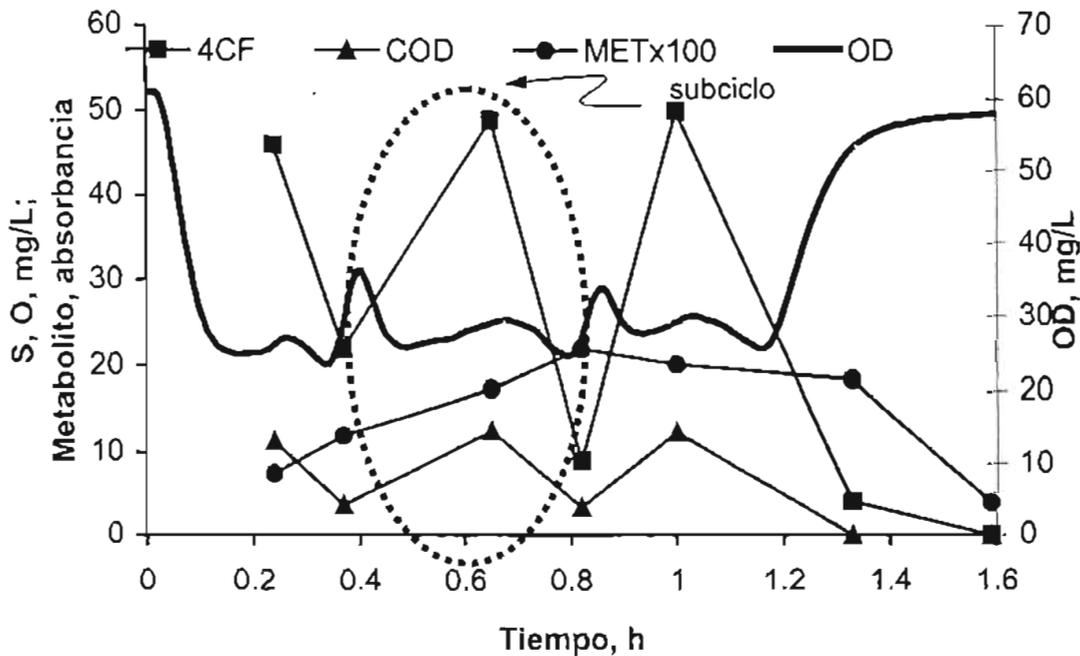


Figura 1.5. Comportamiento de las concentraciones de 4CF, DQO y Carbono Orgánico Disuelto (COD) [Buitrón, *et. al.*, 2004]

Es necesario precisar, que los valores de remoción (DQO: 99% y 4CF: 100%), SST en el efluente (< 14 mg/L), IVL y la velocidad de sedimentación (38 mL/g y 6m/h), que se obtuvieron al final de la aclimatación y como condición inicial para la operación estándar del proceso, se mantuvieron aproximadamente constantes a lo largo de la operación estándar del piloto de laboratorio.

En cuanto a picos de concentración, como resultado de la exposición repentina a altas concentraciones de tóxico, se demostró las enormes ventajas relacionadas con el uso de una estrategia óptima que minimiza los efectos de los choques de concentración, llegando a soportar la ED-TOC concentraciones de hasta 11200 mg 4CF/L. Se puede demostrar que no sólo una concentración más alta de compuesto tóxico se podría tratar con la estrategia óptima, sino que también es obtenida una reducción en el tiempo de degradación en comparación con la estrategia usual (Moreno-Andrade, *et. al.*, 2005).

Tabla I. 2. Estudio comparativo del desempeño de estrategias de control bajo picos de concentración

Estrategia	Concentración de 4CF mg/L	Eficiencia de remoción (4CF)	Tasa de degradación (mg 4CF/gSSV*h)	Comportamiento del reactor
FTC	550	100	21.0	Sin problemas
FTC	760	85	18.5	Con problemas ¹
FTC	900	63	21.4	Con problemas ²
ED-TOC	530	100	45.8	Sin problemas
ED-TOC	700	100	63.5	S/p
ED-TOC	1400	100	91.2	S/p
ED-TOC	5600	100	114.3	S/p
ED-TOC	11200	100	114.3	S/p

¹ Aumento del tiempo de degradación en un 50%. Más una semana para recuperar la eficiencia original

² Deficiente desempeño del reactor. Un mes de recuperación para recobrar la eficiencia original

Degradación de agua residual con fenol

Para el caso de la degradación de fenol mezclado con agua residual se emplearon, en su mayoría, las mismas características de operación que para la degradación de 4CF: temperatura, volumen total y de intercambio, Inóculo y concentración estándar de compuesto tóxico. Sin embargo, el flujo de aire se controló en 2.5 L/min, debido a que el influente tenía mayor carga orgánica, lo que se refleja en mayor consumo de oxígeno.

Como fuente de energía y de carbono se tenía tanto el fenol como el agua residual. Asimismo, por lo que respecta a los nutrientes se agregaron cuando se trataron picos de concentración, ya que los nutrientes que aportaba el agua residual eran insuficientes.

Se evaluaron diversas concentraciones iniciales de fenol entre 350 y 3000 mg/L para probar la estrategia de control.

En la fig. 1.6 se ve claramente el modo de alimentar al biorreactor por lotes, hasta alcanzar el volumen máximo de trabajo del reactor. De igual manera, se observa las variaciones en las concentraciones de DQO y fenol que están asociadas a un rango de valores máximos y mínimos bajo los cuales funciona la estrategia óptima, lo que significa que la estrategia óptima está operando alrededor de un valor de sustrato óptimo, cuya magnitud se relaciona con la velocidad máxima de degradación, sin que los microorganismos sufran los efectos de la inhibición.

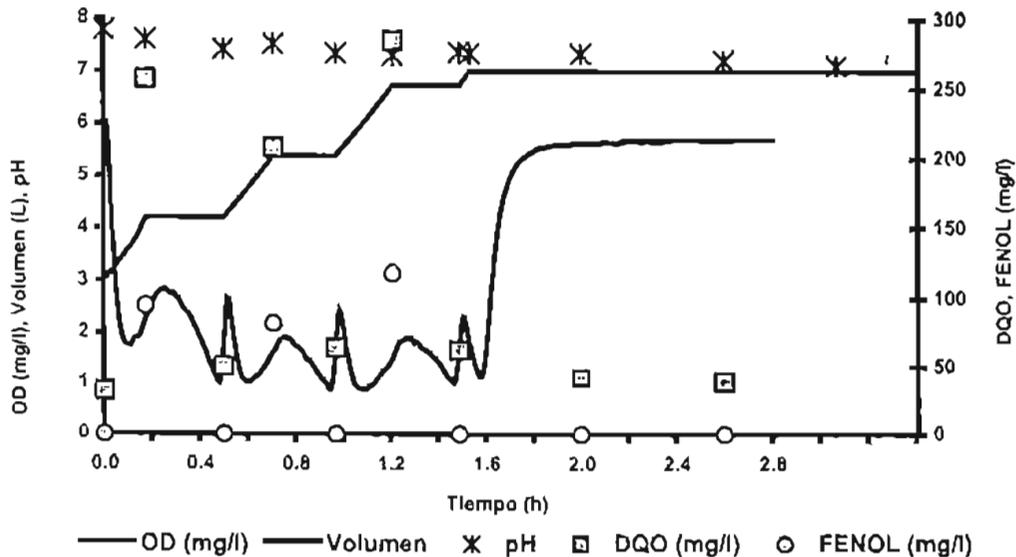


Figura 1.6. Cinética de reacción para una concentración de fenol de 385 mg/L

De la información que se muestra en la fig. 1.6, se obtuvo que las eficiencias de remoción estuvieron del orden de 95% como Demanda Química de Oxígeno (DQO) y de 100% como fenol, teniendo una concentración de SST en el efluente de 32 mg/L. El tiempo de degradación fue de aproximadamente de 2 h.

La degradación del fenol mezclado con agua residual se efectuó para el tratamiento de picos de concentración de hasta 3000 mg/L, de manera que en la fig. 1.7, se muestra la cinética de degradación para un choque de concentración de fenol en el influente de 723 mg/L.

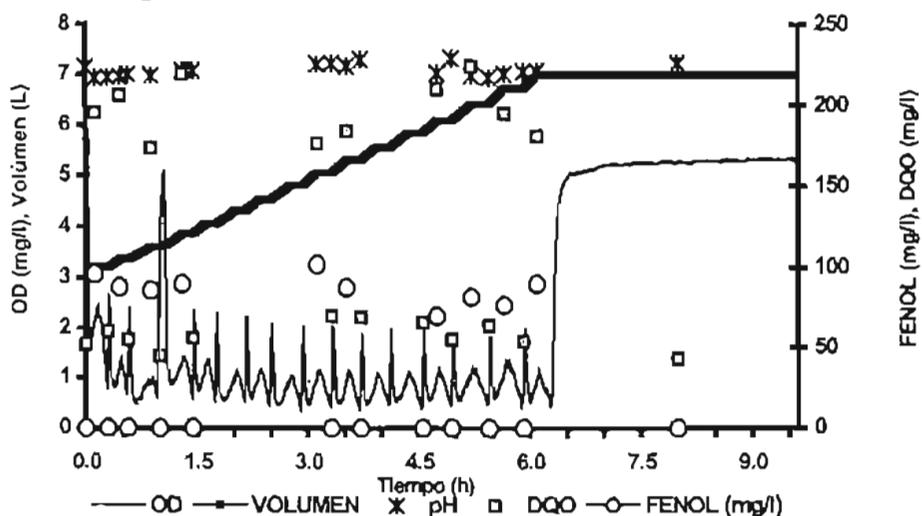


Figura 1.7. Cinética de reacción para un pico de concentración de fenol de 723 mg/L

De igual manera que para la degradación de 4CF, se reportó que la estrategia óptima pudo mantener un buen funcionamiento del reactor, sin que las cantidades excesivas de tóxico pudieran dañarlo significativamente.

Ventajas de la estrategia óptima

La aplicación de una estrategia óptima mejora los resultados del tratamiento como son, entre otras cosas, la eficiencia de la carga orgánica eliminada, así como el incremento de la tasa de degradación del sustrato por unidad de tiempo. Además, esta estrategia tiene un comportamiento excelente frente a picos de concentración (Buitrón *et. al.*, 2004b).

Prácticamente todas las variables asociadas al modelo matemático en el cual se basa la estrategia óptima, son fácilmente medibles o directamente computables, solo es necesario calcular el coeficiente de transferencia de masa del oxígeno (K_La) y el nivel de saturación del oxígeno disuelto (O_s)

El uso de controladores bajo una estrategia óptima para tratar aguas residuales industriales favorece el incremento de la velocidad del tratamiento, permitiendo así la reducción del tamaño de las plantas, o desde otro enfoque, aumentar la capacidad de tratamiento de una planta ya establecida.

En seguida, se engloban las principales ventajas de utilizar un reactor discontinuo junto con una estrategia óptima:

- Mayores eficiencias por la alta selectividad microbiana de un sistema discontinuo.
- Robustez: ofrece una flexibilidad gracias al parámetro controlado, que no se ve afectada por variaciones en la cantidad del flujo y de su composición.
- Ventajas económicas.- al maximizar la tasa de consumo del contaminante, se pueden tratar mayor cantidad de agua por día o reducir la capacidad de la planta.
- ventajas comparativas ante efluentes industriales muy variables en gasto y composición

Por lo tanto, se deduce que la estrategia ED-TOC es una alternativa que debe ser considerada para uso industrial, ya que no requiere de mediciones complejas y su control es fácilmente manipulable, además de que la instrumentación del proceso de tratamiento no tiene un costo elevado.

1.6. Automatización y control del sistema de tratamiento de aguas residuales

1.6.1. Teoría de control

El objetivo general de la teoría de control es suprimir la influencia de las perturbaciones, asegurar la estabilidad del sistema y optimizar el funcionamiento del proceso.

En el caso de un sistema de tratamiento basado en un algoritmo de control automatizado, la operación del sistema debe funcionar con confiabilidad, redundancia y robustez, ya que estas características harán de la planta prototipo un proceso de tratamiento fácil de operar sin que se requiera una persona especializada en el proceso que esté permanentemente *in situ*. A partir de lo cual se puede proveer de un servicio confiable a bajo costo operacional, con un enfoque a largo plazo.

De esta manera, la automatización se enfoca a diversos aspectos: confiabilidad, simplicidad en la operación y el mantenimiento, planeación operativa para contingencias, optimización operativa, integración del sistema de información y del sistema de control.

1.6.2. Sistemas de control

Por su parte, los controles asociados están compuestos por seis elementos (Qasim, S., 1999), los cuales están considerados dentro del esquema de control de la planta prototipo. A continuación se detalla la función de cada uno:

- ◆ *Sección de medidas para detectar cambios en las variables (sensores):* aquellos instrumentos que sensan, miden o computan las variables del proceso
- ◆ *Aparatos transmisores de señal.-* transmiten la señal de las variables del proceso del sensor al controlador (panel de control). La transmisión eléctrica de señal se consigue por voltaje y corriente, duración de pulso o tono. En el caso de la transmisión por voltaje y corriente, las señales son transmitidas por corriente directa en miliamperios (CDma). Dichas señales son transmitidas al panel de control, el cual a su vez, convierte la señal para poder ser desplegada y almacenada en una computadora personal (PC)
- ◆ *Exhibición o lectura de datos.-* esta información es desplegada en el lugar de operación por medio de indicadores o registros (transmisores), de modo que el operador la pueda utilizar para la verificación o corrección del funcionamiento de la planta.
- ◆ *Sistemas de control:* los sistemas de control empleados en Ingeniería sanitaria pueden dividirse en tres categorías: digital, analógico y control automático.

Sistemas
de
Control

Lógico: los sistemas lógicos cuentan con dos posiciones de operación. Algunos ejemplos son on/off, abierto/cerrado, alto/bajo, etc. Este tipo de señal es conocida como cambio de estado
Analógico: la información analógica tiene un rango de valores tales como una tasa de flujo para aire o para agua. (mediciones de nivel o de concentraciones)
Control automático: existen dos clases de control automático: discreto y continuo. El primero correlaciona el estado de un equipo (on/off) y el cambio de estado con un valor preestablecido o un programa de eventos. El segundo requiere la medición analógica para sus entradas y manipular un elemento de control final como sus salidas. El control continuo puede utilizar "loops" de control de retroalimentación y anticipación de eventos, y sistemas de control o controladores que ejecuten las funciones de control.

En cuanto a la serie de mediciones que son necesarias para llevar a buen puerto un proceso de tratamiento, Qasim (1999) desglosa de manera general la utilidad de un sistema de control automático, el cual se compone de tres partes: la medición para detectar los cambios en la variable; fuente de referencia para comparar los valores de la variable con un valor de referencia; y controlador o mecanismos para manipular la variable hasta que la señal medida alcance el valor de referencia.

1.6.3. Ventajas del control de sistemas

Dentro de los resultados favorables con respecto al proceso de control, se analizaron diversas ventajas del uso de instrumentación y de un proceso de control automático, las cuales se reflejan en varios aspectos: reduce trabajo, uso de químicos y consumo de energía, así como se fomenta un mejoramiento en la eficiencia en el proceso de tratamiento, confiabilidad, adquisición y registro de datos (Qasim, 1999). En términos generales, se puede decir que los beneficios obtenidos son:

Tabla 1.3. Ventajas del control de sistemas

Proceso	Equipo	Recursos humanos
Mejoramiento: <ul style="list-style-type: none"> - Funcionamiento y resultados del proceso. - Uso eficiente de energía - Uso eficiente de químicos - Cambios detectados en el proceso oportunamente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Señales de alerta inmediata de fallas - Habilidad para el diagnóstico de problemas - Conocimiento del estado del proceso permanentemente. - Prevención automática de desastres mayores 	<ul style="list-style-type: none"> - Operación precisa con base en información oportuna. - Uso eficiente de horas de trabajo. - Capacidad de solución rápida de problemas analíticos. - Visión completa de la operación de la planta, tanto en registros, fallas y correcciones en general.

1.7. Objetivos y metas del trabajo de tesis

1.7.1. Objetivo general

Llevar a cabo la puesta en marcha de una planta prototipo para el tratamiento de aguas residuales tóxicas.

1.7.2. Objetivo particulares

- Efectuar actividades de supervisión de la instalación de la planta prototipo
- Realizar pruebas a cada componente de la planta prototipo
- Elaborar un protocolo de operación estándar
- Conocer y manejar el software de control que comanda los procedimientos del tratamiento en la planta prototipo.

1.7.3. Metas

- Diseñar listas de comprobación o "checklist" de cada equipo y sensor.
- Registrar, documentar y solucionar anomalías detectadas en las pruebas realizadas
- Proponer el método de cálculo del coeficiente de transferencia de oxígeno en función del flujo de aire y del volumen del reactor.
- Plantear el método de evaluación del régimen de mezclado del reactor.

II. METODOLOGÍA

II.1. Estrategia de trabajo

En la fig. II.1. se describe la secuencia de procedimientos bajo los cuales se llevó a cabo la puesta en marcha de la planta prototipo, considerando diferentes aspectos preliminares para poder operar normalmente una planta piloto industrial.

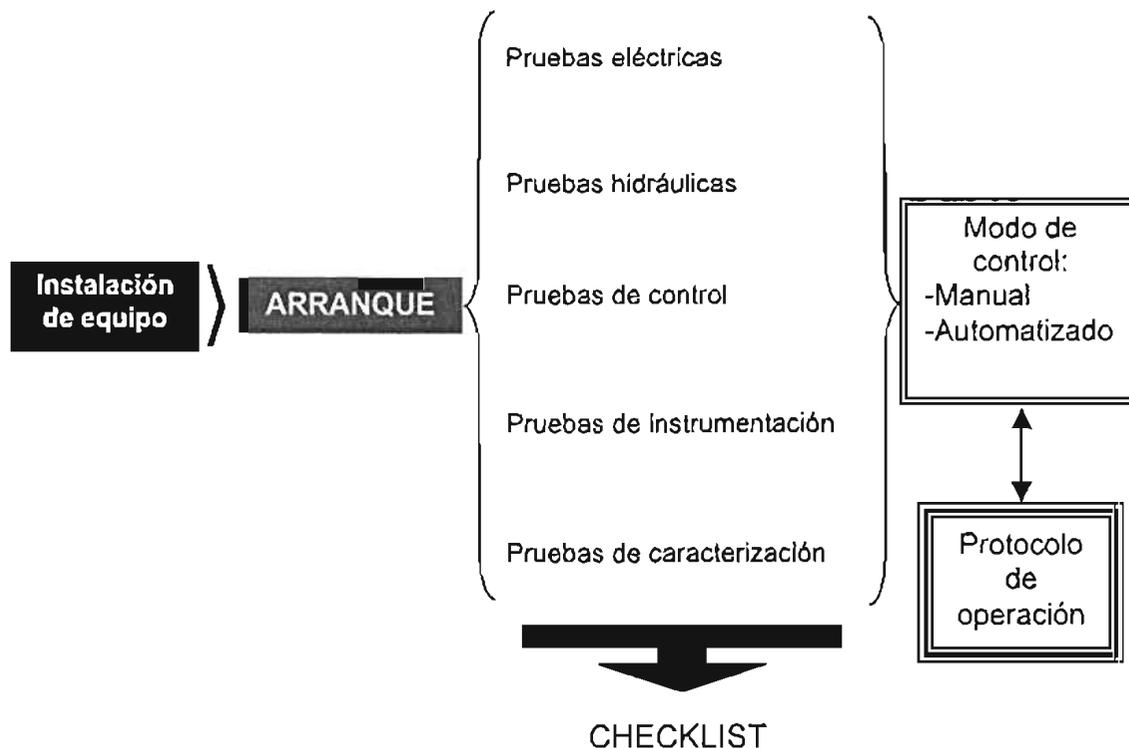


Figura II.1. Diagrama de la secuencia para la puesta en marcha de la planta prototipo

Al finalizar las pruebas dirigidas de manera manual por medio del panel de control, y de manera automatizada por medio del software de la PC, se estableció un protocolo de operación, cuya función es guiar la operación de la planta para los ajustes que se harán sobre la marcha.

A continuación se describe el funcionamiento de la estrategia de control en el piloto de laboratorio, a partir del cual se realizó el *escalamiento a la planta prototipo* (Buitrón, et. al. 2004b). La aplicación de la estrategia óptima en el laboratorio, se utilizará como modelo para la planta prototipo, de manera que se mencionarán los resultados obtenidos más relevantes.

Con base en la demostración realizada por Buitrón et. al. (2004b), de la factibilidad en la aplicación de una nueva estrategia de control para optimizar la tasa de degradación

de compuestos tóxicos, se analizan los siguientes aspectos que sustentan la implementación de la ED-TOC: reactor piloto de laboratorio, degradación de 4CF y de agua residual con fenol.

Adicionalmente, Buitrón *et. al.* (2004b) coinciden con Ellis *et. al.* (1995) respecto a la forma óptima de operar un reactor SBR, ya que existen claras ventajas de una estrategia óptima (Fed-batch) sobre una estrategia sin ningún tipo de optimización (FTC).

II.2. Descripción de la estrategia óptima

Para la implementación de la estrategia óptima en la operación del biorreactor SBR, la cantidad de sustrato y biomasa tienen que ser conocida, pero esto no es factible de medir, por lo que se pueden utilizar técnicas respirométricas para el control del proceso de biodegradación, que relacionen el OD con otras variables del proceso (X, S y V). No obstante, cabe mencionar las relaciones existentes entre las diferentes variables que están involucradas en el modelo matemático general, las cuales están dadas por un análisis de balance de masas en el reactor (Henze, *et. al.*, 1986), para las fases de llenado y reacción:

$$\frac{dX}{dt} = \mu X - K_d X - X \frac{Q_{en}}{V} \quad \dots\dots\dots (II.1)$$

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{1}{Y_{XS}} \mu X + (S_{en} + S) \frac{Q_{en}}{V} \quad \dots\dots\dots (II.2)$$

$$\frac{dO}{dt} = -\frac{1}{Y_{X/O}} \mu X - bX + K_L a (O_s - O) + (O_{en} - O) \frac{Q_{en}}{V} \quad \dots\dots (II.3)$$

$$\frac{dV}{dt} = Q \quad \dots\dots\dots (II.4)$$

Donde:

- X: Concentración de la biomasa dentro del reactor
- S: Concentración del sustrato en el reactor
- V: Volumen de agua dentro del reactor
- O: Concentración de oxígeno disuelto en el agua
- Y_{XS}: Coeficiente de rendimiento celular (biomasa/sustrato)
- Y_{X/O}: Coeficiente de rendimiento biomasa/oxígeno
- K_La: Coeficiente de transferencia de oxígeno
- b: Tasa específica de respiración endógena
- K_d: Coeficiente de decaimiento bacteriano
- μ: Rapidez de crecimiento bacteriano
- S_{en}: Concentración del sustrato a la entrada del reactor
- O_{en}: Concentración de oxígeno disuelto en el influente
- Q_{en}: Flujo de entrada al reactor
- O_s: Concentración de oxígeno a la saturación
- γ: Variable proporcional a μ

La estrategia de Control de Tiempo Óptimo Dirigida por Eventos, por sus siglas en inglés ED-TOC (Event-Driven Time Optimal Control), propuesta por Betancur *et. al.* (2004), está fundamentada en la estimación de una variable llamada gama (γ), la cual está relacionada matemáticamente con la *tasa de degradación del sustrato*, tal que maximizando una también se maximiza la otra. En este caso, γ es casi proporcional a μ por una determinada constante, que no es necesaria conocer para los propósitos del control.

La variable γ se calcula en tiempo real por medio de la medición en línea del oxígeno disuelto y el volumen del reactor, siendo necesario adicionalmente el cálculo del coeficiente de transferencia de masa del oxígeno, así como el nivel de saturación del OD, como se aprecia en la siguiente ecuación, obtenida por Betancur *et. al.* 2004:

$$\gamma = \frac{B}{Y_{X/O}} \mu + bB = K_L a (O_S + O) V - O Q_{v^n} + V \frac{dO}{dt} \dots\dots\dots (11.5)$$

Con la ayuda de un modelo matemático se trata de describir un sistema complejo con la expresión de los mínimos términos esenciales para la descripción de los fenómenos que se pretenden modelar, para que éstos puedan ser manejados con el objetivo de conocer como puede comportarse el sistema bajo una serie de variaciones en las condiciones de operación.

El manejo del gasto de entrada al biorreactor, al ser la variable de control, cuyos valores oscilan entre el intervalo $0 \leq Q_{en} \leq Q_{max}$, es la herramienta principal para optimizar el proceso de tratamiento, de manera que la velocidad de reacción sea la máxima.

Esto se logra, según Moreno y Buitrón (2002), haciendo oscilar el flujo del influente alrededor de un gasto de entrada óptimo (Q_{opt}), el cual indica que la concentración de sustrato es tal, que la tasa de crecimiento específico se encuentra en su valor máximo (μ^*), es decir, que los microorganismo se están alimentando óptimamente, alcanzando así *la velocidad de biodegradación máxima* y el tiempo de reacción mínimo, para lo que, según la ecuación de Haldane (Fig. 1.2), el sustrato debe mantenerse, u oscilar alrededor de un valor S^* , cuya concentración depende del flujo de entrada en el sistema.

La condición de mantener el valor de S^* puede controlarse con la manipulación del flujo de entrada. En consecuencia, a partir de lo documentado por Moreno y Buitrón (2002) se obtienen las siguientes expresiones:

$$Q_{en} = \begin{cases} 0 & \text{si } (V = V_{max}) \text{ ó } (S > S^*) \\ Q_{opt} & \text{si } (V < V_{max}) \text{ y } (S = S^*) \\ Q_{max} & \text{si } (V < V_{max}) \text{ y } (S < S^*) \end{cases}$$

$$Q_{opt} = \frac{\mu^* V X}{Y_{X/S} (S_{en} - S)} \dots\dots\dots (11.6)$$

11.2.1. Comportamiento de la estrategia óptima

Una vez que el sustrato entra al reactor, la reacción inicia, entonces el OD disminuye como resultado del aumento en el consumo de oxígeno debido al incremento de la actividad metabólica de la biomasa para degradar los contaminantes orgánicos que están alimentando al reactor. Simultáneamente, el estimador calcula γ y la va monitoreando. Cuando se detecta el punto máximo de γ (antes de que exista una concentración mínima de OD), la bomba de alimentación se apaga. Después de que la concentración de sustrato disminuye, el sistema detecta que la concentración del sustrato se vuelve menor a la esperada para obtener una γ máxima, es decir, ya no es la óptima, por lo que también se observa que la actividad de los microorganismos comienza a dejar de ser la máxima. Así, el sistema enciende la bomba de alimentación, y una nueva carga de sustrato alimenta al reactor. Se repite este procedimiento hasta que se alcanza el volumen máximo del reactor, con lo cual la degradación continua y termina como un proceso batch clásico.

Usando la estrategia ED-TOC, según la figura 11.2., el flujo debe ser manipulado para que la tasa de reacción se encuentre siempre dentro de la zona gris, es decir, con una tasa de consumo de sustrato cuasi-máxima, tal que la concentración de sustrato se mantenga oscilando en un intervalo crítico durante el llenado del reactor SBR. Como el valor de la concentración del sustrato tenderá a abandonar la zona crítica, el control se activará y desactivará por medio del encendido y apagado de las bombas de alimentación. Esta estrategia, según la ecuación que se emplea para su ejecución (ver ecuación 11.5), se desempeña sin considerar de manera directa el valor de concentración del sustrato de entrada y se puede ajustar a la mayoría de modificaciones hechas a los parámetros del reactor SBR.

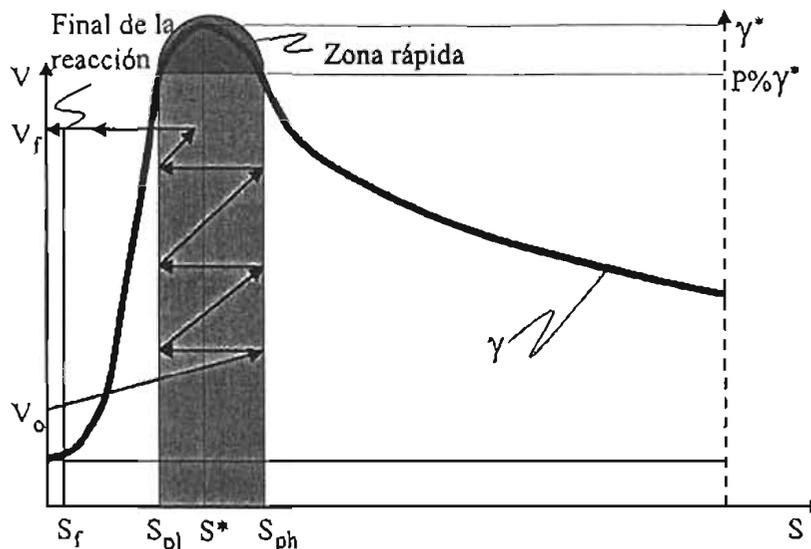


Figura 11.2. Comportamiento del consumo de sustrato con base en el control del flujo del flujo de entrada utilizando la estrategia ED-TOC

II.2.2. Condiciones de operación

El control de los factores ambientales como son la regulación del pH, de la temperatura, adición de nutrientes, o exclusión de oxígeno y también mediante una mezcla correcta, tienen una incidencia en los criterios de control. Por lo que, para la metodología de control utilizada en la planta piloto se tuvieron las siguientes consideraciones:

- i. Mezclado completo durante la etapa de llenado y reacción, de manera que exista, sin importar la sustancia, la misma concentración en cualquier punto del reactor.
- ii. Biomasa homogénea con características similares de comportamiento .
- iii. Concentración mayor a 2 mg/L de OD en el reactor, de tal manera que la tasa de crecimiento dependa exclusivamente de la concentración de sustrato, y no se vea limitada por falta de OD, aunado a que por debajo de este valor se desarrollan mejor las bacterias filamentosas que perjudican la calidad de la sedimentación al momento de clarificar el agua tratada.

II.3. Aplicación de la estrategia óptima

En el laboratorio de la Coordinación de Biotecnología Ambiental del IIUNAM se han llevado a cabo estudios para evaluar la factibilidad de aplicación de la estrategia óptima (ED-TOC). En particular, dichos estudios se han enfocado a la degradación de compuestos fenólicos como modelo de compuestos tóxicos (Buitrón, *et. al.*, 2004b).

Este trabajo describe la implementación de la estrategia ED-TOC, probada en la laboratorio, a una escala de prototipo industrial. A continuación se describe el procedimiento empleado.

II.3.1. Reactor piloto de laboratorio

El trabajo experimental de laboratorio se efectuó en un reactor aerobio discontinuo secuencial con una capacidad de 7L y un volumen de intercambio de 57% (fig. II.3). El flujo de aire empleado fue de 1.5 litros por minuto y se mantuvo una temperatura de 20 °C dentro del reactor. El biorreactor fue inoculado con microorganismos provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales municipales (2000 mg SSV/L). Se empleó un agua sintética que contenía 4CF como única fuente de carbono y energía. Se agregaron nutrientes como nitrógeno, fósforo y oligoelementos siguiendo la recomendación de AFNOR (1985).

Para las condiciones consideradas como estándar, el reactor fue alimentado con una concentración en el influente de 350 mg4CF/L. Se evaluaron diversas concentraciones iniciales de 4CF entre 175 y 11200 mg/L para probar la estrategia de control, y también diversos flujos de aire (0.75, 1.5 y 2.25 litros por minuto). La duración de las fases del SBR fue la siguiente: tiempo de preaeración (15 minutos), llenado y reacción (variable, dependiendo de la concentración del influente), sedimentación (30 minutos) y vaciado (6 minutos).

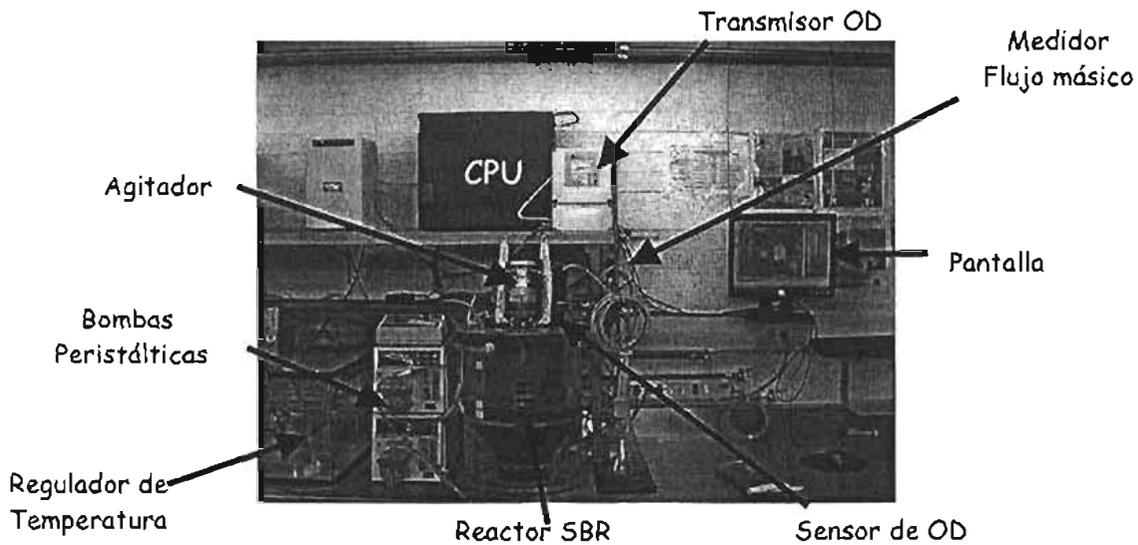


Figura II.3. Disposición de los componentes de la experimentación

En la fig. II.4. se muestra un diagrama simplificado de los dispositivos principales en la configuración experimental del reactor de laboratorio, con el fin de entender de forma general el funcionamiento de la experimentación.

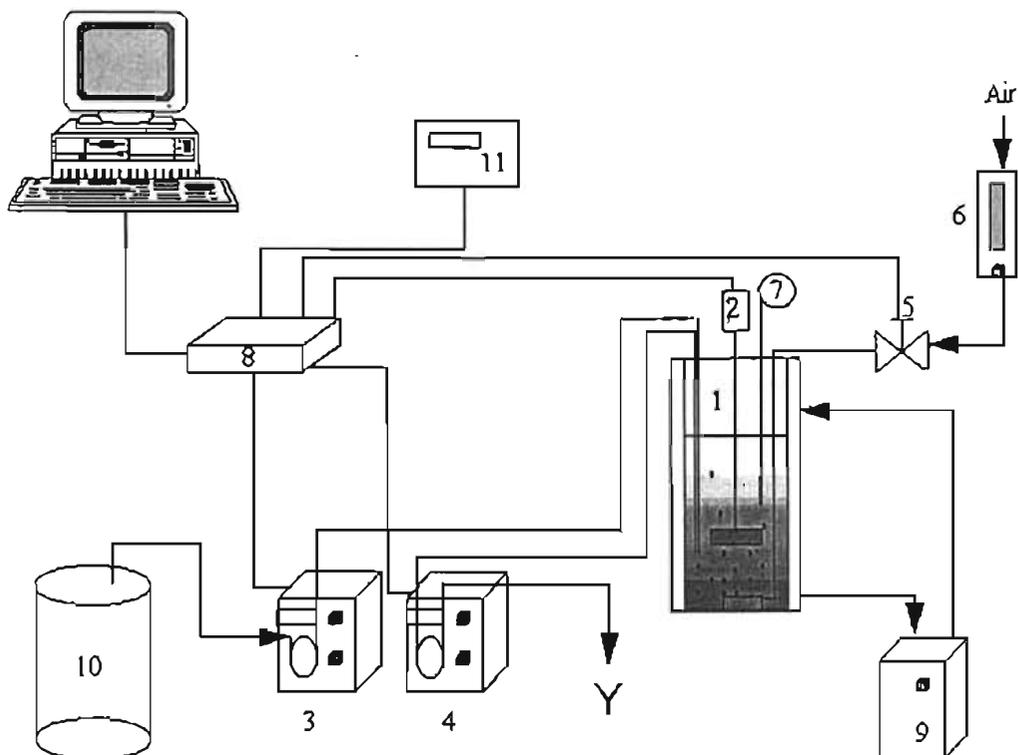


Figura II.4. Arreglo experimental del sistema experimental (Soto, G., 2000). Reactor (1), agitador (2), bomba de llenado (3), bomba de vaciado (4), controlador de flujo másico (5), flujómetro (6), termómetro (7), interfase (8), calentador(9), tanque de almacenamiento (10), oxímetro (11).

II.4. Configuración de la planta prototipo

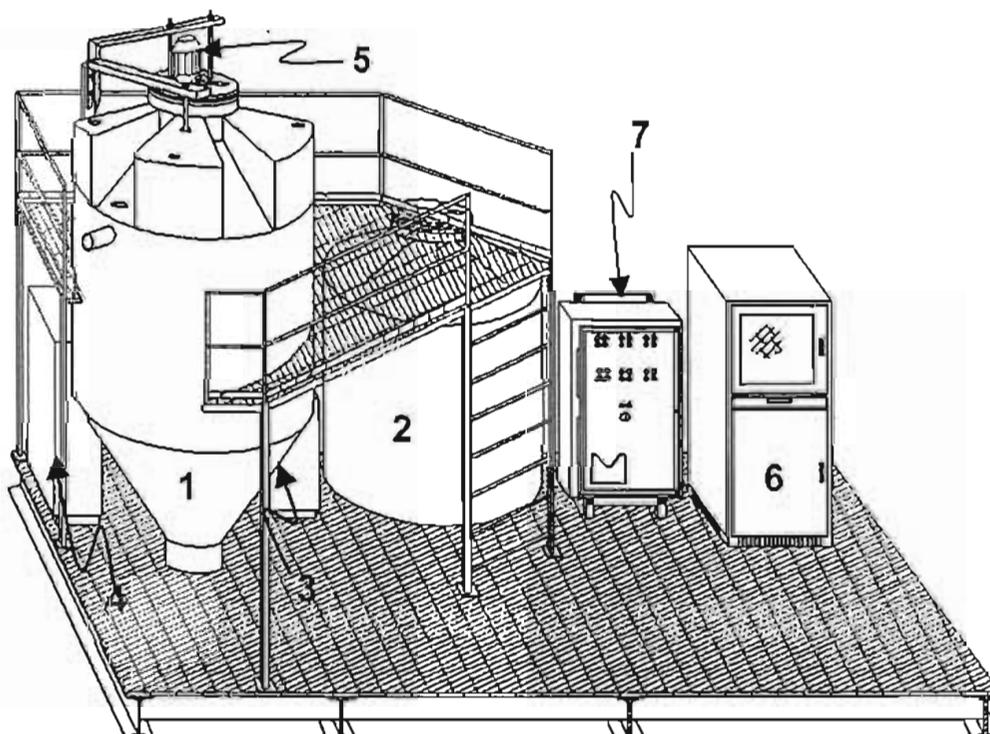
Una planta prototipo es una herramienta excelente para el análisis del funcionamiento de un proceso de tratamiento, con el fin de entender a fondo el comportamiento del sistema, de tal manera, se puede mejorar el modo de operación con base en la investigación de la influencia de múltiples factores que pueden generar los casos reales en la industria.

La planta prototipo, elemento de estudio de esta tesis, fue producto de la proyección de un modelo experimental de laboratorio plasmado en un modelo piloto industrial a escala de campo.

En el anexo I, se puede observar con mayor detalle los planos correspondientes al Diagrama de Tuberías e Instrumentación (DTI) de la unidad de la planta prototipo. En ellos se representan la disposición de las unidades de control, bombas, tanques y tuberías, que engloban el tren de tratamiento de la planta.

II.4.1. Descripción de la planta prototipo

La planta prototipo se diseñó a escala de campo, siendo la herramienta por medio de la cual se llevarán a cabo la experimentación y recolección de datos para evaluar el tratamiento de aguas residuales tóxicas. La planta prototipo funciona con un ambiente aerobio y un proceso de lodos activados, bajo un tratamiento discontinuo secuencial, muy semejante al ya descrito de laboratorio.



Nota: La numeración de la figura está referida a la Tabla II.2.

Figura II.5. Planta prototipo

Asimismo, los diferentes equipos y los tanques fueron instalados sobre una plataforma de acero, como se ve en la Figura II.5, cuyas dimensiones son: largo = 4 m, ancho = 2 m y alto = 3.5 m

De manera general, a continuación se describe la configuración de la planta poniendo énfasis en el equipo, instrumentos y en el biorreactor SBR, los cuales comprenden las parte principales de la planta de tratamiento.

II.4.1.1. Biorreactor SBR

El tipo de reactor que se utiliza, según las operaciones bioquímicas que se necesitan para alcanzar el nivel de tratamiento de diseño, va estrechamente ligado a la configuración física del mismo. En la fig. II.6. se muestra la configuración del reactor, así como algunos dispositivos de operación que intervienen durante el proceso de tratamiento.

Para este caso, los parámetros de diseño del reactor están dados por los siguientes valores:

Tabla II.1. Valores de operación del reactor SBR

Parámetros	Valores
Diámetro	1.10 m
Altura	1.90 m
V_{total} del reactor	1000 L
Tasa máxima de intercambio volumétrico	60%
Volumen máximo intercambiado	600 L

II.4.2. Equipo e instrumentación

Como se ve en la Tabla II.2., los elementos principales que integran la planta prototipo son:

Tabla II.2. Lista de equipo con sus características principales y su función.

Elemento	Características
(1) Biorreactor SBR	Fabricado con Polietileno de Alta Densidad (marca Rotoplas). Es un tanque con fondo cónico (tipo tolva), cuya capacidad máxima es de 1.3 m ³ , teniendo un volumen útil de 1.0 m ³ .
(2) Tanque de almacenamiento	Fabricado con Polietileno de Alta Densidad (marca Rotoplas). Sirve como punto de mezcla del agua residual municipal cruda y el fenol concentrado, así como recolector de la carga hidráulica próxima o siguiente en el proceso. Su capacidad máxima es de 1.1 m ³ , teniendo un volumen de trabajo de 1.0 m ³ .
(3) Dos bombas centrífugas	Bomba centrífuga horizontal de ¼ HP con capacidad de 39 LPM, marca WEG. Una es para alimentar al tanque de almacenamiento desde la toma de agua residual, y la otra, para llenar el SBR desde el tanque de almacenamiento
(3) Bomba peristáltica	Bomba peristáltica de flujo variable con 1/10 HP, marca Masterflex modelo U-07549-52 con un rango de flujo de 0.6 a 8 l/min. Esta bomba tiene como propósito la dosificación precisa que junto con la centrífuga, alimentarán alternadamente al SBR, según lo marque la estrategia óptima ED-TOC.
(4) Dos sopladores acoplados a un sistema de difusores de burbuja fina	Sopladores industriales de paletas deslizantes con motor de 1 HP, marca GAST se encargan de suministrar aire, que a su vez, se refleja en la cantidad de oxígeno transferida al medio líquido. En parte, la aireación provocada por estos dispositivos es la responsable del mezclado en el biorreactor, cuya variación en el flujo de aire refleja cierta flexibilidad en los objetivos que se deseen alcanzar durante la operación del proceso. Los difusores tienen una membrana flexible EPDM. Para controlar el paso del aire al reactor está equipado con un controlador de flujo másico
(5) Agitador	Agitador industrial con motor tipo TENV de ¼ HP, marca Lightning, con velocidad ajustable, cuya capacidad es de 20-350 RPM con el fin de mantener una mezcla homogénea dentro del reactor
(6) Computadora personal (en Gabinete)	Instrumento de interfase de control, mediante el cual se ejecuta el software LabView. Por medio de la PC se controla las diferentes fases del reactor, según el estado de operación del control, mediante la estrategia elegida.
(7) Panel de control	Funge como controlador de entradas y salidas del sistema de control automatizado

Adicionalmente a lo mostrado en la tabla II.2, se cuenta con una bomba centrífuga sumergible, con control ON/OFF, motor de 1/6 HP, marca Little Giant, cuya función es la de extraer el efluente tratado del interior del biorreactor (Ver fig. II.6).

En el Anexo II, se ilustra con detalle las especificaciones del equipo y de la instrumentación, como son características eléctricas, condiciones de operación, tipo de señal de control, entre otras.

Instrumentación

Aunque existen sistemas de instrumentación y control sofisticados que ofrecen innumerables ventajas, la estrategia óptima que se propone en este trabajo se apoya en una instrumentación sencilla, basada en un algoritmo de control.

Característica del control e instrumentación:

- ✦ proporcionan información del estado del equipo (p.e. bomba peristáltica prendida o apagada)
- ➔ medición de parámetros (p.e. gasto del influente)
- ➔ implementación de decisiones de control, tal como abrir o cerrar una válvula
- ➔ detecta perturbaciones en la señal (filtración de ruido)
- ✦ condiciones de señal de alarma que automáticamente controla el equipo

Con respecto a la instrumentación, la medición en línea de los parámetros en el modelo automatizado del proceso de tratamiento se realizaron con la ayuda de los siguientes instrumentos:

Tabla II.3. Instrumentos para la medición de los parámetros del proceso.

<i>instrumento</i>	<i>marca</i>	<i>Modelo</i>
Oxígeno Disuelto (OD)	Endress & Hauser	COS21-1K0
pH	Endress & Hauser	CPM223- PR1105
Temperatura	Endress & Hauser	TST10-CE2XCS2BA2R
Nivel hidrostático	Endress & Hauser	DB50-AC12BB13EE23
Controlador de flujo másico	OMEGA	FMA-876A-V

Se puede observar en la fig. II.6., la ubicación que tienen los sensores en el interior del biorreactor, los cuales están dispuestos siguiendo un arco paralelo al diámetro del biorreactor.

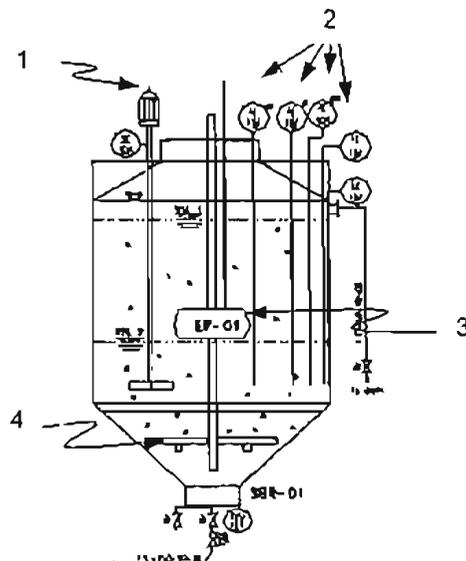


Figura II.6. Biorreactor SBR con dispositivos de operación; (1) Agitador mecánico, (2) Sensores: OD, pH, temperatura y nivel hidrostático, (3) Sistema de bombeo del efluente, (4) Difusores

II.4.3. Control automatizado

Para el caso de un biorreactor SBR, que es un proceso no convencional, son empleados métodos de control para tratar compuestos tóxicos con una alta eficiencia de remoción, para lo cual se puede utilizar la medición en línea de la concentración de oxígeno disuelto o la tasa de variación del dióxido de carbono, ya que son de fácil medición, y ayudan a estimar otros factores importantes dentro del proceso biológico (Buitrón, *et. al.*, 2004b).

Respecto al panel de control, éste tiene un operador de interfase distribuido de entradas y salidas electrónicas, que está compuesto por sensores individuales y sus respectivos apagadores electrónicos remotos. A partir de lo cual, las señales son convertidas a forma digital y transmitidas a través de una autopista de información con varias interfases, tales como un panel de control, una computadora recolectora de información, una impresora, software en general.

En la planta prototipo se implantaron dos modos de control: manual y automático. El control manual es un control "directo" del proceso de tratamiento sin tener un intermediario de control lógico, todos los actuadores son activados o desactivados de manera manual en el panel de control. Por su parte, el control automático está dirigido por el trinomio Beckhoff/Modbus/PC, que es programable y tiene una extensiva gama de interfases de comunicación y de entradas/salidas. Es decir, el tablero de control empleado en la planta es marca Beckhoff, con módulos de I/O (Entradas y Salidas) tanto lógicos (on/off) como analógicos (4-20 mA), los cuales están unidos mediante un Modbus a una PC convencional. El Modbus es la unión de dispositivos, módulos I/O, mediante un canal de comunicaciones donde todos están conectados entre sí.

III.5. Funcionamiento de la planta

Como introducción a la operación de la planta prototipo, se muestra la fig. II.7 como un esquema general de los rubros que acompañan la operación de una planta, a partir de los cuales se entenderá de manera global los elementos que fundamentan el buen o mal funcionamiento de un proceso de tratamiento.

Cabe hacer notar, que la operación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) debe estar sujeta a la revisión de las estrategias de control del proceso completo, con el objetivo de que el funcionamiento de la planta sea eficiente con relación a las acciones de control tomadas por el operador. Por su parte, el mantenimiento se debe implementar en una serie de acciones enfocadas a las mejores condiciones operativas del equipo, instrumentación e instalaciones.

Con respecto a la operación de una PTAR, el control y el manejo de cualquier proceso de tratamiento es esencial para lograr niveles aceptables de eficiencia, independientemente de cómo se plantee, en cada trabajo, los objetivos a alcanzar.

Las condiciones de operación van de la mano a seleccionar qué y con qué se medirá durante el proceso de tratamiento, siendo para este trabajo el oxígeno disuelto, variable que guía al control, por medio del modelo matemático (Betancur, *et. al.* 2004), a optimizar la reacción en el biorreactor en tanto que se conoce y se puede manipular el gasto de entrada al biorreactor.

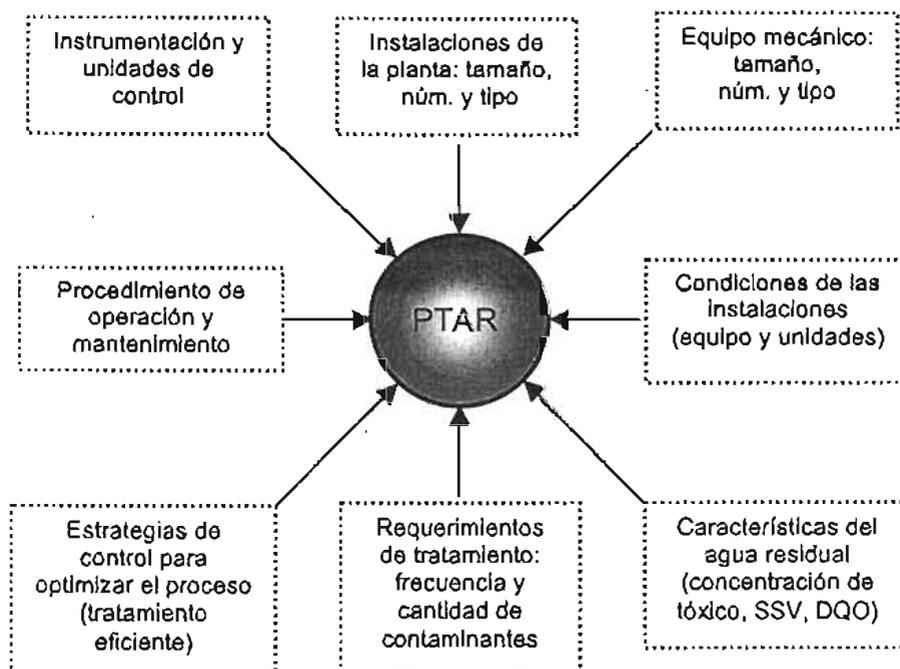


Figura II.7. Esquema general del funcionamiento de una PTAR.

II.5.1. Organización de actividades

Las metas operacionales de la organización del trabajo, que tienen que ver con el funcionamiento de la PTAR van asociadas a los siguientes aspectos:

- Plan de funcionamiento
- Prácticas seguras y económicas.
- Actividades de mantenimiento
- Actividades de rehabilitación
- Medidas de mejoramiento

Es necesario un plan de operación que considere una lista secuencial de acciones necesarias para ejecutar el tren de procedimientos necesarios con el fin de mantener un tratamiento eficiente de las aguas residuales tóxicas. Además, que pueda servir como guía al personal en la operación de la PTAR. Por lo tanto, en el capítulo IV se presenta un programa de actividades acordes con el plan de funcionamiento general de la planta.

II.5.2. Mantenimiento

Para que un mantenimiento sea exitoso depende de la habilidad del operador para asociar un síntoma dado, con la fuente del problema.

De manera general, como parte de una rutina de mantenimiento preventivo es conveniente realizar una revisión de los equipos en los siguientes aspectos: verificar el ensamble de la interconexión de cables, por pérdida o ruptura; prueba continuidad de corriente, revisar el estado físico (conexiones, averías, lubricación, mal funcionamiento,

etc.), factores externos variables que afecten al funcionamiento de la planta, entre otros, con el objeto de identificar y remediar de manera oportuna y eficiente las fallas de cada uno de los componentes de la planta.

Por lo tanto, atendiendo de manera general a lo recomendado por la EPA (2004) con respecto al mantenimiento y operación de los SBR, se plantea la siguiente tabla:

Tabla II.4. Sugerencias para el mantenimiento y operación de un reactor SBR

Componentes	Recomendaciones
Biorreactor	Revisar deficiencias como: formación de espuma, distribución desigual de aire, flotación de biomasa. Verificar el sistema de vaclado y ajustarlo a los requerimientos del proceso Ajustar los tiempos de la secuencia de cada ciclo para alcanzar las concentraciones de referencia para un efluente Revisar la prueba de IVL, así como realizar la purga de lodos para mantener un nivel de SSV dentro del reactor
Sistema de aireación por difusores	Revisar los difusores de aire, cerciorándose del estado del burbujeo, el cual debe mantener burbujas finas para una mejor transferencia de oxígeno. Ejecutar las recomendaciones dadas por el fabricante para el mantenimiento de cada equipo
Control	Revisar todas las funciones de control y estados de alarma del sistema Examinar el módulo de control
Purga de lodos	Programar la purga de lodos por día, o en caso de ser necesario en un período de tiempo más corto.
Técnicas analíticas	Hacer muestreos del interior del biorreactor cuando esté en operación: pH, SSV y sedimentabilidad Recolectar el efluente vaciado para realizar un análisis para examinar la calidad del agua tratada (DBO, SST, pH, N, P, etc.)

De manera general, se aconseja un programas de mantenimiento periódico de modo que se busquen las fallas futuras, para evitar dar a los equipos un mantenimiento mayor. Así pues, la prevención ayudará a minimizar el mantenimiento correctivo. La planeación y ejecución de un programa apropiado de mantenimiento puede ser muy provechoso para el funcionamiento de la planta, ahorrando inversiones evitables, así como garantizando la vida útil máxima del equipo. En general, se debe procurar un mantenimiento preventivo y no contingente.

Para el diagnóstico y corrección de fallas, es necesario identificar un mal funcionamiento o defectos en la operación del equipo, para reemplazar las partes dañadas.

Finalmente, en caso de ser necesaria una evaluación técnica y económica del mantenimiento, se recomienda desglosar en los siguientes rubros: mantenimiento preventivo, mantenimiento correctivo, reparaciones mayores y alteraciones (Qasim, 1999).

11.5.3. Seguridad

Asimismo, la seguridad contra emergencias propias de un proceso de tratamiento de aguas residuales tóxicas, conminan a considerar posibles contingencias que necesitarán resolver rápida y eficientemente.

Una planeación de emergencias dentro de las instalaciones de la planta de aguas residuales está definida como una serie de acciones y procedimientos predeterminados para tratar con todo tipo de situación de riesgos, tanto para la salud de los operadores de la planta, como para la eficiencia de la operación de la planta de tratamiento,.

Se deben analizar los puntos de vulnerabilidad de los zonas críticas de la planta. Tal análisis genera medidas protectivas que eliminan o minimizan los potenciales impactos adversos de la situación de riesgo.

III. PUESTA EN MARCHA DE LA PLANTA PROTOTIPO

Al plantear la metodología experimental y los resultados del funcionamiento de un reactor discontinuo secuencial operado con una estrategia óptima, a escala laboratorio, se pretende sustentar las bases para la Puesta en Marcha de la Planta Prototipo, y posteriormente, para el *modus operandi* de la misma.

Para las plantas de tratamiento en la actualidad, los modelos sirven para investigar los efectos de las estrategias alternativas de operación, con el fin de mejorar la eficiencia del tratamiento y reducir los costos de operación

En este capítulo se explica el procedimiento a seguir para la puesta en marcha de una planta prototipo para el tratamiento de aguas residuales tóxicas, lo que incluye las diferentes pruebas necesarias para la puesta en marcha de la planta prototipo, la metodología de ajustes en la operación del tratamiento por medio de un control automatizado, asimismo, se propone un protocolo de operación para el funcionamiento "normal" de la planta.

III.1. Arranque de la planta prototipo

En primer lugar, se comentará la importancia de la puesta en marcha de una planta de tratamiento de aguas residuales. El arranque es un período crítico para cualquier proceso, y especialmente para un sistema de lodos activados, ya que al ser un proceso biológico por naturaleza toma tiempo y cuidado el desarrollo de la operación de funcionamiento de la unidad.

Un panorama típico para el arranque, según Junkins, *et. al.* (1983), se consideran dos fases:

- Arranque del equipo mecánico, tuberías e instrumentación
- Arranque del proceso.

Con el objeto de corroborar el buen estado y el funcionamiento adecuado de todos los dispositivos: mecánicos, instrumentos, conexiones y señales eléctricas, control de la interfase, etc., se hicieron una serie de pruebas de diferente índole.

III.1.1. Pruebas del funcionamiento eléctrico y de control

Las pruebas eléctricas se ajustan a la necesidad de revisar, de manera independiente, la instalación, el cableado, las conexiones, así como la manipulación de cada equipo de la planta desde el panel de control y desde la PC.

El estado de los equipos fue verificado, siendo probada la capacidad de control manual y automático del sistema sensor/Beckhoff/PC, lo cual se logró por las pruebas de arranque y paro de los aparatos motorizados tales como bornbas, agitador, sopladores, etc., así como la manipulación de los equipos que ofrecían variabilidad en sus condiciones de operación.

III.1.2. Pruebas del funcionamiento hidráulico

El material de la tubería es PVC RD-26 (11.0 kg/cm²), cuya resistencia es alta para las exigencias de las cargas hidráulicas con que trabaja la planta. No obstante, es común encontrar fugas en las conexiones del sistema de tuberías. De tal manera, se requiere revisar la instalación de tuberías, conexiones y accesorios en general para desechar la posibilidad de averías, y en su defecto, realizar las reparaciones correspondientes.

Por otro lado, se necesita comprobar el comportamiento hidráulico del agua residual dentro del biorreactor, lo que se conoce como régimen de mezclado para lo cual se realizan pruebas de trazado utilizando un tinte inerte.

III.1.2.1. Prueba del régimen de mezclado

Esta prueba hidráulica comprende la inyección de un tinte en el influente del reactor, seguido por un muestreo en el interior del mismo a diferentes profundidades en varios instantes de tiempo, monitoreando el flujo y su patrón hidráulico en el seno del biorreactor. Los resultados de la prueba de trazado están asociados con la identificación de circulación exigua, zonas muertas, problemas de homogeneidad en general (Daigger y Buttz, 1992). Por lo tanto, se busca comprobar un buen mezclado totalmente homogéneo.

La sustancia empleada deberá ser un trazador inerte, que se agregue al proceso y medir así, la concentración de la sustancia por medio de la absorbancia. El análisis permite ver las desviaciones en las características hidráulicas del reactor. Asimismo, Daigger y Buttz (1992) sostienen que la experiencia indica que el comportamiento hidráulico de muchas unidades de campo no es ideal, y que existen diversas oportunidades para corregir y optimizar su funcionamiento, pero antes, claro está, es fundamental conocer las fallas que arroja la prueba del régimen hidráulico.

III.1.3. Pruebas de caracterización y calibración

La caracterización del equipo consistió en confirmar la capacidad de diseño de las bombas: dos centrífugas, una peristáltica y una sumergible (efluente), de manera que, los valores se ajusten y calibren según el funcionamiento real de los equipos. Para tal fin, se garantizarán ciertos valores de operación, como son: en cuánto tiempo se llena el biorreactor, en cuánto tiempo se vacía, tiempo que tarda el tanque de almacenamiento en llenarse, etc.

Sin embargo, cabe mencionar que la elaboración de este tipo de pruebas requiere cierta periodicidad debido al desgaste de mangueras, conexiones y mecanismos internos de los equipo mecánicos.

Desde un enfoque de control, la combinación de los datos de entrada y salida expresan la transformación efectuada por el proceso de tratamiento de la planta prototipo. De esta manera, el procedimiento de caracterización cambia los parámetros del modelo tal que se verifique el mejor ajuste para alcanzar los objetivos de tratamiento, para lo que se establecen procedimiento de prueba y error. Por lo tanto, los pasos de rectificación para un mejor procedimiento se basan en el establecimiento de parámetros que den la mínima variación estándar con respecto a la diferencia entre los datos y la información de salida de los cálculos del modelo (Henze, *et. al.*, 2002).

A su vez, la calibración está asociada a la precisión y confiabilidad en la obtención de resultados, estando encaminada a asegurar mediciones correctas por parte de los sensores, para lo que, se siguieron las instrucciones y metodología reportadas en los manuales de operación de cada sensor para este fin.

III.1.3.1. Prueba del K_La

Los niveles de OD en cualquier cuerpo de agua, ya sea limpia o contaminada, depende de las actividades físicas, químicas y bioquímica realizadas en el líquido. Y para el caso de este trabajo de investigación es el elemento medido más importante en cuanto al comportamiento de la biomasa cuando está consumiendo el sustrato.

Las mediciones del OD sirvieron como indicador de la actividad metabólica de los microorganismo, para tal efecto, se relaciona el consumo de sustrato con la caída de los niveles de OD, y en el caso inverso, cuando la concentración de OD aumenta es síntoma de inhibición o de ausencia de sustrato.

Para la medición del OD, se emplea el método de electrodo de membrana, el cual minimiza interferencias, ya que el electrolito al ser el medio que capta la señal de corriente está protegido por una membrana plástica permeable al oxígeno que sirve como una barrera de difusión contra las impurezas. Su portabilidad y fácil operación, así como su mantenimiento lo hacen particularmente conveniente para aplicaciones de campo.

Coeficiente de transferencia de masa del oxígeno (K_La)

La tasa de transferencia de oxígeno entre la fase gaseosa y la fase líquida está gobernada por la transferencia de masa de un volumen de gas a una interfase gas-líquido, y luego, a líquido propiamente

Cabe mencionar que en condiciones de aerobiosis, la cantidad de oxígeno transferida, sin destruir los flóculos, es una limitante para la carga orgánica (alimento disponible) que se encuentra en el interior del biorreactor, así los compuestos orgánicos biodegradables no deben ser excesivos, ya que su remoción depende directamente de la aireación, la cual debe ser suficiente para satisfacer la demanda de oxígeno requerida por los microorganismos. Si se tiene insuficiencia de oxígeno traerá como consecuencia una tasa de biodegradación baja, se fomenta una pobre sedimentación de los lodos, y se producen olores.

Asimismo, como se puede apreciar en la ecuación III.1, el cálculo de gama (γ) confía y depende del valor del K_La , lo cual fue probado por una serie de simulaciones virtuales para probar esta sensibilidad (Betancur, *et. al.*, 2004). Lo anterior se explica perfectamente por las condiciones de aerobiosis en que se trabaja, siendo inherente la limitante impuesta por el oxígeno disponible en la fase líquida, por lo que, es crucial la capacidad de cualquier sistema para transferir el oxígeno de su fase gaseosa a su fase líquida.

$$\gamma = K_La(O_S + O)V - OQ_{en} + V \frac{dO}{dt} \dots\dots\dots (III.1)$$

Donde,

γ : velocidad de consumo másico de oxígeno, mgO_2/h

K_{La} : coeficiente de transferencia de oxígeno, h^{-1}

O : concentración de oxígeno en un instante dado, mg/L

O_S : concentración de oxígeno a la saturación, mg/L

V : volumen, m^3

Q_{en} : gasto del influente, m^3/s

t : tiempo, s

El método de cálculo y las condiciones de prueba del K_{La} se mencionan en el apartado IV.3, donde se describe como se obtuvo.

III.2. Ajustes en el funcionamiento de la planta *in situ*

Las modificaciones a las estrategias de control deben ser analizadas y dispuestas gracias al algoritmo de control diseñado, con base en el funcionamiento real del proceso de tratamiento. También se debe contar con un sistema de control que responda fácilmente a adaptaciones hechas en campo, ante condiciones imprevistas o defectuosas.

III.2.1. Revisión general

Para conseguir una revisión formal del equipo se debe conocer la función específica de cada unidad de la planta, así como evaluar la operación de cada función, además de ejecutar los ajustes necesarios según las condiciones corrientes en la operación de la planta. En términos generales, el registro de todo tipo de eventos, ya sean experimentales, accidentales, de rutina, etc., coadyuvan a regular, ajustar y modificar la metodología del proceso de tratamiento.

El manejo de instalaciones para el tratamiento de aguas residuales comprende varios niveles de trabajo dependiendo de las actividades relacionadas con el proceso, mantenimiento de equipo, obtención de resultados y rectificación de procedimientos. Desde un punto de vista ingenieril, un manejo básico está supeditado al uso eficiente de la economía, recursos humanos, equipo y material en general.

III.2.2. Monitoreo de las principales variables

El monitoreo de las mediciones en línea de parámetros importantes como son el COD, DQO, SSV y OD, pH, nivel hidrostático, entre otros, permiten la construcción de una base de datos para un mejoramiento del control de procesos, de manera que se pueda seguir más a detalle el funcionamiento de la planta.

El seguimiento de la medición del OD en un tanque aerobio con base en el registro de un sensor de oxígeno, nos ayuda a conocer la concentración de éste en el interior del tanque, para poder regular el suministro de aire, o la cantidad de biomasa dentro del biorreactor, y así mantener cierta concentración mínima de OD, cuya cantidad por unidad de volumen es crítica en ciertos valores ($< 2 \text{ mg/L}$).

Concretamente, el monitoreo en línea consiste en el uso de instrumentación para medir el comportamiento de parámetros y variables, y en el empleo de un sistema de adquisición de datos para recolectar la información del proceso en tiempo real, esto es,

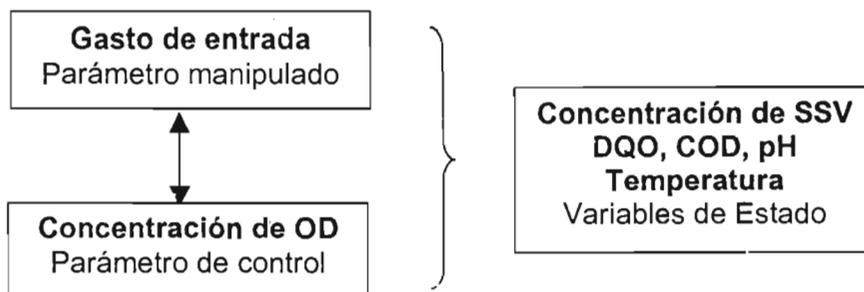
inmediatamente después de que suceden los fenómenos. Para luego pasar al análisis de los datos recabados.

El monitoreo en línea se podrá efectuar sobre las siguientes parámetros que se muestran en la tabla III.1. De tal suerte, la información recolectada en un determinado período de tiempo permitirá dar cuenta de las interrelaciones de los componentes del proceso, además de ser cuantificados.

Tabla III.1. Elementos medidos

Elementos	Tipo de medición
OD	En línea
pH	En línea
Nivel hidrostático	En línea
Temperatura	En línea
DQO y COD	Fuera de línea
Concentración de fenol	Fuera de línea
SSV	Fuera de línea
IVL	Fuera de línea

Los parámetros son instrumentos básicos para maximizar la eficiencia y confiabilidad de un proceso (Metcalf & Eddy, 2003). Cuando éstos se deben mantener en ciertos valores esperados se les llaman parámetros controlados. A diferencia, de aquellos parámetros que pueden ser cambiados directamente, a satisfacción de los que se desean controlar, son llamados parámetros manipulados.



La cadena de eslabones del sistema de control que intervienen para monitorear desde la computadora o desde los transmisores es la siguiente:

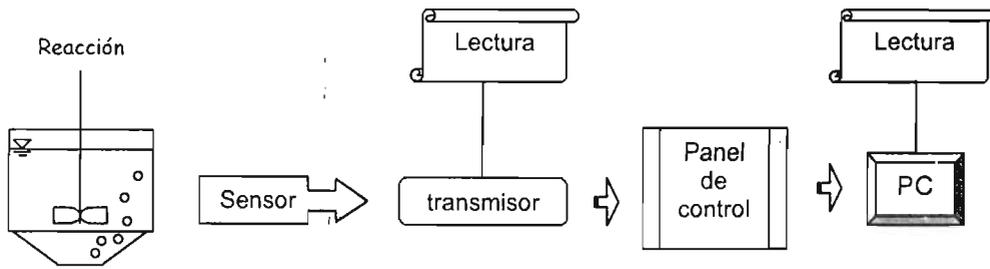


Figura III.1. Sistema de control para monitorear variables

III.2.3. Rectificación de procedimientos

Un sistema de control de cualquier proceso utiliza variables del proceso y controles asociados. Las primeras son medidas por un sensor dispuesto para el sistema de control. La medición es transmitida, desplegada y/o registrada para guiar al operador en ajustes correctivos del proceso. Por otro lado, en los sistemas de control automático, los valores de las señales de las variables del proceso son comparadas contra una referencia preestablecida, a partir de lo cual el controlador implementa acciones seleccionadas para llegar a resultados deseados.

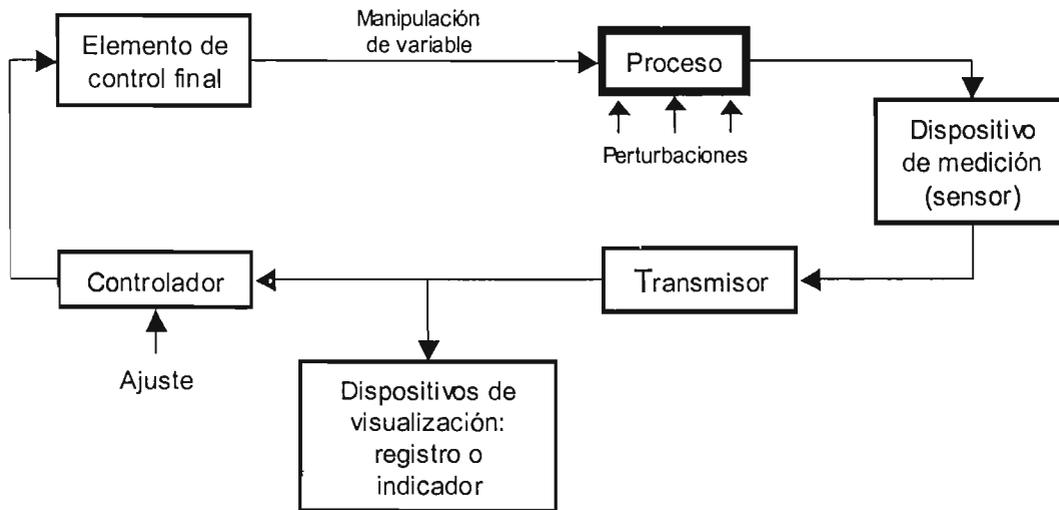


Figura III.2. Componentes de un sistema de control típico (Qasim, S. 1999)

En tanto el seguimiento cualitativo del proceso (monitoreo), conforme se vaya documentando las cinéticas de crecimiento biológico (a partir del SSV) se puede hacer una proyección para determinar una tasa de purga para determinadas condiciones (no podrá extrapolarse circunstancias debido a la sensibilidad de los sistemas biológicos). Un rango típico de concentración de SST en los sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales convencionales es 2000 a 3000 mg/L, pero no menos de 1000mg/L, porque el proceso biológico se vuelve extremadamente susceptible a "shocks" causadas por la variación en el pH, temperatura, cargas orgánicas en el influente y otras variables, lo que se reflejaría en la calidad del efluente.

La Tasa de Consumo de Oxígeno debe oscilar, como muestra de una actividad biológica aceptable para el proceso, entre 20 a 30 mg/L/h (AR municipales), y 60 a 100 mg/L/h (AR industriales)

III.3. Protocolo para la operación de la planta

La función primordial del operador de una planta de tratamiento de aguas residuales es mantener adecuadamente la secuencia y el monitoreo del proceso, de modo que, se garantice al máximo la calidad del efluente tratado. Para tal fin, se requiere una operación eficiente que se sujete al diseño del proceso de tratamiento.

Dada la combinación de factores desfavorables como la inhibición, causada por choques de concentración, así como la desaclimatación, provocada por el ayuno, la operación reduce significativamente su eficiencia dando como resultado un proceso poco confiable en términos de la calidad del efluente de la planta, y poco rentable en términos de la cantidad de agua tratada por unidad de tiempo.

Es por ello, que al plantear una metodología óptima con base en una estrategia de control, se busca resolver ciertas condiciones adversas que poseen los compuestos tóxicos inhibitorios.

En seguida, se describirán los pasos principales que integran la puesta en marcha y el funcionamiento de la planta prototipo, los cuales se consideran para la iniciación de la operación del tratamiento de aguas residuales tóxicas.

III.3.1. Aclimatación

Para conseguir un tratamiento eficiente, donde los tiempos de degradación estén controlados óptimamente es indispensable cierto grado de aclimatación de los microorganismos al sustrato que se quiere remover. Tal aclimatación a las condiciones biológicas conduce al funcionamiento apropiado del sistema, siendo una necesidad básica en cualquier planta de aguas residuales con influentes tóxicos.

Debido a la naturaleza tóxica del compuesto inhibitorio modelo, como el fenol, en el período de reacción se presenta una disminución en la capacidad de degradación de la biomasa ante la presencia de sustrato tóxico, por lo tanto, resulta imprescindible la adaptación previa de la biomasa a la sustancia tóxica para hacerla biodegradable.

III.3.1.1. Características experimentales

Para iniciar la aclimatación de los microorganismos, se inocula el biorreactor con un volumen de 500 L de biomasa, la cual se extrae del tanque de aireación de un proceso convencional de lodos activados de una planta de tratamiento de aguas municipales, cuya concentración de sólidos suspendidos volátiles (SSV) oscila entre 200 a 300 mg/L.

La biomasa inoculada no estará libre de sustrato, por lo que, antes de empezar la aclimatación con una biomasa "pura" en el interior del biorreactor, la masa microbiana se criba, y se airea durante 2 horas, para eliminar la cantidad de sustrato remanente. Luego, al sedimentarse los lodos, se descarga el sobrenadante del reactor hasta un volumen de

400 L (Volumen mínimo), con lo que se pretende que la concentración de SSV sea de 2 000 mg/L, para entonces iniciar la aclimatación.

La alimentación del biorreactor se realiza con un influente mezclado, *agua residual doméstica con fenol*, por lo que, ambos fungen como fuentes de carbono y energía, cuyas concentraciones para el caso del agua residual doméstica son mas o menos constantes (alrededor de 200 mg/L de DQO), y las concentraciones de fenol varían según la estrategia de aclimatación. El pH y la temperatura no se mantienen controlados, ya que oscilan según las condiciones climáticas diarias.

III.3.1.2. Estrategia de aclimatación

La metodología para la aclimatación es la descrita por Moreno-Andrade y Buitrón (2004), en la cual la duración de la fase de reacción tiende a ser cada vez más corta, con lo que se va ajustando el tiempo de reacción a valores más pequeños. Esta fase se detiene cuando la remoción del fenol sea igual o mayor que 95% para una concentración inicial estándar de operación. De tal manera, al registrarse una disminución en el tiempo de reacción durante la secuencia de ciclos de aclimatación, esto muestra el incremento en la velocidad de degradación del sustrato, debido a la adaptación de la biomasa al nuevo alimento.

Así que, la estrategia de aclimatación se guía por la degradación del sustrato hasta niveles de remoción considerados elevados, para asegurar un alto grado de eficiencia en la operación estándar del proceso de tratamiento.

La concentración inicial de fenol dentro del agua residual para la aclimatación se propone en 175 mg/L. Una vez que el tiempo de degradación es constante, se aumenta la concentración de fenol a la condición estándar de operación (350 mg/L). De modo que, al alcanzar esta condición, se puede afirmar que los microorganismos aclimatados deben estar aptos para realizar una biodegradación efectiva del influente tóxico.

III.3.2. Modus operandi de la planta prototipo

En la Fig. III.3. se concentran los componentes que comprenden la puesta en marcha de la planta prototipo, con lo que se desea mostrar las fases y procedimientos necesarios que están dentro de un *protocolo de operación* acorde con los objetivos que se plantean en la fase experimental del tratamiento de aguas residuales tóxicas.

La planeación de una serie de actividades afines con un plan de funcionamiento general de la planta, condujo a la elaboración de un programa de funcionamiento que oriente al operador de la planta sobre la secuencia de pasos que integran el funcionamiento del proceso de tratamiento (ver Tabla III.2.).

Dentro de la revisión de equipo e instalaciones se considera el mantenimiento preventivo de los componentes de la planta prototipo. En este sentido, se recomienda la elaboración de una bitácora de la operación cotidiana de la planta, anotando las anomalías y deficiencias, lo que ayudará a realizar un diagnóstico más preciso de los problemas, y tomar medidas para evitar fallas.

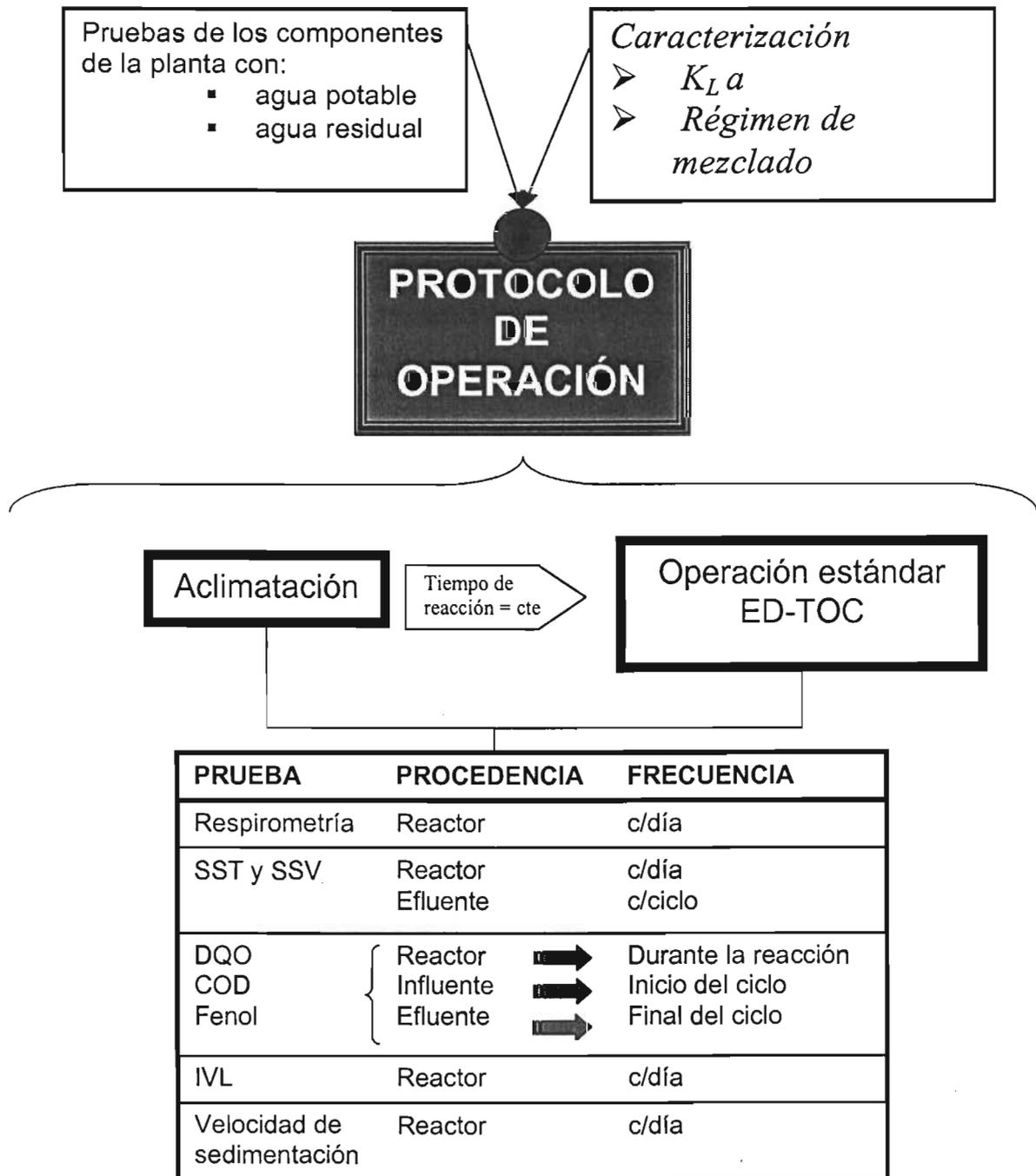


Figura III.3. Diagrama del protocolo de operación

- Calibración
- Limpieza del montaje de piezas
- Limpieza de sensor
- Revisión de cables y conexiones

Considerando el tipo de agua que se maneja deben realizarse prácticas de trabajo seguras, que tienen que ver con la higiene del personal que está operando la planta en tanto protección de manos, nariz, boca, ojos y oídos en el caso de que así se requiera; lavado completo de manos y uso apropiado de ropa

Documentación de resultados

La secuencia de recolección de muestras e información del proceso de tratamiento está dada por la tabla III.2., pero para eso se elaboró un formato de registro o planilla de muestreos que monitorea la experimentación, la cual se maneja a nivel laboratorio para organizar el tipo y la secuencia de las muestras.

En la plantilla tipo que se esquematiza en el anexo III, se observa la organización de la información para la toma y almacenamiento del registro de muestras, como son datos sobre DQO, COD, concentración de fenol, SST y SSV, pH, IVL y valores de respirometría.

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el planteamiento final de este trabajo, se retoma el contenido principal de los capítulos II y III, con la finalidad de puntualizar los resultados que fundamentan este trabajo de tesis. Por lo tanto, se señalarán los resultados obtenidos del trabajo que conlleva la Puesta en Marcha de una Planta Prototipo para el Tratamiento de Aguas Residuales Tóxicas que operará con una metodología experimental escalada a partir de un reactor piloto de laboratorio.

Con base en esto, la información aquí vertida es el producto final del trabajo de campo y de investigación asociados a la configuración, equipo y control de la planta prototipo.

IV.1. Pruebas de equipo e instrumentación

La revisión del funcionamiento de los diferentes aparatos, acorde al tren de tratamiento bajo el cual funciona la planta, se realizó por medio de varias pruebas de comprobación final de entrada/salida. Esto es, con apoyo del panel de control y el software especializado, se comprobó la respuesta de cada equipo, desde el panel y desde la computadora. Esta verificación operacional se realizó aparato por aparato.

Primero, las entradas y salidas fueron verificadas para revisar la continuidad eléctrica y el cableado. Después, cada aparato fue energizado, así como las salidas (analógicas y lógicas) del sistema de control automatizado fueron probadas, lo que aseguró, que el estado del monitoreo de salidas y seguimiento de registro de fenómenos fuera confiable.

IV.1.1. Formato de conformidad (Checklist)

Una lista de conformidad, se usa como guía para evaluar el funcionamiento de los equipos, dentro de lo que es el arranque de las unidades de la planta, mecánicas y electrónicas, así como para llevar a cabo un revisión rigurosa de todo el equipo.

Como resultado de esta actividad, se elaboraron los "checklist" para cada equipo e instrumento, para lo cual se muestra un formato tipo (ver la Fig.IV.1.), ya elaborado para el funcionamiento del equipo mecánico en general.

De tal manera, la utilidad de esta revisión estriba en que todos los mecanismos fueron probados y ajustados según los resultados arrojados por el checklist.

Soplador 1 y válvula de purga en EOLI-SBR-UNAM-02 (PLANTA PILOTO). Procedimiento de prueba

Fecha: 22 / junio / 2005

Archivo BIOREC: PSyVp

Unidades de medida: L/min

Responsable IBTECH: Ing. Enrique Osnaya

Responsable UNAM: Luis Rodrigo Cervantes Quiroz

Nomenclatura de soplador 1 en BIOREC: -----

Nomenclatura de soplador 1 en planos: AB-01

Condiciones de la prueba

Fluido utilizado: Agua residual

Volumen inicial (L): 400

Sólidos suspendidos volátiles (g/L): 1.5

Modo de operación: Standby

Procedimiento de la prueba

Acción	Observaciones	Conforme	
		Si	No
Encender agitador y establecer velocidad de 150 rpm. Monitorear 2 minutos (m2m)	Sin problemas	X	
Encender soplador 1. Establecer un flujo de aire a la mitad de la escala en el controlador de flujo de aire	Sin problemas $Q_{aire} = 200 \text{ L/min}$	X	
Medir O_2 y determinar el tiempo de saturación	15 min	X	
Cambiar flujo al valor mínimo durante 15 minutos y observar si el soplador se sobrecalienta.	Existe sobrecalentamiento Condición de operación $195 < Q_{aire} < 210 \text{ L/min}$		X
Cambiar flujo de aire al valor máximo durante 15 minutos y observar si el soplador se sobrecalienta.	Sin problemas	X	
Establecer un flujo de aire a la mitad de la escala	Sin problemas	X	
Encender bomba alimentación y m2m	Sin problemas	X	
Encender bomba dosificadora hasta V_{max} y m2m	Sin problemas	X	
Encender válvula de purga de lodo y m2m	Sin problemas	X	
Simular falta de energía apagando interruptor y m2m	válvula queda abierta ¹	X	
Reestablecer energía y apagar válvula de purga, m2m	Sin problemas	X	

Comentarios y sugerencias para mejorar la prueba

La recomendación del fabricante es que el soplador no exceda una presión de trabajo de 10 psi (lb/ft²)

¹ La purga del biorreactor se debe hacer en presencia del operador, para que en caso de una falla de energía el operador cierre manualmente válvula de paso tipo bola que controla la purga

Figura IV.1. Formato de conformidad para soplador

IV.2. Pruebas hidráulicas

Para las pruebas hidráulicas, se purgo el sistema de tuberías y bombas, y en algunos casos hubo que realizar limpieza interior de los conductos hidráulicos.

Además, se efectuó un arreglo de mínimas fugas a lo largo del sistema de tuberías, provocadas por defectos en la instalación de las conexiones. Asimismo, se requirieron la reinstalación de algunas conexiones de tubería unidas con las bombas centrífugas.

IV.2.1. Propuesta para la comprobación del régimen de mezclado del reactor

A manera de propuesta, se explica el procedimiento para realizar la prueba de trazado, en la cual se recurre a técnicas de estímulo-respuesta. En este caso, el estímulo es la inyección de un trazador al sistema y la respuesta es el comportamiento en función del tiempo que tiene el trazador en el interior del tanque.

El tipo de estudio de trazado dependen de cómo se inyecte el trazador, si es en forma continua durante todo el estudio de trazado (inyección tipo escalón, se identifica con la letra **F**), si es una inyección en un instante de tiempo (inyección tipo pulso, se identifica con la letra **C**).

En el caso del experimento tipo **C**, la inyección de la totalidad del trazador debe ser efectuada en el menor tiempo posible para que ello no afecte los resultados obtenidos.

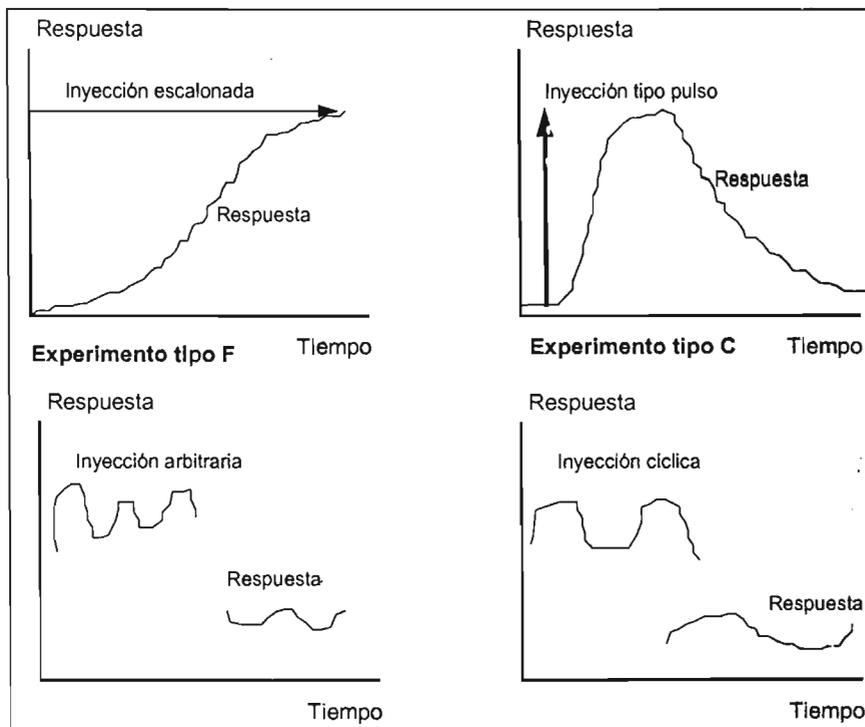


Figura IV.2. Modelado para sistemas con flujo continuo

Partiendo de la idealización mostrada en la Fig. IV.3. para un reactor discontinuo, se alcanzará una concentración máxima, como señal de un sistema completamente mezclado. En la curva del trazador podremos distinguir dos trayectorias: la primera con un comportamiento de un mezclado casi instantáneo, y la otra, se asocia con la estabilización de un mezclado perfecto. Sería difícil que en los cinco puntos muestreados, según la Fig. IV.4. se de un comportamiento ideal, de manera que, se deberán tomar medidas para resolver las deficiencias del mezclado, comunes en los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Comportamiento del trazador en un SBR

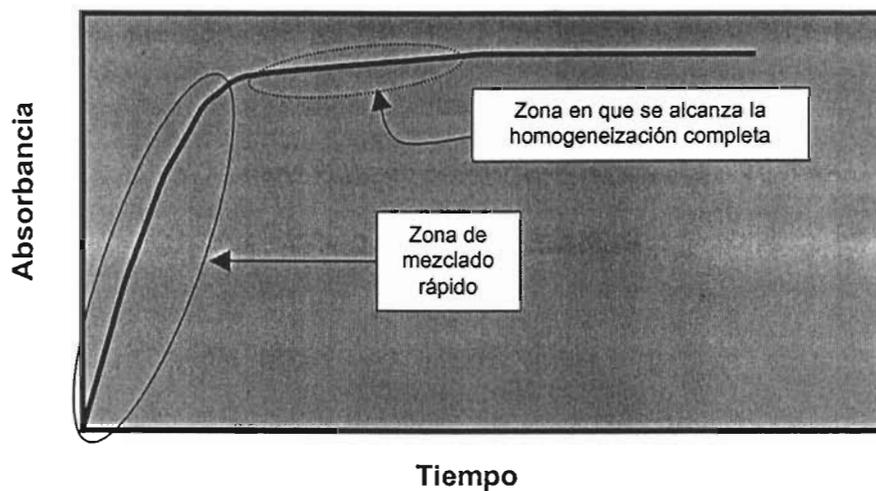


Figura IV.3. Curva del trazador en el mezclado

Para realizar esta prueba se definieron cinco puntos de muestreo (ver fig. IV.4), que particularmente estuvieran ubicados en zonas donde los efectos del mezclado y la aireación fueran deficientes, por lo que, potencialmente representasen alguna zona muerta o exigua en relación a la circulación del líquido en el interior del reactor. No olvidar que los resultados de la prueba de trazado están asociados con la identificación de circulación exigua, zonas muertas y problemas de homogeneidad en general.

La inyección por pulso dentro del reactor SBR se hará con una solución de 100 ml de pintura vinílica diluida en 1 L de agua, cuya disolución dentro del reactor podrá ser registrada por el espectrofotómetro en el pico de absorbancia de 619 nm.

El muestreo se efectúa en continuo, haciendo pasar la muestra por una celda contenida en un espectrofotómetro, que a su vez está conectado a una PC, donde por medio del programa Matlab se hace un registro de absorbancia y se determina el comportamiento en el tiempo de la concentración del trazador.

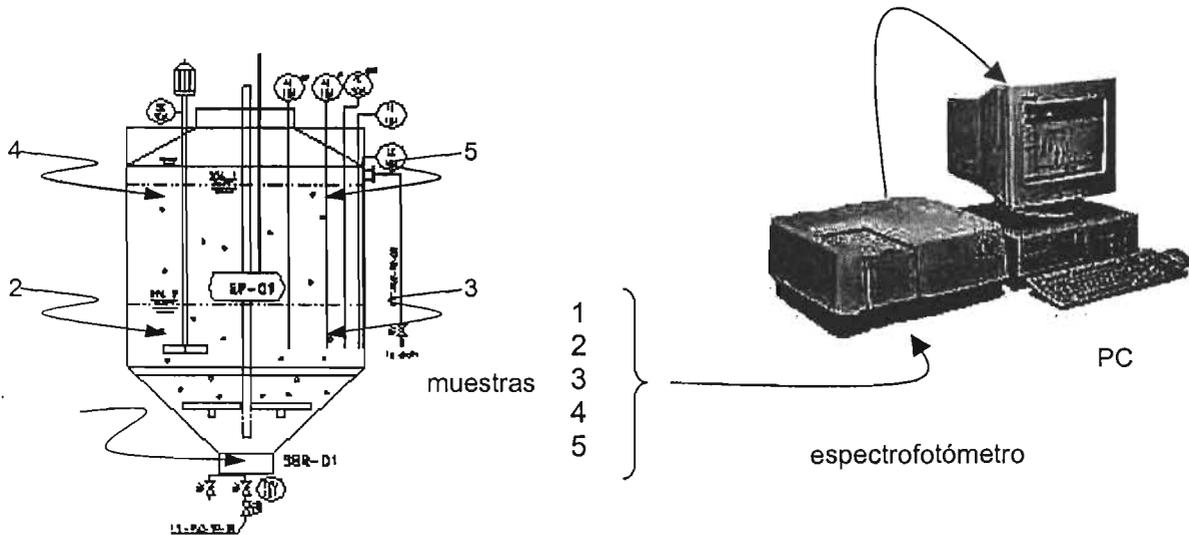


Figura IV.4. Arreglo experimental para los estudios de trazado

El tiempo de mezclado está dado, según Shuler y Kargi, (1992), por el tiempo calculado cuando se alcanza el 95% de la concentración final del colorante dentro del reactor, es decir, cuando se acaba la zona de mezclado rápido tomando como referencia la fig. IV.3. Los resultados de estas pruebas tienen como límite, un tiempo menor o igual a 20 s según el diseñador de la planta prototipo, para que cualquier partícula que entre por el influente del reactor llegue a los puntos de muestreo, previamente establecidos. Como recomendación para un mejor desempeño del sistema de mezclado se propone desviar una tubería de manguera flexible direccionada hacia las zonas con mayores problemas de circulación.

IV.3. Método para el cálculo del $K_L a$

El $K_L a$ se calcula por medio de una prueba del sistema de aireación, la cual considera el punto de la concentración mínima de oxígeno disuelto, ya que en este punto se supone que ya se ha degradado el sustrato y prevalece la transferencia de masa.

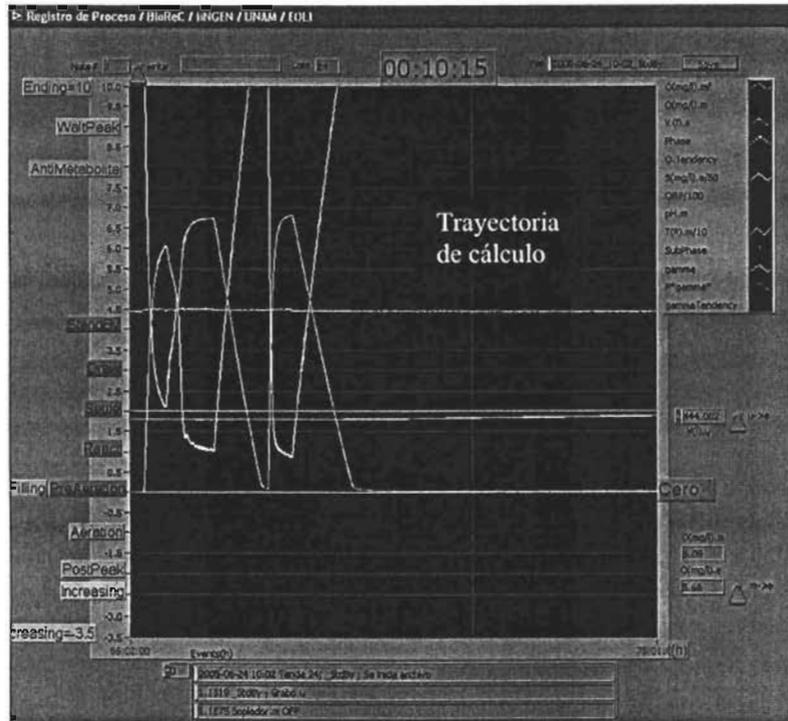


Figura IV.5. Curva de OD para el cálculo del $K_L a$

Para tal fin, se emplea la siguiente ecuación:

$$\frac{dO}{dt} = K_L a (O_s - O) \dots\dots\dots(IV.1.)$$

Donde:

$K_L a$ = coeficiente de transferencia de oxígeno, [t^{-1}]

O_s = oxígeno a la saturación, [mV^{-1}]

O = oxígeno al tiempo t , [mV^{-1}]

t = tiempo, [t]

Integrando,

$$\int_0^{O_t} \frac{dO}{(O_s - O)} = K_L a \int_0^t dt \dots\dots\dots(IV.2.)$$

Resolviendo,

$$K_L a = \frac{1}{t} \ln \frac{(O_s - O_0)}{(O_s - O_t)} \dots\dots\dots(IV.3.)$$

Como condición para la prueba, no debe existir sustrato, pero si microorganismos ya que se necesita considerar solo la actividad endógena de la biomasa. La prueba inicia cuando el reactor deja de airearse habiendo estado en una condición previa de saturación de oxígeno, de modo que, la curva de oxígeno sigue una trayectoria descendente reflejo de la respiración endógena de los microorganismos, y en el momento de que llega a un nivel de 0 mg OD/L, reinicia la aireación hasta que se vuelve a saturar de OD el interior del reactor, donde se considera el tiempo que tarda el sistema de aireación en saturar de oxígeno en una condición de ausencia de sustrato y con un nivel nulo de oxígeno (ver Fig. IV.5).

Dentro de la prueba, la curva de descenso del nivel de oxígeno señal de la respiración endógena y la curva de saturación de oxígeno a partir de un nivel de 0 mg OD/L son los datos que se procesan en un programa diseñado en Matlab para el cálculo del K_{La} .

A partir de lo anterior, se calculó el K_{La} para el volumen máximo de trabajo del biorreactor con diferentes flujos de aire inyectados, bajo condiciones similares de SSV, temperatura y agitación (641 mgSSV/L; 18 °C; 100 rpm), dando como resultado los siguientes datos:

Tabla IV.1. Resultados de las pruebas de K_{La} para volumen máximo

Flujo de aire (L/min)	K_{La} (h^{-1})
150	14.55
110	12.44
70	10.20

Se ha observado que a nivel piloto de laboratorio es necesario contar con un valor de K_{La} comprendido entre 12 y 13 h^{-1} . por lo tanto, se concluye que el escalamiento de este parámetro fue adecuado, pues se puede obtener un valor de hasta 14.5 h^{-1} con un flujo de aire de 150 L/min.

IV.4. Determinación de las condiciones iniciales de operación de la planta

Se dispone de un biorreactor aerobio discontinuo con capacidad útil de 1000 L e inicialmente un volumen de intercambio del 30% para luego ir aumentando su capacidad de operación hasta llegar a un 60% de volumen intercambiado.

Después de la aclimatación, el biorreactor recibirá una biomasa apta para la degradación del compuesto tóxico, con una concentración aproximada de 2000 mg/L con un volumen de 400 L de Licor Mezclado de SSV (MLSSV),

El flujo de aire se propone de 150 L/min, cuya magnitud representa un adecuado comportamiento del K_{La} ($> 13 h^{-1}$), con suficiente transferencia de oxígeno, y no afecta la formación de los flóculos biológicos. Por otro lado, la temperatura del agua residual en el interior del reactor no tiene ningún control, por lo que se consideran variaciones conforme a la condiciones climáticas diarias.

El influente de la planta, para la etapa de operación, se compone por agua residual municipal mezclada con fenol, en una concentración estándar de operación del compuesto tóxico de 350 mg fenol/L. Asimismo, la Demanda Química de Oxígeno (DQO) del influente mezclado se encuentra entre 1000 y 1200 mg DQO /L.

A manera de resumen, se puede decir que el trabajo experimental constará de los siguientes valores de operación:

- Volumen máximo = 1000 L
- Volumen de intercambio = 400 L
- Concentración del sustrato tóxico en el flujo de entrada = 350 mg fenol/L
- DQO del lote de agua residual municipal = 250 mg/L
- DQO del influente mezclado = 1100 mg/L
- No se adiciona ningún nutriente, considerando una operación estándar.

Por otra parte, las fases que comprenden los ciclos de tratamiento en el biorreactor tienen una duración cuyos valores se muestran en la Tabla IV.2:

Tabla IV.2. Duración de las fases de los ciclos de tratamiento

Fase	Duración (min)
Pre-aireación	15
Llenado y reacción	variable*
Sedimentación	30
Vaciado	15-20
Tiempo muerto	10-20

* Este valor depende de la estrategia empleada

IV.5. Instrumentación

IV.5.1. Pruebas

Con el objeto de evaluar el funcionamiento de cada sensor, se elaboraron los correspondientes "checklist". A continuación, en la fig. IV.6, se muestra un formato tipo, ya terminado, donde se aprecia la información recabada, como son: datos generales, las condiciones de operación y el comportamiento de los registros de los sensores a lo largo de toda la prueba.

IV.5.2. Calibración de instrumentos

La calibración de los sensores se realizó conforme a la indicaciones del fabricante, considerando la configuración electrónica de los rangos de cada instrumento para fijar un intervalo de valores, un máximo y un mínimo, en los cuales se medirá cada variable. Esto permitirá tener mayor precisión en las mediciones que monitorean el proceso de tratamiento.

Sensor de pH en EOLI-SBR-UNAM-02 (PLANTA PILOTO). Procedimiento de prueba

Fecha: : 19 / junio / 2005	Fecha de última calibración (si existe): -----
Archivo BIOREC: SpH	
Unidades de medida: mg/L	
Responsable IBTECH: Ing. Enrique Osnaya	
Responsable UNAM: Luis Rodrigo Cervantes Quiroz	
Nomenclatura del sensor en BIOREC: -----	
Nomenclatura del sensor en planos: AE/AT02-104	
Intervalo de aceptación. (< 2%)	Mínimo Máximo dif (%)
Ruido	8.71 8.8 1.022727
Error	-----

Condiciones de la prueba

Fluido utilizado: Agua potable
Volumen inicial (L): 750
Sólidos suspendidos volátiles (g/L): 1.5
Modo de operación: Manual

Sensores adicionales funcionando durante TODA la prueba	Medida en la PC			Existe	
	Mínimo	Máximo	Dif (%)	Si	No
Temperatura	20.1	20.2	0.49505	X	
Oxígeno disuelto 1	6.7	6.8	1.470588	X	
Oxígeno disuelto 2					X
ORP	140	160	12.5	X	
Otro (especificar)					

Procedimiento de la prueba

Acción	Medida en la PC			Conforme	
	Mínimo	Máximo	Dif (%)	Si	No
Actuadores OFF, monitorear 5 minutos (m5m)	8.69	8.71	0.229621	X	
Encender agitador (150 rpm) y soplador 1 (40 L/min), m2m	8.71	8.8	1.022727	X	
Apagar agitador y soplador 1, m2m	8.71	8.8	1.022727	X	
Encender agitador y soplador 2, m2m	8.67	8.71	0.459242	X	
Encender bomba de alimentación durante 3 minutos y m2m	8.58	8.6	0.232558	X	
Apagar bomba de alimentación y m2m	8.6	8.63	0.347625	X	
Encender bomba dosificadora durante 3 minutos y m2m	8.58	8.6	0.232558	X	
Apagar bomba dosificadora y m2m	8.56	8.58	0.2331	X	
Apagar agitador y soplador 2, m2m	8.55	8.57	0.233372	X	
Encender bomba de descarga durante 3 minutos y m2m	8.56	8.58	0.2331	X	
Apagar bomba de descarga y m2m	8.55	8.57	0.233372	X	
Encender purga de SBR durante 3 minutos y m2m	8.54	8.55	0.116959	X	
Apagar purga de SBR y m2m	8.53	8.55	0.233918	X	

Comentarios y sugerencias para mejorar la prueba

En el registro del ORP hubo una diferencia de 12.5%, lo que se debió a que al ir llenando el reactor hubo una

dilución de esta variable en el interior del tanque

Figura IV.6. Formato de conformidad para el sensor de pH

Los sensores que se calibraron fueron los siguientes: nivel hidrostático, OD, pH y temperatura. Sin embargo, se recomienda recalibrar cada instrumento con cierta periodicidad, o en caso de ser necesario, hacerlo conforme existan fallas en el sistema de medición.

IV.6. Control

La plataforma de control de la instrumentación de la planta prototipo es National Instrument, dentro de la cual se ejecuta el software especializado LabView 7.0, el cual se muestra en la Fig. IV.7.

En la pantalla de control, se muestra la información sobre el OD, el flujo de entrada al reactor, así como el estado de la aireación y mezclado, de manera que se despliegan los datos que manejan el control óptimo de la estrategia ED-TOC. Los tiempos de sedimentación y Tiempo Muerto los define el operador con base en las características de los lodos.

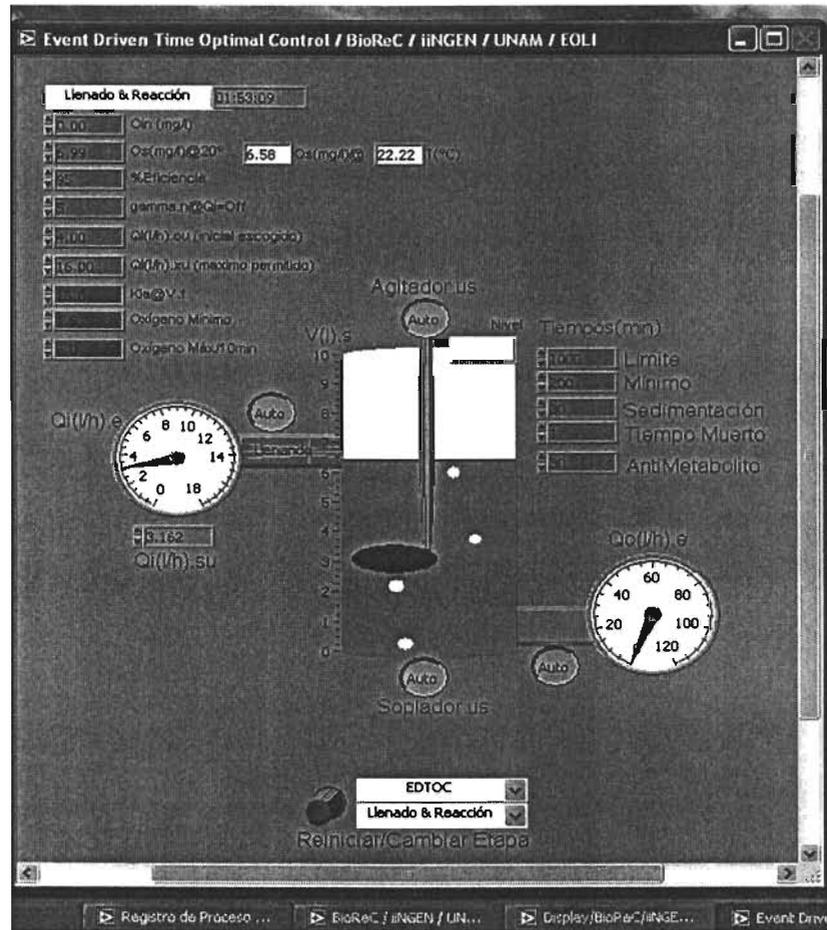


Figura IV.7. Pantalla de control

Esta interfase permite la visualización del estado de control de los componentes de la planta prototipo, así como comandar el control del desarrollo del proceso de tratamiento, de modo que, se puede corregir algún dato erróneo imprevisto, hacer

cambios sobre la marcha, registrar cambios para los siguientes ciclos del SBR, además, se pueden ajustar parámetros del modelo.

Dentro de esta comunicación automatizada, se registran los valores de parámetros que nos interesan monitorear a lo largo de la operación de la planta, con lo que se puede responder de forma inmediata a perturbaciones en el proceso.

En la Fig. IV.8 se observan las curvas de cada variables o parámetro, ya sea medido en línea o estimado, con lo cual se integra el estado del proceso, a partir de valores que son fáciles de medir.

Esta pantalla de monitoreo permite almacenar en la computadora todas las evoluciones de las variables.

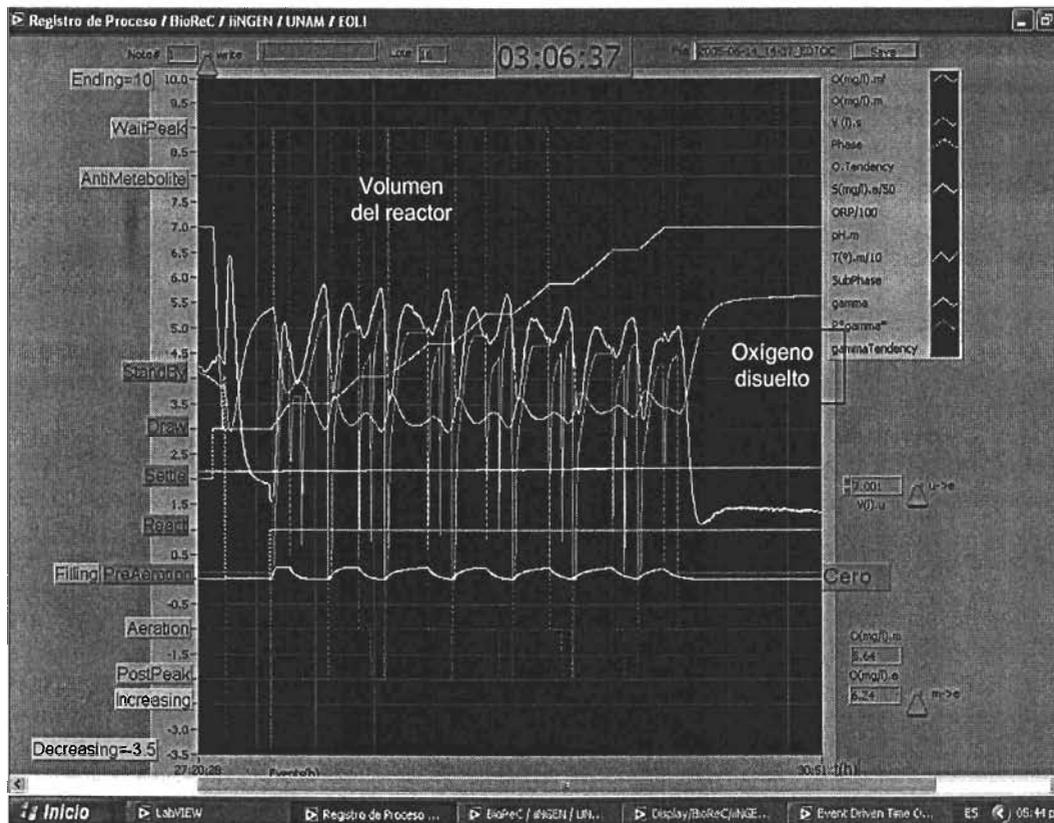


Figura IV.8. Monitoreo gráfico de los comportamientos de las variables

La trayectoria ascendente escalonada que aparece en los gráficos de la Fig. IV.8. es la alimentación de reactor por lotes (subciclos) hasta alcanzar su nivel máximo de operación. Asimismo, la trayectoria que oscila en valores cercanos a 3 y 3.5 (mg/L) se trata del OD medido en línea, cuyo comportamiento está relacionado con el consumo de sustrato.

IV.7. Trabajo a futuro

Los objetivos a futuro son la implementación de la metodología experimental que forma parte de este trabajo de investigación, y resolver las problemáticas propias de un

modelo a escala piloto industrial, con la finalidad de poder promover el proyecto de investigación en la industria. De manera que, se logre realizar una experimentación con aguas residuales industriales tóxicas en el campo real de donde se originan este tipo de efluentes.

Particularmente, se pretende utilizar la estrategia óptima para efectuar la aclimatación de la biomasa en un proceso biológico para el tratamiento de aguas residuales tóxicas, con lo que se busca evaluar el desempeño de esta estrategia para condiciones previas a la operación estándar.

Con el uso de la ED-TCC, se pretende explorar otros aspectos dentro del mismo tratamiento con reactores discontinuos secuenciales, como son el funcionamiento de la ED-TOC a largo plazo, e inclusive, realizar una investigación sobre los Biorreactores con Membranas (MBR) utilizando la estrategia óptima.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

CONCLUSIONES

El uso de técnicas fáciles de medir y con bajo costo económico que ofrecen un control robusto y confiable, hacen factible la implementación de la estrategia óptima a nivel industrial, con los consecuentes ahorros obtenidos al optimizar el tiempo de degradación de los compuestos tóxicos, evitando gasto de energía, recursos humanos y tiempo de tratamiento para más lotes de agua residual.

De ahí la importancia de este trabajo de investigación y de campo para llevar a cabo la *puesta en marcha de una planta prototipo diseñada para el tratamiento de aguas residuales tóxicas*, el cual se enfocó en poner a punto las instalaciones, el equipo, el material, los instrumentos y el control automatizado que dirigirá el proceso de tratamiento. En segundo término, se realizó una planeación general de las actividades de operación, mantenimiento, seguridad, así como, muestreo y recolección de información. Para entonces, poder hacer el análisis de resultados y retroalimentar así la estrategia de control óptima.

Por lo que, en todo trabajo experimental se debe considerar un número indefinido de ajustes, como es el caso de la planta prototipo, propios de una actividad de investigación cambiante, que perfecciona el conocimiento y crea nuevos paradigmas en los métodos de estudio.

Como herramienta principal para efectuar la verificación de cada componente de la planta prototipo, se diseñaron formatos de conformidad o *checklist*, los cuales sirvieron para identificar el estado de cada equipo y de cada sensor, así como, para guiar al operador acerca de las fallas o deficiencias de los componentes de la planta, con lo que se registraron y modificaron los desperfectos de dichos componentes.

Para el arranque de la planta piloto, se propusieron los métodos de determinación de dos aspectos fundamentales en la operación del biorreactor: el régimen de mezclado del sistema de agitación, y el coeficiente de transferencia de oxígeno (K_La) del sistema de aireación. El cálculo de estos parámetros de operación garantizarán el buen estado y funcionamiento del proceso biológico.

Con respecto al cálculo del K_La del sistema de aireación de la planta prototipo, se obtuvo que para un flujo de aire de 150 L/min se tiene un K_La de 14.55 h^{-1} , que es superior al valor de 13 h^{-1} , el cual se determinó como un límite mínimo aceptable en el laboratorio, para el buen comportamiento del sistema biológico.

Adicionalmente, se propusieron las condiciones iniciales de operación, así como los diferentes procedimientos que involucran el trabajo experimental de investigación, de modo que, sirva como un modelo para la operación de la planta prototipo, con base en un protocolo de operación.

Por último, se recibió la capacitación para conocer y manejar el software de control ejecutable desde la PC, que comanda las diferentes estrategias de control que se pueden

desarrollar en un SBR. Esta interfase de control fue el medio por el cual se controlaba automáticamente el biorreactor en sus distintas fases de operación, así que, se realizaron diversas prácticas de control manual (desde el panel de control) y automática (desde la PC)

Más adelante, como objetivos posteriores al alcance de este trabajo de tesis, se implementará la estrategia óptima en el proceso de tratamiento de la planta prototipo, así como se realizará la aclimatación previa de la biomasa para preparar a los microorganismo en la degradación de compuestos tóxicos. A largo plazo, se evaluará el comportamiento de la estrategia ED-TOC en un tiempo prolongado de operación en la planta prototipo, y finalmente, se promoverá su utilización en el sector industrial.

REFERENCIAS

- AFNOR (1985) Evaluation en milieu aqueux de la biodégradabilité aérobie "ultime" des produits organiques solubles, *Normalisation française*, NFT 90-312.
- American Public Health Association, APHA (1992); American Water Works Association; Water Environment Federation. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater; 18th Ed.; Greenberg, A.E., Clesceri, A.E., Eaton, A.D., Eds; APHA: Washington D.C.
- Betancur, M., Moreno, J. y Buitrón, G.(2004) "Event-Driven Control for Treating Toxicants in Aerobic Sequencing Batch Bioreactors". 9th International Symposium on Computer Applications in Biotechnology. March 28-31. France.
- Buitrón, G., Moreno, J., Betancur, M., y Moreno, I. (2004a) "Aerobic Treatment of Toxic Wastewater: Problems, Solutions and Open Questions". 3rd IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology. Noosa, Australia.
- Buitrón, G., Moreno-Andrade, I., Betancur, M., y Moreno, J. (2004b) Biodegradación de efluentes altamente contaminados por compuestos fenólicos utilizando una estrategia de control óptima. Memorias del XIV Congreso Nacional de Ingeniería Ambiental y Ciencias Ambientales. 12-14/05/2004, Mazatlán, México
- Burke, G., Ramnarine Singh, B. y Theodore, L. (2000) *Handbook of Environmental Management and Technology*. Ed. Wiley Interscience. USA.
- Daigger, G y Buttz, J.(1992) *Upgrading Wastewater Treatment Plants*. Technomic. USA.
- Ellis, T., Smets, B. y Grady, C.P.L.(1995) "Influence of simultaneous multiple substrate biodegradation on the kinetic parameters for individual substrates". Proceedings WEFTEC '95. Vol. 1. Miami Beach.
- Grady, C.P.L., Daigger, G. y Lim, H.(1999) *Biological Wastewater Treatment*. Ed. Marcel Dekker. 2da. Edición. USA.
- Henze, M., Grady, L., Gujer, W., Marais, G. y Matsuo, T.(1986) "Activated sludge model" No.1, IAWPRC Scientific and Technical Reports
- Henze, M., Härremoes, P., Cour Jansen, J.I. y Arvin, E. (1997) *Wastewater Treatment*. Springer Verlag, Berlin.
- Horan, N.J.(1990) *Biological Wastewater Treatment Systems*. John Wiley & Sons Editorial. U.K.
- Junkins, R., Deeny, K. y Eckhoff, T. (1983) "The Activated Sludge Process: Fundamentals of Operation". Ann Arbor Science. USA.

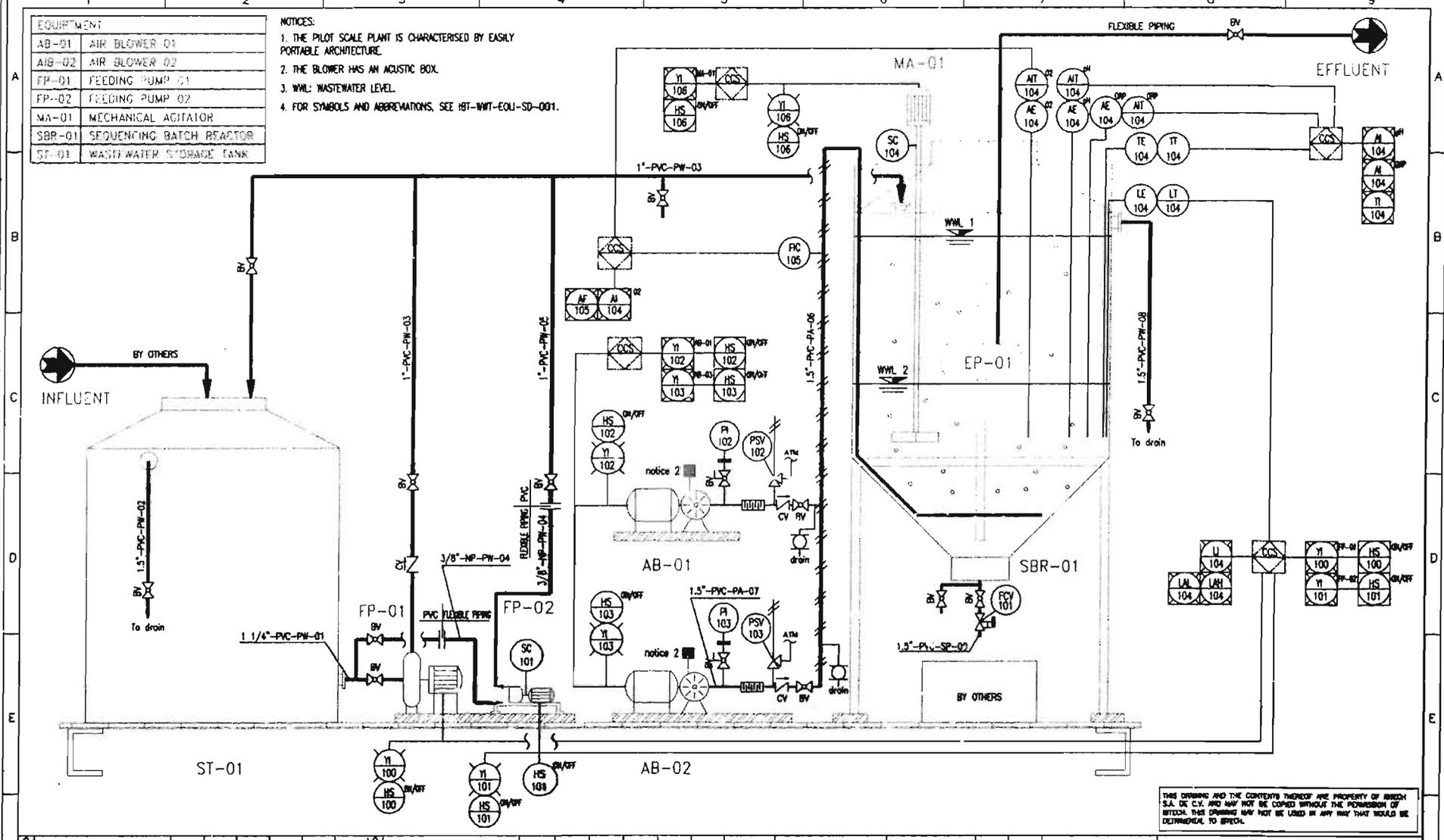
- Marrot, B., Barrios-Martinez, A., Moulin, P. y Roche, N. (2004) "Industrial Wastewater Treatment in a Membrane Bioreactor: a Review". *Environmental Progress*. 23(1). pp. 59-68.
- Metcalf & Eddy, Inc. Revisado por Tchobanoglous, G., Burton, F. y Stensel, D. (2003) *Wastewater Engineering: treatment and reuse*. Ed. McGraw-Hill, 4ta. ed. USA.
- Moreno, J y Buitrón, G.(2002) "Optimación de un biorreactor aerobio para el tratamiento de aguas residuales industriales". *Revista Iberoamericana de Investigación : Computación y Sistemas*. Número especial, diciembre, 74-82.
- Moreno-Andrade, I. y Buitrón, G. (2004)"Variation of the microbial activity during the acclimation phase of a SBR system degrading 4-chlorophenol". *Wat. Sci. Tech.* 5 (10): pp. 251-258
- Moreno-Andrade, I., Buitrón, G., Betancur, M. y Moreno, J.(2005) "Control strategy for the optimal degradation of inhibitory wastewater in a discontinuous biorreactor". Sometido a *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*.
- Peters, M., Goronszy, M., Bian, Y.(1994) "Fed-batch reactor treatment of industrial wastewaters". *Proceedings WEFTEC*. Vol. 1. Chicago.
- Qasim, S.(1999) *Wastewater Treatment Plants: planning, design and operation*. 2da. Edición. CRC Press. USA.
- Rittmann, B. y McCarty, P.(2001) *Environmental Biotechnology: Principles and Applications*. Ed. McGraw-Hill. U.S.A.
- Soto, G.(2000) *Biodegradación de compuestos tóxicos en un proceso SBR controlado por medio del oxígeno disuelto*. Tesis de Maestría en Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. México.
- U.S. Environmental Protection Agency.(2004) "Sequencing Batch Reactor Systems". *Onsite Wastewater Treatment Systems*. Technology Fact Sheet 3.

ANEXO I

DTI DE LA PLANTA PROTOTIPO

EQUIPMENT:	
AB-01	AIR BLOWER 01
AB-02	AIR BLOWER 02
FP-01	FEEDING PUMP 01
FP-02	FEEDING PUMP 02
MA-01	MECHANICAL AGITATOR
SBR-01	SEQUENCING BATCH REACTOR
ST-01	WASTEWATER STORAGE TANK

- NOTICES:
1. THE PILOT SCALE PLANT IS CHARACTERISED BY EASILY PORTABLE ARCHITECTURE.
 2. THE BLOWER HAS AN AUSTIC BOX.
 3. WWL: WASTEWATER LEVEL.
 4. FOR SYMBOLS AND ABBREVIATIONS, SEE IGT-WWT-EOLI-SD-001.



THIS DRAWING AND THE CONTENTS THEREOF ARE PROPERTY OF BISHOP S.A. DE C.V. AND MAY NOT BE COPIED WITHOUT THE PERMISSION OF BISHOP. THIS DRAWING MAY NOT BE USED IN ANY WAY THAT WOULD BE DETRIMENTAL TO BISHOP.

NO.	REVISIONS	DATE	BY	REASON	NO.	REVISIONS	DATE	BY	REASON
1					4				
2					5				
3					6				

EOLI PROJECT		PIPE INSTRUMENTATION DIAGRAM WASTEWATER TREATMENT PROCESS	
DESIGNED BY	DRAWN BY	CHECKED BY	APPROVED BY
DATE	DATE	DATE	DATE

ANEXO II

TABLA DE ESPECIFICACIONES DE EQUIPO Y SENSORES



EQUIPO / INSTRUMENTOS

DATE:	19-Mar-04
DEPTO:	PROCESS
BY:	A.M.P.V.
REVISED:	J.E.L.H.
APROBE:	J.E.L.H.
REVISION:	A
Hoja: 1 de:	1

CLIENTE: EOLI
 PROYECTO: FILED-SCALE PILOT PLANT
 DEPARTAMENTP: PROCESOS

INSTRUMENTOS	UNIDAD	CANTIDAD	CARACTERISCAS ELÉCTRICAS		SEÑAL DE CONTROL		CONDICIONES DE OPERACIÓN		LOCALIZACIÓN DE INDICACIÓN			
			Alimentación de energía	Señal manejada	instrumento-tarjeta	tarjeta-instrumento	mínimo	máximo	Local	Panel de control	Computadora	
LE/LT-104	Medidor transmisor de nivel	pza	1.0	11.5-30 VCD	4-20 mA (analógica)	Analógica	---	0.0 m (nota 6)	0.95 m (nota 6)		VALOR	VALOR
AE/ATO2-104	Senor de oxigeno disuelto Endress Hauser COS21-1K0, transmisor de oxigeno disuelto E+H COM223-DX1105.	pza	2.0	115 VAC	4-20 mA (analógica)	Analógica	---	(nota 8)	(nota 8)		VALOR	VALOR
FICT-105	Flujometro controlador OMEGA FMA-876-V-air. (Control local)	pza	1.0	24 VCD	4-20 mA (analógica)	Analógica	---	0.00	500.00	VALOR		VALOR
TE/TT-104	Termómetro TR 10-A2A8CESXR300	pza	1.0	10-35 VCD	4-20 mA (analógica)	Analógica	---	0.00	50.00		VALOR	VALOR
AE/ATpH-104	Electrodo pH CPS11-2AS2ESA, pH/ORP transmisor intercambiable E+H CPM 223-PR 1105.	pza	1.0	115VAC	4-20 mA (analógica)	Analógica	---	0.00	14.00		VALOR	VALOR
AE/ATORP-104	Electrodo combinado ORP/REDOX CPS12-OPA2ESA, pH/ORP transmisor intercambiable E+H CPM 223-PR 1005.	pza	1.0	115VAC	4-20 mA (analógica)	Analógica	---	-2,720 mV	+2,070mV		VALOR	VALOR
FV-01	Válvula bola ON / OFF (normalmente cerrada), con actuador eléctrico.	pza	1.0	110VAC		---	Digital (nota 7)	abieta	cerrada		ESTADO	ESTADO
EQUIPO		UNIDAD	CANTIDAD	Alimentación de energía	Señal manejada	equipo-tarjeta	tarjeta-equipo					
MA-01	Agitador mecánico con control de velocidad manual.	pza	1.00	110VAC	120 volts (digital)	Digital (nota 7)	Digital (nota 7)	20 rpm	350 rpm		ESTADO	ESTADO
FP-02	Bomba peristáltica, con control remoto (nota 9).	pza	1.00	110VAC	4-20 mA (analógica)	Analógica	Analógica	0.6 l/min	8 l/min		VALOR	VALOR
FP-01	Bomba centrífuga horizontal	pza	1.00	110VAC	120 volts (digital)	Digital (nota 7)	Digital (nota 7)	encendido	apagado		ESTADO	ESTADO
EP-01	Bomba centrífuga sumergible	pza	1.00	110VAC	120 volts (digital)	Digital (nota 7)	Digital (nota 7)	encendido	apagado		ESTADO	ESTADO
AB-01/02	Soplador de aire	pza	2.00	110VAC	120 volts (digital)	Digital (nota 7)	Digital (nota 7)	encendido	apagado		ESTADO	ESTADO

NOTA 1. LOS INSTRUMENTOS TENDRÁN LA CAPACIDAD DE MANDAR SEÑAL A COMPUTADORA PARA INDICACIÓN.

NOTA 2. EL FLUJOMETRO SERÁ EL UNICO INSTRUMENTO QUE REALIZARÁ CONTROL, PERO ESTE SERÁ LOCAL POR TANTO SÓLO ENVIARÁ SEÑAL PARA INDICACIÓN.

NOTA 3. LOS EQUIPOS TENDRÁN CAPACIDAD PARA INDICACIÓN DE ESTADO EN COMPUTADORA, Y SE PODRAN PONER EN OPERACIÓN DESDE COMPUTADORA

NOTA 4. EL CONTROL DE VELOCIDAD DEL AGITADOR ES LOCAL Y MANUAL, POR MEDIO DE UNA PERILLA.

NOTA 5. EL CONTROL DE LA BOMBA PERISTALTICA ES A REMOTO.

NOTA 6. LOS NIVELES SE MIDEN EN LA PARTE RECTA DE LA TOLVA.

NOTA 7. EL ACCIONAMIENTO DE MOTORES Y VÁLVULA SE HARA ATRAVEZ DE RELEVADORES EN TABLERO DE FUERZA

NOTA 8. VALORES POR PROCESO.

NOTA 9. LA BOMBA PERISTÁLTICA PODRÁ APAGAR O ENCENDERSE DESDE TABLERO ELÉCTRICO.

ANEXO III

PLANTILLA DE REGISTRO DE DATOS EXPERIMENTALES

ARCHIVO: _____

ESTRATEGIA: _____

muestra	tiempo (hr)	COD*	DQO*	FENOL		FENOL*	pH
				dilución	lectura		
lote			/				
influyente							
0							
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
efluente			/				

* mg/L

SÓLIDOS

	# de filtro	ml M	peso (g)			mgSST/L	mgSSV/L
			filtro	estufa	mufla		
Reactor							
Lote							
Efluente							

RESPIROMETRÍA

Solución Mineral: _____ mg O₂/mgSSVh

Acetato (210 mg/L): _____

Fenol (50 mg/L): _____

I. V. L.

ml lodo mgSSV/L IVL (ml/gSSV) vel. sdim (cm/hr)

NOTAS: _____

ANEXO IV

FORMATOS DE CONFORMIDAD

Sensor de Nivel en EOLI-SBR-UNAM-02 (PLANTA PILOTO) Procedimiento de prueba

Fecha: **19 / junio / 2005** Fecha de última calibración (si existe): -----

Archivo BIOREC: **SNH**

Unidades de medida: **L**

Responsable IBTECH: **Ing. Enrique Osnaya**

Responsable UNAM: **Luis Rodrigo Cervantes Quiroz**

Nomenclatura del sensor en BIOREC: -----

Nomenclatura del sensor en planos: **LE/LT-104**

Intervalo de aceptación. (< 2%)	Mínimo	Máximo	dif (%)
Ruido	738	740	0.29
Error	-----	-----	-----

Condiciones de la prueba

Fluido utilizado: **Agua residual**

Volumen inicial (L): **405**

Sólidos suspendidos volátiles (g/L): **1.5**

Modo de operación: **Manual**

Sensores adicionales funcionando durante TODA la prueba	Medida en la PC			Existe	
	Mínimo	Máximo	Dif (%)	Si	No
Temperatura	20.0	20.1	0.50	X	
Oxígeno disuelto 1	6.0	6.5	7.69	X	
Oxígeno disuelto 2	-----	-----	-----		
pH	6.77	11.28	39.98	X	
ORP	154	181	14.92	X	
Otro (especificar)					

Procedimiento de la prueba

Acción	Medida en la PC			Conforme	
	Mínimo	Máximo	Dif (%)	Si	No
Actuadores OFF, monitorear 2 minutos (m2m)	407	408	0.13	X	
Encender agitador (150 rpm) y soplador 1 (40 L/min; m2m)	415	416	0.21	X	
Apagar agitador y soplador; m2m	409	409	0.12	X	
Encender agitador, m2m	410	410	0.00	X	
Encender soplador 2, m2m	416	416	0.12	X	
Encender bomba de alimentación y llenar a la mitad el SBR, verificando que la medida aumenta sin disminuir	416	717	42.05	X	
Apagar bomba de alimentación, m2m	738	740	0.29	X	
Cambiar a soplador 1, m2m	738	739	0.14	X	
Encender bomba dosificadora y llenar casi al máximo, verificando que la medida aumenta sin disminuir	-----	-----	-----		X
Apagar bomba dosificadora, m2m	-----	-----	-----		X
Apagar agitador y soplador, m2m	738	739	0.14	X	
Encender bomba de vaciado hasta nivel medio, verificando que la medida disminuye sin aumentar	550	739	25.58	X	
Apagar bomba de vaciado y m2m	550	551	0.18	X	
Encender purga del SBR hasta nivel cercano al mínimo, verificando que la medida disminuye sin aumentar	417	551*	24.32	X	

Las variaciones en las lecturas del nivel del agua se deben a que durante la prueba se introdujo y se extrajo líquido.

La bomba dosificadora no estaba disponible en la realización de esta prueba

Las variaciones en los otros sensores se debieron a efectos de dilución al introducir líquido

Sensor de Oxígeno disuelto (1) en EOLI-SBR-UNAM:02 (PLANTA PILOTO) Procedimiento de prueba

Fecha: 19 / junio / 2005	Fecha de última calibración (si existe): -----		
Archivo BIOREC: SOD1			
Unidades de medida: mg/L			
Responsable IBTECH: Ing. Enrique Osnaya			
Responsable UNAM: Luis Rodrigo Cervantes Quiroz			
Nomenclatura del sensor en BIOREC: -----			
Nomenclatura del sensor en planos: AE/ATO2-104			
Intervalo de aceptación. (<2%)	Minimo	Máximo	dif (%)
Ruido	6.2	6.5	4.6153846
Error	-----	-----	-----

Condiciones de la prueba

Fluido utilizado (saturado con O ₂): Agua potable
Volumen inicial (L): 750
Sólidos suspendidos volátiles (g/L): 0
Agitación (rpm): 150
Flujo de aire (L/min): 110
Modo de operación: Standby

Sensores adicionales funcionando durante TODA la prueba	Medida en la PC			Existe	
	Minimo	Máximo	Dif (%)	Si	No
Temperatura	20.1	20.2	0.4950495	X	
Oxígeno disuelto 2	-----	-----	-----		
pH	6.77	11.28	39.98	X	
ORP	140	160	12.5	X	
Otro (especificar)					

Procedimiento de la prueba

Acción	Medida en la PC			Conforme	
	Minimo	Máximo	Dif (%)	Si	No
Permitir saturación con O ₂	6.8	6.9	1.4492754	X	
Apagar agitador y monitorear 2 minutos (m2m)	6.7	6.8	1.4705882	X	
Apagar soplador 1 y m2m	6.2	6.7	7.4626866	X	
Encender agitador y soplador 2, m2m	6.2	6.5	4.6153846	X	
Encender bomba de alimentación durante 2 minutos y m2m	6.5	6.6	1.5151515	X	
Apagar bomba de alimentación y m2m	6.6	6.7	1.4925373	X	
Encender bomba dosificadora durante 2 minutos y m2m	6.4	6.6	3.030303	X	
Apagar bomba dosificadora y m2m	6.3	6.4	1.5625	X	
Apagar agitador y soplador, m2m	6	6.3	4.7619048	X	
Encender bomba de descarga durante 2 minutos y m2m	5.8	6	3.3333333	X	
Apagar bomba de descarga y m2m	5.7	5.8	1.7241379	X	
Encender bomba de purga durante 2 minutos y m2m	5.6	5.7	1.754386	X	
Apagar bomba de purga y m2m	5.5	5.6	1.7857143	X	
Encender bomba llenado tanque negro durante 2 minutos y m2m	5.3	5.4	1.8518519	X	
Apagar bomba llenado tanque negro y m2m	5.2	5.3	1.8867925	X	

Comentarios y sugerencias para mejorar la prueba

Las variaciones en el sensor de OD se debieron a efectos de dilución al introducir líquido o al dejar de airear

Las variaciones en los otros sensores se debieron a efectos de dilución al introducir líquido

Sensor de Temperatura en EOLI-SBR-UNAM-02 (PLANTA PILOTO) Procedimiento de prueba

Fecha: 19 / junio / 2005	Fecha de última calibración (si existe): -----		
Archivo BIOREC: ST			
Unidades de medida: grC			
Responsable IBTECH: Ing. Enrique Osnaya			
Responsable UNAM: Luis Rodrigo Cervantes Quiroz			
Nomenclatura del sensor en BIOREC: -----			
Nomenclatura del sensor en planos: TE/TT-104			
Intervalo de aceptación. (<2%)	Minimo	Máximo	dif (%)
Ruido	20.1	20.2	0.4950495
Error	-----	-----	-----

Condiciones de la prueba

Fluido utilizado: Agua residual
Volumen inicial (L): 750
Sólidos suspendidos volátiles (g/L): 2
Agitación (rpm): 150
Flujo de aire (L/min): 110
Modo de operación: Standby

Sensores adicionales funcionando durante TODA la prueba	Medida en la FC			Existe	
	Mínimo	Máximo	Dif (%)	Si	No
Oxígeno disuelto 1	6.2	6.7	7.4626866	X	
Oxígeno disuelto 2	-----	-----	-----		
pH	6.77	11.28	39.98	X	
ORP	140	160	12.5	X	
Otro (especificar)					

Procedimiento de la prueba

Acción	Medida en la PC			Conforme	
	Mínimo	Máximo	Dif (%)	Si	No
Apagar agitador y monitorear 2 minutos (m2m)	20.1	20.1	0	X	
Apagar soplador 1 y m2m	20.1	20.1	0	X	
Encender agitador y soplador 2, m2m	20.1	20.2	0.4950495	X	
Encender bomba de alimentación durante 2 minutos y m2m	20.2	20.3	0.4926108	X	
Apagar bomba de alimentación y m2m	20.2	20.3	0.4926108	X	
Encender bomba dosificadora durante 2 minutos y m2m	20.1	20.2	0.4950495	X	
Apagar bomba dosificadora y m2m	20.1	20.1	0	X	
Apagar agitador y soplador, m2m	20	20.1	0.4975124	X	
Encender bomba de descarga durante 2 minutos y m2m	20	20	0	X	
Apagar bomba de descarga y m2m	20	20.1	0.4975124	X	
Encender bomba de purga durante 2 minutos y m2m	20.1	20.1	0	X	
Apagar bomba de purga y m2m	20.1	20.1	0	X	

Comentarios y sugerencias para mejorar la prueba

Las variaciones en los otros sensores se debieron a efectos de dilución al introducir líquido

Soplador y agitador en ÉOLI-SBR-UNAM-02 (PLANTA PILOTO). Procedimiento de prueba

Fecha: 19 / junio / 2005

Archivo BIOREC: SyA

Unidades de medida: L/min; rpm

Responsable IBTECH: Ing. Enrique Osnaya

Responsable UNAM: Luis Rodrigo Cervantes Quiroz

Nomenclatura de soplador en BIOREC: AB-01/02

Nomenclatura de agitador en BIOREC: MA-01

Nomenclatura de soplador en planos: -----

Nomenclatura de agitador en planos: -----

Condiciones de la prueba

Fluido utilizado: Agua residual

Volumen inicial (L): 450

Sólidos suspendidos volátiles (g/L): 1.5

Modo de operación: Standby

Procedimiento de la prueba

Acción	Observaciones	Conforme	
		Si	No
Encender agitador y establecer velocidad de 150 rpm. Monitorear 5 minutos (m5m)	S/p *	X	
Revisar que la propela esté sumergida y no salpique	S/p	X	
Cambiar velocidad de agitación al máximo y m5m	S/p	X	
Cambiar velocidad de agitación a 150 rpm	S/p	X	
Encender soplador. Establecer un flujo de aire a la mitad de la escala en el controlador de flujo de aire	S/p	X	
Medir O ₂ y determinar el tiempo de saturación	S/p (tiempo de saturación= 18 min)	X	
Cambiar flujo al valor mínimo durante 15 minutos y observar si el soplador se sobrecalienta.	S/p	X	
Cambiar flujo de aire al valor máximo durante 15 minutos y observar si el soplador se sobrecalienta.	S/p	X	
Establecer un flujo de aire a la mitad de la escala	S/p	X	
Encender bomba alimentación hasta 3/4 Vmax y m5m	S/p	X	
Encender bomba dosificadora hasta Vmax y m5m	S/p	X	
* S/p: sin problemas			

Comentarios y sugerencias para mejorar la prueba

En las primeras pruebas el soplador se sobrecalentaba pero se adaptó un dispositivo de liberación de presión en un punto de la tubería que va del soplador al biorreactor