

22  
Zej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

Facultad de Estudios Superiores Zaragoza

Zaragoza Campo II

PROPUESTA PARA LA OPERACIÓN Y ARRANQUE  
DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES BASADA EN ZANJAS DE OXIDACIÓN

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el título de

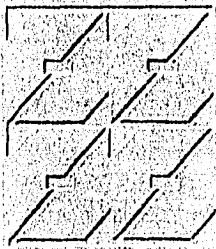
Ingeniero Químico

Presenta

Martín Márquez Moreno

Asesor : Adalberto Noyola Robles

México, D.F., noviembre de 1996



LO HUMANO, EJE DE  
NUESTRA REFLEXIÓN

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



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 ESTUDIOS  
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA DE  
INGENIERIA QUIMICA**

**OF/IQ/JU/082/026/96**

**C. MARTIN MARQUEZ MORENO  
P R E S E N T E.**

*En respuesta a su solicitud de asignación de jurado para el Examen Profesional, les comunico que la Jefatura a mi cargo ha propuesto la siguiente designación:*

**PRESIDENTE:   ING. GONZALO RAFAEL COELLO GARCIA**  
**VOCAL:           DR. ADALBERTO NOYOLA ROBLES**  
**SECRETARIO:   ING. MARTHA FLORES BECERRIL**  
**SUPLENTE:      ING. ANDRES AQUINO CANCHOLA**  
**SUPLENTE:      ING. DOMINGA ORTIZ BAUTISTA**

**A T E N T A M E N T E**  
**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**

**México, D.F., 4 de Septiembre 1996**

**Ing. Magín Enrique Juárez Villar**  
**Jefe de la Carrera**

## DEDICATORIA

### **A MI FAMILIA:**

*Dedicar unas cuantas palabras sería muy poco a los seres que quiero y respeto, pero espero que estas líneas reflejen lo mucho que yo deseo que sientan. Lo realizado hasta ahora por mí, es gracias a ustedes, el pensar que su preferencia de ofrecernos lo que podían a lo largo de toda la vida, a veces sin que nosotros pudiéramos agradecer, despierta una inquietud de dedicarles este su trabajo, porque ustedes merecen esto y otras satisfacciones más. A mi madre: Mary, por el amor que nadie cambiaría, por tu apoyo incalculable y porque has dado lo mejor, gracias. A mi padre: Armando, por su incansable lucha para que sus hijos tengan lo necesario y por su paciencia y cariño que ofreció en mi vida, por todo eso, gracias. A mi esposa: Lety, por la esperanza de seguir formando la familia que tanto hemos deseado, por los sueños e ilusiones que compartimos mutuamente y porque espero que toda la vida sigamos unidos como hasta hoy lo hemos hecho, bueno por todas las cosas bellas que nos esperan, gracias por dejar que siga amándote. A mis hermanos: Araceli, Lidia, Armando y Jesús, por el cariño y respeto que tenemos entre nosotros y el apoyo recibido de ustedes. Y por supuesto, cómo olvidar al jovencito de Alí a quien quiero tanto, porque cuando aprendas a leer sea un aliciente de superación, porque en la sangre lo llevas, al sobreponerte de lo duro que te recibió este mundo y yo rezaba porque no te alejara del verdadero cariño que hoy en día estás recibiendo por todos nosotros.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Al DR. ADALBERTO NOYOLA ROBLES por brindarme la oportunidad de participar en su grupo de trabajo y así ofrecerme parte de su conocimiento y experiencia para darme confianza y seguridad en la terminación de este proyecto.*

*A JORGE E. LOPEZ por sus valiosas aportaciones en la revisión y elaboración de este trabajo.*

*A los miembros del jurado: ANDRES AQUINO CANCHOLA, DOMINGA ORTIZ BAUTISTA, MARTHA FLORES BECERRIL Y RAFAEL COELLO GARCIA.*

*A los compañeros de trabajo que colaboraron con parte de este proyecto: Azael Velasco y Fernando Morgan.*

*Al personal que ha colaborado en la construcción y operación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Nuevo Laredo, así como a una parte del personal de la CNA por la ayuda brindada.*

*Al grupo de compañeros de trabajo que han hecho amena mi estancia en el instituto: Sarita, Juan Manuel, Gloria, Rosy, Miguel Angel, Adriana L., Miriam, Lucy, Ana Laura, Adriana R., Yolanda, Tere, Oscar, Uriel, Roberto, Pepe, Ariel, Santiago y Francisco.*

## CONTENIDO

### ÍNDICE DE TABLAS

### ÍNDICE DE FIGURAS

### LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

## CAPÍTULO I. TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE AGUAS RESIDUALES

1.1 CARACTERIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES.....	1-1
1.1.1 Panorama Nacional.....	1-2
1.1.2 Caracterización.....	1-3
1.2 FUNDAMENTOS DE LOS PROCESOS BIOLÓGICOS.....	1-6
1.2.1 Microbiología.....	1-6
1.2.2 Cinética Bacteriana.....	1-9
1.2.2.1 Condiciones Ambientales.....	1-13
1.2.2.2 Ecuaciones Cinéticas.....	1-14
1.2.3 Principales Procesos Biológicos.....	1-19
1.3 PROCESO DE LODOS ACTIVADOS.....	1-22
1.3.1 Descripción del Proceso.....	1-22
1.3.2 Diseño del Proceso.....	1-27
1.3.2.1 Características del Agua Residual.....	1-28
1.3.2.2 Parámetros de proceso.....	1-31
1.3.3 Variantes del Proceso de Lodos Activados.....	1-34
1.4 ZANJAS DE OXIDACIÓN.....	1-42

## CAPÍTULO II. DESCRIPCIÓN Y CRITERIOS DE DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE NUEVO LAREDO, TAMAULIPAS

2.1 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA.....	2-1
2.1.1 Generalidades.....	2-2
2.1.2 Criterios de Diseño Generales.....	2-4
2.1.3 Características del Agua Residual a Tratar.....	2-5
2.1.4 Calidad Requerida del Agua Tratada.....	2-6
2.1.5 Servicios Auxiliares.....	2-9
2.2 DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS.....	2-12
2.2.1 Tratamiento Preliminar.....	2-14
2.2.2 Tratamiento Secundario.....	2-19
2.2.3 Sistema de Desinfección.....	2-24
2.2.4 Sistema de Tratamiento de Lodo.....	2-30

## CAPÍTULO III. OPERACIÓN DE LA PLANTA

3.1 DESCRIPCIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN.....	3-1
3.1.1 Estación de Bombeo.....	3-1
3.1.2 Tratamiento Preliminar.....	3-1

3.1.3 Tratamiento Secundario.....	3-5
3.1.4 Sistema de Desinfección.....	3-8
3.1.5 Sistema de Manejo de Lodos.....	3-10
<b>3.2 MONITOREO DEL PROCESO.....</b>	<b>3-15</b>
3.2.1 Monitoreo Sensorial del Proceso.....	3-16
3.2.1.1 Monitoreo en el Tanque de Aireación.....	3-16
3.2.1.1.1 Color del licor mezclado y olor.....	3-17
3.2.1.1.2 Espuma.....	3-17
3.2.1.1.3 Crecimiento de Algas.....	3-17
3.2.1.1.4 Características de la Aireación.....	3-18
3.2.1.1.5 Acumulación de Sólidos.....	3-18
3.2.1.1.6 Forma del Flujo.....	3-18
3.2.1.1.7 Tacto en los Equipos.....	3-20
3.2.1.2 Monitoreo en el Clarificador Secundario.....	3-20
3.2.1.2.1 Lavado de Lodo.....	3-20
3.2.1.2.2 Abultamiento del Lodo.....	3-20
3.2.1.2.3 Levantamiento de Lodo (Flotación).....	3-24
3.2.1.2.4 Efluente Turbio del Clarificador Secundario.....	3-26
3.2.1.2.5 Lodos Dispersos.....	3-26
3.2.1.2.6 Flóculos Pequeños y Dispersos.....	3-26
3.2.2 Monitoreo Analítico del Proceso.....	3-27
3.2.2.1 Medición de la Sedimentabilidad del Lodo.....	3-28
3.2.2.2 Medición de la Concentración, Cantidad y Calidad del Lodo.....	3-31
3.2.2.2.1 Definición de "Calidad del Lodo".....	3-34
3.2.2.4 Medición de la Concentración de Oxígeno Disuelto.....	3-35
3.2.2.4 Determinación de la Calidad del Efluente.....	3-38
3.2.2.4.1 Medición de la Materia Orgánica.....	3-38
3.2.2.4.2 Determinaciones Complementarias.....	3-39
3.2.2.4.3 Otros Métodos para la Evaluación de la Calidad del Efluente.....	3-39
3.2.2.5 Medición de la Cama de Lodo en el Clarificador Secundario.....	3-41
3.2.2.6 Análisis al Microscopio de Lodo Activado.....	3-43
<b>3.3 CONTROL DEL PROCESO.....</b>	<b>3-49</b>
3.3.1 Control de la Aireación.....	3-49
3.3.1.1 Variación en la Tasa de Aireación.....	3-49
3.3.1.2 Factores que Afectan los Requerimientos de Oxígeno.....	3-50
3.3.2 Control de la Purga de Lodos.....	3-52
3.3.2.1 Métodos de Control de la Purga de Lodos.....	3-52
3.3.2.1.1 Control Manteniendo Constante la Concentración de Sólidos Suspendidos del Licor Mezclado (SSLM).....	3-53
3.3.2.1.2 Control Mediante la Relación F/M.....	3-54
3.3.2.1.3 Constante del Tiempo de Retención Celular Medio ( $\theta_c$ ).....	3-56
3.3.2.2 Selección del Método de Control de Purga.....	3-59
3.3.3 Control de la Recirculación de Lodos.....	3-63
3.3.3.1 Propósito de la Recirculación.....	3-64
3.3.3.2 Importancia por Corregir la Recirculación de Lodos.....	3-65
3.3.3.3 Métodos de Control de la Recirculación de Lodos.....	3-66
3.3.3.3.1 Balances de Masa.....	3-67
3.3.3.3.2 Sedimentabilidad.....	3-68
3.3.3.3.3 Monitoreo del Nivel de la Cama de Lodos en el Clarificador Secundario.....	3-69
3.3.3.3.4 Método de la Calidad del Lodo para el Control de la Recirculación.....	3-70
3.3.4 Nitrificación y Denitrificación.....	3-74
3.3.4.1 Operación de los Aireadores.....	3-76
3.3.4.2 Establecimiento de los Niveles de Energía para Aireación para el Control de la Nitrificación y Denitrificación.....	3-77

## CAPÍTULO IV. EL ARRANQUE DE LA PLANTA

4.1 ESTRATEGIA DE ARRANQUE.....	4-1
4.2 CAPACITACIÓN.....	4-2
4.2.1 Curso de Capacitación.....	4-2
4.2.2 Reconocimiento de las instalaciones.....	4-5
4.2.3 Visita a una planta similar.....	4-5
4.3 PROCEDIMIENTOS PRELIMINARES.....	4-5
4.3.1 Limpieza y prueba de líneas de servicios auxiliares.....	4-6
4.3.2 Revisión y limpieza de equipo y tuberías de proceso.....	4-7
4.3.3 Tuberías fuera de los límites de la planta.....	4-8
4.3.4 Inspección y prueba del equipo eléctrico.....	4-8
4.3.5 Comprobación de circuitos de control e instrumentos.....	4-9
4.3.6 Prueba de bombas y equipos rotatorios.....	4-10
4.3.7 Prueba de los sopladores.....	4-11
4.3.8 Prueba y revisión de los aireadores mecánicos.....	4-11
4.3.9 Prueba y revisión del equipamiento de los sedimentadores.....	4-12
4.3.10 Prueba y revisión del equipamiento del área de desinfección.....	4-12
4.3.11 Prueba y revisión del equipamiento del tanque de retención.....	4-12
4.3.12 Revisión de los lechos de secado.....	4-12
4.4 PRUEBAS HIDROSTÁTICAS.....	4-13
4.5 ARRANQUE.....	4-15
4.5.1 Programa de Arranque.....	4-15
4.5.2 Protocolo de Arranque.....	4-16
4.5.2.1 Estación de bombeo.....	4-16
4.5.2.2 Tratamiento Preliminar.....	4-19
4.5.2.3 Tratamiento secundario.....	4-21
4.5.2.4 Sistema de Desinfección.....	4-24
4.5.2.5 Tratamiento de lodos.....	4-27
4.5.3 Rutinas de Muestreo y Análisis Durante el Arranque.....	4-30

## CONCLUSIONES

## BIBLIOGRAFÍA

### ANEXOS:

ANEXO A. INDICADORES ANALÍTICOS

ANEXO B. PLANOS

ANEXO C. MICROORGANISMOS EN LODOS ACTIVADOS

ANEXO D. MODELO No. 1 DE LODOS ACTIVADOS

ANEXO E. DETERMINACIÓN DE LA ADICIÓN DE NUTRIENTES

ANEXO F. DETERMINACIÓN DE LA ADICIÓN DE CLORO PARA EL CONTROL DEL  
ABULTAMIENTO DE FILAMENTOSOS

ANEXO G. DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE COAGULANTE A ADICIONAR PARA  
AYUDAR A SEDIMENTAR EL LICOR MEZCLADO

ANEXO H. FOTOS



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Capítulo 1</b>		<b>Pág.</b>
1.1	Generación de aguas residuales municipales y carga orgánica	1-2
1.2	Composición de un agua residual doméstica	1-4
1.3	Biodegradabilidad de componentes orgánicos	1-5
1.4	Clasificación de microorganismos	1-6
1.5	Organismos principales	1-7
1.6	Clasificación de microorganismos por fuente de energía y carbono	1-8
1.7	Organismos heterótrofos	1-8
1.8	Forma de operación de los reactores	1-9
1.9	Tipos de reactores en el tratamiento de aguas residuales	1-10
1.10	Principales reactores biológicos en el tratamiento de aguas residuales	1-21
1.11	Concentración límite de contaminantes inorgánicos que afectan al proceso de lodos activados	1-31
1.12	Características más importantes en el proceso de lodos activados	
1.13	Criterios de diseño para procesos de aireación extendida	1-38
1.14	Descripción de las variantes del proceso de lodos activados	1-40
1.15	Características y parámetros de operación de los procesos de lodos activados	1-41
<b>Capítulo 2</b>		<b>Pág.</b>
2.1	Bases de diseño	2-4
2.2	Concentración de diversos contaminantes en la red de drenaje (mg/l)	2-7
2.3	Para centros de poblaciones hasta de 80,000 habitantes	2-8
2.4	Para centros de poblaciones mayores de 80,000 habitantes	2-8
2.5	Requerimientos de energía	2-10
2.6	Localización de líneas de drenaje	2-11
2.7	Algunos proveedores de paquetes tecnológicos en el tratamiento de aguas residuales	2-13
2.8	Porcentajes de remoción para el desarenador tipo vórtice	2-17
2.9	Criterios de diseño para los aireadores mecánicos	2-21
2.10	Capacidad y dimensiones de un cilindro de una tonelada	2-25
<b>Capítulo 3</b>		<b>Pág.</b>
3.1	Operación de la estación de bombeo en condiciones normales	3-1
3.2	Posición de las compuertas deslizantes y tubería bajo condiciones normales	3-3
3.3	Dosificación de cloro según proyecto	3-8
3.4	Indicadores sensoriales en el tanque de aireación	3-16
3.5	Monitoreo sensorial en el tanque de aireación de zanjas de oxidación	3-19
3.6	Variación del consumo de energía de los aireadores en función de la sumergencia del impulsor	3-50
3.7	Ventajas y desventajas de las formas de control del flujo de recirculación	3-67
<b>Capítulo 4</b>		<b>Pág.</b>
4.1	Instrumentación principal de la planta	4-9
4.2	Maniobras de paro y arranque de bombas	4-17
4.3	Programa de secuencia de arranque de las bombas	4-18
4.4	Localización de puntos, análisis, frecuencia y tipo de muestreo	4-32

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Capítulo 1</b>		<b>Pág.</b>
1.1	Aportación de contaminantes del agua	1-1
1.2	Carga orgánica por giro industrial, por ciento generado y acumulado	1-3
1.3	Crecimiento del número de bacterias	1-12
1.4	Crecimiento de la bacteria en función de su masa	1-13
1.5	Efecto de la disponibilidad del sustrato sobre la tasa de crecimiento	1-15
1.6	Esquema de un reactor de mezcla completa	1-18
1.7	Balace de carbono en el tratamiento aerobio y anaerobio	1-20
1.8	Digestión anaerobia	1-21
1.9	Configuración en la recirculación del proceso de lodos activados	
1.10	Estimación del grado de biodegradabilidad de aguas residuales en función de la DQO y de la DBO	1-23
1.11	Proceso de lodos activados convencional	1-35
1.12	Proceso de lodos activados con alimentación escalonada	1-35
1.13	Proceso de lodos activados de mezcla completa	1-36
1.14	Proceso de estabilización por contacto	1-37
1.15	Otras variantes del proceso de lodos activados	1-42
1.16	Tipos de zanjas de oxidación	1-43
1.17	Configuración de una zanja de oxidación en carrusel	1-45
1.18	Nitrificación y desnitrificación en zanjas de oxidación	1-45
1.19	Configuración de sistemas en carrusel de acuerdo a su forma	1-46
<b>Capítulo 2</b>		<b>Pág.</b>
2.1	Plano de distribución general	2-2
2.2	Localización del Proyecto	2-3
2.3	Estación de bombeo	2-3
2.4	Clasificación de industrias por giro	2-5
2.5	Perfil hidráulico líquido	2-12
2.6	Perfil hidráulico sólido	2-13
2.7	Bomba sumergible típica	2-14
2.8	Corte de la obra principal	2-15
2.9	Rejillas de barras de limpieza mecánica	2-16
2.10	Desarenador tipo vórtice	2-17
2.11	Criba para la remoción de sólidos finos	2-18
2.12	Esquema del tratamiento secundario	2-19
2.13	Arreglo y configuración de las zanjas de oxidación	2-20
2.14	Rango de sumergencia del impulsor del aireador mecánico	2-21
2.15	Caja de distribución de flujo (zanjas-clarificadores)	2-22
2.16	Clarificador secundario	2-23
2.17	Tren del sistema de desinfección con cloro	2-24
2.18	Cilindros de cloro de 908 Kg (2000 libras)	2-25
2.19	Arreglo del almacén de cloro	2-25
2.20	Evaporador de cloro	2-25
2.21	Clorador de operación manual con regulador de vacío	2-27
2.22	Eyector de 3"	2-28
2.23	Tanque de contacto y cámara de inyección con cloro	2-30
2.24	Bomba centrífuga de recirculación de lodos vertical	2-31
2.25	Bomba centrífuga de recirculación de lodos horizontal	2-32
2.26	Bomba de desplazamiento positivo en torsión para purga de lodos	2-33

<b>Capítulo 3</b>		<b>Pág.</b>
3.1	Diagrama del tratamiento preliminar	3-2
3.2	Caja de distribución de flujo de la obra de cabeza	3-4
3.3	Diagrama del tratamiento secundario	3-5
3.4	Componentes de un clarificador secundario	3-7
3.5	Diagrama del sistema de desinfección	3-9
3.6	Diagrama del manejo de lodos	3-10
3.7	Arreglo del sistema de recirculación de lodos	3-12
3.8	Lecho de secado típico con lodo listo para ser removido	3-14
3.9	Familia de curvas para la prueba de sedimentabilidad	3-29
3.10	Curva de sedimentación típica para un sistema de aireación extendida	3-30
3.11	Determinación de parámetros para la evaluación del proceso biológico	3-31
3.12	Familia de curvas para la prueba de concentración de lodo sedimentado	3-34
3.13	Control automático de un reactor de lodos activados para el suministro de oxígeno	3-37
3.14	Disco Secchi	3-40
3.15	Sección del clarificador secundario	3-41
3.16	Medición de la cama de lodos en el clarificador secundario	3-43
3.17	Tipos de protozoarios presentes en proceso de lodos activados convencional	3-45
3.18	Algunos microorganismos encontrados en un lodo activado	3-48
3.19	Flujo de recirculación bajo	3-66
3.20	Flujo de recirculación elevado	3-66
3.21	Método de balance de masa	3-68
<b>Capítulo 4</b>		<b>Pág.</b>
4.1	Estrategia de arranque	4-1
4.2	Programa de puesta en marcha y estabilización	4-16
4.3	Arranque de la estación de bombeo principal	4-18
4.4	Comportamiento de la concentración del sustrato y de los SSVLM en un reactor intermitente	4-24
4.5	Localización de puntos de muestreo	4-31

## Lista de símbolos y abreviaturas

1)	$\alpha$	Factor de corrección de transferencia de O <sub>2</sub>
2)	$\beta$	Factor de corrección de tensión superficial
3)	$\mu$	Tasa de crecimiento específico, día <sup>-1</sup>
4)	$\theta$	Tiempo de retención hidráulica de un reactor, h
5)	$\theta_c$	Tiempo de retención celular medio, día
6)	$\Theta$	Constante, (de 1.02 a 1.04 para RFC)
7)	$\theta_r$	Tiempo de retención hidráulica ( $V_r+V_r$ ), h
8)	$\mu_m$	Tasa máxima de crecimiento específico, día <sup>-1</sup>
9)	$C_i$	Concentración de i
10)	$C_{S20}$	Concentración de saturación de O <sub>2</sub> en agua a 20°C, 9 mg/l
11)	$C_L$	Concentración de O <sub>2</sub> en condiciones de operación, mg/l
12)	$C_{sat}$	Concentración de saturación de O <sub>2</sub> en agua a T y altura dada, mg/l
13)	$CLS_t$	Concentración de lodo sedimentado a un tiempo t, mg/l
14)	COT	Carbón orgánico total, mg/l
15)	DBO	Demanda bioquímica de oxígeno, mg/l
16)	DQO	Demanda química de oxígeno, mg/l
17)	E	Eficiencia del proceso, %
18)	F/M	Relación alimento-microorganismo
19)	IVL	Índice volumétrico de lodo
20)	k	Tasa máxima de utilización del sustrato por unidad de masa de microorganismos
21)	$k_d$	Coefficiente de decaimiento endógeno, día <sup>-1</sup>
22)	K <sub>t</sub>	Constante de velocidad media, mg/l
23)	N	Transferencia de O <sub>2</sub> en condiciones de operación, kgO <sub>2</sub> /hp/h
24)	N <sub>0</sub>	Transferencia en agua a 20°C y OD de 0, kg O <sub>2</sub> /hp/h.
25)	OD	Oxígeno disuelto, mg/l
26)	OUR	Tasa de utilización de oxígeno, mg/l/h
27)	pH	Concentración del ion de hidrógeno
28)	Q	Flujo volumétrico, l/s
29)	Q <sub>e</sub>	Flujo efluente de líquido de la unidad de separación, l/s
30)	Q <sub>r</sub>	Flujo de recirculación de lodos, l/s
31)	Q <sub>w</sub>	Flujo de purga, l/s
32)	$r_{20}$	Tasa de reacción a 20°C
33)	$r_i$	Velocidad de reacción de i
34)	$r_t$	Tasa de reacción a T°C
35)	S	Concentración del sustrato, mg/l
36)	S <sub>0</sub>	Concentración del sustrato en el influente, mg/l
37)	SAMM	Substancia activa al azul de metileno
38)	SSLM	Sólidos suspendidos del licor mezclado, mg/l
39)	SST	Concentración de sólidos suspendidos totales, mg/l
40)	SST <sub>r</sub>	Sólidos suspendidos en la recirculación, mg/l
41)	SSV	Sólidos suspendidos volátiles, mg/l
42)	SSV <sub>r</sub>	Sólidos suspendidos volátiles en la recirculación, mg/l
43)	t	Tiempo
44)	T	Temperatura
45)	TKN	Nitrógeno total de Kjeldahl, mg/l
46)	TRA	Tasa de recirculación actual

47)	TRD	Tasa de recirculación deseada
48)	U	Tasa específica de utilización del sustrato, mg/l/hr
49)	$U'_{DN}$	Tasa de desnitrificación global
50)	$U_{DN}$	Tasa de desnitrificación específica, mg N-NO <sub>3</sub> /mg SSVLM/d
51)	$V_s$	Volumen del tanque sedimentador
52)	$V_r$	Volumen del reactor más volumen del tanque sedimentador
53)	$VLS_t$	Volumen de lodo sedimentado a un tiempo t, m <sup>3</sup> /l
54)	$V_r$	Volumen del reactor
55)	X	Concentración de sólidos en el licor mezclado, mg/l
56)	$X_e$	Concentración de microorganismos en el efluente, mg/l
57)	$X_p$	Concentración de microorganismos en la línea de purga de lodo, mg/l
58)	Y	Coefficiente de producción máxima, mg/mg

## **RESUMEN**

**Este trabajo presenta un estudio profundo sobre el proceso de tratamiento de zanjas de oxidación tipo carrusel. La configuración utilizada en zanjas de oxidación es de flujo continuo pero formando un circuito, además de contar con características tanto de los reactores de mezcla completa y de flujo pistón e incluir condiciones de sistemas de aireación extendida. La configuración es generalmente concebida para que el flujo entre al reactor justo corriente abajo del punto de descarga. Además cuenta con dos zonas: una aerobia que corresponde a la remoción de materia orgánica (DBO) y la nitrificación; y una anóxica que tiene como parte fundamental la desnitrificación, así como parte de la remoción de DBO.**

**Este proyecto centra sus esfuerzos para la colaboración del arranque y operación de la planta de tratamiento de aguas residuales de Nuevo Laredo, Tamaulipas, la cual constituye una de las plantas más importantes a nivel nacional, debido a que forma parte de un proyecto fronterizo para una capacidad de 1360 litros por segundo. Por ello, la inquietud de incorporar conceptos más sólidos en beneficio del buen funcionamiento de la planta.**

**En el trabajo se analizan diferentes formas de operar la planta y ponerla en marcha, utilizando variables muy comunes en procesos biológicos de tipo aerobio, tales como, suministro de oxígeno, tasa de purga y tasa de recirculación.**

## INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de agua es muy variable en todo el territorio nacional y actualmente enfrenta una seria disminución, además de una creciente contaminación de los principales cuerpos de agua, susceptibles de servir como fuentes de abastecimiento. A lo largo del tiempo se ha acumulado un déficit en los servicios para la recolección y tratamiento de aguas residuales, ya que la infraestructura es insuficiente, o bien no recibe mantenimiento o se encuentra parcialmente abandonada, debido a que se carece de recursos financieros y personal calificado para operar y mantener en buenas condiciones las instalaciones.

Una de las situaciones que han obligado a los industriales y municipios a tomar conciencia, son las actuales políticas de control del medio ambiente, propiciadas fundamentalmente por las reglamentaciones ecológicas que se han venido instrumentando en los últimos años. Actualmente se tienen normas oficiales mexicanas para las descargas de aguas residuales y la autoridad cuenta con la facultad de otorgar o negar permisos para el vertimiento.

En un gran número de municipios no se tiene un control muy estricto en el vertimiento de contaminantes, por ello, es necesario tomar acciones inmediatas y concretas, para recuperar un sano equilibrio ecológico y mantenerlo mediante una adecuada administración, generando así, perspectivas para una mejor calidad de vida.

El tratamiento de aguas residuales favorece el reuso y reintegración del recurso a los sectores demandantes tanto de producción primaria como de transformación. Eventualmente, se lograría disminuir la competencia social por el agua potable. En este esquema es necesario contemplar elementos que reúnan a todos los consumidores hacia un mismo fin a través de programas de concientización de participación ciudadana sobre el costo de escasez del agua potable (uso racional).

El estado de Tamaulipas, particularmente la zona urbana de Nuevo Laredo, no escapa a dicha problemática, ya que las condiciones sanitarias actuales ponen en riesgo la salud y el bienestar de los habitantes o impiden los usos benéficos de dichas aguas. Por ejemplo, en esta zona se irrigan amplias superficies con agua extralda del Río Bravo; la utilización de esta agua contaminada en cultivos representa un riesgo potencial para la salud de la población que consume los productos agrícolas. Por tal motivo, se han realizado trabajos recientes de saneamiento en esta ciudad, que incluyen la construcción de una planta de tratamiento de tipo biológico con capacidad 1360 l/s. El tratamiento propuesto es una variante del proceso de fodos activados conocida como zanjas de oxidación tipo carrusel.

Estos trabajos de saneamiento nacen en primer instancia como parte de un proyecto de financiamiento conjunto para mejorar la calidad de la aguas del Río Bravo de la zona fronteriza Nuevo Laredo, Tamaulipas - Laredo Texas, coordinado por la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) integrado por las delegaciones de México y los Estados Unidos, con ayuda de la Comisión Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Nuevo Laredo (COMAPA) y la Comisión Nacional del Agua (CNA). Por común acuerdo en este proyecto las normas a aplicar para la descarga de efluentes de la planta de tratamiento fueron las estadounidenses.

Dentro del contexto anterior, el objetivo principal de esta tesis es proponer una estrategia de arranque de la planta de tratamiento de aguas residuales municipales de Nuevo Laredo, la cual incluya métodos de control del proceso para que la estabilización de la operación sea alcanzada. Para lograr esto se plantean los siguientes objetivos particulares:

1. Ubicar el proceso de zanjas de oxidación tipo carrusel dentro del tratamiento biológico de aguas residuales, estableciendo sus características de operación.
2. Realizar una revisión de las características de la planta, así como de los criterios de diseño generales.
3. Identificar las condiciones de operación de la planta, incluyendo formas de control y metodologías necesarias para la obtención de datos del proceso.
4. Proponer los procedimientos preliminares y protocolo de arranque requeridos, así como de un modelo que represente dicho arranque.



Para ello se han planteado cuatro capítulos: en el primero de ellos se revisará el panorama general del tratamiento biológico de aguas residuales y en particular el papel que toman las zanjas de oxidación; para el segundo capítulo la descripción y los criterios de diseño de la planta son importantes para comprender la constitución de la misma; el capítulo tres muestra aspectos operativos como la descripción de las condiciones normales de operación, métodos de control del proceso; y por último se identificará qué tipo de estrategia es requerida para el arranque de la planta.

**Capítulo 1**



**Tratamiento Biológico de Aguas Residuales**

## CAPÍTULO I

### TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE AGUAS RESIDUALES

#### 1.1 CARACTERIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES.

Todo cuerpo de agua como mares, ríos, lagunas, mantos acuíferos, etc., posee un contenido natural de materiales disueltos y suspendidos. Al entrar en contacto con zonas urbanas, agropecuarias e industriales estos cuerpos se convierten en receptores de sustancias orgánicas e inorgánicas contaminantes. En muchos casos éstas se encuentran en exceso y cambian la calidad del líquido sobrepasando sus posibilidades de autopurificación. Estas modificaciones de las condiciones físicas, químicas y biológicas dan como resultado un *agua contaminada*. Este problema y sus efectos en la ecología y la salud han sido un tema ampliamente tratado, para lo cual se han propuesto estrategias de control que aminoren sus efectos.

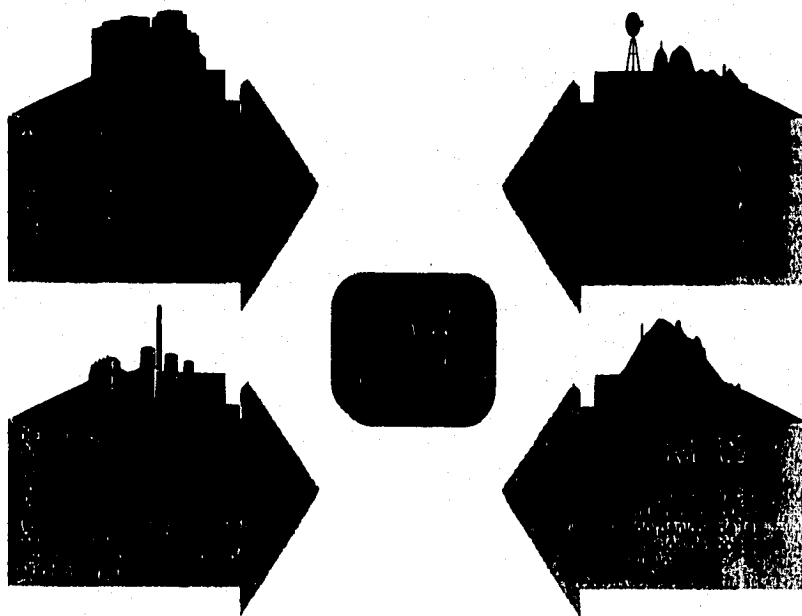


Figura 1.1 Aportación de contaminantes del agua.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

#### 1.1.1 Panorama Nacional.

En México, la generación de **aguas residuales municipales**, en los estados de Guanajuato, Jalisco, México, Michoacán, Nuevo León, Puebla, Veracruz y el Distrito Federal, donde se asienta el 54.5 % de la población nacional, alcanza aproximadamente el 60% del total nacional. La mayor aportación de aguas residuales, se generan en las grandes concentraciones de población, tales como las áreas metropolitanas de las ciudades de México, Guadalajara, Monterrey y Puebla, así como en las concentraciones urbanas de Torreón-Gómez Palacio-Ciudad Lerdo, San Luis Potosí-Soledad, Tampico-Madero y la ciudad de Toluca, incluyendo ciudades con una población mayor a los 500,000 habitantes (Mejía, 1995).

Tabla 1.1  
Generación de aguas residuales municipales y carga orgánica.

Entidad Federativa	Población a dic/1994 (habitantes)	%	Caudal Generado (m <sup>3</sup> /seg)	%	DBO Generado (ton/día)	%
Distrito Federal	8'786,987	10	24	14.0	633	12.8
México	10'472,796	12	23.2	13.8	653	13.2
Jalisco	5'567,614	6	13.6	8.0	372	7.5
Veracruz	6'645,114	8	11	6.5	346	7.0
Nuevo León	3'306,144	4	7.9	4.7	217	4.4
Guanajuato	4'249,160	5	7.8	4.6	234	4.7
Puebla	4'402,273	5	6.8	4.0	219	4.4
Michoacán	3'785,691	4	6.7	4.0	204	4.1
Nacional	86'687,927	100	167.7	100	4,945	100

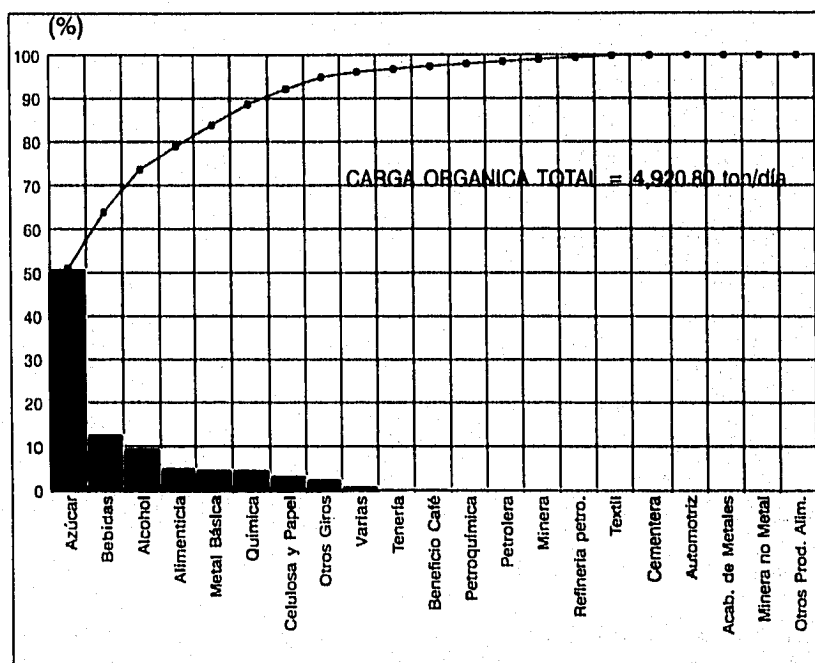
Fuente: Mejía, 1995.

La contribución principal de **carga orgánica por giro industrial** en orden decreciente corresponden a las industrias del azúcar, bebidas, alcohol, alimenticia, metal básica, química, celulosa y papel entre las más importantes (Mejía, 1995). Por ejemplo, en sólo 30 cuencas hidrológicas se genera el 91% de la DBO<sub>5</sub> total nacional, siendo la del río Papaloapan la de mayor contribución con 31 % del total nacional, y dentro de esta cuenca, la industria azucarera aporta el mayor índice con 66 % (740,223 kgDBO<sub>5</sub>/día). En la figura 1.2 se muestra la carga orgánica generada nacionalmente por giro industrial, la cual es de 4,920.80 ton DBO<sub>5</sub>/día.

Las mayores aportaciones de DBO<sub>5</sub> por **actividades pecuarias** se dan en las entidades de Veracruz, Jalisco, Chiapas, Chihuahua, Sinaloa, Michoacán, Tabasco y Sonora, generando en conjunto 15,301 ton/día que representan el 56 % del total nacional.

Respecto a los **aportes agrícolas**, México cuenta con una superficie superior a las 195'000,000 hectáreas, de las cuales únicamente el 8.2 % del total es utilizado para la agricultura; es decir, sólo alrededor de 15'990,000 hectáreas. De éstas, el 75.3 % corresponde a tierras de temporal y el restante 24.7 % se encuentra bajo riego distribuido en 79 distritos. La mayor parte del área bajo riego se localiza al norte de la República

Mexicana siendo los estados de Sinaloa, Tamaulipas, Chihuahua y Sonora en donde se ubican los distritos de riego con mayor cantidad de hectáreas (Mejía, 1995).



Fuente: Mejía, 1995.

Figura 1.2 Carga orgánica por giro industrial, por ciento generado y acumulado.

En la visión específica de este proyecto, los aportes de tipo municipal representan mayor interés, e incluyen normalmente descargas domiciliarias, industriales y aguas pluviales. Dentro de los principales contaminantes se encuentran materiales orgánicos solubles e insolubles, compuestos de nitrógeno, fósforo y sustancias inertes en forma soluble y coloidal.

### 1.1.2 Caracterización.

El agua residual es caracterizada en términos de su composición física, química y biológica. La composición e impurezas de un agua residual doméstica se muestra en la tabla 1.2.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

Tabla 1.2  
Composición de un agua residual doméstica.

Contaminante	Unidades	Concentración		
		Débil	Media	Fuerte
Sólidos Totales, STT	mg/l	350	720	1,200
Sólidos Disueltos Totales, SDT	mg/l	250	500	850
Sólidos Disueltos Fijos, SDF	mg/l	145	300	525
Sólidos Disueltos Volátiles, SDV	mg/l	105	200	325
Sólidos Suspendidos Totales, SST	mg/l	100	220	350
Sólidos Suspendidos Fijos, SSF	mg/l	20	55	75
Sólidos Suspendidos Volátiles, SSV	mg/l	80	165	275
Sólidos Sedimentables	ml/l	5	10	20
Demanda Bioquímica de Oxígeno 5 días, 20°C, DBO <sub>5</sub>	mg/l	110	220	400
Demanda Química de Oxígeno, DQO	mg/l	250	500	1,000
Nitrógeno Total, N	mg/l	20	40	85
Orgánico	mg/l	8	15	35
Amoniacal	mg/l	12	25	50
Nitritos	mg/l	0	0	0
Nitros	mg/l	0	0	0
Fósforo Total, P	mg/l	4	8	15
Orgánico	mg/l	1	3	5
Inorgánico	mg/l	3	5	10
Cloruros	mg/l	30	50	100
Sulfatos	mg/l	20	30	50
Alcalinidad	mg/l	50	100	200
Grasa y Aceites	mg/l	50	100	150
Calciformes Totales	no/100 ml	10 <sup>4</sup> -10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>8</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>9</sup>

Adaptado de Metcalf & Eddy, 1991

### Características Físicas.

Entre las características físicas se tienen los sólidos totales contenidos en el agua residual, los cuales están compuestos por materia flotante, materia sedimentable, materia coloidal y materia en solución. Otras características incluyen olor, temperatura, densidad, color y turbiedad.

### Características Químicas.

En este caso se tienen tres formas: (a) materia orgánica, (b) materia inorgánica, y (c) gases. Para el diseño y operación de una planta de tratamiento adquiere una especial importancia la medición del contenido orgánico.

Los compuestos orgánicos están conformados básicamente de una combinación de carbono, hidrógeno y oxígeno, además de incluir otros elementos importantes como nitrógeno y azufre. Los principales grupos de sustancias orgánicas son las proteínas (40-60 %), carbohidratos (25-50 %) y grasas y aceites (10 %). En la tabla 1.3 se muestra la biodegradabilidad de algunos compuestos orgánicos. Una forma de cuantificar la materia orgánica es el uso de los términos de demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y carbón orgánico total (COT).

Tabla 1.3  
Biodegradabilidad de compuestos orgánicos.

Compuesto	Comportamiento Frente a la Degradación Biológica
Hidrocarburos saturados	Prácticamente no degradables, a veces tóxicos
Olefinas con 5 a 7 átomos de carbono	Difíciles de degradar
Hidrocarburos clorados	No degradables
Alcoholes	Degradables, excepto: alcohol terbutílico, alcohol amílico, pentaeritritol
Fenoles	Degradables excepto: clorofenoles, particularmente el 2,4,5 triclorofenol
Aldehídos	Degradables, previa aclimatación de microorganismos, excepto: benzaldehído a concentraciones mayores de 0.8 mg/l
Ácidos orgánicos y sus sales ésteres	Degradables, excepto: tioácidos
Éteres	Poco degradables
Cetonas	Ocupan una posición intermedia entre los ácidos, alcoholes y aldehídos por una parte, y los éteres por otra
Aminoácidos	Casi siempre degradables
Aminas y amidas	Degradables: monoetanolamina, diamonaetano, acrilamida, di y trietanolamina, piridina, acetanilida Difícilmente degradables: tioacetamida morfalina y acetil morfalina
Compuestos cianurados	Degradables hasta concentraciones de 50 mg/l HCN después de la adaptación de los microorganismos
Compuestos no saturados	Degradables: alcohol alílico, crotanaldehído, buladieno, estírol
Sulfatos de alcohol	Fácilmente degradables
Hidratos de carbono	Fácilmente degradables; hidratos de carbono con moléculas simples y superiores como dextrina a el almidón

Fuente: DDF/DGCOH, 1982

Existen varios agregados inorgánicos los cuales pueden ser identificados por medio de parámetros como el pH (concentración del ión hidrógeno) y la alcalinidad. Además de estos se identifican compuestos inorgánicos como cloruros, nitrógeno (orgánico, amoniacal, nitritos y nitratos), fósforo, sulfuros, compuestos inorgánicos tóxicos y metales pesados.

En gases generalmente encontramos nitrógeno (N<sub>2</sub>), oxígeno (O<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), amoniaco (NH<sub>3</sub>) y metano (CH<sub>4</sub>); los tres últimos son derivados de la descomposición de la materia orgánica presente.

#### Características Biológicas.

Dentro de éstas se encuentran algunos grupos de microorganismos y ciertos organismos patógenos que se verán en detalle en la sección 1.2.1 (Microbiología); por ahora basta mencionar que casi todos los desechos orgánicos contienen grandes cantidades de microorganismos, siendo el número más probable para el agua residual superior a 10<sup>6</sup>/ml, y que aún después de un tratamiento todavía conservan una gran cantidad de estos.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

### 1.2 FUNDAMENTOS DE LOS PROCESOS BIOLÓGICOS.

Los sistemas para el tratamiento de aguas residuales no son recientes y desde principios del siglo XX se han ideado métodos y operaciones para acelerar los procesos naturales de autopurificación. La calidad del agua obtenida en cada uno de estos métodos es diferente y la índole de los contaminantes que son retirados varía. En general, por su eficiencia y por ser más económicos, los sistemas de tratamiento biológico son los más utilizados cuando se desea remover contaminantes de tipo orgánico biodegradable.

#### 1.2.1 Microbiología.

##### *Tipos de Microorganismos*

Como se mencionó anteriormente, es de gran importancia el rol que juegan los microorganismos dentro del tratamiento biológico de aguas residuales al reducir la carga orgánica. Por ello, es trascendental conocer los fundamentos de este proceso.

Los microorganismos son clasificados como eucariotas, eubacterias y archaeobacterias. Los procariontes (eubacterias y archobacterias) son de gran importancia en el tratamiento biológico. Las eucariotas incluyen los reinos; (a) vegetal, (b) animal, y (c) protista. En el proceso de lodos activados cuando se realiza un análisis al microscopio para determinar la eficiencia, las eucariotas suelen ser muy importantes en especial los protozoarios, ya que son más sensibles a cambios en el proceso que las bacterias, por lo que una calda significativa en el número de protozoarios presentes, indicaría que el proceso está en problemas o bien ha ocurrido un cambio substancial.

Tabla 1.4  
Clasificación de microorganismos.

Grupo	Reino	Miembros Representativos
Eucariotas	Animal	Crustáceos, Lombrices, Rotíferos
	Vegetal	Plantas acuáticas, Plantas de semilla Helechos, Musgos.
	Protista superior	Protozoarios, Algas, Hongos (mohos y levaduras)
Procariontes (Eubacterias, Archaeobacterias)	Protistas inferior	Algas verde-azules, bacterias

Adaptada de Metcalf & Eddy, 1991

Los procariontes son estructuras celulares simples y pequeñas (<5  $\mu\text{m}$ ) con núcleo primitivo de un sólo cromosoma circular, sin membrana nuclear. Su reproducción normalmente es por fisión binaria.



Las eucariotas son células más grandes (>20 µm) con una estructura más compleja y un núcleo verdadero que contiene varios cromosomas con membrana nuclear. Su reproducción puede ser asexual o sexual y tiene ciclos de vida muy complejos.

Hay un grupo adicional de microorganismos: los virus, que no pueden ser clasificados en ninguna de las dos clases anteriores y, por tanto, se consideran por separado.

**Tabla 1.5**  
**Organismos principales.**

<p><b>Virus</b></p> <p>Los virus son la forma más simple de organismo. Son parásitos obligados y que no tienen la habilidad para sintetizar nuevos compuestos. Son altamente específicos tanto en la que concierne al organismo huésped como la enfermedad que producen.</p>	<p><b>Bacterias</b></p> <p>Son organismos prokariotas unicelulares que pueden vivir como autótrofos o como heterótrofos y aprovechar el alimento soluble. Su reproducción es por fisión binaria y el tiempo de generación en algunas especies puede tomar sólo 20 min. en condiciones favorables.</p>
<p><b>Hongos</b></p> <p>Los hongos son prokariotas eucariotas aerobias, multicelulares, no fotosintéticas y heterótrofos. Algunos son saprófitos, obteniendo su alimento de la materia orgánica muerta. Son capaces de degradar compuestos orgánicos altamente complejos. Los hongos crecen en áreas reducidas y a bajos valores de pH. Los hongos existen en las aguas contaminadas y en los plantas de tratamiento biológico, especialmente cuando hay altas relaciones de C:N.</p>	<p><b>Algas</b></p> <p>Son microorganismos eucariotas, autótrofos, fotosintéticos, contienen clorofila y actúan como las principales productoras de materia orgánica en un ambiente acuático. Los compuestos inorgánicos tales como el dióxido de carbono, el amoníaco, los nitratos y los fosfatos proporcionan la fuente de alimento para sintetizar nuevas células de algas y para producir oxígeno. En ausencia de la luz solar, las algas viven en forma quimiosintética y consumen oxígeno.</p>
<p><b>Protozoarios</b></p> <p>Los protozoarios son microorganismos eucariotas unicelulares de 10 a 100 µm de longitud que se reproducen por fisión binaria. La mayoría son heterótrofos aerobios o anaerobios facultativos. Su fuente principal de alimento son las células bacterianas; sin embargo, no pueden sintetizar todos los factores y dependen de las bacterias para que se les suministren. Existen por lo menos de 15,000-20,000 especies, las cuales se clasifican en cinco grupos principales o clases: flagelados, sarcodinas, esporozoarios, ciliados y suclorarios. Estas tienen una gran participación en el control de procesos de lodos activados.</p>	<p><b>Formas Superiores de Vida</b></p> <p>Además de microorganismos, hoy en el agua natural macroorganismos más complejos, muchos de ellos visibles a simple vista. Entre éstos se incluyen las rotíferas que son animales multicelulares con un cuerpo flexible y cilios en la cabeza para atrapar alimento y darles movilidad, y crustáceos, que son animales multicelulares de concha dura. Los gusanos y las larvas de insectos viven en los depósitos del fondo y en algunos procesos de tratamiento biológico; son capaces de metabolizar sustancias orgánicas complejas que otros organismos no degradan rápidamente.</p>

Fuente: IMTA - Instituto de Ingeniería, UNAM, 1993

### Metabolismo microbiano.

Para que un microorganismo pueda reproducirse y funcionar apropiadamente necesita de: (a) una fuente de energía, (b) carbono para la síntesis de nuevo material celular (sustrato), y (c) elementos inorgánicos como nutrientes tales como nitrógeno, fósforo, azufre, potasio, calcio y magnesio. Algunos nutrientes orgánicos puede ser requeridos para la síntesis de la célula (factores de crecimiento). Si un organismo toma carbono a partir del dióxido de carbono, es llamado autótrofo y si usa carbono orgánico se le conoce como heterótrofo.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

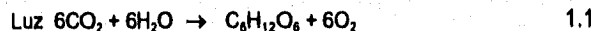
**Tabla 1.6**  
Clasificación de microorganismos por fuente de energía y carbono.

Clasificación	Fuente de Energía	Organismos Representativos	Fuente de Carbono
Autótrofos			
Fotoautótrofo	Luz	Algas, bacterias fotosintéticas	CO <sub>2</sub>
Quimioautótrofo	Energía química	Bacterias	CO <sub>2</sub>
Heterótrofos			
Fotoheterótrofo	Luz	Bacterias fotosintéticas	Carbono orgánico
Quimioheterótrofo	Energía química	Bacterias, hongos, protozoarios, animales	Carbono orgánico

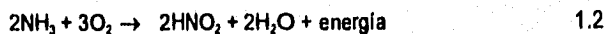
Fuente : Stainier, Ingraham, Wheelis & Painter, 1986

Los organismos autótrofos son capaces de sintetizar sus requerimientos orgánicos a partir de la materia inorgánica y pueden crecer independientemente de las sustancias orgánicas externas. Emplean dos métodos para alcanzar este fin:

1. Fotosíntesis: muchas plantas utilizan el carbono inorgánico y la radiación ultravioleta para producir materia orgánica y oxígeno.



2. Quimiosíntesis: se utiliza la energía química de los compuestos inorgánicos para suministrar la energía para la síntesis de sustancias orgánicas.



Los organismos heterótrofos requieren una fuente externa de materia orgánica; los tres tipos se muestran en la tabla 1.7.

**Tabla 1.7**  
Organismos heterótrofos.

Saprófitos	Fagófitos	Parásitos
Obtienen la materia orgánica soluble directamente del ambiente circulante o por la digestión extracelular de compuestos insolubles.	Utilizan partículas orgánicas sólidas.	Obtienen la materia orgánica a partir de los tejidos de otros organismos vivos, por lo se denominan parásitos.

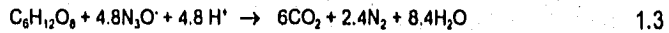
Fuente : IMTA - Instituto de Ingeniería, UNAM, 1993

El oxígeno también tiene un papel muy importante en el crecimiento de las células. Algunos organismos requieren la presencia de oxígeno molecular (O<sub>2</sub>) para su metabolismo. Tales microorganismos se conocen como aerobios obligados; es decir, el oxígeno es el aceptor final de electrones, lo cual favorece la síntesis de material celular de tal modo que el 60 % de la energía contenida en la materia orgánica es asimilada por las células y el 40 % restante se disipa en forma de calor (Noyola y Saval, 1992).

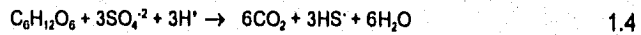
Los organismos para los cuales la presencia de oxígeno molecular es tóxica se conocen como anaerobios obligados. En este caso, otros compuestos oxidados como nitratos,

sulfatos o CO<sub>2</sub> actúan como aceptores finales de electrones; de esta forma se tienen tres vías de degradación, que se representan con las siguientes reacciones globales:

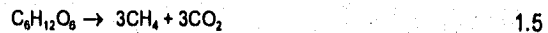
Desnitrificación (medio anóxico):



Sulfatorreducción:



Metanogénesis:


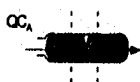
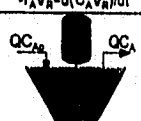


También existe una clase de organismos que pueden crecer en presencia o ausencia de oxígeno, y se llaman anaerobios facultativos.

### 1.2.2 Cinética Bacteriana.

Para el diseño y operación de un sistema de tratamiento biológico, es necesario comprender la cinética bacteriana, esto es debido a que la degradación del contenido orgánico en aguas residuales y la remoción de nitrógeno (nitrificación y desnitrificación), dependen de la tasa de crecimiento de las bacterias, así como de otros aspectos como el tipo del reactor biológico utilizado.

Tabla 1.8  
Forma de operación de los reactores

Forma de Operación	Flujo Pistón	Mezcla Completo
Intermitente o batch		 $-r_A V_R = d(C_A V_R)/dt$
Continua	 $d(C_A) \cdot r_A \cdot dV_R = 0$	 $Q(C_{A0} - C_A) - r_A V_R = 0$

Q=flujo volumétrico, C<sub>i</sub>=concentración de i, r<sub>i</sub>=velocidad de reacción de i, V<sub>R</sub>=volumen del reactor.

Fuente: Barona & Prengle, 1973



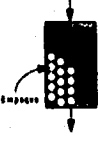

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

#### Tipos de Reactores

En materia de tratamiento de aguas residuales, el corazón de los procesos es sin duda el reactor biológico, donde se llevan a cabo las reacciones bioquímicas. Es tan importante considerar variables y ecuaciones involucradas para su diseño, como factores de eficiencia, selección, optimización y costos.

**Tabla 1.9**  
**Tipos de reactores en el tratamiento de aguas residuales**

Tipo de Reactor	Descripción
	<p>Estos equipos representan una condición intermedia con respecto a las condiciones de flujo entre los reactores de flujo pistón y mezcla completa.</p>
	<p>Los reactores de mezcla completa en serie se utilizan donde el modelo del régimen de flujo corresponde a reactores de flujo pistón y reactores de mezcla completa.</p>
	<p>Este equipo es en realidad una modificación del concepto del reactor de flujo pistón descrito antes. Su arreglo es vertical y generalmente en forma cilíndrica, además de estar rellena con algún medio de empaque, tal como rocas, escoria, cerámicos o plásticos. Con respecto al fluido estos pueden estar completamente sumergidos (filtro anaerobio) o ser dosificados intermitentemente (filtro percolador).</p>
	<p>Es también un arreglo cilíndrico vertical que contiene empaques en un lecho, los cuales se comportan como un líquido en ebullición. Durante la operación del reactor, el fluido se introduce en la parte inferior con una velocidad tal que "suspenden" los empaques sin arrastrarlos, formando así un "lecho expandido". Este lecho expandido tiene condiciones hidrodinámicas tales que el mezclado es muy bueno y produce una composición y temperatura uniformes en el sentido radial del equipo, aunque existe dispersión en el sentido axial de la cama de lechos, con el correspondiente retromezclado.</p>

Adaptado de Melcalif & Eddy, 1991

Los reactores empleados en estos procesos tienen una gran variedad de formas, dimensiones y aplicaciones. Los reactores pueden ser clasificados bajo dos puntos de vista: por su forma (diseño) y por su tipo o forma de operación. De acuerdo con el tipo de operación (en función de las condiciones de flujo), los reactores se clasifican en intermitentes por lotes o *batch*, continuos y semicontinuos. En la tabla 1.8 se muestra la clasificación de estos reactores, mientras que en la tabla 1.9 se presentan otros tipos. Se identificarán a continuación los reactores de tipo intermitente o *batch*, y continuo.

**Reactores intermitentes.** En estos reactores se introduce el fluido al principio de la operación y se procesa durante el tiempo necesario para obtener la conversión biológica y/o química deseada, sin agregar o extraer materiales del reactor. La composición de la

mezcla y la velocidad de la reacción cambian con respecto al tiempo. El reactor generalmente consiste en un tanque agitado.

**Reactores de flujo continuo (RFC).** En este caso se introducen los reactivos y se remueven los productos en forma simultánea y continua. Dentro de los reactores continuos más importantes están:

(a) Reactor de flujo pistón. La composición de la mezcla varía con su posición en el equipo, y cada posición le corresponde una composición, la cual tiende a ser constante si el equipo se opera bajo condiciones de régimen permanente, es decir alimentación constante, remoción constante del fluido, etc. El reactor puede tener forma alargada, ya sea un sistema tubular o una torre vacía o empacada.

(b) Reactor continuo de mezcla completa. La concentración promedio de reactivos y productos dentro del reactor es la misma que la corriente de salida del producto.

#### *Crecimiento Bacterial*

El sistema más simple que puede ser considerado, es un sistema *batch* conteniendo un cultivo de microorganismos puros. El crecimiento puede ser representado mediante un gráfico del número logarítmico contra tiempo, tal como se puede ver en la figura 1.3, donde inicialmente un número pequeño de microorganismos son inoculados en un volumen fijo de un medio de cultivo, y el número de microorganismos viables es registrado como una función del tiempo. El modelo basado en el número de células, se representa en cuatro diferentes fases:

**Fase lag.** En esta fase se adiciona el inóculo a un medio de cultivo. Tal periodo representa el tiempo requerido por los microorganismos para aclimatare a su nuevo ambiente y comenzar a reproducirse.

**Fase de crecimiento logarítmico.** Durante este periodo las células se dividen a una tasa determinada por su tiempo de generación y su habilidad para procesar alimento.

**Fase estacionaria.** En esta fase la población permanece estacionaria. Las razones de este fenómeno son: (a) que las células han agotado el sustrato o nutrientes necesarios para el crecimiento, y (b) que el crecimiento de nuevas células está compensado por la muerte de células viejas.

**Fase de mortandad.** Durante esta fase, la tasa de mortandad de las bacterias excede la producción de nuevas células. Esta tasa se expresa generalmente en función de la

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

---

población y características ambientales. En algunos casos, la fase log-muerte es la inversa de la fase log-crecimiento.

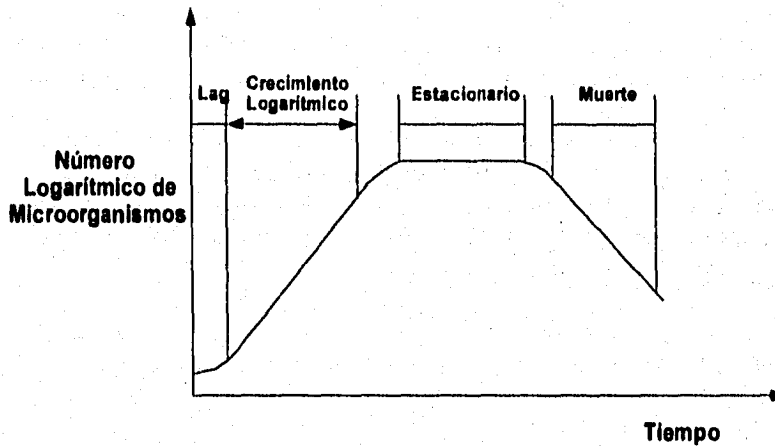


Figura 1.3 Crecimiento del número de bacterias.

Fuente : Mondl & Bell, 1982

La misma información puede ser expresada con mayor utilidad en masa bacteriana en vez de expresarse en términos del número de microorganismos, como se muestra en la figura 1.4. El modelo de crecimiento consiste de las siguientes cuatro fases:

**Fase lag.** Aquí, otra vez, requiere de un tiempo de aclimatación para su ambiente nutricional. La fase lag en términos de masa de microorganismos es más corta que la correspondiente a la fase en términos de su número, porque la masa comienza a incrementarse antes de que la división de la célula tome lugar.

**Fase de crecimiento logarítmico.** En esta etapa siempre existe un exceso de alimento alrededor de los microorganismos y la tasa de metabolismo y crecimiento es sólo función de la habilidad de los microorganismos para procesar el sustrato.

**Fase de decaimiento del crecimiento.** La tasa de incremento de la masa de la bacteria decrece debido a las limitaciones en la disponibilidad de alimento.

**Fase endógena.** Los microorganismos son forzados a metabolizar su propio protoplasma sin reemplazo debido a que la concentración de alimento disponible está en un mínimo. Durante esta fase, los nutrientes que permanecen dentro de las células muertas (material

del citoplasma) se liberan de estas células, y sirven como sustrato a las vivas, quedando membranas celulares no degradables relativamente ligeras comparadas con el material del citoplasma, y que presentan dificultad en la sedimentación.

Los sistemas *batch* pasan por todas las fases mostradas en las figuras 1.3 y 1.4. Aunque los reactores de mezcla completa no entran en esta clasificación, suelen utilizarse ciertos intervalos del comportamiento de la bacteria.

Algunas veces el control de sistemas de tratamiento biológico se realiza mediante el control del sustrato disponible para los microorganismos; para esto es necesario que las condiciones ambientales requeridas para el crecimiento de microorganismos sean las adecuadas.

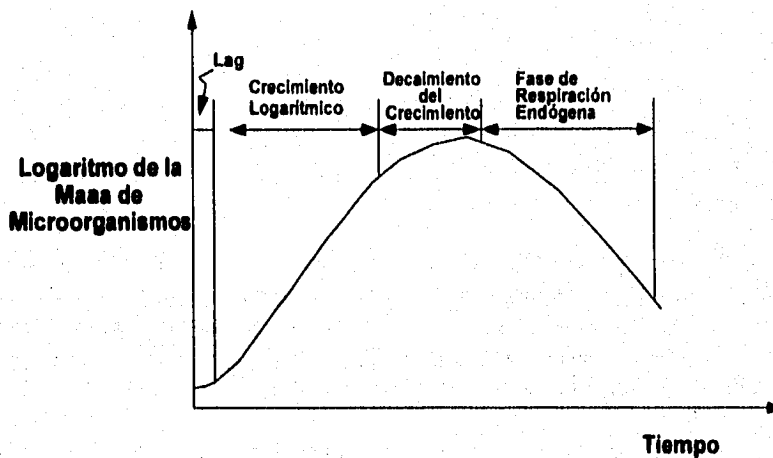


Figura 1.4 Crecimiento de la bacteria en función de su masa.

Fuente : Mandl & Bell, 1982

#### 1.2.2.1 Condiciones Ambientales.

Las condiciones ambientales pueden ser controladas por regulación del pH y temperatura, adición o exclusión de oxígeno disuelto y nutrientes, así como por una mezcla apropiada. La temperatura puede ser involucrada en el diseño y operación de un reactor de mezcla completa, sin embargo, su control no es muy común al menos en los procesos aerobios. El oxígeno disuelto (OD) y el pH en el reactor pueden ser controlados para algún nivel deseado. Los nutrientes más comunes en el control de una planta de

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

---

tratamiento de aguas residuales son el nitrógeno y el fósforo. Para el adecuado crecimiento de las células se requiere de 1 mg/l de nitrógeno por cada 20 mg/l de DBO<sub>5</sub>; los requerimientos de fósforo son de aproximadamente 1 mg/l PO<sub>4</sub>-P por cada 100 mg/l de DBO<sub>5</sub>. También se requiere de algunas trazas de iones inorgánicos. En general el requerimiento de nutrientes dependerá de la cantidad de células en síntesis, que a su vez dependerá del diseño del proceso.

#### 1.2.2.2 Ecuaciones Cinéticas.

Tanto en sistemas batch como de mezcla completa, la tasa de crecimiento de microorganismos de la figura 1.4 puede ser representada durante la fase de crecimiento logarítmico como:

$$\frac{dX}{dt} = \mu X \quad 1.6$$

donde  $X$  = concentración de Microorganismos, mg/l

$\mu$  = tasa de crecimiento específico, día<sup>-1</sup>

$t$  = tiempo, días

En sistemas de mezcla completa, el crecimiento logarítmico logra mantenerse en varios puntos sobre la curva dependiendo de la modificación del proceso. Pero para procesos como el de zanjas de oxidación que operan en aireación extendida, los microorganismos se ven obligados a la fase de respiración endógena, además de metabolizar su propio protoplasma y nutrientes liberados por las células muertas.

Para determinar el control apropiado de un reactor biológico, es necesario conocer la relación entre la tasa de crecimiento de la biomasa y la utilización del sustrato. Para esto se utiliza un modelo desarrollado por Monod que asume un cultivo puro y un sistema continuo, donde expresa la relación entre el crecimiento de microorganismos y la disponibilidad del sustrato de la siguiente manera:

$$\mu = \mu_m \frac{S}{K_s + S} \quad 1.7$$

donde  $\mu$  = tasa de crecimiento específico, día<sup>-1</sup>

$\mu_m$  = tasa máxima de crecimiento específico, día<sup>-1</sup>

$S$  = concentración del sustrato, mg/l

$K_s$  = constante de velocidad media, mg/l



Como se muestra en la figura 1.5, la tasa de crecimiento microbiano se incrementa al igual que la disponibilidad del sustrato, hasta alcanzar una tasa de crecimiento máximo ( $\mu_m$ ).

El modelo Monod ha sido utilizado para desarrollar modelos cinéticos de sistemas biológicos. Para influentes altamente variables y sistemas de tratamiento diferentes, existen métodos representativos que podrían utilizarse; por ejemplo, en la actualidad se conocen los trabajos realizados por la **International Association on Water Pollution Research and Control (IAWPRC)** referidos como el Modelo No. 1 (Henze, 1987) y el Modelo No. 2 (Henze, 1995) sobre lodos activados (Activated Sludge Model No. 1 & No. 2) que pueden predecir, mediante modelos cinéticos, la relación entre la tasa de crecimiento de la biomasa y la utilización del sustrato, dependiendo de diferentes factores como la naturaleza de las aguas residuales a tratar.

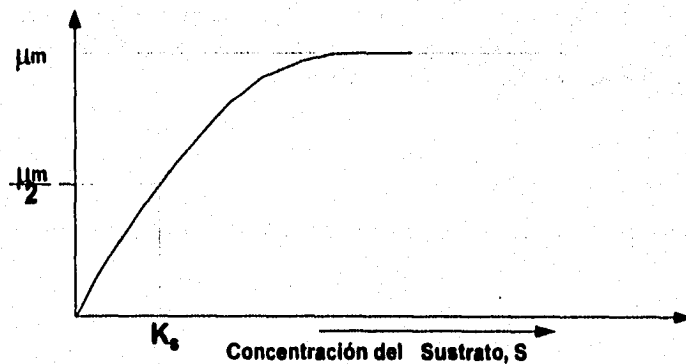


Figura 1.5 Efecto de la disponibilidad del sustrato sobre la tasa de crecimiento.

Fuente : Melcoll & Eddy, 1991

El valor de  $\mu$  de la ecuación 1.7 es sustituido en la ecuación 1.6, la expresión resultante para la tasa de crecimiento es:

$$\left(\frac{dX}{dt}\right)_{\text{crecimiento}} = \frac{\mu_m X S}{K_s + S} \quad 1.8$$

Tanto en sistemas batch como en continuos, una porción del sustrato es convertido a nuevas células y una porción es oxidada a otros productos inorgánicos y orgánicos. Se ha observado que la cantidad de nuevas células producidas para un sustrato dado y por unidad de tiempo, está determinada por la relación entre la tasa de utilización del sustrato y la tasa de crecimiento, como se muestra a continuación.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

---

$$\left(\frac{dX}{dt}\right)_{\text{crecimiento}} = -Y \frac{dS}{dt} \quad 1.9$$

donde  $Y$  = coeficiente de producción máxima, mg/mg (representa la masa de células formadas por masa de sustrato utilizada).

La producción de la biomasa depende de:

- El estado de oxidación de la fuente de carbono y elementos nutrientes
- El grado de polimerización del sustrato
- Vía de metabolismo
- La tasa de crecimiento
- Varios parámetros físicos ambientales

Para poder expresar el cambio en la concentración del sustrato debido a la actividad biológica, se define un nuevo término  $k$ , como la tasa máxima de utilización del sustrato por unidad de masa de microorganismos, siendo esta:

$$k = \frac{\mu_m}{Y} \quad 1.10$$

Combinando las ecuaciones 1.8, 1.9 y 1.10 se obtiene la tasa de utilización del sustrato:

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{kXS}{k_1 + S} \quad 1.11$$

En un reactor de flujo continuo y para otros sistemas de tratamiento, no todas las células están en la fase de crecimiento logarítmico. Consecuentemente, la expresión para la tasa de crecimiento debe ser corregida para proveer la energía necesaria para el mantenimiento de las células. Otros factores, tales como muerte y predación, deben también ser considerados. Generalmente, estos factores son trabajados conjuntamente y asumiendo que el decaimiento en la masa celular causado por ellos es proporcional a la concentración de microorganismos presentes. Este decaimiento es a menudo identificado en la literatura como decaimiento endógeno, y puede ser expresado como:

$$\left(\frac{dX}{dt}\right)_{\text{decaimiento}} = -k_d X \quad 1.12$$

donde  $k_d$  = coeficiente de decaimiento endógeno, día<sup>-1</sup>

Si se combina el efecto de la fase endógena con la ecuación de crecimiento:

$$\left(\frac{dX}{dt}\right)_{\text{neto}} = \left(\frac{dX}{dt}\right)_{\text{crecimiento}} - \left(\frac{dX}{dt}\right)_{\text{decaimiento}} \quad 1.13$$

Tasa de crecimiento neto = tasa de crecimiento - tasa de decaimiento en fase endógena

De la ecuación 1.8 y 1.12 se obtiene la tasa de crecimiento neto de microorganismos:

$$\left(\frac{dX}{dt}\right)_{\text{neto}} = \frac{\mu_m X S}{k_s + S} - k_d X \quad 1.14$$

o, en términos del sustrato (con 1.10 y 1.11 en 1.14):

$$\left(\frac{dX}{dt}\right)_{\text{neto}} = -Y \left(\frac{dS}{dt}\right) - k_d X \quad 1.15$$

Las constantes utilizadas en estas expresiones varían con la temperatura. El efecto que tiene este parámetro sobre el proceso de tratamiento, concretamente en un reactor de flujo continuo es más complejo. La temperatura afecta a las tasas de reacción bioquímica, tasas de reacción química, solubilidad de los gases, tasas de transferencia de gas y sedimentabilidad de sólidos. Tales efectos se expresan globalmente como:

$$r_T = r_{20} \Theta^{(T-20)} \quad 1.16$$

donde  $r_T$  = tasa de reacción a T °C

$r_{20}$  = tasa de reacción a 20°C

$\Theta$  = constante, (de 1.02 a 1.04 para RFC)

#### Aplicaciones

Para un reactor de mezcla completa se puede realizar un balance de masa de microorganismos de la siguiente forma (figura 1.6):

$$\frac{dX}{dt} V_r = Q X_0 - Q X + V_r \left(\frac{dX}{dt}\right)_{\text{neto}} \quad 1.17$$

donde  $Q$  = flujo, volumen/tiempo

$X_0$  = Concentración de microorganismos en el influente, mg/l (sólidos suspendidos volátiles (SSV))

$V_r$  = Volumen del reactor

$X$  = Concentración de microorganismos en el reactor, mg/l SSVLM

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

Por substitución de los términos desarrollados en la ecuación 1.14 y asumiendo 1) estado estacionario, y 2)  $X_0$  pequeño, se puede escribir:

$$Q/V_r = \frac{\mu_n S}{k_s + S} - k_d = 1/\theta \quad 1.18$$

donde  $\theta$  es conocido como el tiempo de retención hidráulica de un reactor. Además el término  $1/\theta$  corresponde a la tasa de crecimiento específico neto, que es la propuesta por Van Uden.

Para este tipo de reactor el término  $1/\theta$  también corresponde a  $1/\theta_c$  donde  $\theta_c$  es el tiempo de retención celular medio. En el tratamiento de aguas residuales,  $\theta_c$  se define como la masa de organismos en el reactor respecto a la masa de organismos removidos del sistema cada día. Para el reactor de la figura 1.6, la expresión del tiempo de retención hidráulica es la siguiente:

$$\theta = \frac{V_r X}{Q X} = \frac{V_r}{Q} \quad 1.19$$

Asumiendo los mismos puntos anteriores (ec. 1.6) y realizando de igual forma un balance de masa para el sustrato se obtiene:

$$S_0 - S = \theta \left( \frac{k S X}{K_s + S} \right) \quad 1.20$$

donde  $S_0$  = Concentración del sustrato en el influente, mg/l

$S$  = Concentración del sustrato en el efluente, mg/l

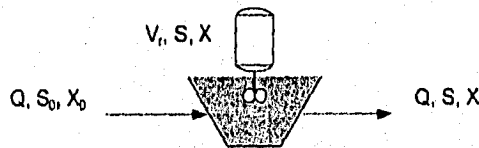


Figura 1.6 Esquema de un reactor de mezcla completa.

### 1.2.3 Principales Procesos Biológicos.

Como se mencionó con anterioridad, los procesos biológicos transforman a través de microorganismos el material orgánico (coloidal y disuelto) en sólidos sedimentable floculentos que puedan separarse en tanques de sedimentación, logrando también la remoción de algunos nutrientes. Aunque estos procesos (tratamiento secundario) se usan junto con los físicos y químicos empleados en tratamiento preliminar del agua residual, no deben considerarse como sustitutos de aquéllos. La sedimentación primaria es muy eficaz para separar los sólidos suspendidos de cierto tamaño, en tanto que los procesos biológicos lo son en la separación de sustancias orgánicas solubles y de tamaño coloidal.

Existen dos tipos principales de tratamiento biológico: los aerobios y los anaerobios, aunque adicionalmente se pueden citar los facultativos, anóxicos y un último que es la combinación entre los cuatro anteriores (Metcalf & Eddy, 1991). Estos sistemas a su vez se diferencian de dos formas: (a) *los sistemas con microorganismos en crecimiento sobre una superficie o biomasa fija*, destacando entre ellos los filtros percoladores, biodiscos y los filtros anaerobios; y (b) *los sistemas con microorganismos en suspensión*, dentro de los cuales se encuentran los lodos activados, lagunas de estabilización, los digestores anaerobios y procesos anaerobios de contacto.

Estos procesos biológicos se diferencian básicamente por sus vías metabólicas: la aerobia, que requiere de oxígeno, y la anaerobia, que no lo necesita; así como los microorganismos anaerobios facultativos que actúan en uno u otro de los mecanismos anteriores de acuerdo a las condiciones del medio. Hasta ahora la más utilizada es la aerobia; sin embargo, desde hace algunos años los procesos anaerobios han empezado a desarrollarse más y son atractivos para países en desarrollo debido a sus costos razonables. Para propósitos de este proyecto se analizarán con más detalle el proceso aerobio, y en menor grado condiciones anóxicas. Las principales diferencias entre un sistema aerobio y anaerobio de acuerdo a un balance de la materia orgánica (en forma de carbono) se esquematiza en la figura 1.7.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

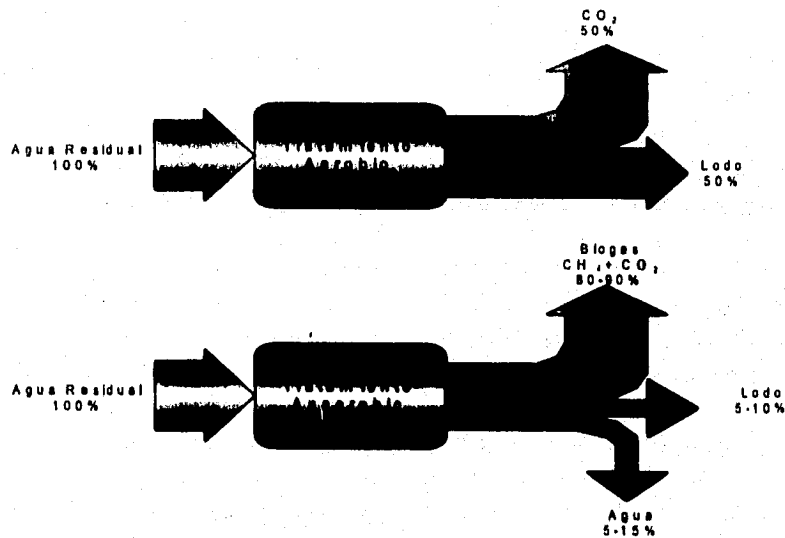


Figura 1.7 Balance de carbono en el tratamiento aerobio y anaerobio.

Dado que los microorganismos son los responsables de llevar a cabo el proceso biológico, sus características metabólicas determinarán el tipo de aplicación, así como sus ventajas y desventajas.

### *Sistemas aerobios*

La tecnología del tratamiento por vía aerobia está bien desarrollada y es sin duda la más comúnmente aplicada. La experiencia acumulada y las altas eficiencias en la remoción de materia orgánica son algunas de las razones de su aceptación. Presenta ciertos inconvenientes, pero son aceptados ante la confiabilidad de la tecnología. Existen un buen número de procesos aerobios, los que a su vez se subdividen en tipos y pueden agruparse en procesos de tipo extensivo (lagunas), procesos de biomasa en suspensión (lodos activados en diversas formas) y procesos de biopelícula (filtros percoladores, discos biológicos rotatorios, entre otros).

### *Sistemas anaerobios*

Para llevar a cabo la digestión anaerobia se han propuesto varios procesos con configuraciones diferentes que buscan optimizar el sistema. Los reactores anaerobios se dividen en tres generaciones de acuerdo a la evolución tecnológica que presenten. La primera corresponde a aquellos procesos donde la biomasa se encuentra en suspensión; en la segunda generación, los microorganismos son retenidos en el reactor mediante un

soporte o bien por sedimentación, y los de la tercera donde los microorganismos están adheridos en un soporte que se expande o fluidifica. En la figura 1.8 se muestra un esquema de la digestión anaerobia como alternativa tecnológica.

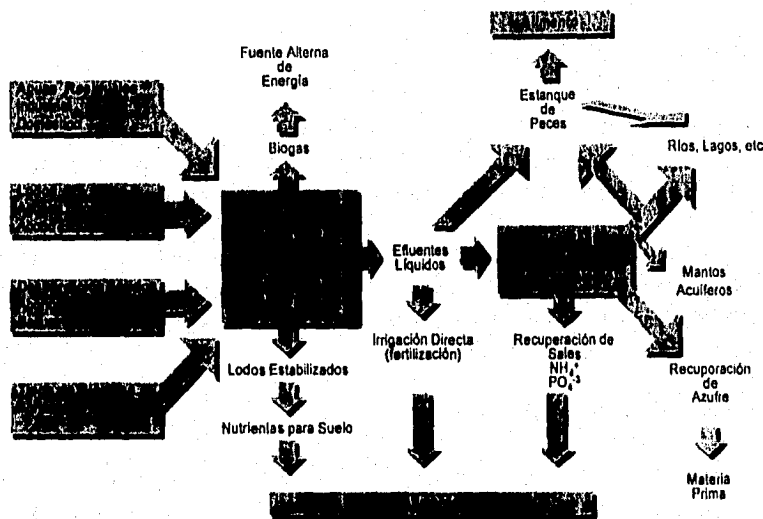


Figura 1.8 Digestión Anaerobia.

Fuente: Lettinga & Hulshoff, 1991

En la tabla 1.10 se muestra la clasificación de los sistemas de tratamiento biológico más importantes.

Tabla 1.10  
Principales reactores biológicos en el tratamiento de aguas residuales

Proceso	Cultivo	Nombre Común	Uso
Aerobio	Suspensión	Proceso de lodos activados	Remoción DBO, (nitrificación, desnitrificación)
		Laguna aireada	Remoción DBO, (nitrificación)
	Fijo	Filtro percolador	Remoción DBO, nitrificación
		Disco biológico rotatorio	Remoción DBO, (nitrificación)
Anaerobio	Suspensión	Reactor anaerobio de contacto	Remoción DBD, estabilización desecho, (desnitrificación)
		Reactor de biomasa granulada	Remoción DBO
	Fijo	Filtro anaerobio	Remoción OBO, estabilización desecho, (desnitrificación)
Procesos de lagunaje		Reactor de lecho Expandido	Remoción DBO, estabilización desecho, (desnitrificación)
		Laguna aerobia	Remoción DBO
		Laguna facultativa	Remoción DBO, (nitrificación)
		Laguna de maduración	Remoción DBO
		Laguna anaerobia	Remoción DBO, (astabilización desecho)

Adaptado de Melcaill & Eddy, 1991

## **ARRANQUE Y OPERACIÓN**

### **Tratamiento de Aguas Residuales**

---

#### **1.3 PROCESO DE LODOS ACTIVADOS**

##### **1.3.1 Descripción del Proceso**

El sistema de lodos activados fue desarrollado por Arden & Lockett en Inglaterra en 1914, y fue implementado años más tarde en los Estados Unidos. Es un método altamente efectivo para tratar por medio de microorganismos, los compuestos orgánicos.

El proceso se efectúa de la siguiente manera: hay una estabilización biológica del agua residual en un reactor bajo condiciones aerobias; el ambiente aerobio se logra por el uso de difusores o bien por aireación mecánica. El proceso involucra oxidación controlada con un cultivo microbiano, principalmente bacterias.

Los componentes de estos sistemas son:

- Un reactor biológico diseñado para trabajar en modo de mezcla completa y/o flujo pistón, con un tiempo de retención hidráulica ( $\theta$ ) que puede generalmente ir desde 0.5 a 24 hr.
- Un sistema de aporte de oxígeno al medio.
- Un sistema de mezcla del contenido del reactor con el fin de conseguir un contacto adecuado microorganismos-alimento-oxígeno.
- Un sistema de separación de la fracción sólida del licor mezclado en el agua tratada.
- Un sistema de recolección de los sólidos separados y su recirculación al reactor.
- Un sistema de purga y tratamiento del exceso de sólidos biológicos generados en el proceso de tratamiento.

La configuración de la línea de purga puede ser tomada del reactor o bien de la línea de recirculación, como se puede ver en la figura 1.9.

Para comprender el tratamiento a través de lodos activados será necesario definir aspectos como la microbiología, parámetros y diseño del proceso que a su vez servirán para preclar el proceso de zanjas de oxidación.



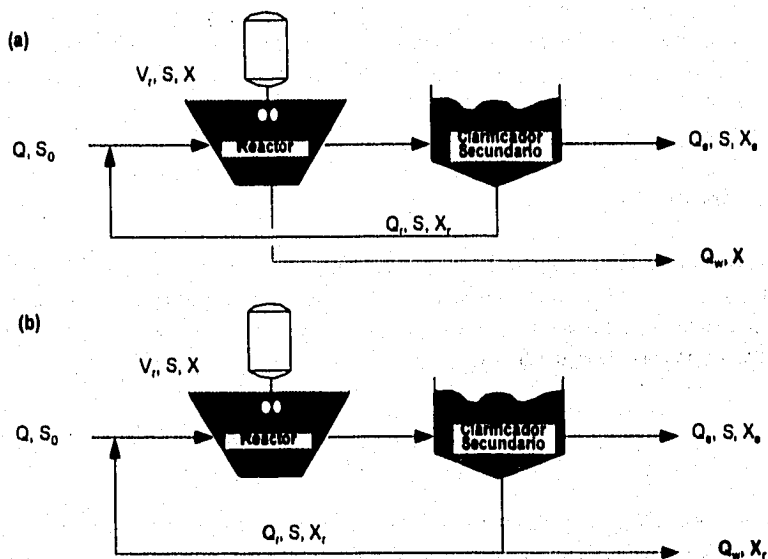


Figura 1.9 Configuración en la recirculación del proceso de lodos activados.

Fuente: Melcoll & Eddy, 1991

#### Microbiología del proceso

El objetivo general de un análisis de microbiología es obtener información rápida y confiable acerca de la eficiencia en la operación de la planta con el fin de prever cambios o ajustes. Por ejemplo, el análisis microscópico puede prevenir un problema de abultamiento (*bulking*, sección 3.2.1) y eventualmente poder realizar ajustes en la operación antes de que el problema sea serio.

Las bacterias en el proceso de lodos activados incluyen miembros entre otros del género *Pseudomonas*, *Zooglea*, *Achromobacter*, *Flavobacterium*, *Nocardia*, *Micobacterium*, *Bedellovibrio*, y dos géneros para nitrificación: *Nitrosomas* y *Nitrobacter*. Adicionalmente varias formas filamentosas: *Sphaerotilus*, *Beggiatua*, *Thiothrix*, *Lecicothix* y *Geotrichum*. La actividad metabólica de otros organismos, tales como protozoarios (flagelados, ciliados y sarcodinas), rotíferos y algunos nemátodos es también importante en el sistema de lodos activados. Estos últimos actúan como "pulidores" del efluente. Los protozoarios degradan bacterias dispersas que no floculan, mientras que los rotíferos eliminan algunas pequeñas partículas biológicas floclantes que no sedimentan.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

---

En cuanto a los parámetros ambientales del sistema, se reporta que los bajos valores de oxígeno, favorecen el desarrollo de *Sphaerotilus*, por lo que se recomienda no operar con concentraciones menores de 2 mg/l. Las temperaturas superiores a 30°C inhiben el crecimiento de las algas y los valores de pH bajos provocan el crecimiento de organismos filamentosos en el lodo.

#### Análisis del proceso

Tiempo de residencia celular medio  $\theta_c$ . Para un sistema como el que se muestra en la figura 1.9(a), el tiempo de residencia celular medio  $\theta_c$  (definido como la masa de organismos en el reactor dividido por la masa de organismos removidos del sistema cada día), es dado por la siguiente expresión:

$$\theta_c = \frac{V_r X}{Q_w X + Q_r X_r} \quad 1.21$$

donde  $Q_w$  = flujo de líquido conteniendo las células biológicas a ser removidas (purga)

$Q_r$  = flujo efluente de líquido de la unidad de separación

$X_r$  = concentración de microorganismos en el efluente de la unidad de separación

Para el sistema mostrado en la figura 1.9(b), el tiempo de residencia celular medio  $\theta_c$  está dado por la siguiente expresión.

$$\theta_c = \frac{V_r X}{Q_w X_r + Q_r X_r} \quad 1.22$$

donde  $X_r$  = concentración de microorganismos en la línea de purga de lodo

$Q_w$  = tasa de purga de células de la línea de recirculación

Tasa de utilización del sustrato. Esta es definida como:

$$U = \frac{\left(\frac{dS}{dt}\right)}{X} = \frac{Q(S_0 - S)}{V_r X} = \frac{S_0 - S}{\theta X} \quad 1.23$$

donde  $U$  = tasa específica de utilización del sustrato, mg/l/hr, o rapidez de cambio en el sustrato debido a la actividad biológica por unidad de masa de organismos.

Tiempo de retención hidráulica. El tiempo de retención hidráulica  $\theta_r$  para el sistema es definido como:

$$\theta_c = \frac{V_r}{Q} = \frac{V_r + V_s}{Q} \quad 1.24$$

donde  $V_r$  = volumen del reactor más volumen del tanque sedimentador

$Q$  = flujo del influente

$V_r$  = volumen del reactor

$V_s$  = volumen del tanque sedimentador

El tiempo de retención hidráulica medio para un reactor  $\theta$ , está definido como:

$$\theta = \frac{V_r}{Q} \quad 1.25$$

Esta variable se interrelaciona con la carga másica, concentración de sólidos y edad celular para obtener un diseño correcto.

Ahora bien, retomando la **figura 1.9(a)** y realizando un balance de masa para los microorganismos en el sistema se puede escribir lo siguiente:

$$\frac{dx}{dt} V_r = QX_0 - [Q_w X + Q_e X_e] + V_r \left( \frac{dx}{dt} \right)_{neto} \quad 1.26$$

Acumulación = entrada - salida + tasa de crecimiento neto

Substituyendo la tasa de crecimiento neto de microorganismos en términos del sustrato (ec. 1.15) y asumiendo estado estacionario y  $X_0$  pequeño, se tiene lo siguiente:

$$\frac{Q_w X + Q_e X_e}{V_r X} = -Y \frac{\left( \frac{dS}{dt} \right)}{X} - k_d \quad 1.27$$

El término de la izquierda de la ecuación anterior es el inverso del tiempo de residencia celular medio, bajo este concepto y substituyendo la tasa de utilización del sustrato (ec. 1.23) en la ecuación 1.27, se tiene la siguiente expresión:

$$\frac{1}{\theta_c} = YU - k_d \quad 1.28$$

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

---

De la ecuación 1.23 se puede observar que para determinar la tasa específica de utilización del sustrato  $U$ , es necesario conocer la masa de microorganismos activos, lo que hace de  $U$  un parámetro de control poco práctico.

Usando  $\theta_c$  como un parámetro de control, no hay la necesidad de determinar la cantidad de sólidos biológicos activos en el sistema ni la necesidad de evaluar la cantidad de alimento utilizado (sustrato). El control de  $\theta_c$  es realizado simplemente sobre la tasa de crecimiento de microorganismos y por tanto, sobre el grado de estabilización del lodo; con ello un porcentaje específico de la cantidad de células en el sistema debe ser purgada cada día. De este modo, si se determina que  $\theta_c$  de 10 días es necesario para una eficiencia deseada, entonces 10 % del total de la masa de las células será purgada del sistema por día.

Para un sistema de mezcla completa con recirculación, el desecho de las células en exceso puede realizarse mediante la purga desde el reactor o bien desde la línea de recirculación del licor mezclado. Si se elige la primera opción (ecuación 1.21) y los sólidos en el efluente son insignificantes sólo se requerirá conocer  $Q_w$  y  $V_r$  para determinar  $\theta_c$ . La purga de células de esta manera provee un método directo para el control y medición de  $\theta_c$ . En la práctica, para obtener un lodo más espeso, la purga es realizada de la línea de recirculación. Asumiendo que  $X_r$  es muy pequeña, la ecuación 1.22 puede aproximarse de la siguiente manera:

$$\theta_c \approx \frac{V_r X}{Q_w X_r} \quad 1.29$$

De este modo, se requerirá conocer la concentración de microorganismos tanto del licor mezclado como del lodo de retorno en la línea de recirculación.

Un término relacionado muy de cerca con la tasa de utilización específica  $U$  y que en la práctica se utiliza comúnmente para el diseño y como parámetro de control, es conocido como la relación alimento-microorganismo (F/M), que es definida como:

$$F/M = \frac{S_0}{\theta X} \quad 1.30$$

Los términos de  $U$  y  $F/M$  están relacionados por la eficiencia del proceso:

$$U = \frac{(F/M)E}{100} \quad 1.31$$

donde E es la eficiencia del proceso definida como:

$$E = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100 \quad 1.32$$

Otras relaciones de gran ayuda, que se obtienen realizando un balance para los microorganismos y sustrato, son las siguientes:

$$X = \frac{\theta_c Y(S_0 - S)}{\theta (1 + k_d \theta_c)} \quad 1.33$$

y

$$S = \frac{K_s (1 + \theta_c k_d)}{\theta_c (Yk - k_d) - 1} \quad 1.34$$

### 1.3.2 Diseño del Proceso.

El diseño y operación de un sistema de lodos activos dependerá de múltiples variables, algunas son variables de proceso sobre las que se tiene control, y otras son características del agua residual o parámetros del sistema.

Las características del agua residual o parámetros del sistema son:

- Caudal y carga
- Biodegradabilidad
- Sólidos en suspensión
- N-NH<sub>3</sub>, O TKN
- Temperatura
- Deficiencias de nutrientes
- Toxicidad

Las variables de proceso básicas son:

- Tiempo de retención hidráulica,  $\theta$
- Concentración de sólidos en el reactor, SSLM
- Tiempo de retención celular medio o edad del lodo,  $\theta_c$
- Relación alimento-microorganismo, F/M

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

---

- Producción de lodos en exceso y purga,  $Q_w$
- Requerimiento de oxígeno,  $\text{kg O}_2$
- Índice volumétrico de lodos, IVL
- Flujo de recirculación de lodos,  $Q_r$

#### 1.3.2.1 Características del Agua Residual

##### *Caudal y carga*

Los procesos de lodos activados se dimensionan para determinadas condiciones de caudal y carga, donde se habrán tenido en cuenta sus posibles variaciones. Los picos del caudal pueden provocar la pérdida de biomasa en el effluente del clarificador debido a una sobrecarga hidráulica.

Los picos en la carga pueden provocar deficiencias en la oxigenación del reactor biológico, con el consiguiente deterioro de la calidad del effluente.

##### *Biodegradabilidad*

Un criterio de biodegradabilidad aceptable en el proceso de lodos activados para aguas residuales es la relación DQO/DBO. Una relación por debajo de 2.5, significa que el agua residual es biológicamente degradable. Una relación arriba de 2.5 es indicativo de que algunos compuestos orgánicos son resistentes a la biodegradación, por lo que se recomienda un tiempo de residencia más largo, o inclusive se cuestionaría la aplicación de los procesos biológicos. Lo anterior puede limitarse con la adición de un adsorbente, como por ejemplo carbón activado o tierra de diatomea, los cuales son parcialmente reciclados con el lodo. La relación DQO/DBO arriba de 5, significa que el agua puede contener sustancias tóxicas que reducen la actividad metabólica de los organismos en la biomasa. La adición de un adsorbente puede resolver el problema, o inclusive un proceso de oxidación no biológica (tal como oxidación con ozono y ultravioleta). La figura 1.10 muestra los tres regímenes de biodegradabilidad basados en la relación DQO/DBO. Para aguas residuales domésticas, esta relación es aproximadamente 1.6 (Gray, 1989). Existe un gran número de procedimientos para determinar la biodegradabilidad (Eckenfelder, 1989). Sin embargo, la relación DQO/DBO es una herramienta ampliamente utilizada en el diseño y monitoreo de los procesos biológicos.

##### *Nitrógeno*

El nitrógeno generalmente se encuentra en forma amoniacal y orgánica en las aguas residuales municipales y en concentraciones de 10 a 30 mg/l. Las formas de nitrógeno en

plantas de tratamiento o en los cuerpos receptores pueden intervenir de diferentes formas:

- El efecto del amoníaco en la desinfección (alta demanda de cloro).
- La toxicidad del amoníaco en los organismos acuáticos.
- La demanda de oxígeno de formas no oxidadas de nitrógeno.
- El papel del nitrógeno en la eutroficación.
- Aspectos de salud pública por presencia de nitritos y nitratos.

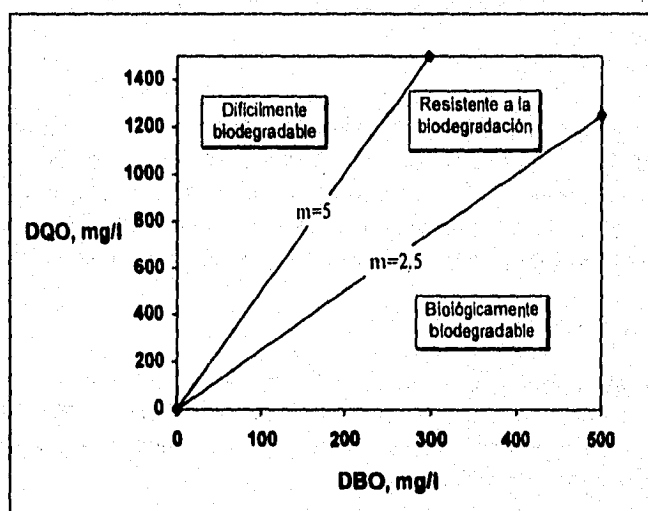
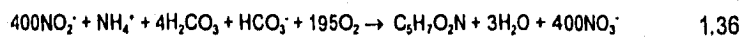
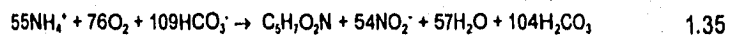


Figura 1.10 Estimación del grado de biodegradabilidad de aguas residuales en función de la DQO y la DBO.

Fuente: Coppi, Malek & Bradford, 1993

Por estas razones, muchas plantas requieren de la nitrificación y desnitrificación para la eliminación de nitrógeno.

La nitrificación es el proceso que convierte el nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_3$ ) a nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) a través de las siguientes etapas:



## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

---

Por su parte, el proceso de desnitrificación, es la conversión de nitratos (que fueron producidos durante la nitrificación) y nitritos a gas nitrógeno bajo condiciones anóxicas (ver ecuación 1.3).

La oxidación del ión amonio a nitrato ocurre con la formación intermedia del ión nitrito. El nitrito es relativamente inestable, y en la mayoría de los casos, es rápidamente convertido a ión nitrato. Los microorganismos responsables son los del género *Nitrosoma* (nitrito) y *Nitrobacter* (nitrito a nitrato). Estas reacciones bioquímicas dependen del pH y la temperatura. Para un intervalo operativo se propone un pH de 7.9 a 8.9.

#### *Temperatura*

La temperatura del agua a tratar afectará directamente la actividad biológica de los microorganismos, y por tanto tendrá una incidencia directa sobre la relación alimento-microorganismo y sobre la edad del lodo ( $t_c$ ). La temperatura del reactor afectará la producción de lodos y el requerimiento de oxígeno, y por tanto, el volumen del propio reactor. Por ello, se recomienda que dentro del tanque de aireación sea de 15° a 35°C.

#### *Deficiencia de nutrientes*

Las aguas residuales municipales no presentan deficiencias en nutrientes que puedan afectar al crecimiento bacteriano. Se sugiere una relación  $DBO_5:N:P$  de 100:5:1 en peso, para un correcto funcionamiento del proceso. En caso de déficit, deberá agregarse al agua residual los nutrientes necesarios.

#### *Toxicidad*

La existencia de compuestos tóxicos para los microorganismos, normalmente debido a presencia de descargas industriales, puede dificultar la operación de la planta de tratamiento e impedir alcanzar la calidad de efluente deseada.

En ciertos casos, los microorganismos pueden adaptarse a la presencia de compuestos tóxicos tras un período de aclimatación, e incluso pueden llegar a degradarlos. Los compuestos más comunes que inhibirán el proceso biológico se reflejan en la tabla 1.11.



**Tabla 1.11**  
**Concentración límite de contaminantes inorgánicos**  
**que afectan el proceso de lodos activados.**

Contaminantes	Concentración (mg/l)		
	No afecta al proceso (menor de)	Afecta la remoción de DBO	Afecta la Nitrificación
Aluminio	-	15 a 26	-
Amoniaco	100	-	-
Arsénico	0.1	0.1	-
Borato	0.1	1.0	-
Cadmio	-	1.0 a 100	-
Calcio	-	2,500	-
Cromo (hexavalente)	-	1.0 a 10	0.25
Cromo (trivalente)	-	50	-
Cobre	0.2	0.1	0.005 a 0.5
Cianuro	0.1	0.3 a 100	0.34
Hierro	-	1.0 a 1000	-
Manganeso	10.0	20.0	-
Magnesio	-	-	50
Mercurio	-	0.1	-
Níquel	-	1.0	0.25
Plata	-	9.0	-
Plomo	0.1	0.1	0.5
Sulfuro	-	20.0	-
Zinc	10.0	10.0	-
Fenoles:			
Fenol	-	200	4 a 10
Cresol	-	-	4 a 16
2-4 Dimetilfenol	-	-	460

Fuente: WPCF, 1987; Eckenfelder, 1989; TA, C. Tecnología del agua, 1995

### 1.3.2.2 Parámetros de proceso

#### *Tiempo de retención hidráulica, $\theta$*

Esta variable se utiliza como parámetro de diseño del volumen del reactor, generalmente tiene un valor entre 4 y 8 h para sistemas convencionales. Para procesos de baja carga es de 20 a 30 h y para zanjas de oxidación entre 8 y 36 h. En la tabla 1.13 se presentan algunos valores típicos para diferentes formas de operación en procesos de lodos activados.

#### *Concentración de sólidos en el reactor, SSLM*

La concentración de sólidos en un reactor de mezcla completa suele mantenerse entre 1,000 y 4,000 mg/l y para el caso de las zanjas de oxidación alcanzan valores de 3,000 a 6,000 mg/l. Se recomienda no superar los valores de 5,000 mg/l, ya que ello daría problemas de sedimentación en el clarificador secundario.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

---

Determinado el volumen del reactor, se puede conocer la cantidad de microorganismos presentes en el mismo, y por ello, la cantidad de materia orgánica biodegradable que el sistema es capaz de eliminar

#### *Tiempo de retención celular medio, $\theta_c$*

El valor de edad celular escogido para el diseño es función del grado de tratamiento requerido. Un valor elevado de edad celular implica manejar una gran cantidad de sólidos en el sistema y permite obtener un efluente de alta calidad. La producción de lodos en exceso será en este caso relativamente baja. La edad celular nos indicará asimismo el grado de estabilización del lodo. Dado que las bacterias nitrificantes presentan un crecimiento más lento que las heterotróficas, para procesos convencionales ( $\theta_c=5$  a 15 días), es necesario mantener una edad celular mínima, que dependerá de la temperatura, si se desea obtener la nitrificación del efluente. Para procesos de aireación extendida los valores son altos; para el caso de zanjas de oxidación son de 10 a 30 días.

#### *Relación alimento-microorganismo, F/M*

Esta variable expresa la cantidad de alimento aportado por unidad de masa de microorganismos y por unidad de tiempo. Para procesos convencionales se encuentra entre 0.2 y 0.4 kg DBO<sub>5</sub>/kg ssvLW/d y para zanjas de oxidación de 0.05-0.30 kg DBO<sub>5</sub>/kg ssvLW/d.

Una relación F/M baja (<0.3) representa un proceso de aireación extendida. En tal situación la cantidad de alimento (sustrato) presente es insuficiente para mantener el crecimiento de microorganismos, por lo que se ven obligados a vivir en la fase de respiración endógena y a metabolizar tanto su propio protoplasma como el material del citoplasma de las células muertas. Como consecuencia de este fenómeno, las membranas celulares no degradables que se obtienen son relativamente ligeras respecto al material del citoplasma, ocasionando una sedimentación con mayor dificultad. En consecuencia los clarificadores secundarios deben trabajar a cargas hidráulicas superficiales superiores a las convencionales.

#### *Producción de lodo en exceso y purga, $Q_w$*

En el proceso de tratamiento se produce lodo en exceso debido a la síntesis de material celular y a la entrada de sólidos en suspensión junto con el influente. Será necesario purgar una cantidad de lodo periódicamente con el fin de mantener una concentración de biomasa (lodo joven) en el reactor.

Para procesos de aireación extendida el objetivo fundamental es reducir la manipulación de lodos, por lo que normalmente no se incluye la clarificación primaria como parte del proceso.

*Requerimiento de oxígeno, kg O<sub>2</sub>*

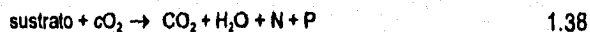
En un sistema de lodos activados se dan varios procesos en los que existe un requerimiento de oxígeno.

a) Síntesis de células, en función de la DBO<sub>5</sub> eliminada.



b) Oxidación de nitrógeno amoniacal (ver ecuaciones 1.35 y 1.36).

c) Respiración endógena.



d) Recuperación de oxígeno por desnitrificación (ecuación 1.3).

Como prevención a deficiencias de oxígeno que dificultarían la degradación de la materia orgánica, se suele operar el reactor con una concentración de oxígeno residual de 0.5 a 2 mg/l.

Conocido el oxígeno teórico requerido, y la eficiencia de la transferencia de oxígeno para un equipo de aireación determinado, se puede calcular la potencia necesaria de aireación. Siempre debe mantenerse un cierto nivel de agitación en el reactor para evitar la sedimentación de los sólidos o zonas muertas donde falte oxígeno.

*Índice volumétrico de lodos y recirculación de lodos (IVL, Q<sub>r</sub>)*

La finalidad de la recirculación de lodo es mantener una concentración de sólidos en el tanque de aireación. Un método muy utilizado para controlar el caudal de lodo de recirculación, así como el funcionamiento de la planta, se basa en una medida empírica conocida como índice volumétrico de lodos (IVL). Este índice se define como el volumen en mililitros ocupado por un gramo de sólido del licor mezclado del lodo activado, tras una sedimentación de 30 minutos en un cilindro graduado de 1,000 ml. El IVL nos indicará asimismo las características de sedimentabilidad del lodo y dependerá de la concentración de sólidos en el reactor. Para concentraciones de SSLM DE 2,000 a 3,500 mg/l se consideran valores adecuados de IVL de 80 a 150 ml/g. Valores superiores de IVL pueden provocar pérdida de sólidos en el efluente del clarificador secundario. Para el caso de zanjas de oxidación un valor de IVL adecuado puede variar de 70 a 110 ml/g. Pero hay que recordar que los clarificadores secundarios en los procesos de aireación extendida, incluyendo las zanjas de oxidación, trabajan con tiempos de retención superiores a los convencionales, por ello es preferible utilizar un IVL a 60 minutos con valores representativos de 70 a 110 ml/g para una buena sedimentación.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

**Tabla 1.12**  
Características más importantes en el proceso de lodos activados.

Parámetro	Descripción
Criterios de Carga	Relación alimento-microorganismo (F/M) Tiempo de Retención celular ( $\theta_c$ )
Selección del Tipo de Reactor	Cinética de reacción Transferencia y necesidades de oxígeno Naturaleza del agua a tratar Condiciones ambientales locales Costos de construcción y de operación y mantenimiento
Producción de lodo y control del proceso.	Es importante conocer la cantidad de lodo producida diariamente, ya que ello afectará al diseño de las instalaciones de eliminación y manipulación del lodo.
Transferencia de oxígeno	$\text{kg O}_2/\text{d} = (\text{masa total de DBO}_5 \text{ utilizada, kg/d}) \cdot (1.42 \text{ masa de organismos purgados, kg/d})$ $\text{DBO}_5 = 1.42 (\text{masa de células, g/m}^3)$
Necesidad de nutrientes	En cantidades sustanciales: $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ , $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{PO}_4^{3-}$ , $\text{Cl}^-$ , $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{HCO}_3^-$ A nivel de trazas: $\text{Fe}^{2+}$ , $\text{Cu}^{2+}$ , $\text{Mn}^{2+}$ , $\text{Zn}^{2+}$ , $\text{B}^{3+}$ , $\text{Mo}^+$ , $\text{V}^{2+}$ , $\text{Co}^{2+}$ , $\text{I}^-$ , $\text{Se}^{2-}$
Requisitos ambientales	Temperatura y pH
Características de los efluentes	Materia orgánica biodegradable soluble: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Materia que ha escapado del tratamiento biológico</li> <li>• Formada como productos intermedios de la degradación biológica del residuo</li> <li>• Componentes celulares</li> </ul> Materia orgánica suspendida: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sólidos biológicos producto de la separación en el tanque de sedimentación</li> <li>• Sólidos coloidales que escapan del tratamiento y separación</li> </ul> Materia orgánica no biodegradable: <ul style="list-style-type: none"> <li>• La originalmente presente en el influente</li> <li>• Subproductos de la degradación biológica</li> </ul>

Adaptado de Melcaill & Eddy, 1991

### 1.3.3 Variantes del Proceso de Lodos Activados.

El proceso de lodos activados es muy flexible y puede adaptarse a casi cualquier tipo de problema relativo al tratamiento biológico de aguas residuales mediante la utilización de algunas de sus variantes. Estos procesos son indudablemente los más aplicados en el mundo y preferidos para el tratamiento de aguas residuales municipales.

**Proceso de lodos activados convencional.** Consiste de un tanque de aireación, cuyo contenido se le conoce como licor mezclado, un clarificador secundario y una línea de recirculación de lodo. La purga del lodo se puede realizar indistintamente desde el licor mezclado o desde la línea de recirculación. El flujo es de tipo pistón, el agua residual y el lodo recirculado entran al tanque y son aireados durante un período de 4 a 8 horas. El contenido es mezclado por la acción de la aireación mecánica o por difusores de aire. El suministro de aire permanece constante conforme se despiaza el fluido a lo largo del tanque. Durante este período se produce la adsorción, floculación y oxidación de la materia orgánica. El licor mezclado se hace sedimentar en el clarificador secundario y el lodo es recirculado en una proporción de aproximadamente el 25 a 50 % del caudal.

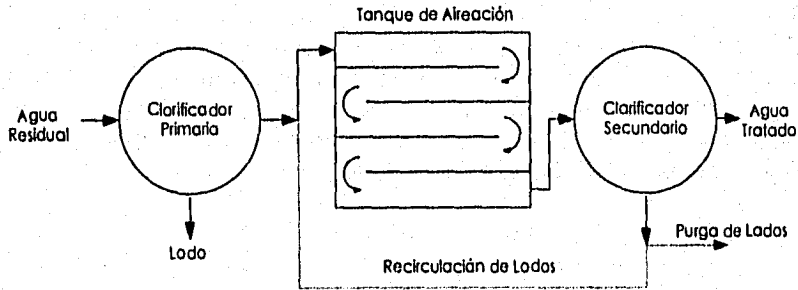


Figura 1.11 Proceso de lodos activados convencional.

Fuente : Metcalf & Eddy, 1991

**Alimentación escalonada.** En este proceso, la alimentación de agua residual cruda se introduce en diversos puntos a lo largo del tanque de aireación. Este arreglo proporciona un reparto equitativo de las relaciones de F/M a lo largo del tanque. El tanque de aireación se divide mediante mamparas formando varios canales paralelos. Cada canal constituye una etapa del proceso y las etapas están unidas entre sí en serie. El lodo recirculado se introduce en la cabeza del tanque. Este proceso, así como el suministro de oxígeno y su demanda a lo largo de la longitud del tanque, se muestran en la figura 1.12.

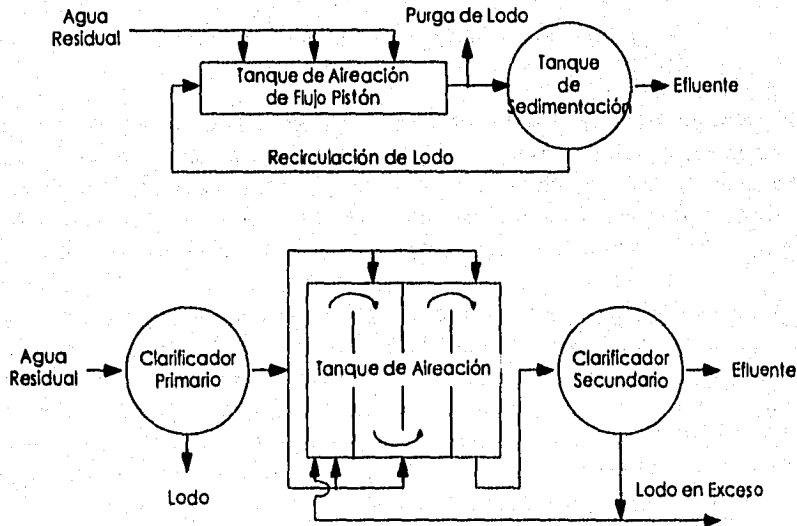


Figura 1.12 Proceso de lodos activados con alimentación escalonada.

Fuente : Metcalf & Eddy, 1991

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

**Mezcla completa.** En esta modificación las líneas de alimentación y recirculación de lodos se combinan y se introducen en diversos puntos del tanque desde un canal central. El líquido aireado abandona el reactor por vertederos en ambos lados del tanque. El suministro y la demanda de oxígeno son uniformes a lo largo del tanque. La gran ventaja de la mezcla completa es que el proceso es muy resistente a daños que puede originarse por choques de carga, debido a su dilución instantánea.

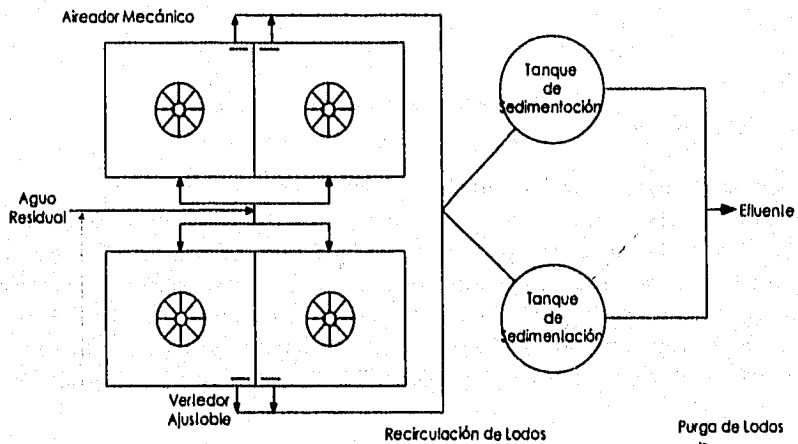


Figura 1.13 Proceso de lodos activados de mezcla completa.

Fuente: Metcalf & Eddy, 1991

**Aireación graduada.** El objetivo de la aireación graduada es armonizar la cantidad de aire suministrado con la demanda de oxígeno a lo largo del tanque de flujo pistón. A la entrada, la demanda de oxígeno es más alta, por lo que los aireadores se sitúan más próximos para proporcionar una tasa más alta de oxigenación. El espacio entre aireadores se aumenta hacia la salida conforme la demanda de oxígeno disminuye.

**Aireación modificada.** La particularidad de esta variante es que contempla tiempos de aireación más cortos, generalmente de 1.5 a 3 horas, y una relación elevada de alimento-microorganismo F/M. La concentración de SSLM es relativamente baja mientras que la carga orgánica es alta. La eliminación de DBO resultante se encuentra dentro del intervalo 60-75 %; así pues, el proceso no es aconsejable cuando se desee obtener un efluente de alta calidad. Se ha tropezado con algunas dificultades en este proceso debido a las malas características de sedimentación del lodo y a la alta concentración de sólidos suspendidos en el efluente.

**Estabilización por contacto.** En la figura 1.14 se presenta un diagrama de flujo del sistema. La configuración de este sistema consta de un tanque pequeño de contacto, un

clarificador secundario y un tanque de estabilización que es aproximadamente seis veces más grande que el de contacto. En este proceso el influente se mezcla con lodo estabilizado sometiéndose a una aireación en el tanque de contacto por un tiempo de retención de 20 a 40 minutos. Durante el contacto inicial se separa una fracción apreciable de demanda DBO, en suspensión y disuelta, mediante bio-absorción después de estar en contacto con el lodo activo suficientemente aireado. El efluente del tanque de contacto fluye hacia el clarificador secundario. Se separa el efluente clarificado y la corriente de lodos sedimentables se lleva a un tanque de estabilización, donde se airea durante un período de 1.5 a 5 h.

Durante este período de estabilización los productos orgánicos adsorbidos se rompen mediante degradación aerobia. El lodo que abandona el tanque de estabilización lo hace en condiciones de "inanición" y dispuestos por lo tanto a adsorber residuos orgánicos, hecho que se aprovecha al dirigirlo hacia el tanque de contacto. La aireación de los tanques de estabilización y de contacto en plantas prefabricadas, se llevan a cabo normalmente mediante difusores.

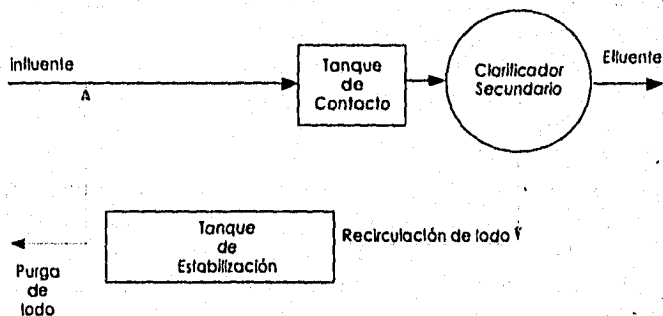


Figura 1.14 Proceso de estabilización por contacto.

Fuente: Metcalf & Eddy, 1991

**Aireación extendida.** Por sus características muy similares a las zanjas de oxidación, se revisará con más detalle este proceso. La aireación extendida es una variante del proceso de lodos activados, al que se le conoce también por oxidación total, y tiene como base fundamental una aireación prolongada. En el reactor, el criterio de diseño es lograr tiempos de retención celular largos y relaciones de sustrato/microorganismo ( $F/M$ ) bajas. Con esto, los microorganismos se encuentran francamente en la fase endógena, lo que reduce la cantidad de lodos de purga y aumenta su grado de estabilización (lodos digeridos), lo que simplifica su manejo. Además normalmente no se incluye la clarificación primaria. En la tabla 1.13 se presentan algunos criterios de diseño adicionales para el proceso de aireación extendida.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

Tabla 1.13  
Criterios de diseño para procesos de aireación extendida.

Criterio	Unidad	Valor	
		Rango	Normal
Prefiltramiento		Rejilla de barras o triturador	
Tiempo de retención (tanque de aireación)	h	18-36	24
Carga DBO <sub>5</sub> (F/M)	kg DBO <sub>5</sub> /kg SSVLM/d	0.05-0.15	0.10
SSLM (tanque de aireación)	mg/l	2,500-6,500	3,500
Oxígeno requerido			
Promedia a 20°C	kg/kg DBO <sub>5</sub> aplicado	2-3	2.5
Pico a 20°C	(valor) x Q <sub>prom.</sub>	1.25-2.0	1.5
Lodo en exceso (SSV)	kg/kg DBO <sub>5</sub> remov.	0.3-0.75	0.4
Carga hidráulica en tanque de sedimentación en hora pico	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d	14.7-24.5	19.6

Adaptado de Metcalf & Eddy, 1991

La aireación extendida, se aplica normalmente a pequeños caudales de agua residual, inferiores a 4,000 m<sup>3</sup>/d (46 l/s), ya que los tanques tienen volúmenes considerables y por su manejo simplificado de lodos pueden adaptarse a pequeños caudales. Se dispone comercialmente de unidades prefabricadas, las que si se diseñan y manejan adecuadamente no presentan problemas de olores y de esa forma pueden instalarse dentro de zonas pobladas.

En una unidad de aireación extendida convencional el influente pasa primero a través de una rejilla de barras para separar los sólidos en suspensión gruesos con el objeto de proteger los equipos. En algunas ocasiones se prefiere incorporar un triturador en lugar de una rejilla. El modelo del flujo es de tipo pistón. Dentro de estos sistemas es recomendable que se use como medio de aireación los difusores de aire, aunque no son descartados los aireadores mecánicos de baja potencia, debido a que es necesario mantener suficiente agitación para conservar los sólidos en suspensión.

### Parámetros del proceso

En estos procesos se requiere tanto de una carga orgánica (0.5-0.15 kg DBO<sub>5</sub>/kg SSVLM/d) y un carga volumétrica (0.16-0.40 kg DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>d) bajas, así como de largos tiempos de aireación. Se tienen tiempos de retención hidráulica de 16 a 36 horas y de 20 a 30 días de tiempo de retención celular. Su tasa de recirculación varía de 50 a 300 % y su eficiencia es del orden del 75 al 95 % en remoción de la DBO<sub>5</sub>. La concentración de sólidos suspendidos en el reactor alcanzan valores de 3,000 a 6,000 mg/l, aunque se recomienda no superar los valores de 5,000 mg/l constantemente, ya que podrían dar problemas de sedimentación en el clarificador.



Para asegurar un óptimo desarrollo de la operación se recomienda que la carga orgánica o relación sustrato-microorganismo (F/M) esté en el intervalo de 0.5 a 0.15 kg DBO<sub>5</sub>/kg SSV<sub>U</sub>/d; con estos valores la cantidad de alimento (sustrato) presente es insuficiente para mantener el crecimiento de microorganismo, por que se verán obligados a vivir bajo respiración endógena y a metabolizar tanto su propio protoplasma como los nutrientes que se han liberado de las células muertas (material del citoplasma). Como consecuencia de este fenómeno, las membranas celulares no degradables que se obtienen, son relativamente ligeras ocasionando una sedimentación con mayor dificultad. En consecuencia los clarificadores deben trabajar con cargas hidráulicas superficiales menores a las convencionales.

El problema de los clarificadores secundarios también involucra un incierto campo de operación; por ello es recomendable que las cargas hidráulicas superficiales en el diseño, en especial flujos pico de una hora, estén limitadas de 600 a 800 gal/ft<sup>2</sup>d (24 a 32 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d). Estos clarificadores deben ser equipados con sistemas de recolección de natas y un efectivo sistema para la remoción de la natas acumuladas

Debido al alto grado de estabilización obtenido, el manejo de los lodos generados puede limitarse tan sólo al secado. Como recomendación, éste puede ser por medio de lechos de secado para las plantas pequeñas (inferiores a 100 l/s).

#### *Nitrificación*

En los procesos de aireación extendida, la nitrificación se puede presentar hasta un grado relativamente apreciable con la consiguiente conversión de nitrógeno amoniacal en nitritos y nitratos, ya que se cuenta en este proceso con la doble circunstancia de carga orgánica baja (relación F/M) y un suministro de aire en exceso. Un problema asociado a la nitrificación es la caída del pH en el sistema debido a que esta reacción consume alcalinidad. El pH puede descender hasta valores de alrededor de 4.5, en cuyo caso el proceso biológico puede verse seriamente afectado. En algunas plantas paquete se agrega cal al reactor biológico para mantener un pH neutro.

Para finalizar con esta sección, en las tablas 1.14 y 1.15 se muestra un resumen de las variantes del proceso de lodos activados y algunos datos de diseño, respectivamente, además de algunos esquemas adicionales en la figura 1.15.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

Tabla 1.14

Descripción de las variantes del proceso de lodos activados.

Modificación del Proceso	Descripción
Convencional Flujo Pistón	Tanto el agua residual como el lodo recirculado entran al tanque por un extremo y son aireados por un difusor de aire a un aireador mecánico, dicha aireación permanece constante, conforme el licor mezclado se desplaza a lo largo del tanque.
Mezcla Completa	El agua residual y el lodo recirculado se introducen en varios puntos, por lo que la carga orgánica y la demanda de oxígeno sean uniformes en el tanque.
Aireación Graduada	El objetivo de este sistema es acomodar la cantidad de aire suministrada a la demanda de los microorganismos conforme el líquido avanza. A la entrada, los difusores se colocan en espacios reducidos iguales para lograr una elevada tasa de oxigenación, la cual va disminuyendo conforme se acerca la salida.
Aireación con Alimentación Escalonada	En éste el agua residual es introducida en varios puntos del tanque para igualar la relación F/M. Generalmente se utilizan tres a más canales. La flexibilidad en la operación es una de características de este proceso.
Aireación Modificada	La diferencia respecto a los otros sistemas es que en éste los tiempos de aireación son más cortos, generalmente de 1.5 a 3 horas y tienen una relación alta de F/M. La eliminación de DBO suele ser baja, encontrándose dentro del intervalo de 60-75 %.
Contacto-estabilización	Este proceso se desarrolló para aprovechar las propiedades de adsorción del lodo activado.
Aireación Extendida	El proceso de aireación extendida funciona en la fase de respiración endógena, requiriendo de una carga orgánica relativamente baja y un largo período de aireación.
Aireación de Alta Carga	Se trata de una modificación donde las altas concentraciones de SSM están combinadas con elevadas cargas volumétricas. Esta relación permite altas relaciones F/M con prolongados tiempos de retención celular y con tiempos de retención hidráulica cortos de 0.5 a 2 horas.
Proceso Kraus	El proceso Kraus trata aguas residuales con bajos niveles de nitrógeno. Las nitas son adicionadas como una fuente de nutriente junta con una porción del lodo de recirculación en un tanque de aireación por separado diseñado para nitrificar. Otro resultado es el mejoramiento de la capacidad de sedimentación del licor mezclado.
Sistema de Oxígeno Puro	El uso del oxígeno puro como sustituto del aire en el proceso de lodos activadas es la principal característica de este proceso. El oxígeno es aplicada en tanques de aireación completamente cubiertos, para fines de un máximo aprovechamiento.
Zanjas de Oxidación	La zanja de oxidación consiste de un canal en forma de anillo, avala o carousel, el cual está equipada con un dispositivo de aireación mecánica. El agua residual pasa a través del dispositivo de aireación para proporcionar el oxígeno requerido, que además ayuda a circular el licor mezclado a una velocidad de 0.25 a 0.35 m/s. Las zanjas de oxidación son una forma de aireación extendida, con largos tiempos de retención hidráulica y celular.
Reactor Intermitente o secuencial	Consiste de un sistema de llenado-vaclada, que involucra un reactor de mezcla completa. El licor mezclado es retirado del reactor al final de cada ciclo, eliminando así la necesidad de utilizar un clarificador secundario.
Reactor de Pazo Profundo	Este reactor está conformado por un pozo vertical de aproximadamente 400 a 500 ft (120 a 150 m) de profundidad que reemplaza el clarificador primario y el tanque de aireación. El pazo está recubierto con una capa de acero y ajustado con una tubería concéntrica para formar un reactor anular. El licor mezclado y el aire son llevados a la parte central y baja del pazo, para posteriormente subir a través del espacio anular. Con este proceso se incrementa la transferencia de oxígeno al licor mezclado.

Adaptado de Metcalf & Eddy, 1991

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

Tabla 1.15

Características y parámetros de operación de los procesos de lodos activados

Variación del proceso	Modo de operación	Aireación	Remoción DBO (%)	$\theta_c$ (d)	F/M kg DBO/kg SSVLM/d	Carga kg DBO/m <sup>2</sup> /d	SSLUM (mg/l)	V/Q (h)	R/Q (%)
Convencional	FP	DA y AM	85-95	5-15	0.2-0.4	0.32-0.64	1,500-3,000	4-8	0.25-0.75
Mezcla completa	RFCTA	DA y AM	85-95	5-15	0.2-0.6	0.80-1.92	2,500-4,000	3-5	0.25-1.0
Alimentación escalonada	FP	DA	85-95	5-15	0.2-0.4	0.64-0.96	2,000-3,500	3-5	0.25-0.75
Aireación modificada	FP	DA	60-75	0.2-0.5	1.5-5.0	1.2-2.4	200-1,000	1.5-3	0.05-0.25
Estabilización por contacto	FP	DA y AM	80-90	5-15	0.2-0.6	0.96-1.2	1,000-3,000 <sup>a</sup> 4,000-10,000 <sup>b</sup>	0.5-1.0 <sup>a</sup> 3-6 <sup>b</sup>	0.5-1.5
Aireación extendida	FP	DA y AM	75-95	20-30	0.05-0.15	0.16-0.4	3,000-6,000	18-36	0.5-1.5
Aireación de alta carga	RFCTA	AM	75-90	5-10	0.4-1.5	1.6-16.0	4,000-10,000	2-4	1.0-5.0
Proceso Kraus	FP	DA	85-95	5-15	0.3-0.8	0.64-1.6	2,000-3,000	4-8	0.5-1.0
Sistema de oxígeno puro	RFCTA	AM	85-95	3-10	0.25-1.0	1.6-3.2	2,000-5,000	1-3	0.25-0.5
Zanjas de oxidación	FP	AM	75-95	10-30	0.05-0.3	0.08-0.48	3,000-6,000	8-36	0.75-1.5
Reactor batch	FI	DA	85-95	N/A	0.5-0.3	0.08-0.24	1,500-5,000	15-20	N/A
Reactor de pozo profundo	FP	DA	85-95	n.d.	0.5-0.3	n.d.	n.d.	0.5-5	n.d.

FP=flujo pistón, RFCTA=reactor de flujo continuo de tanque agitado, FI=Flujo intermitente, DA=difusores de aire, AM=aireación mecánica  
nd.= no disponible, N/A=no aplica, a=unidad de contacto, b=unidad de estabilización

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

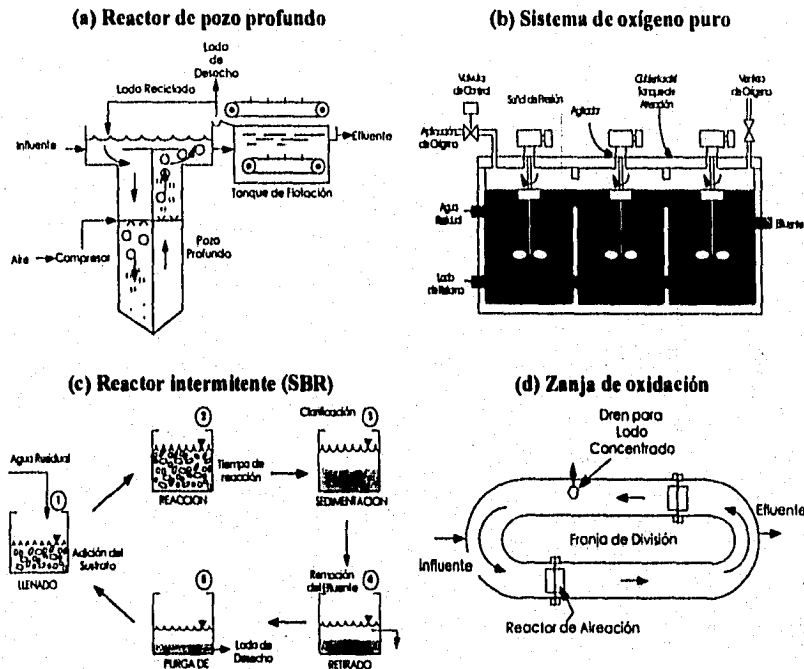


Figura 1.15 Otras variantes del procesos de lodos activados.

Adaptado de Metcalf & Eddy, 1991

### 1.5 ZANJAS DE OXIDACIÓN.

Desde la introducción del modelo original de zanjas de oxidación realizado por Pasveer se ha desarrollado una gran variedad de procesos y modificaciones de equipos; muchas de éstas se llevaron a cabo sobre la variación en la forma del flujo y de su dispositivo de aireación.

La configuración utilizada en zanjas de oxidación es la de flujo continuo pero formando un circuito, además de contar con características tanto de los reactores de mezcla completa y de flujo pistón e incluir condiciones de sistemas de aireación extendida. El flujo entra al reactor y es mezclado inmediatamente. La configuración es generalmente concebida para que el flujo entre al reactor justo corriente abajo del punto de descarga, por lo que debe recorrer un circuito antes de que alguna fracción del influente pueda ser descargada. El tiempo de retención hidráulica en reactores de este tipo son largos,

generalmente de 8 a 36 hr, y el tiempo para completar el circuito en un canal con velocidad normal son de 15 a 30 minutos. La cinética de estos reactores normalmente asume que son reactores de mezcla completa, generándose un pequeño error que es corregido por un factor de seguridad.

De acuerdo a su configuración, estos reactores pueden agruparse en cinco tipos (ver figura 1.16):

- Tipo carrusel con aireadores de superficie.
- Canales con aireadores de chorro.
- Tipo óvalo con rotor de discos.
- De un sólo circuito con aireadores de jaula o cepillo.
- Tipo barrera utilizando turbinas de superficie o de sumergencia.

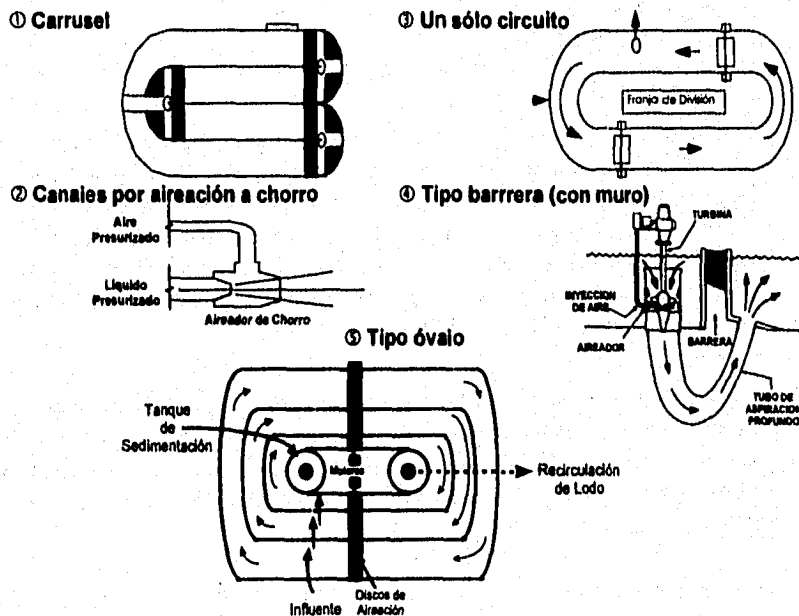


Figura 1.16 Tipos de zanjas de oxidación.

Fuente: Mandt & Bell, 1982

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

---

### *Tipo carrusel*

El sistema carrusel fue desarrollado por un grupo de consultores holandeses a finales de los 60's ( Dwars, Heederick and Verhay, Ltd., Envirotech and Activox). Su meta era mejorar los sistemas de un solo circuito con aireadores tipo cepillo, mediante un tanque más profundo, logrando con ello al final de sus trabajo un sistema con mayor eficiencia en energía y costos más bajos (Kount & Keper, 1972).

Se quería conservar ventajas tanto de los sistemas de aireación extendida como de los tanques tipo canal, con las siguientes características:

- No requieren de tratamiento primario.
- Costos de operación y mantenimiento más bajos.
- Una operación más confiable (segura y estable).
- Altos niveles de tratamiento.
- Remoción de nitrógeno.
- Bajos requerimientos de energía.
- Producción de un lodo más estabilizado.

*Características de un sistema carrusel.* Después de que el flujo de agua residual se ha mezclado parcialmente con el flujo de recirculación de lodo en un punto anterior, éste pasa a la zona de aireación y es impulsado hacia el canal con un aireador mecánico de superficie (eje vertical) de baja velocidad y posicionado en línea con las paredes de división del tanque de aireación. El flujo pasa a través de una o más zonas de aireación antes de que una fracción salga sobre los vertedores colocados corriente arriba de una de las zonas de aireación (ver figura 1.17).

Como se muestra en la figura 1.17, el tanque de aireación está diseñado como un canal continuo, con la ubicación de los aireadores para que existan dos zonas principales (aerobia y anóxica). El agua residual y los lodos activados de recirculación son introducidos en el tanque en la "zona de aireación", donde los aireadores montados tienen dos funciones:

- Proveer del oxígeno necesario para la eliminación de DBO y remoción de nitrógeno amoniacal.
- Suministrar la velocidad de flujo necesaria para mantener los sólidos en suspensión, mientras que el licor mezclado se está moviendo a través del canal.

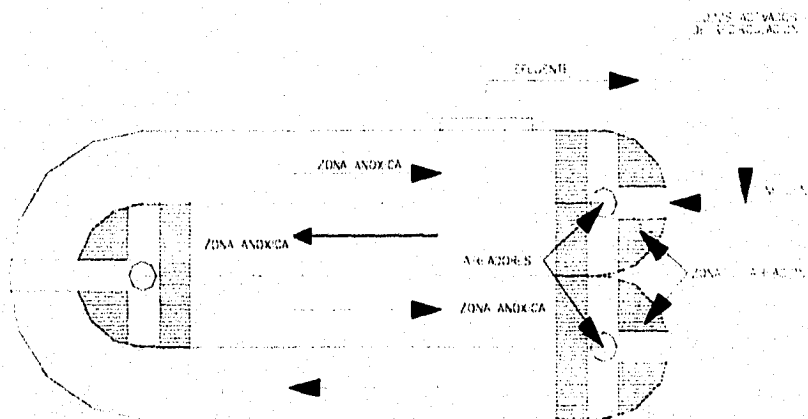


Figura 1.17 Configuración de una zanja de oxidación en carrusel

Fuente : Manual EIMCO carousel system, 1994.

Dentro de la zona aerobia que corresponde a la parte de aireación se presenta tanto la remoción de materia orgánica (DBO) como la nitrificación, mientras que para la zona anóxica (longitud del canal) la desnitrificación es parte fundamental de esta sección, así como la remoción de DBO (figura 1.18).

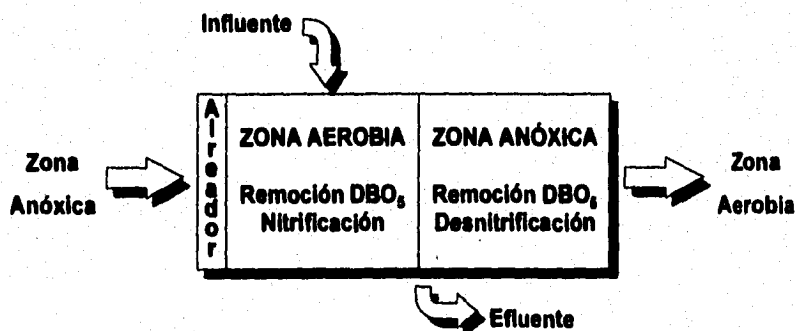


Figura 1.18 Nitrificación y desnitrificación en zanjas de oxidación.

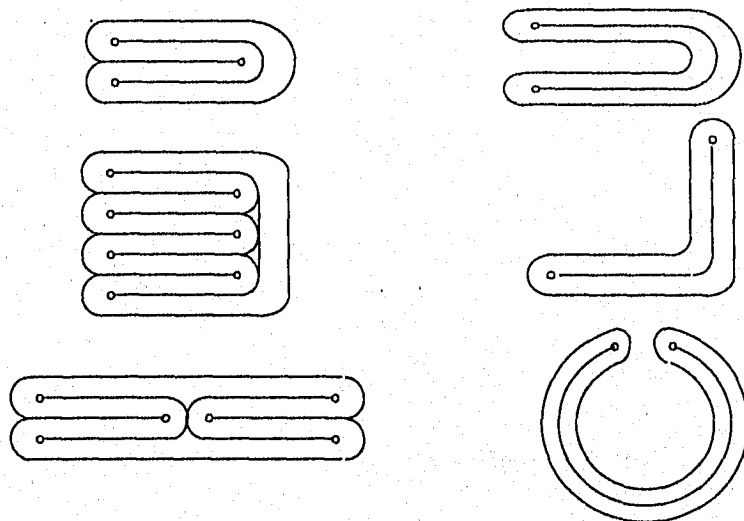
Fuente : Mandl & Bell, 1982

A su vez, los sistemas en carrusel pueden ser configurados de acuerdo a la forma del tanque en herradura, circular, serpentin o modelos en "U", "L" y "H" (figura 1.19).

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

---



**Figura 1.19 Configuración de sistemas en carrusel de acuerdo a su forma.**

Fuente : Mondl & Bell, 1982



## **Capítulo 2**



# **Descripción y Criterios de Diseño de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Nuevo Laredo, Tamaulipas**

## CAPÍTULO II

### DESCRIPCIÓN Y CRITERIOS DE DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE NUEVO LAREDO, TAMAULIPAS.

#### 2.1 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA.

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Nuevo Laredo, Tamaulipas (PTARNL) consiste de las siguientes etapas:

- a) **Equipo de bombeo y obra de toma.** Consiste de una caja de confluencia con su correspondiente tubería de llegada ("Colector Ribereño" y "Colector Coyote I") y dos estaciones de bombeo con tres bombas sumergibles cada una. Para aspectos de mantenimiento, se tiene un monorriel equipado con polipasto y canastillas de limpieza.
- b) **Tratamiento preliminar.** Obra principal constituida de equipos mayores como dos sopladores de aire, dos rejillas de barras mecánicas, una rejilla de barras manual, dos sistemas de remoción de arena (provistos cada uno con un desarenador tipo vórtice, mecanismo de transmisión, bomba de arena y tolva de almacenamiento), cribas estáticas de arena, banda transportadora y una caja de distribución de flujo.
- c) **Tratamiento secundario.** En esta sección se tienen seis zanjas de oxidación equipadas con tres aireadores mecánicos cada una, cuatro clarificadores secundarios y una caja de distribución de flujo.
- d) **Sistema de desinfección.** Estas instalaciones están conformadas por tanques de contacto de cloro con su respectiva cámara de inyección, un almacén de cilindros de cloro y un edificio para equipo mayor. Este último contendrá dos evaporadores, dos cloradores y demás accesorios. A la salida de este sistema se cuenta con medidores de flujo para el efluente (canal Parshall) y un sistema de aireación natural por pequeñas caídas que desemboca al Arroyo del Coyote.
- e) **Sistema de manejo de lodos.** Este incluye dos estaciones de bombeo para la recirculación de lodo (seis bombas en total) y una estación para la purga de lodo (tres bombas en total), un tanque de retención y 80 lechos de secado de lodos.
- f) **Otros.** Se incluye un sistema de agua potable y uno de no potable; edificios de administración, mantenimiento y eléctrico; casetas de vigilancia y seguridad. En la figura 2.1 se presenta un diagrama de distribución general de la PTARNL.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

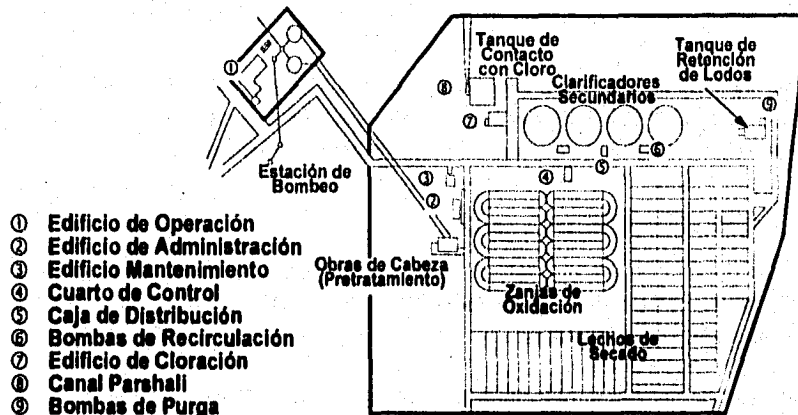


Figura 2. 1 Plano de distribución general.

La descripción de cada uno de los procesos será analizada con detalle más adelante; por el momento, bastará mencionar que el tratamiento secundario, en particular las zanjales de oxidación, son el corazón del proceso, por su función al reducir tanto el contenido orgánico (DBO<sub>5</sub>) y nitrógeno. Además el proceso biológico está diseñado para producir un lodo de alto grado de estabilidad, por ello el sistema de tratamiento de lodos sólo funcionará como un sistema de secado.

### 2.1.1 Generalidades.

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Nuevo Laredo (PTARNL) está localizada sobre la margen derecha del Río Bravo, aguas abajo de la confluencia del arroyo del Coyote (figura 2.2). La planta se localiza fuera de la zona de inundación del Río Bravo correspondiente a la avenida de diseño de 3,960 m<sup>3</sup>/s, protegida adecuadamente contra dicho gasto.

La planta tratará la totalidad de las aguas residuales generadas por la ciudad. La construcción de dos colectores "Ribereño y Coyote I" permitió conducir el agua residual al sitio de tratamiento. El "Colector Ribereño" corre aproximadamente paralelo al Río Bravo, tiene una longitud de 18.3 km y varía en sus diámetros de 45 cm (18") en la parte alta a 183 cm (72") en la parte baja. El "Colector Coyote I" tiene una longitud de 8.7 km y varía en diámetro de 30 cm (12") a 122 cm (48"). Este fue construido paralelo al Arroyo del Coyote para interceptar las aguas residuales de la red de alcantarillado en la parte sur de la ciudad. Una caja de confluencia cercana a la estación de bombeo servirá para interceptar ambos colectores.

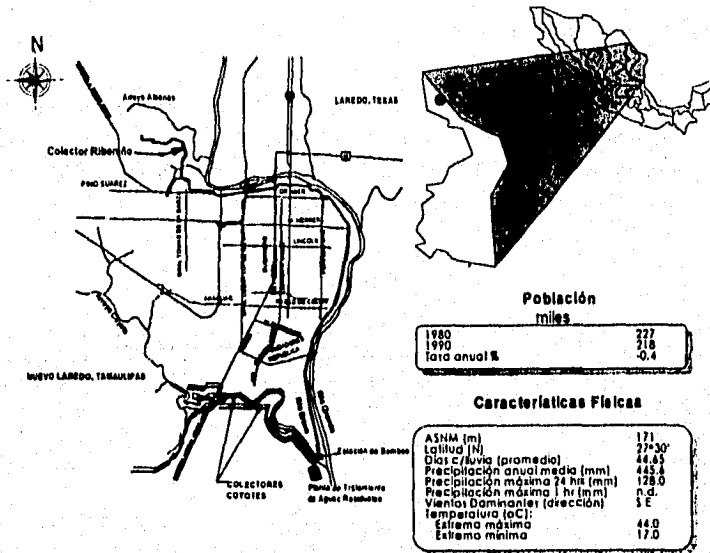


Figura 2.2 Localización del proyecto.

La caja de confluencia, así como tubería necesaria, harán llegar el fluido a la estación de bombeo de donde se transferirá a la planta de tratamiento (figura 2.3). La estación de bombeo consiste de dos cárcamos circulares de concreto separados, cada uno con un diámetro interno de 10 m y 15 m de profundidad. Cada cárcamo está equipado con tres bombas sumergibles con capacidad de 600 l/s (14 mgd), con motores de 281 hp c/u.

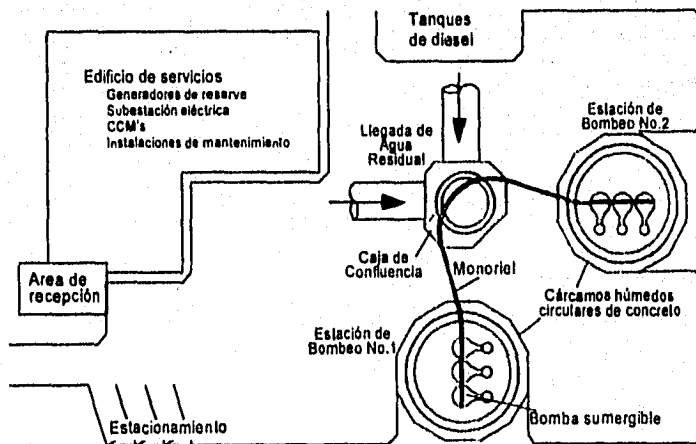


Figura 2.3 Estación de bombeo.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

#### 2.1.2 Criterios de Diseño Generales.

Para propósitos de este proyecto que tiene como parte fundamental el proceso biológico, sólo se hará una descripción general de planta y equipos, así como de los criterios de diseño generales. En la **tabla 2.1** se indican los datos básicos utilizados en el diseño de la planta incluyendo condiciones previstas a futuro (a 10 años).

**Tabla 2.1**  
Bases de diseño.

Parámetros	Condiciones de Diseño	
	Año 2000	Año 2010
<b>FLUJOS DE DISEÑO</b>		
Flujo diario promedio, l/s	1,360	1,600
Flujo máximo mensual, l/s	1,630	2,160
Flujo máximo diario, l/s	2,760	3,600
Flujo pico de 2 horas, l/s	3,600	5,400
Flujo mínimo, l/s	800	1,080
<b>CONDICIONES DE ENTRADA</b>		
Concentración de DBO <sub>5</sub> , mg/l	220	220
Carga de DBO <sub>5</sub> , kg/d	25,800	34,000
Concentración de SST, mg/l	220	220
Carga de SST, kg/d	25,800	34,000
Concentración de nitrógeno amoniacal (NH <sub>3</sub> ), mg/l	25	25
Carga de nitrógeno amoniacal (NH <sub>3</sub> ), kg/d	2,940	3,900
Fracción de sólidos volátiles, %	70	70
Grasas y Aceites, mg/l	50	50
Surfactantes (SAAM), mg/l	10	10
Alcalinidad total, mg/l	270	270
Temperatura mínima, °C	18	18
Temperatura máxima, °C	30	30
<b>LIMITES DEL EFLUENTE</b>		
Concentración de DBO <sub>5</sub> máxima en: 30 días, mg/l	20	20
7 días, mg/l	30	30
Concentración de SST máxima en: 30 días, mg/l	20	20
7 días, mg/l	30	30
Coliformes fecales, máximo, col/100ml	200	200
pH	6 a 9	6 a 9
Oxígeno disuelto mínimo, mg/l	2.0	2.0
<b>PARAMETROS DE DISEÑO DEL PROCESO</b>		
Relación F/M, kg DBO <sub>5</sub> /kg SSVLM/d	0.087	
Tiempo de retención hidráulica $\theta_h$ , h	22	
Tiempo de retención celular $\theta_c$ , días	20	
Producción de lodos, kg SST/día	17,419	
Concentración de SSLM, mg/l	4,000 a 6,000	
Rango de recirculación, %	40 a 100	

FUENTE: Camp Dresser & McKee Inc., 1990

### 2.1.3 Características del Agua Residual a Tratar.

Las características de las aguas residuales suministradas a la planta estarán determinadas por las concentraciones de los contaminantes en las red de drenaje, las que involucran aportes industriales y domiciliarios.

Respecto a la información de los aportes industriales, sólo se cuenta con un intervalo de giros industriales existentes en Nuevo Laredo e información obtenida a partir de análisis hechos en la red de drenaje de la ciudad.

#### Descarga Industrial

Nuevo Laredo cuenta con una descarga industrial relativamente pequeña, pero con una base comercial muy extensa, contando con 71 maquiladoras en su planta industrial, estando la mayoría de éstas maquiladoras dedicadas al ensamble de productos con un mínimo de operaciones o procesos de transformación. Estudios realizados a fines de 1994 mostraron una distribución industrial ilustrada en la figura 2.4.

**Clasificación de Industria por Giro en Nuevo Laredo, Tamaulipas**

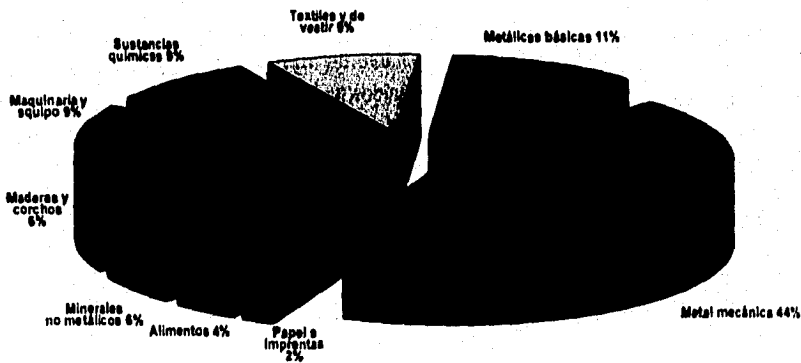


Figura 2.4 Clasificación de industrias por giro.

Fuente: COMAPA, 1994

Como un primer intento para determinar que empresas requerirán permisos de descarga, se empleó la metodología clásica de la Environmental Protection Agency (EPA) para clasificación de industrias. Este método sugiere que cada industria se estudie desde el

## **ARRANQUE Y OPERACIÓN**

### **Tratamiento de Aguas Residuales**

---

punto de vista de procesos, materia prima, producto terminado, residuos de la producción y utilización de agua en la planta, y se determine la necesidad de emitir permisos de descarga con base en su potencial de contaminación. Para ello, se clasificaron en tres grupos:

- Empresas "categóricas", las cuales operan en un giro o categoría de la cual se conoce un cierto potencial de contaminación en sus descargas.
- Empresas "no categóricas" pero emplean una cantidad de agua mayor a 2,200 m<sup>3</sup>/mes (2,000 m<sup>3</sup>/mes corresponde aproximadamente a 25,000 gal/d, 22 días laborales al mes, que es la cifra usada por la EPA para clasificar a un usuario como "significativo").
- Empresas que "no utilizan agua" en sus procesos.

El primer intento de clasificación arrojó 24 industrias "categóricas", las cuales serán sometidas automáticamente a permisos de descarga. Asimismo se clasificaron 26 industrias como "no categóricas" pero con agua en su proceso, las cuales se tendrán que estudiar más a fondo para determinar su impacto en el sistema, y definir si alguna de ellas será incluida en la lista de candidatos a permiso. Finalmente el resto de las industrias "no utilizan agua" o no se han clasificado.

#### ***Descarga municipal***

Preliminarmente, los resultados del análisis de las condiciones actuales en la red de drenaje (tabla 2.2), sugieren que el contaminante de mayor importancia es el plomo, ya que de acuerdo a los datos de muestreo obtenidos hasta la fecha, su concentración es de 0.12 mg/l, sobrepasando los límites de inhibición, debido a que la concentración para inhibir el proceso biológico es de 0.1 mg/l, como se muestra en la tabla 1.11. Debido a ello será necesario tomar medidas correctivas para disminuir esta concentración en las secciones de America, Galeana y Campestre del Colector Ribereño.

#### **2.1.4 Calidad Requerida del Agua Tratada.**

Debido a que el proyecto nace con la idea de mejorar la calidad de las aguas del Río Bravo en Nuevo Laredo, Tamaulipas-Laredo, Texas, y que forma parte de un financiamiento conjunto entre la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) Integrado por las delegaciones de México y Estados Unidos, se ha establecido que en este proyecto las normas a aplicar para la descarga de efluentes de plantas de tratamiento sean las estadounidenses y las medidas de control necesarias para cumplir con estas normas serán financiadas conjuntamente por ambos gobiernos.

Tabla 2.2  
Concentración de diversos contaminantes en la red de drenaje (mg/l)

Dren	Gasto lps	Arsénico	Cadmio	Cromo	Cobre	Cianuro	Plomo	Mercurio	Níquel	Plata	Zinc	Selenio	Fenoles totales
E. Gutiérrez	65.8	0.054	<0.005	<0.005	<0.01	<0.05	<0.05	<0.0002	<0.05	0.018	0.21	0.034	0.16
P.E. Calles	12	0.0097	<0.005	<0.005	<0.01	<0.05	<0.05	<0.0002	<0.05	0.015	0.38	0.0039	0.013
Monterrey	27.2	0.015	<0.005	<0.005	<0.01	<0.05	<0.05	0.0024	<0.05	0.015	0.38	0.0056	0.046
América	272.4	0.07	0.1	0.15	0.17	<0.05	0.34	<0.0002	0.48	0.032	0.25	0.025	0.13
Abasolo	82.9	0.015	<0.005	<0.005	<0.01	<0.05	0.086	0.0011	<0.05	0.017	0.44	0.0049	<0.01
Aldama	3.9	0.02	<0.005	<0.005	<0.01	<0.05	<0.05	0.003	<0.05	0.0018	0.15	0.025	0.013
Ocampo	1.3	0.013	<0.005	<0.005	<0.01	<0.05	<0.05	0.002	<0.05	<0.01	0.17	0.0087	<0.01
Galeana	0.39	0.011	0.014	<0.005	0.041	<0.05	0.14	<0.0002	<0.05	<0.01	0.12	0.0052	<0.01
A. Serdan	3.2	0.012	0.0063	0.31	<0.01	<0.05	<0.05	0.001	<0.05	<0.01	0.33	0.0059	<0.01
Degollado	0.5	0.02	<0.005	<0.005	<0.01	<0.05	<0.05	<0.0002	<0.05	<0.01	0.095	0.0074	<0.01
P. J. Méndez	2.3	0.016	0.0058	<0.005	0.036	<0.05	<0.05	0.0024	<0.05	<0.01	0.15	0.0089	<0.01
20 Nov.	0.5	0.013	0.0052	<0.005	<0.01	<0.05	<0.05	0.0056	<0.05	<0.01	0.092	0.0071	<0.01
L. Vicario	0.3	0.018	0.012	<0.005	0.012	<0.05	0.071	<0.0002	<0.05	<0.01	0.21	0.0096	<0.01
Profirió Diaz	0.04	0.019	0.011	<0.005	<0.01	<0.05	0.089	0.003	<0.05	<0.01	0.5	0.0049	<0.01
Canales	0	0.01	<0.005	<0.005	<0.01	<0.05	0.053	<0.0002	<0.05	<0.01	0.02	0.0063	<0.01
Mina, MH, W	76.3	0.017	<0.005	<0.005	<0.01	<0.05	<0.05	0.0016	<0.05	<0.01	0.11	0.0068	<0.01
Guatemala	16.1	0.014	<0.005	<0.005	<0.01	<0.05	0.056	0.0021	<0.05	<0.01	0.33	0.0053	<0.01
Lincoln	10.4	0.022	<0.005	<0.005	<0.01	<0.05	<0.05	0.0039	<0.05	<0.01	0.044	0.0058	<0.01
V. Carranza	161.2	0.018	<0.005	<0.005	<0.01	<0.05	<0.05	<0.0002	<0.05	<0.01	0.16	0.0058	<0.01
Colón	17.9	0.011	<0.005	<0.005	<0.01	<0.05	<0.05	0.0029	<0.05	<0.01	0.2	0.0039	<0.01
Anahuac	150.9	0.017	<0.005	<0.005	0.016	<0.05	<0.05	0.0016	<0.05	0.013	0.58	0.0046	<0.01
Compestre	24.6	0.023	<0.005	<0.005	<0.01	<0.05	0.15	0.0013	<0.05	<0.01	1.5	0.0049	<0.01
<b>C. Ribereño</b>	<b>930.3</b>	<b>0.032</b>	<b>0.029</b>	<b>&lt;0.05</b>	<b>0.061</b>	<b>&lt;0.05</b>	<b>0.129</b>	<b>0.001</b>	<b>0.137</b>	<b>0.012</b>	<b>0.327</b>	<b>0.014</b>	<b>0.048</b>
<b>C. Coyote</b>	<b>83.8</b>	<b>0.017</b>	<b>&lt;0.005</b>	<b>&lt;0.05</b>	<b>0.041</b>	<b>&lt;0.05</b>	<b>0.016</b>	<b>0.002</b>	<b>&lt;0.05</b>	<b>&lt;0.01</b>	<b>1.6</b>	<b>0.006</b>	<b>&lt;0.01</b>
<b>Total:</b>	<b>1014</b>	<b>0.03</b>	<b>0.027</b>	<b>0.04</b>	<b>0.06</b>	<b>0</b>	<b>0.12</b>	<b>0.001</b>	<b>0.129</b>	<b>0.014</b>	<b>0.424</b>	<b>0.013</b>	<b>0.047</b>

Fuente: reporte de COM, 1990 (Tabla 3-2).

En el caso de las normas para la descarga de aguas residuales en los Estados Unidos, para plantas de tratamiento que descargan al Río Bravo en el área de Laredo, Tex., deben cumplir con las siguientes normas:

• **Cualitativas:**

El efluente no debe contener sólidos flotantes o espuma persistente más allá de la zona inmediata a la descarga.

El efluente no debe contener sustancias en concentraciones que sean tóxicas o dañinas a la vida humana, animal o acuática o que puedan impedir significativamente el uso benéfico de las aguas que reciben lo descarga.



## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

- **Cuantitativas:**

El afluente debe reunir las siguientes condiciones:

Oxígeno disuelto (OD)	No menor de 2 mg/l
pH	No menor de 6 ni mayor de 9
Coliformes fecales	Concentración promedio para 30 días de 200 colonias/100 ml
Sólidos suspendidos	Concentración promedio para 30 días de 20 mg/l
DBO <sub>5</sub>	Concentración promedio para 30 días de 20 mg/l

En el caso de México, las normas para la descarga de aguas residuales al Río Bravo provenientes de Nuevo Laredo, Tam., son diferentes a las estadounidenses. La Norma Oficial Mexicana a la que se hace referencia es la NOM-067-ECOL/1994, establece las condiciones de descarga de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de sistemas de alcantarillado o drenaje municipal. La presente norma entrará en vigor el día 1o. de enero de 1997, la cual especifica lo indicado en las tablas 2.3 y 2.4. Para el caso de Nuevo Laredo, sólo aplica la tabla 2.4.

**Tabla 2.3**  
Para centros de poblaciones hasta de 80,000 habitantes.

PARAMETRO	LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES	
	PROMEDIO DIARIO	INSTANTANEO
pH (unidades de pH)	6 - 9	6 - 9
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	100	150
Grasas y aceites (mg/L)	20	30
Sólidos sedimentables (mL/L)	1.0	2.0
Demanda bioquímica de oxígeno (mg/L)	100	150
Demanda química de oxígeno (mg/L)	200	250
S.A.A.M. (mg/L)	5	8

**Tabla 2.4**  
Para centros de poblaciones mayores de 80,000 habitantes.

PARAMETRO	LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES	
	PROMEDIO DIARIO	INSTANTANEO
pH (unidades de pH)	6 - 9	6 - 9
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	50	80
Grasas y aceites (mg/L)	10	20
Sólidos sedimentables (mL/L)	1.0	1.2
Demanda bioquímica de oxígeno (mg/L)	50	80
Demanda química de oxígeno (mg/L)	100	160
S.A.A.M. (mg/L)	5	8

**Con condiciones particulares de descarga en:**

- Coliformes totales
- Color
- Conductividad eléctrica
- Fósforo total
- Materia flotante
- Metales pesados
- Nitrógeno total
- Sólidos disueltos totales
- Turbiedad
- Tóxicos orgánicos
- Hidrocarburos que no se incluyen en tóxicos orgánicos

**2.1.5 Servicios Auxiliares.**

**Energía Eléctrica**

Los dos principales componentes del sistema eléctrico de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Nuevo Laredo (PTARNL) incluyen la fuente de energía principal y su sistema de distribución, y la fuente de energía de reserva. Se considera también una última fuente de energía proveniente de los Estados Unidos como última opción.

La fuente de energía principal es suministrada por la Comisión Federal de Electricidad, (CFE). La CFE suministra energía a 13,200 volts a dos subestaciones eléctricas, donde a través de transformadores el voltaje es convertido a 277/480 volt. La energía eléctrica es conducida hacia una caja de distribución a través de dos ductos bus que pueden transmitir altos amperajes con seguridad. De la caja de distribución, la energía es repartida hacia los centros de control de motores (CCM's D), donde se regula el suministro de energía a los motores y equipos de la PTARNL (ver anexos).

La energía de reserva es proporcionada por un generador de 600 kW. En el caso de que el suministro primario de energía falle, este generador deberá arrancarse manualmente. Una vez que el generador ha sido puesto en marcha y operado a su temperatura de operación, es capaz de suministrar energía a los CCM "B" y CCM "C". Ambos CCM's proveen energía a:

- rejillas de limpieza mecánica
- desarenadores
- sopladores (utilizados para el suministro de aire en la obra de cabeza)
- bombas de eliminación de arena
- banda transportadora
- bombas de recirculación de lodos
- Edificio de cloración
- tomamesas en los clarificadores secundarios

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

Un generador de emergencia adicional está localizado en la estación de bombeo y estará destinado al suministro de energía para las bombas de alimentación de agua residual cruda hacia la PTARNL.

**Tabla 2.5**  
**Requerimientos de energía.**

Motores	Unidades	hp Unitario	hp Total	kW total
<b>Total motores</b>			<b>5,660</b>	<b>4,170.03</b>
Bomba Fiygi	6	281	1,686	1,264.5
Polipasto	2	10	20	15
Soplador Root	2	5	10	7.5
Bomba de arena	2	10	20	15
Banda transportadora	1	5	5	3.75
Desarenador	2	2	4	3
Aireadores	18	150	2,700	2,025
Compuertas	12	0.67	8.04	6.03
Mecanismo Sedimentador	4	2.0	8	6
Bomba recirculación de lodo	6	100	600	450
Sopladores purgo de lodo	3	125	375	281.25
Bomba purgo de lodo	3	25	75	56.25
Válvula matriz	2	2	4	3
Bomba de agua no potable	2	15	30	22.5
Bomba de ayuda (cloro)	2	7.5	15	11.25
<b>Equipo Eléctrico</b>				
<b>Total equipo eléctrico</b>				<b>109</b>
Evaporador	2	12	-	24
Resistencia de calefacción	-	-	-	15
Alumbrado exterior	-	-	-	30
Alumbrado c/control	-	-	-	10
Alumbrado oficinas	-	-	-	10
Aire acondicionado	-	-	-	20
<b>Total</b>				<b>4279.03</b>

### Servicio de Agua Potable

El servicio de agua potable será suministrado en el límite de la planta por la planta potabilizadora Sur-Oriente de la Ciudad de Nuevo Laredo. La capacidad de flujo y presión estarán determinadas por los requerimientos. El agua potable se usará únicamente para propósitos sanitarios, de laboratorios y en las instalaciones de los edificios de Administración, Mantenimiento y Seguridad, así como para el baño maría en el evaporador de cloro. Se sugiere que sea el mismo organismo operador de la planta potabilizadora el responsable de establecer un programa de mantenimiento del sistema de agua potable, basado en las prácticas comunes de ingeniería y en su propia experiencia.

### Servicio de Agua No Potable

El sistema de agua no-potable tiene 5 diferentes propósitos:

1. Como medio de dilución del gas cloro en el sistema de desinfección, ya que para aplicar cloro al efluente en el tanque de contacto antes de su vertimiento al "Arroyo del

Coyote\*, se realiza un precontacto del gas cloro con cierto caudal del agua tratada para facilitar la operación. Debido a la posibilidad de que no haya agua tratada en forma continua y confiable, la cloración podría llevarse a cabo provisionalmente por alimentación directa del gas en lugar de alimentación por solución.

2. Como sello hidráulico en varias bombas de la planta.
3. Para arrastrar, mezclar, y transportar arena de la tolva de almacenamiento del tratamiento preliminar.
4. Para lavar todos los tanques y canales, donde sea necesario, así como las canastillas en los cárcamos de la estación de bombeo.
5. Para riego de jardines.

### Sistema de Drenaje

El sistema de drenaje servirá para vaciar tanques y estructuras o equipos en toda la planta. Algunas de las líneas de drenaje tienen válvulas y algunas no las tienen. La tabla 2.6 muestra las líneas con válvulas y su ubicación, así como aquellas que no las tienen.

Todas las líneas de drenaje se orientan hacia el registro más bajo dentro de la planta de tratamiento. Desde ahí, el drenaje corre hacia un registro situado en las cercanías del Arroyo del Coyote, descargando a la estación de bombeo de agua cruda. De esta manera se puede retornar el agua a la planta para tratamiento posterior.

**Tabla 2.6**  
**Localización de líneas de drenaje.**

Líneas de drenaje sin válvulas	Líneas de drenaje con válvulas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Depósito colector de las instalaciones de cabeza</li> <li>• Sello hidráulico de las bombas de arena</li> <li>• Sello hidráulico de las bombas de recirculación</li> <li>• Sello hidráulico de las bombas de desecha</li> <li>• Sello hidráulico de las bombas de agua no-potable</li> <li>• Instalaciones de los edificios de Administración, Seguridad y Mantenimiento</li> <li>• Lixiviados de los lechos de secado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zanjas de Oxidación</li> <li>• Agua residual de los clarificadores secundarios (el agua remanente después de que las bombas de retorno son usadas para drenar el clarificador secundario)</li> <li>• Colector de natas en el clarificador secundario</li> <li>• Sobrenadante del tanque de retención de lodos*</li> <li>• Tanque de contacto con cloro</li> </ul>

\* El tanque de retención de lodos utiliza un vertedero en vez de válvula para la remoción de cierta cantidad de agua como sobrenadante.

### Servicio Telefónico

El servicio telefónico se proveerá sólo al edificio de administración y laboratorio.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

#### Cloro

Para el suministro de cloro se tiene previsto a "CYDSA", como compañía potencial, ubicada en Monterrey, Nuevo León.

#### 2.2.2 Descripción de Equipos.

En la actualidad se cuenta con una gran cantidad de proveedores de tecnología en materia ambiental; la PTARNL fue construida con diferentes equipos de diversos fabricantes buscando con ello, satisfacer los requerimientos del diseñador. En la tabla 2.7 se muestra una matriz de los principales proveedores de equipo en el tratamiento de aguas residuales.

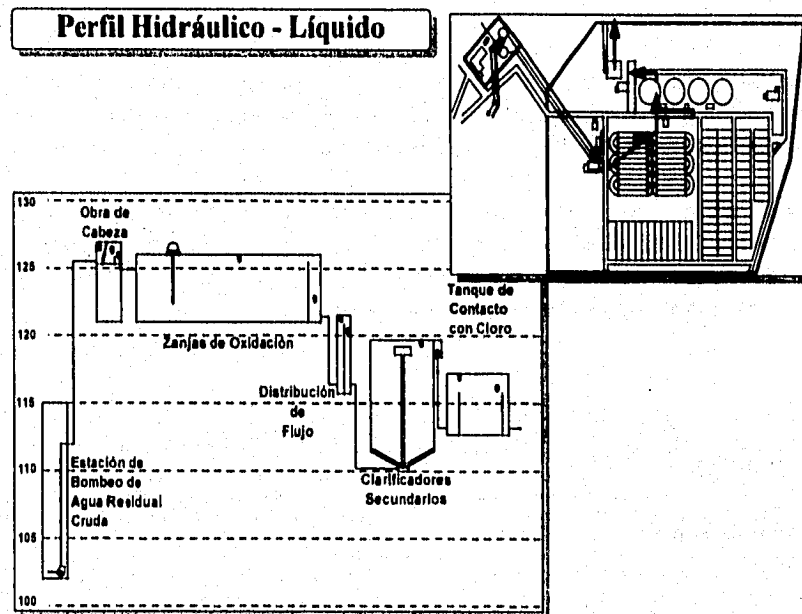


Figura 2.5 Perfil hidráulico líquido.

De acuerdo a las instalaciones físicas y las conducciones de interconexión, se tienen dos perfiles hidráulicos, uno para líquidos y otro para sólidos (figuras 2.5 y 2.6). Dichos perfiles muestran los gradientes hidráulicos para un flujo por gravedad, las alturas de impulsión de las bombas y aspectos de niveles de operación e inundación.

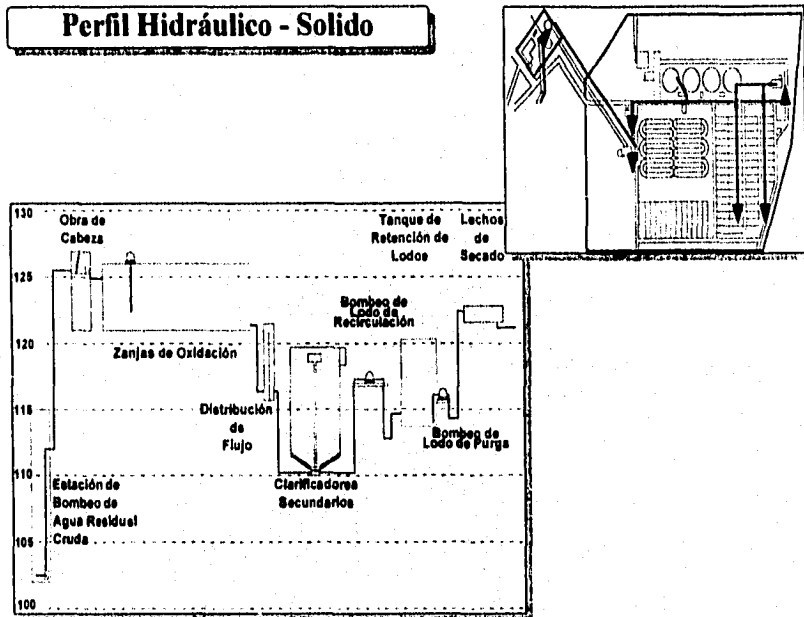


Figura 2. 6 Perfil hidráulico sólido.

Tabla 2.7 Algunos proveedores de paquetes tecnológicos en el tratamiento de aguas residuales.

Compañía	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
EIMCO Process Equipment Co.	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	
Envirex	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X
Franklin Miller, Inc.	X							X	X	X		X								X	
Inflico Degremont, Inc.	X	X								X								X	X	X	
Ionics Italia Spa.	X	X				X					X	X	X				X	X	X	X	
Jel Tech.	X	X	X		X	X														X	
Lightnin, Unit of General Signal	X	X	X					X					X							X	
Mixing Systems, Inc.	X	X			X	X		X					X							X	
National Technical Services, Inc.	X	X		X	X	X	X	X				X	X			X	X			X	
Parkson Corp.	X	X			X							X	X								
Pollution Control Engineering	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X				X	
Pollution Control, Inc.	X	X			X	X					X	X	X			X				X	
Puresream, Inc.	X		X		X		X					X			X						
Semblex Co.	X			X	X			X												X	
Smith & Loveless, Inc.	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
UTB Umivelttechnik Buchs	X	X		X		X		X			X	X		X							
General Filter Co.		X	X				X	X								X	X	X			
Mel-Pro Corp. Systems Div.		X	X					X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	
Specialized Process Equipment		X	X					X		X				X	X	X				X	
ILB Corp.		X			X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X				X	

- 1. Aireadores
- 2. Unidades de oxidación
- 3. Clarificadores
- 4. Eq. coagulación
- 5. Difusores
- 6. Digestor de lodos
- 7. Biofiltros
- 8. Eq. floculación
- 9. Desarenadores
- 10. Separador de aceite
- 11. Separador aceite-agua
- 12. Sedimentador de plato inclinado
- 13. Unidades paquete y modulares
- 14. Sistema de sacada de lodo
- 15. Tanques sedimentadores
- 16. Tratamiento recup. sólidos (residuos)
- 17. Unidades de intercambio iónico
- 18. Eq. de Precipitación
- 19. Osmosis Inversa
- 20. Paquetes tecnológicos

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

Las bombas que impulsarán el agua residual cruda de la estación de bombeo hacia la planta de tratamiento son de tipo sumergible con capacidad de 600 l/s y 281 hp marca Flygt (figura 2.7).

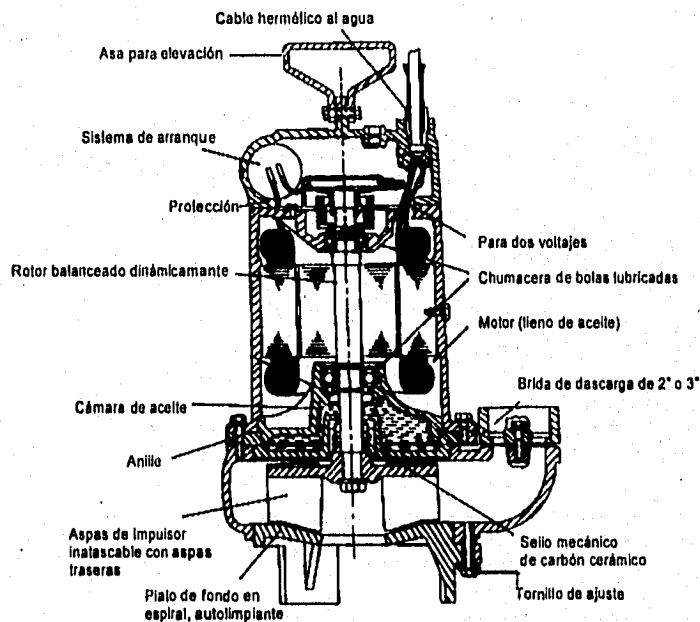


Figura 2.7 Bomba sumergible típica.

#### 2.2.2.1 Tratamiento Preliminar.

Una vez que el agua residual entra a la planta de tratamiento, la primera fase del proceso es el tratamiento preliminar, el cual se realiza en las instalaciones de cabeza. El propósito general del tratamiento preliminar es la remoción del material voluminoso que pueda dañar equipo y aditamentos corriente abajo.

La eliminación de estos materiales se lleva a cabo por medio de un conjunto de rejillas de barras y un sistema de remoción de arena. Dicha eliminación involucra trapos, rocas, arena, grava, tierra, materia orgánica, madera, papel, raíces de árbol, plásticos; en fin, materiales que no fueron retenidos por las canastillas de los cárcamos de la estación de bombeo. En la figura 2.8 se muestra un corte transversal de la obra de cabeza del tratamiento preliminar.

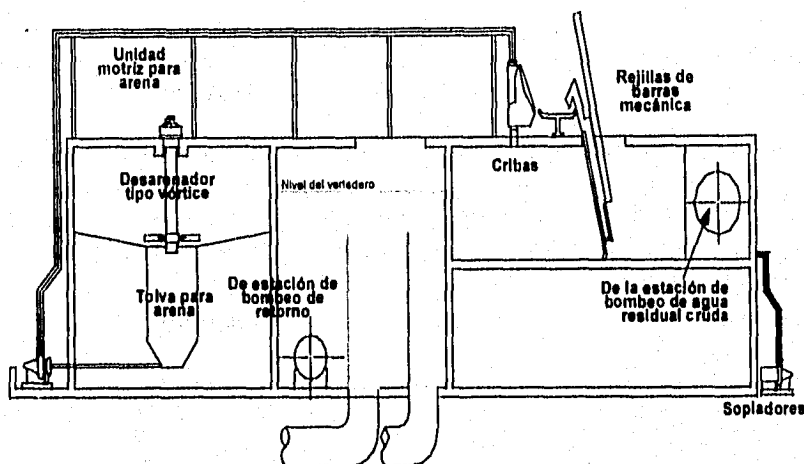


Figura 2.8 Corte de la obra principal (tratamiento preliminar).

### **Sopladores**

Se tienen instalados dos sopladores de aire de desplazamiento positivo rotatorios de lóbulos de 5 hp de potencia y capacidad a 7 psig de 75 ft<sup>3</sup>/min, fabricados por Roots-Connersville. Estos sopladores suministran el aire necesario para mantener suspendidos los sólidos en el agua residual y para evitar el agotamiento de oxígeno, previniendo así el desarrollo de condiciones sépticas durante las etapas de pretratamiento.

Aunque los sopladores de desplazamiento positivo se aplican normalmente para altas presiones de descarga (>8 psig) y para capacidades menores de 3,000 ft<sup>3</sup>/min (85m<sup>3</sup>/min) de aire libre por unidad, existen modelos pequeños como los utilizados en esta parte de la planta. Este tipo de sopladores son máquinas de capacidad constante y de presión variable. Por ello las unidades no pueden ajustarse, pero el control de la capacidad puede obtenerse por el uso de múltiples unidades o por un dispositivo para la velocidad variable. Para unidades de mayor tamaño la inclusión de silenciadores a la entrada y descarga son esenciales.

### **Rejillas de Barras de Limpieza Mecánica**

Se cuenta con dos rejillas de barras de limpieza mecánica fabricadas por SOREM, constituidas por barras paralelas de acero inoxidable 304, con un espacio libre entre barras de 20 mm y con 80 grados de inclinación respecto a la horizontal (ver figura 2.9). La máxima presión diferencial a través de una rejilla es de 600 mm. Están equipadas con rastrillos mecánicos (con motores de 5 hp) que se mueven hacia arriba de las rejillas a una velocidad



## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

máxima de 10.2 m/min, eliminando así los sólidos gruesos. Posteriormente, los sólidos retenidos son colocados sobre una banda transportadora que servirá para depositarlos en un camión de carga para su consiguiente disposición final fuera de la planta.

La frecuencia de limpieza de las rejillas está determinada por un *timer* o bien cuando la máxima presión diferencial es sobrepasada, según lo indicado por electroneveles que miden esta presión diferencial a través de la rejilla. Las rejillas fueron diseñadas de tal forma que el flujo promedio a través de cada una debe ser 680 l/s y el flujo máximo de 2,040 l/s, con profundidad máxima del agua de 1.83 m.

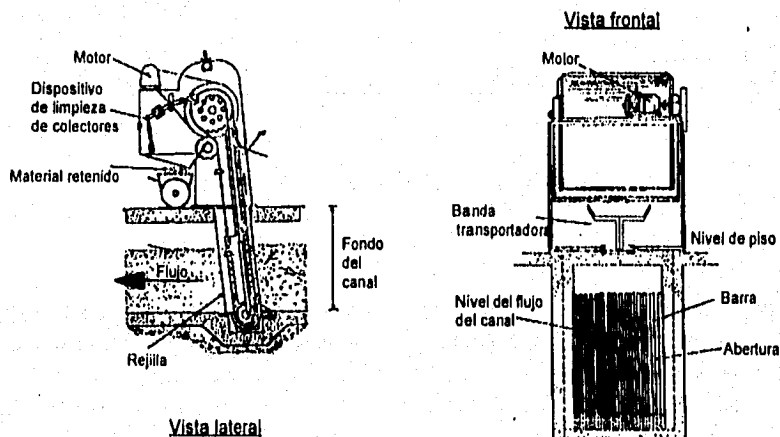


Figura 2.9 Rejillas de barras de limpieza mecánica.

### Rejillas de Barras de Limpieza Manual

La rejilla de limpieza manual es similar a una rejilla de limpieza mecánica construida de acero inoxidable 304, sólo que tienen un abertura de aproximadamente 25 mm, con una inclinación de 45 grados con respecto a la horizontal y tiene que ser limpiada manualmente con un rastrillo. La rejilla de barras de limpieza manual sólo será utilizada cuando una de las rejillas mecánicas esté en servicio y se requiera que dos rejillas de barras estén funcionando o bien cuando se requiera una mayor capacidad de desbaste.

### Sistema de Remoción de Arena

El sistema de remoción de arena está equipado con accesorios Smith & Loveless, el cual consiste de los siguientes componentes (ver figura 2.10):

- Dos desarenadores tipo vórtice.
- Dos juegos de paletas montadas en un eje.
- Dos mecanismos de transmisión, y
- Dos bombas de arena.

El **desarenador** consta de una cámara cilíndrica de concreto de un diámetro de 6,100 mm, donde el agua residual entra y sale en forma tangencial, el tiempo promedio de retención del flujo es de 30 segundos. El canal del influente es de 1,400 mm de ancho y 5,600 mm de longitud y para el vertedero del efluente se tiene un longitud de 2,750 mm. Existe una abertura hacia una **tolva de almacenamiento** de arena localizada en el centro y fondo de la cámara, donde se aloja el arena separada del agua residual, que cuenta con un diámetro de 1,500 mm y una profundidad de 2,500 mm. Bajo este sistema se tiene una remoción de sólidos mostrada en la **tabla 2.8**.

**Tabla 2.8**  
Porcentajes de remoción para el desarenador tipo vórtice.

Tamaño de partícula No. de Malla	Remoción %
50 (0.30 mm)	95 +
70 (0.24 mm)	85 +
100 (0.15 mm)	65 +

El **mecanismo de agitación** cuenta con una **paleta (turbina)** fabricada de acero al carbón y recubierta con pintura epóxica. Este sistema permite mantener la velocidad de flujo constante e impulsar arena hacia el centro de la tolva, producto del flujo toroidal suministrado por la paleta. El mecanismo de transmisión es accionado por un **motor trifásico** de uso pesado de 2 hp de potencia y 480 Volt, totalmente cerrado y cuenta con un ventilador de enfriamiento. Los desarenadores y los impulsores están dimensionados para que puedan operar satisfactoriamente con gastos hasta de 2,200 l/s cada uno.

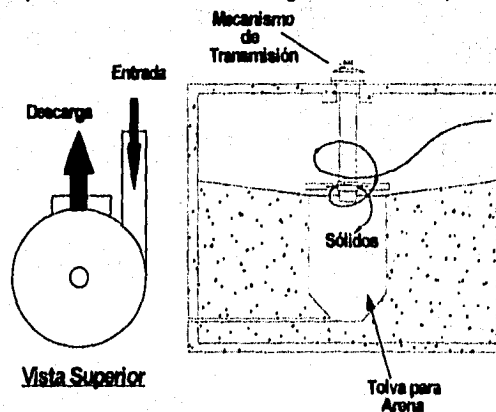


Figura 2.10 Desarenador tipo vórtice.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

Periódicamente, la arena es vaciada de la tolva y bombeada a cuatro **cribas** (rejillas estáticas autolimpiantes). Esta operación se realiza con el acompañamiento de agua tratada, tanto para eliminar cualquier residuo orgánico y por aspectos operativos del equipo de bombeo.

Las **bombas de arena** utilizadas son de desplazamiento positivo marca Wemco, de flujo en torsión y trabajo pesado, de impulsor abierto e inatascables. La potencia del motor es de 3 hp, la capacidad máxima de cada bomba es 9.5 l/s y su velocidad angular es de 1,200 r.p.m. Debido a la naturaleza abrasiva de la arena, las carcasas de las bombas son de fierro fundido ASTM 532.

#### **Cribas de arena**

Para separar la arena del agua de lavado, se utilizan cuatro cribas de tipo autolimpiante en acero inoxidable 316 fabricadas por HYCOR Corp. La arena se retiene en la malla, mientras que el agua de lavado sigue fluyendo para desaguar en los canales internos de la obra de cabeza entre las rejillas de barras mecánicas y el desarenador. El elemento de tamizado (rejillas) de estas cribas está hecho de mallas de acero inoxidable del tipo 316 con una abertura de malla de 0.5 mm. Las cribas tienen un ancho de 952.5 mm y una capacidad de flujo nominal de 16 l/s. Una sección vertical de una criba se muestra en la **figura 2.11**.

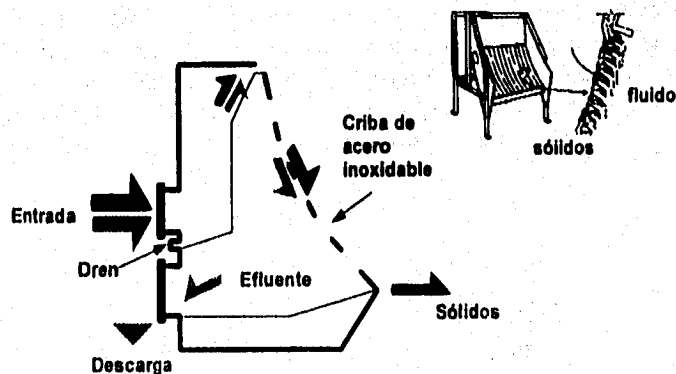


Figura 2.11 Criba para la remoción de sólidos finos.

#### **Banda transportadora**

Por medio de una banda transportadora con ancho de 0.61 m y 14.94 m de longitud se envían los sólidos retenidos, tanto en las rejillas mecánicas como en las cribas, hacia un

camión de carga para su disposición final. La velocidad máxima de transporte es de 30 m/min y la capacidad es de 70 kg/min. El medio de impulsión de la banda transportadora es un motor de 5 hp.

### Instrumentación y control

La instrumentación y control en esta parte del tratamiento están constituidos por:

- Timers y sensores de nivel de presión diferencial, que sirven para regular la frecuencia de operación de las rejillas mecánicas.
- Válvulas solenoides y timers permiten regular la frecuencia de introducción de agua no potable (agua de lavado) en las tolvas de almacenamiento de arena, con el fin de transportar los sólidos retenidos en las tolvas a las cribas de arena.
- Indicadores de falla de algún motor o pérdida de potencia en las obras de cabeza.

### 2.2.2.2 Tratamiento Secundario.

El tratamiento secundario incluye seis zanjas de oxidación con tres aireadores mecánicos cada una (18 en total), una caja de distribución de flujo, cuatro clarificadores secundarios y sus correspondientes componentes.

El agua residual fluye del proceso de tratamiento preliminar hacia las zanjas de oxidación por seis tuberías de 0.914 metros de diámetro (una para cada zanja). La mezcla del agua residual en las zanjas de oxidación, junto con suministro de aire, proveen un medio para el desarrollo de los microorganismos responsables de remover los contaminantes orgánicos del agua.

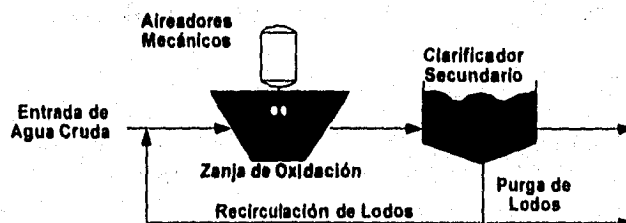


Figura 2.12 Esquema del tratamiento secundario.

De las zanjas de oxidación, el agua pasa a los clarificadores secundarios, donde se separan los sólidos. Una parte de ellos, por medio de un flujo de recirculación entre 40 y 150 % del

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

flujo de alimentación, se recircula a la obra de cabeza después del desarenador, y se mezcla con agua residual cruda para regresar nuevamente a las zanjas de oxidación. El resto de los lodos se dirige hacia los lechos de secado de lodos.

#### Zanjas de Oxidación

Cada zanja de oxidación mide 98.6 metros de longitud, 38.4 metros de ancho, y 6.7 metros de altura y tiene una capacidad individual de 17,850.7 m<sup>3</sup> (ver figura 2.13). El flujo de cada zanja de oxidación es controlado por vertederos ajustables que son operados eléctricamente, para proporcionan así, el nivel de líquido de la zanja de oxidación y la sumergencia del aireador, controlando con ello la cantidad de aire suministrada al agua residual así como la energía consumida por los aireadores mecánicos.

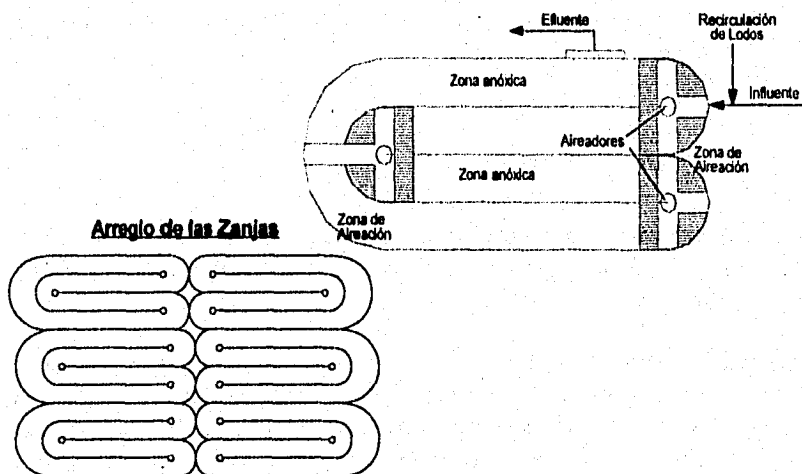


Figura 2.13 Arreglo y configuración de las zanjas de oxidación.

#### Aireadores Mecánicos

Cada zanja de oxidación esta equipada con tres aireadores mecánicos de media velocidad marca EIMCO, teniéndose un total de 18 (figura 2.14). Estos aireadores suministran el aire (que proporciona el oxígeno) al flujo de agua residual, promoviéndose el desarrollo de biomasa. Además, los aireadores producen una corriente con suficiente velocidad en los canales de la zanja (zona anóxica) para mantener suspendidos los sólidos.

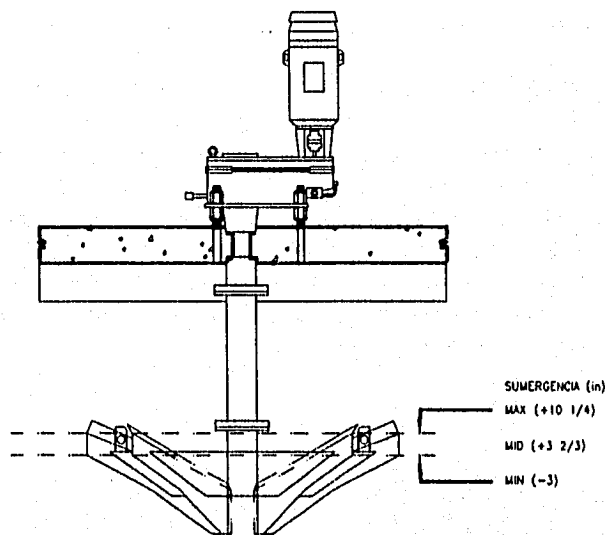


Figura 2.14 Rango de sumergencia del impulsor del aireador mecánico.

Cada aireador es accionado por un motor de 150 hp equipado con un mecanismo de reducción de la flecha e impulsor con una relación de 62.7 (reductor baja velocidad; 1,780-28.6 rpm). El impulsor se encuentra a 5.03 metros del fondo de la zanja. Los aireadores están diseñados para alcanzar y mantener una velocidad promedio del líquido en el canal de al menos 0.213 m/s (0.71 ft/s) a la capacidad máxima de operación. La transferencia de oxígeno, crucial para lograr el control óptimo del proceso, tiene un valor estándar de 2.13 kg O<sub>2</sub>/KW h (3.5 lbO<sub>2</sub>/hp h). En la tabla 2.9 se muestran los criterios de diseño para los aireadores.

Tabla 2.9  
 Criterios de diseño para los aireadores mecánicos

Parámetro	Valor
Tasa de transferencia de oxígeno real/DBO5	1.2
Tasa de transferencia de oxígeno real/NH3	4.7
Tasa de transferencia de oxígeno real en condiciones de diseño, kg/min.	31.1
Tasa de transferencia de oxígeno real en el gasto medio de diseño y sin nitrógeno, kg/min	35.8
Tasa de transferencia de oxígeno real, diseño, kg/min	33.6
Alfa $\alpha$	0.90
Beta $\beta$	0.95
OD mínimo, mg/l	1.00
Alitud, m	125
Temperatura máxima del agua, °C	30
Cs en el silo, mg/l	7.47
Tasa de transferencia de oxígeno real/Tasa de transferencias de oxígeno estándar	0.603
Tasa de transferencia de oxígeno estándar en las condiciones de diseño, kg/min.	55.7
Tasa de transferencia de oxígeno estándar/aireador, kg/hora	186
Tasa de transferencia de oxígeno estándar, kg/hp/hora:	
Con todos los aireadores operando	1.24
Con un aireador/tanque fuera de operación	1.49

Fuente: CAMP DRESSER & MCKEE INC., 1991

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

### *Caja de Distribución de Flujo*

Una caja de distribución de flujo, que mide 10.768 metros de longitud, 8.43 metros de ancho y 5.53 metros de altura, se localiza inmediatamente después de las zanjas de oxidación y recibe el efluente por medio de una tubería de 1.67m (66") de diámetro (figura 2.15). La caja de distribución sirve para identificar y controlar el flujo de agua residual de las zanjas de oxidación hacia cada uno de los cuatro clarificadores secundarios. Este control del flujo se realiza por medio de compuertas deslizantes individuales fabricadas en aluminio, que miden 3.04 metros por 0.80 metros con 0.013 metros de espesor. Al abrir o cerrar cada una de estas compuertas, se permite pasar al flujo de agua residual por tuberías individuales de 0.914 metros y entrar en el centro de cada clarificador secundario.

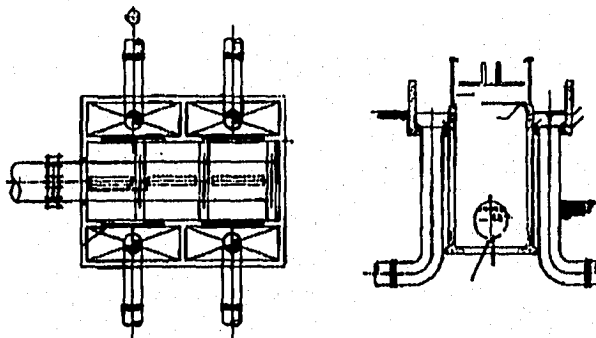


Figura 2.15 Caja de distribución de flujo (zanjas-clarificadores).

### *Clarificadores Secundarios*

Cada clarificador secundario está diseñado con un volumen de 13,250 m<sup>3</sup>, para un tiempo de retención de 10.8 h y una carga superficial de 14.94 m<sup>3</sup>/d (figura 2.16). El tanque mide 50 metros de diámetro y tiene un vertedor para el efluente de 47.8 metros de diámetro. La profundidad del líquido en pared lateral es de 6.35 metros con pendiente del fondo de 1:24. Las dimensiones de la mampara del influente (pozo de entrada) son de 16.50 m de diámetro y 4.25 m de altura. El influente sube por la tubería para entrar por la parte central del clarificador. Ahí, el agua residual choca contra una placa deflectora que distribuye el agua de manera homogénea sobre toda la superficie del clarificador. Una rastra central, accionada por un motor de 2.0 h, rota por toda la circunferencia al nivel del piso del clarificador, colectando los lodos que se sedimentan en el fondo. Los lodos son arrastrados hacia el centro del clarificador y se colectan en la tolva central. Parte de los lodos son bombeados hacia la cámara de distribución de flujo en la obra de cabeza para su redistribución hacia las zanjas de oxidación, mientras que la otra parte se envía al tanque de retención de lodos de purga para su posterior secado en los lechos. Los colectores de





## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

### 2.2.2.3 Sistema de Desinfección.

Con el proceso de desinfección se evita que ingresen al "Arroyo del Coyote" y finalmente al Río Bravo, niveles dañinos de organismos patógenos. El sistema está dividido en dos estructuras distintas:

- Edificio de cloración, sitio destinado para los evaporadores, cloradores y los cilindros de cloro y demás accesorios.
- Tanques de contacto de cloro, que además incluyen una cámara de inyección.

Otras infraestructuras a la salida de la instalación de cloración son:

- Un canal parshall como dispositivo de medición de flujo del efluente final.
- Un sistema de aireación en cascada para generar un alto nivel de turbulencia e incrementar el oxígeno disuelto.

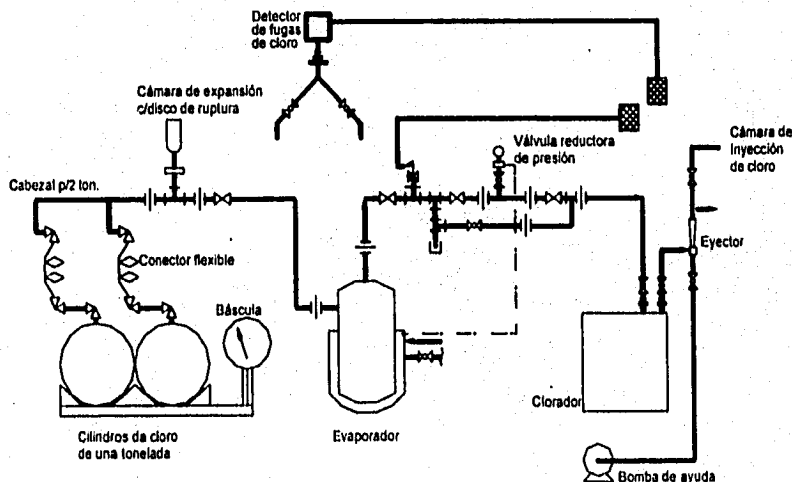


Figura 2.17 Tren del sistema de desinfección con cloro.

#### Cilindros de Cloro

El almacén ha sido diseñado para alojar 26 cilindros de 908 kg (2,000 lb) de capacidad, con un peso total de 1,658 kg (cilindro y cloro), con tasa máxima de cloro líquido de 400 lb/h, lo que significa que un cilindro puede ser vaciado en aproximadamente 5 horas. La capacidad de almacenamiento es de 26 unidades, considerando existencia para 20 días (ver figura 2.19).

Tabla 2.10  
Capacidad y dimensiones de un cilindro de una tonelada.

Tipo de Contenedor	Peso Neto	Peso Cilindro Vacío	Peso Bruto	Diámetro Exterior	Longitud
Contenedor de una tonelada	908 kg 2000 lb	590-750 kg 1300-1650 lb	1498-1658 kg 3300-3650 lb	0.7625 m 2'6"	2.027-2.097 m 6'7 <sup>3</sup> / <sub>4</sub> "-6'10 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> "

Los cilindros cuentan con dos válvulas, una para descargar gas cloro (parte superior) y otra para descargar cloro líquido (parte inferior).

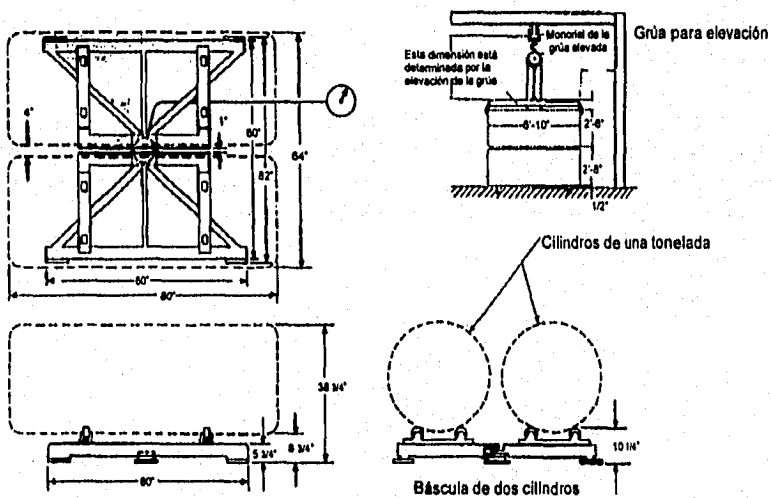


Figura 2.18 Cilindros de cloro de 908 kg (2000 libras).

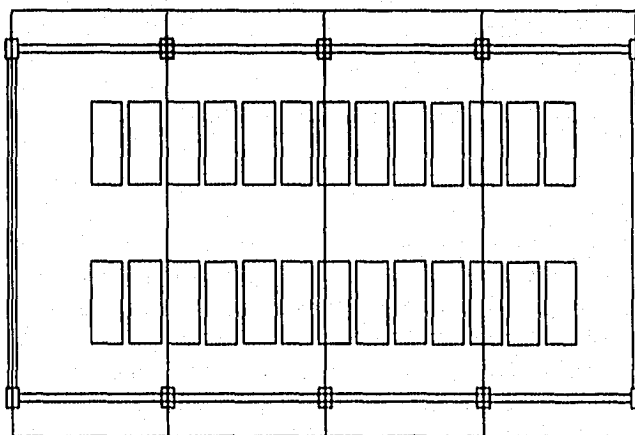


Figura 2.19 Arreglo del almacén de cloro.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

### Evaporadores de Cloro

Se cuenta con dos evaporadores de cloro marca Fischer & Porter, modelo 71V1106B, con una capacidad de 2,722 kg/d (6000 lb/día) cada uno. En general, este equipo apresura el cambio de cloro líquido a gas cloro (un evaporador nunca se utiliza con tanques de cloro de 150 lb). Esto permite que grandes cantidades de gas puedan ser suministradas, es decir mayores a 400 lb/día.

El cloro líquido que proviene de los cilindros es inmerso en un baño maría donde el cloro cambia de estado instantáneamente a una temperatura de 71°C (160°F) aproximadamente, la cual es controlada por un termostato.

El sistema de baño maría con recirculación por convección y la campana de sobrecalentamiento en la parte superior de la cámara de evaporación de cloro, permite que no sea necesario el uso de una bomba de circulación forzada de agua. Se cuenta con contactos de alarmas para monitorear externamente la operación.

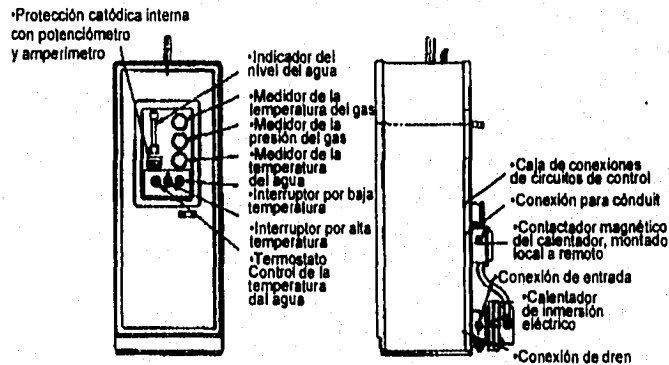


Figura 2.20 Evaporador de cloro.

### Cloradores

Se cuenta con dos cloradores marca Fischer & Porter, con capacidad de dosificación de 2,722 kg/d (6000 lb/día), con regulador de vacío montado externamente, con válvula de cierre positivo a prueba de falla de vacío (bomba de ayuda parada), es decir el cloro no pasa de la zona de alta presión a la zona de vacío en condiciones inseguras. Para verificar y ajustar la cantidad de cloro aplicada se utiliza un rotámetro instalado sobre el panel frontal del clorador, ejecutándose así la desinfección. Los gradientes de medición del flujo de gas cloro a través del rotámetro están en unidades de flujo másico (libras/día y kilogramos/hora).

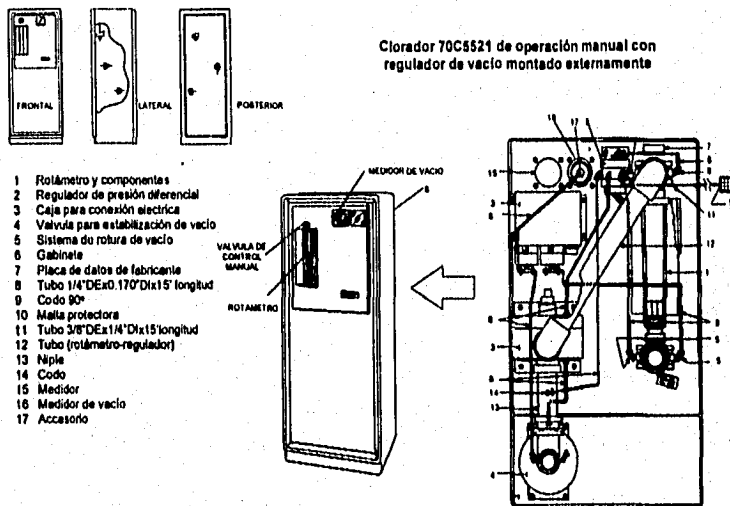


Figura 2.21 Clorador de operación manual con regulador de vacío.

**Eyectores**

El eyector es el primer punto de contacto de gas con agua; se cuenta con dos unidades de orificio fijo de 3" fabricados por Fischer & Porter. El eyector consiste de una reducción tipo venturi y de una válvula check de diafragma, donde el agua entra al venturi bajo una alta presión y baja velocidad, en el cuello estas condiciones cambian a baja presión y alta velocidad, creando un vacío parcial, este vacío lleva el gas cloro al venturi y la solución formada en este punto es descargada en punto de salida (cámara de inyección).

**Otros (Sistema de Desinfección)**

Además de los componentes mencionados anteriormente, se cuenta con los accesorios siguientes:

- Dos básculas Fairbanks Morse para dos cilindros de una tonelada. Uno de los métodos disponibles para determinar el contenido de cloro en los cilindros es a través de su diferencial en peso.
- Tres Conectores flexibles con válvulas de cabezal y de aislamiento. Estos conectores se utilizan entre la válvula inferior del cilindro y el cabezal principal para permitir un libre movimiento en los cambios de los cilindros.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

- Un cabezal para dos cilindros de una tonelada. Esta pieza es la tubería fija que interconecta los cilindros con el evaporador para la conducción del cloro líquido.
- Dos cámaras de expansión con disco de ruptura e interruptor de presión con sello químico. El disco de ruptura consiste de un diafragma de metal que se rompe cuando la presión del gas en el cabezal principal alcanza un valor predeterminado más grande que la presión normal de operación, pero menor que el máximo permisible, con el fin de proteger el equipo.
- Dos válvulas reductoras de presión con operación eléctrica a 120 VCA/60 Hz. Esta unidad sirve para controlar la presión diferencial del gas cloro y prevenir que cambie a cloro líquido (licuefacción).
- Dos válvulas de relevo y alivio. Esta es necesaria para proporcionar un relevo automático por exceso de presión que pudiera desarrollarse debido a que el evaporador esté aislado por el cierre de una válvula.
- Cuatro difusores de solución clorada de 3"x2.5m instalados en la cámara de inyección de cloro.
- Dos equipos de seguridad para respirar aire comprimido con tanque para 30 minutos, mascarilla, regulador de presión y alarma.
- Tres detectores de fuga de cloro.
- Dos motobombas Aurora de 15 hp, para 105 GPM y 6 kg/cm<sup>2</sup> como bomba de ayuda para la inyección de la solución clorada.

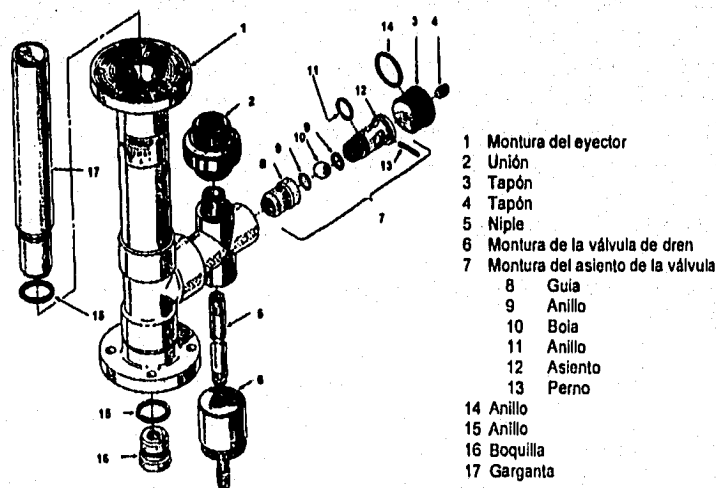


Figura 2.22 Eyector de 3".

### ***Cámara de inyección de la Solución de Cloro***

La cámara de inyección mide 10.3 metros de longitud y 2.4 metros de profundidad, siendo el punto donde el efluente del clarificador secundario es inyectado con solución de cloro. La cámara está dividida en dos secciones separadas, lo que permite al personal de operación aislar el flujo de agua.

### ***Tanque de Contacto con Cloro***

El tanque de contacto está diseñado para retener el agua por un período de tiempo el cual asegure la desinfección del efluente antes de ser descargado al Arroyo del Coyote. Esta estructura se encuentra localizada después de la cámara de inyección y también está dividida en dos secciones. Cada sección mide 32.7 metros de longitud, 14 metros de ancho y 3.6 metros de profundidad, con una pared de 3.6 metros de ancho entre ambas secciones.

Cada sección cuenta con 11 mamparas alternadas y perpendiculares a sus paredes. Aunque las mamparas son iguales en altura que el tanque, cada mampara es 3.75 metros mas corta que el ancho de las cámaras. Esta configuración particular fuerza al agua residual a realizar una trayectoria ondulante antes de que salga del tanque. La retención del agua residual de esta forma asegura que ésta y la solución de cloro tengan un tiempo de contacto adecuado para que el cloro actúe.

### ***Instrumentación y control***

Instrumentación y control:

- Controladores de temperatura para los evaporadores.
- Medidores de presión para el gas cloro en los cloradores.
- Rotámetro para el control del gasto de alimentación a los inyectoros.
- Detectores de fuga de cloro.
- Sistema de protección catódica provisto para los evaporadores
- Indicador en el panel eléctrico para una pérdida de energía en las instalaciones.

### ***Canal Parshall***

Para cuantificar el flujo del efluente del tanque de contacto, el agua residual desinfectada fluye a través de un canal parshall (dispositivo de medición) con tamaño de garganta de 3.0 m, equipado con un sensor ultrasónico de nivel. Antes de que el flujo pase por la garganta el agua tratada fluye por un canal rectangular de 5.5 m de ancho. Debido a las características del canal y a su configuración específica, se desarrolla una condición de flujo crítico corriente arriba y corriente abajo del canal. En términos básicos, para

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

cuantificar el flujo basta medir la profundidad del agua inmediatamente corriente arriba de la constricción (garganta) en el canal.

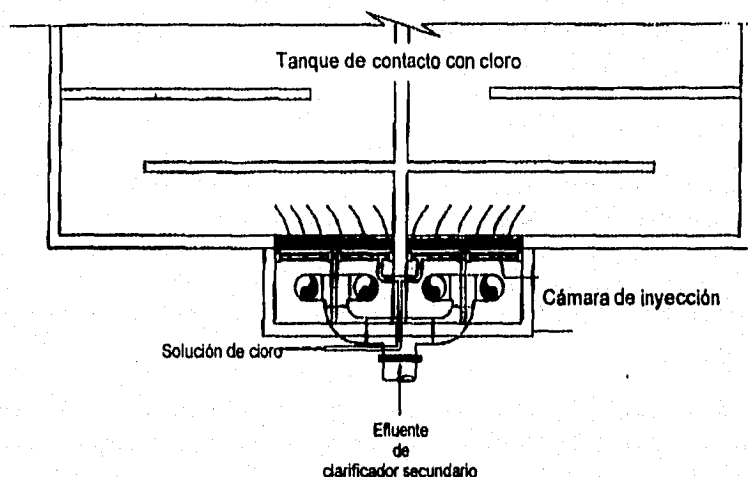


Figura 2.23 Tanque de contacto y cámara de inyección con cloro.

### Sistema de Aireación en Cascada

A la salida del canal parshall, el agua residual fluye en cascada; se trata básicamente de una serie de escalones de concreto colocados sobre la rivera y sobre el nivel del arroyo. Esta cascada crea un alto nivel de turbulencia facilitando el suministro de oxígeno al agua tratada antes de ser vertida en el arroyo. El valor del parámetro de descarga de la PTARNL respecto a la concentración de oxígeno disuelto en el efluente es de un mínimo de 2.0 mg/l.

#### 2.2.2.4 Sistema de Tratamiento de Lodo.

Los lodos generados en las zanjas de oxidación son producto del proceso biológico, que por medio del clarificador secundario son separados del efluente a desinfectar. Parte de la biomasa separada se recircula a la zanja de oxidación (via instalaciones de cabeza) y la otra se purga del sistema. La parte purgada es esencial para establecer un control sobre la densidad de población de microorganismos presentes en el proceso de lodos activados, por ello debe tratarse de mantener constante dicha población.

El exceso de lodos purgados, es decir removidos del clarificador, son llevados al tanque de retención de lodos de purga, donde posteriormente serán bombeados hacia los lechos de secado. Una vez que los lodos están suficientemente secos, son removidos del lecho en forma de "torta" y transportados a un relleno sanitario para su disposición final.

Es importante hacer notar que no se trata de un tratamiento el que se le da a los lodos generados; tan sólo es secado, es decir, una remoción de exceso de agua y esto es debido a la estabilización biológica realizada por las zanjas de oxidación. Para la estabilización de los lodos se tienen tratamientos químicos y de solidificación, así como el espesado, procesos que no serán utilizados en el proyecto. Para las rutas de disposición se dispone de los métodos de incineración, pirólisis, vitrificación o bien disposición directa en relleno sanitario; esta última es la que hasta el momento se tiene prevista.

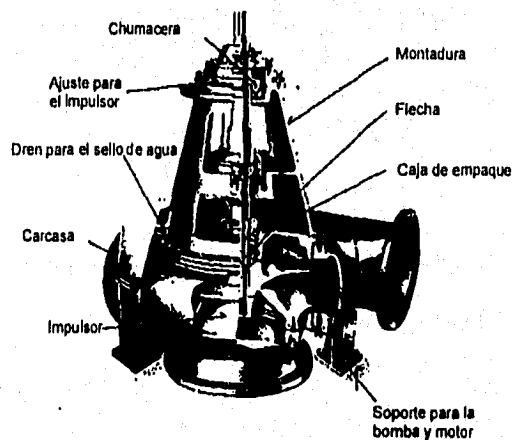


Figura 2.24 Bomba centrífuga de recirculación de lodos vertical.

### **Bombas de Recirculación de Lodos**

Existe un total de seis bombas de recirculación de lodos, tres de éstas están destinadas a dos clarificadores. Estas bombas tienen dos funciones: retornar el lodo del clarificador secundario a las zanjas de oxidación (vía obra de cabeza) o purgar lodo del clarificador secundario al tanque de retención de lodos. Las bombas son de tipo centrífugo horizontales de impulsor inatacable marca Worthington y están accionadas por un motor de 100 hp. Cada una de ellas es capaz de bombear lodo activado del clarificador



## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

secundario a las instalaciones de cabeza a un flujo de 410 lps. Las bombas de recirculación de lodos también pueden utilizarse para trasladar el lodo de purga al tanque de retención por medio de la abertura de las válvulas en las instalaciones de purga. En las figuras 2.25 se muestra un esquema representativo de las bombas para la recirculación de lodos de tipo horizontal y en la figura 2.24 una alternativa no tomada en cuenta para este proyecto.

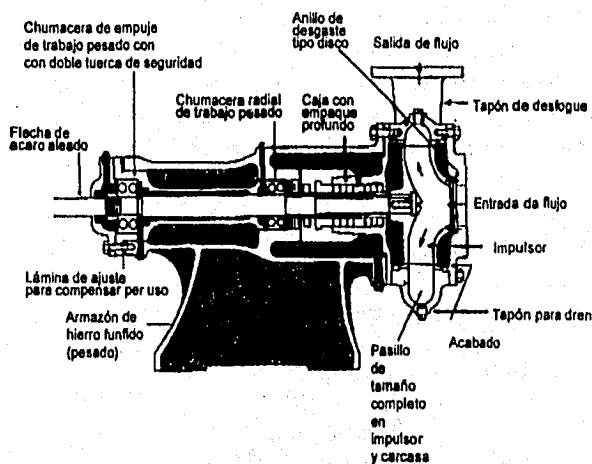


Figura 2.25 Bomba centrífuga de recirculación de lodos horizontal.

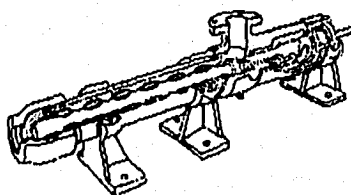
### Tanque de Retención de Lodo de Purga

Este tanque está constituido por dos celdas individuales que reciben lodo de las bombas de recirculación y retienen este lodo para su posterior aplicación sobre los lechos de secado. Este tanque está diseñado como tanque de almacenamiento de lodos que son retirados de alguno de los clarificadores. La estructura completa mide 30.48 m de longitud, 17.826 m de ancho y 6.80 m de altura, con una capacidad de 2937 m<sup>3</sup>. Una pared de 0.76 m de espesor divide la estructura para que una parte (o celda) de ella pueda quedar fuera de servicio o para que los lodos bombeados por las bombas de recirculación puedan ser aislados en un solo lado de la estructura.

En el fondo de cada celda hay cuatro tuberías de PVC de 0.152 m de diámetro que recorren toda la longitud de la estructura. Estas tuberías, en combinación con los difusores instalados en ellas, inyectan aire a los lodos, lo que asegura que no se vuelvan sépticos. Los difusores son marca Grave-Hawkins.

### **Sopladores de Aire**

Hay tres sopladores de aire de desplazamiento positivo marca Roots de 125 hp cada uno con capacidad de  $53 \text{ m}^3/\text{min}$ , con una presión de descarga de 7.2 psig, localizados cerca del tanque de retención de lodo. Estos sopladores sirven para inyectar aire al lodo almacenado en el tanque de retención. El aire es suministrado a través de una tubería de 0.203 m de diámetro cercana al fondo del tanque. El aire fluye a través de la tubería y sale por los difusores fijos, oxigenando así a los lodos.



**Figura 2.26** Bomba de desplazamiento positivo en torsión para purga de lodos.

### **Bombas de Purga de Lodo**

Se cuenta con tres bombas de lodo de purga de desplazamiento positivo tipo tornillo (cavidad progresiva) de una sola etapa marca Moyno, accionadas por un motor de 25 hp (carga dinámica total = 10.5 m, 13.9 psi). Cada una cuenta con capacidad de 41.6 lps. Se encuentran localizadas en la parte norte inmediata al tanque de retención de lodo. Estas bombas sirven para enviar el lodo del tanque de retención hacia los lechos de secado. La tubería de succión es de 0.203 m de diámetro.

### **Lechos de Secado**

Se cuenta con 80 lechos de secado, cada uno de 35m de longitud, 15 m de ancho y 0.50 m de altura. Los lechos de secado están divididos en tres grupos (lechos de lodo 1 a 24, 25 a 56 y 57 a 80). Cada uno de estos grupos están divididos a su vez en dos secciones iguales separadas por una pared de 0.20 m de espesor.

Una descripción de su sección transversal (a partir de la base) consiste de una tubería perforada de 0.152 m de diámetro, la cual colecta y transporta los lixivados que han sido liberados por el lodo; de una cama mayor de 75 mm de espesor de grava de 20 mm, una cama de 75 mm altura de grava de 6-12 mm, y una tercera cama de 75 mm de altura de grava de 3-6 mm, una cama de 75 mm de espesor de arena de 1.5-3 mm y otra de 200 mm de espesor con arena de tamaño de partícula 200. Estas variaciones en la

## **ARRANQUE Y OPERACIÓN**

Tratamiento de Aguas Residuales

---

granulometría del medio filtrante aseguran que el medio más pequeño instalado en lo alto del lecho sea sostenido en ese lugar por partículas más grandes y de esa forma fomentan el drenado de los lixiviados mientras que los sólidos son retenidos.

Un válvula de corte bridada de 0.203 m controla el flujo del lodo de purga bombeado desde el tanque de retención a través de una tubería de 0.762 m de diámetro y lo vierte sobre la superficie del lecho.

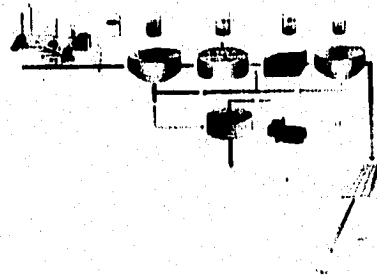
A través de una rampa de entrada, localizada en la parte opuesta del influente al lecho de secado se facilita la remoción del lodo seco por medio de camiones.

### ***Instrumentación y control***

El control e instrumentación del proceso, sólo consta de sensores de nivel e indicador en las dos celdas del tanque de retención de lodos.

## Capítulo 3

# Operación de la Planta



## CAPÍTULO III

### OPERACIÓN DE LA PLANTA

#### 3.1 DESCRIPCIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN.

El objetivo de esta sección es dar un panorama que oriente a los operadores de la PTARNL, al proporcionarles entre algunos puntos: los procedimientos bajo condiciones normales de operación, la función de cada uno de los procesos de tratamiento, una descripción breve de la instrumentación y control, y una descripción de los elementos clave de cada proceso unitario.

##### 3.1.1 Estación de Bombeo.

Bajo condiciones normales de operación, los equipos bombearán a la planta de tratamiento 1,360 l/s. Esto podrá lograrse manteniendo en servicio dos equipos de bombeo, pudiendo ser: un equipo por cárcamo (1,368 l/s) o dos equipos en un sólo cárcamo de bombeo (1,342 l/s). Al comparar las eficiencias de operación y potencias mecánicas demandadas a los motores (ver tabla 3.1), se observa que no existe una diferencia apreciable entre las dos formas de operación. Sin embargo, se recomienda que los dos cárcamos se mantengan en funcionamiento. En el anexo B se muestra información adicional de estas bombas.

**Tabla 3.1**  
**Operación de la estación de bombeo en condiciones normales.**

forma de operación	Flujo (l/s)	Eficiencia (%)	Potencia (hp)
Un equipo de bombeo por cárcamo.	1,368	78.8	275
Dos equipos en un sólo cárcamo.	1,342	76.5	274

Fuente: Instituto de Ingeniería, 1996

##### 3.1.2 Tratamiento Preliminar.

Las funciones de cada equipo del tratamiento preliminar son las siguientes:

1. *Compuertas deslizantes (ESLG)*. Control del flujo
2. *Canal alreado (Sopladores ; AC-01,02)*. Suministro de aire para prevenir la sedimentación de arena y evitar que el agua se vuelva séptica.
3. *Rejillas de barras (MB-01, MBS-01,02)*. Remoción de sólidos gruesos.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

4. *Banda transportadora*. Retirar los sólidos retenidos en el tratamiento preliminar para depositarlos en un camión de carga.
5. *Desarenador (GD-01,02)*. Remoción de arenas y sólidos sedimentables.
6. *Tolva de arena*. Almacenamiento de los sólidos separados del desarenador.
7. *Bombas de arena (GP-01,02)*. Transporte de sólidos y agua de lavado de las tolvas de arena a las cribas.
8. *Cribas de arena (GS-01,02,03,04)*. Separación de arena del agua de lavado.

El arreglo de estos equipos se muestra en la figura 3.1.

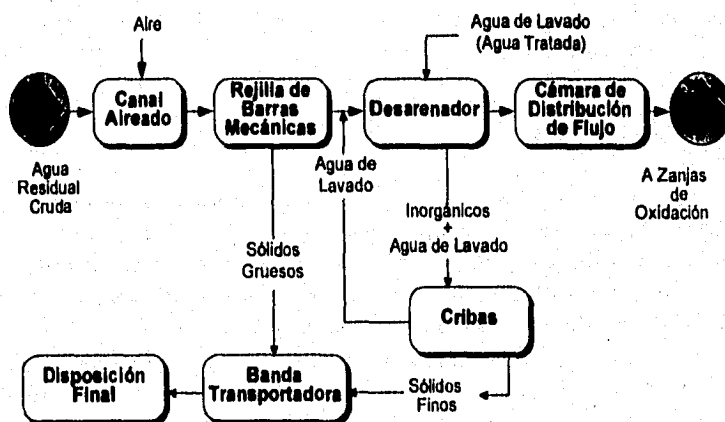


Figura 3.1 Diagrama del tratamiento preliminar.

El agua residual cruda es transportada de la estación de bombeo en conductos gemelos de 48" de diámetro (1219-WW-CS;  $\varnothing$  en mm, servicio, material de la tubería) a un canal aireado localizado en la obra de cabeza, estructura que será destinada para el tratamiento preliminar. A partir de este punto las aguas a tratar fluirán por gravedad hasta su vertimiento al Arroyo del Coyote. La aireación que se realiza por medio de un soplador, tiene como función prevenir la sedimentación de arena y evitar situaciones sépticas. Mientras esta aireación sucede, el agua residual fluye a través de las rejillas de barras (mecánicas o manuales) las cuales remueven los sólidos gruesos del fluido. Bajo condiciones normales de operación las rejillas de barras mecánicas son las que estarán en funcionamiento (ESLG-01,03); el movimiento de los rastrillos mecánicos será controlado normalmente por un timer automático. Sin embargo, también se contará con un sensor de nivel, el cual medirá indirectamente la presión diferencial a través de la rejilla. La presión diferencial de este sensor será de 600 mm de columna de agua.

Los sólidos removidos por las rejillas de barras mecánicas son depositadas en una banda transportadora, la cual traslada los sólidos fuera de la obra de cabeza a un camión de carga para su disposición final.

Después de que el agua residual ha pasado por las rejillas, el fluido es dirigido por gravedad a dos desarenadores tipo vórtice, donde es separada la arena, para ser depositada en una tolva de almacenamiento, que se encuentra debajo del desarenador. Posteriormente se removerán estos sólidos de las tolvas con la ayuda de agua de lavado, para bombearse finalmente hacia las cribas (localizadas cerca de la banda transportadora). Estos últimos equipos retendrán la arena, permitiendo sólo el paso del agua de lavado de nuevo hacia los canales de la obra de cabeza. En la tabla 3.2 se muestra las posiciones de las compuertas bajo condiciones normales de operación, con ello cada equipo estará habilitado o no, de acuerdo a la posición.

**Tabla 3.2**  
**Posición de las compuertas deslizantes y tubería bajo condiciones normales.**

Estructura	Posición
Compuertas deslizantes a la entrada de la obra de cabeza	Abiertas
Compuertas deslizantes para las rejillas mecánicas (ESLG-01,03)	Abiertas
Compuerta deslizante a la entrada de la rejilla manual (ESLG-02)	Cerrada
Compuertas deslizantes a la entrada del desarenador (ESLG-05,06)	Abiertas
Compuertas deslizantes a la salida de la rejilla manual (ESLG-04)	Cerrada
Tubería en la caja de distribución:	
Tubería de 36" a zanja en operación (914-ODI-CS)	Tubería abierta
Tubería de 36" a zanja fuera de operación (914-ODI-CS)	Tubería tapada
Línea de 42" para recirculación de lodos (1067-RAS-CS)	Tubería abierta

Después de que el agua residual ha pasado por los desarenadores, se vierte a una caja de distribución ubicada en la misma obra de cabeza, donde se combina con la línea de los lodos activados recirculados (1067-RAS-CS) proveniente del tratamiento secundario y de ahí se distribuye a las zanjas de oxidación. La caja de distribución contiene seis tubos verticales de 36" de diámetro (914-ODI-CS), cada uno con la misma elevación, que servirán como medio de transporte del agua a cada una de las zanjas de oxidación (ver figura 3.2). Esta misma elevación y debido a que siempre permanecerán abiertos, permitirá que el flujo sea proporcional entre las zanjas. También se cuenta con dos tubos ciegos de mayor elevación para una futura ampliación. Con un tapón de corte de flujo y con ayuda de un polipasto se cerrarán los tubos que no sean utilizados (cilindro de acero con un sello de neopreno alrededor de la circunferencia del tapón).

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

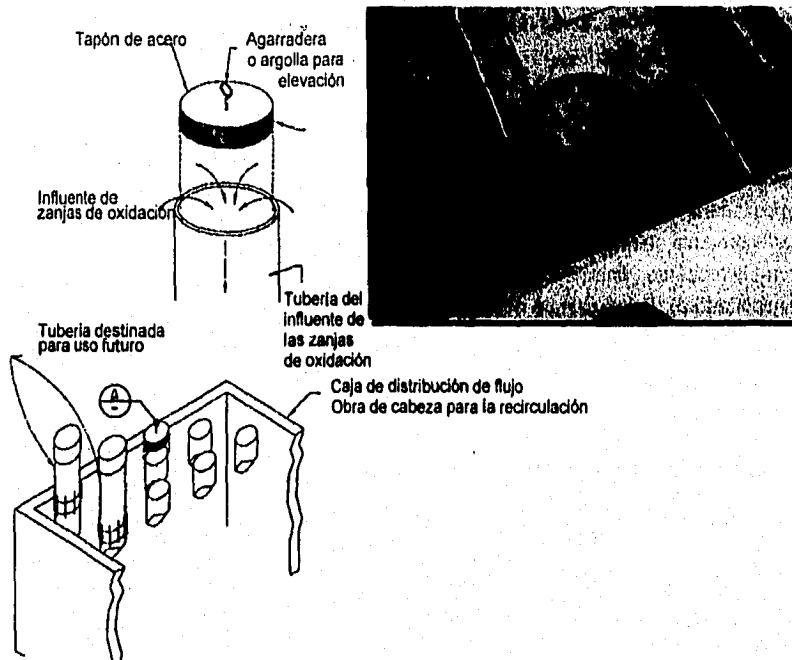


Figura 3.2 Caja de distribución de flujo de la obra de cabeza.

En condiciones normales de operación, las dos rejillas de barras mecánicas (MBS-01,02) y los dos desarenadores tipo vórtice estarán en funcionamiento (GD-01,02). La obra de cabeza tiene una capacidad máxima de 4,080 lps. El tiempo de ajuste de los timers en las barras mecánicas será ajustado de acuerdo a la experiencia adquirida en la planta, proponiéndose intervalos de 15 minutos durante el arranque. Las dos bombas de arena deben operar al menos una vez por hora, recomendándose también que durante el arranque sea en intervalos de 15 minutos, ajustando después de acuerdo a la experiencia. La frecuencia de operación de estas bombas es necesaria para prevenir que se tape la tolva de almacenamiento y tubería relacionada. Respecto a los soplaadores, sólo uno de ellos estará en funcionamiento, permaneciendo el otro en reserva.

Además, para completar la remoción, la banda transportadora debe estar siempre en funcionamiento para dar servicio tanto a las rejillas de barras mecánicas como a las cuatro cribas estáticas (GS-01/04). Debe verificarse que siempre se disponga del camión de carga o de un contenedor adecuado para recibir los desechos removidos de la obra de cabeza.



Durante la operación será importante verificar que los motores instalados en la obra de cabeza no presenten ruido inusual, vibración, desalineamiento y calentamiento excesivo. Cuando se realicen trabajos de mantenimiento en algunas de las rejillas mecánicas (una vez al mes o más si es necesario), primero debe ponerse en funcionamiento la rejilla manual y luego poner fuera de operación la mecánica, durante este periodo, de ser necesario remover del canal inhabilitado los sólidos depositados en el fondo mediante palas; cuando la rejilla manual se encuentre en operación hay que remover los sólidos mediante rastrillos en forma frecuente. Durante la operación de los desarenadores, es importante asegurarse del suministro de agua de lavado antes de accionar la bomba de arena, verificando que el intervalo de tiempo de las válvulas solenoides sea adecuado para la operación automática de limpieza y vaciado de las tolvas de arena.

### 3.1.3 Tratamiento Secundario.

El tratamiento secundario consta del siguiente equipo con su respectiva función (figura 3.3):

1. *Zanjas de oxidación*. Biodegradación de la materia orgánica.
2. *Aireadores mecánicos (AR's)*. Suministro de aire y mezcla.
3. *Vertederos de operación eléctrica (FWG's)*. Control de la sumergencia de los impulsores.
4. *Caja de distribución de flujo*. Distribución de flujo de las zanjas a los clarificadores.
5. *Compuertas deslizables (FSLG-01/04)*. Control de flujo hacia los sedimentadores.
6. *Clarificadores secundarios (SC-01/04)*. Separación de sólidos suspendidos del agua tratada.
7. *Mecanismos de recolección de lodos*. Colector de lodos.
8. *Mecanismos de recolección de natas*. Colector de residuos en la superficie.

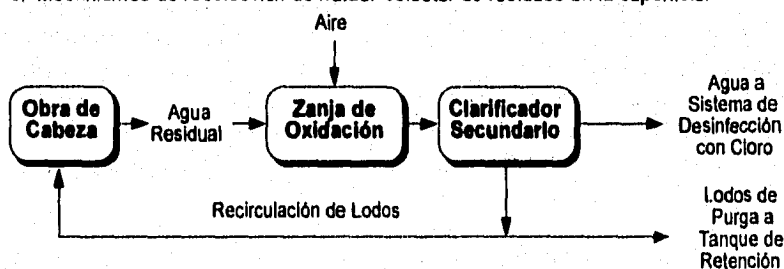


Figura 3.3 Diagrama del tratamiento secundario.

Es conveniente aclarar que la planta no cuenta con un sistema de tratamiento primario, debido a que el proceso biológico trabaja bajo aireación extendida y una de las ventajas de este sistema es minimizar la manipulación de lodos.

## **ARRANQUE Y OPERACIÓN**

Tratamiento de Aguas Residuales

---

En condiciones normales de operación, la planta trabajará con las seis zanjas de oxidación y con los cuatro clarificadores secundarios. En la sección 3.3 se presentará con detalle la forma de operación y como llegar a ella; por el momento sólo bastará presentar en forma general el proceso de tratamiento secundario.

### ***Tanques de Aireación.***

La aireación es primordial para la biodegradación de la materia orgánica, por ello el control en el suministro de oxígeno por parte de los aireadores mecánicos y el control de la sumergencia de los impulsores a través del nivel de los vertederos es sumamente importante. Los aireadores mecánicos suministran aire al agua residual para que los microorganismos se desarrollen en lodos activados sanos, además de mantener los sólidos en suspensión.

La cantidad de oxígeno disuelto (OD) y la cantidad de los lodos activados en la zanja están directamente relacionados con el grado de inmersión de las paletas de mezclado. Sin embargo, debe ponerse en claro que mientras mayor sea el nivel del agua residual sobre las paletas de mezclado, se necesitará mayor amperaje para operar los aireadores.

En condiciones normales de operación deberá trabajarse con las seis zanjas de oxidación, con operación de sus tres aireadores. Sólo se trabajará en forma intermitente durante el arranque u otras causas que lo justifiquen.

### ***Clarificadores Secundarios.***

Como se mencionó anteriormente, los lodos activados fluyen de las zanjas de oxidación hacia los clarificadores secundarios (figura 3.4). En estos últimos se tiene un tiempo de retención de 10.8 horas con gasto promedio de 340 l/s en cada clarificador. Cuando los sólidos alcanzan el fondo, son recolectados por una rastra que los empuja hacia una tolva central, de donde son bombeados como "lodos de recirculación" o "lodos de purga". El efluente (o sobrenadante) fluye sobre los vertederos hacia una tubería que lo conduce a la cámara de inyección de solución de cloro para desinfectar el agua tratada en la unidad de contacto con cloro.

Debido a que los mecanismos de recolección de lodos y natas permanecen unidos, será fácil de identificar si ambos operan adecuadamente, ya que utilizan el mismo motor y el movimiento de la rastra superficial indica que el colector del fondo también se está moviendo. También debe tenerse en claro que existen trabajos de mantenimiento que deberán incluirse en la operación real de la planta, situación que no aplica a este trabajo por los alcances establecidos.

Bajo condiciones normales los cuatro clarificadores y el sistema de rastras deben permanecer siempre en operación. Toda la longitud del vertedero del efluente debe tener el mismo nivel para asegurar una evacuación homogénea del agua tratada.

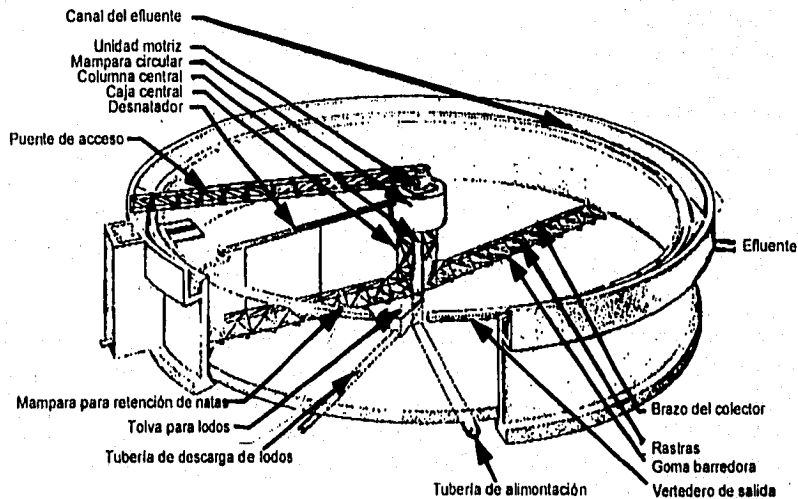


Figura 3.4 Componentes de un clarificador secundario.

Fuente: CNA, 1985

#### Control del Proceso.

Como se verá más adelante (sección 3.3) el control operacional de un sistema biológico aerobio puede ser clasificado acorde a las variables objetivo de la acción de control. Estas variables pueden ser mediciones directas de la calidad del efluente, o pueden ser estados o indicadores que reflejen indirectamente el desempeño del proceso:

- Calidad del efluente (e.g. DQO, nitrógeno, etc.)
- Control del oxígeno disuelto (e.g. método convencional, perfil de OD, etc.)
- Control mediante indicadores del proceso (e.g. relación F/M, edad de lodo, tasa de utilización de oxígeno)
- Inventarios de sólidos (concentración de SSLM, masa de lodo)

Generalmente se acostumbra manipular tres variables para su control: flujo de recirculación de ( $Q_r$ ), flujo de purga ( $Q_w$ ) y suministro de oxígeno (OD) (Sperling & Lumbers, 1991).

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

#### 3.1.4 Sistema de Desinfección.

El equipo que constituye el sistema de desinfección es el siguiente:

**Almacén de cloro (para 20 días):**

1. *Cilindros de cloro.* Suministro de cloro con 978 kg por unidad.
2. *Evaporador de cloro.* Obtención de gas cloro.
3. *Clorador.* Dosificación de gas cloro.
4. *Eyector.* Primer punto de contacto entre el agua y el gas cloro (solución de cloro).
5. *Bombas de ayuda.* Suministrar el agua de dilución para el gas cloro.
6. *Cámara de inyección.* Aplicación de la solución clorada al efluente de la planta
7. *Tanque de contacto con cloro.* Lograr un tiempo de retención aproximado de 30 minutos para el contacto entre el cloro y el efluente de la planta.

Bajo condiciones de operación normal, la dosificación de cloro será de 1,175 kg/día (2,588 lb/d) con dosis de 9 mg Cl<sub>2</sub>/l. Los datos de dosificación de cloro para diferentes flujos de diseño están incluidos en la tabla 3.3, aunque la dosificación de diseño podría cambiar de acuerdo a los resultados en las pruebas de cloro residual y de ser necesario se ajustaría la dosificación una vez por turno. Siempre deben programarse tiempos de abastecimiento de cloro para 20 días de almacenaje.

**Tabla 3.3**  
**Dosificación de cloro según proyecto.**

Parámetro	Condiciones de Diseño (lps)	Dosis de Cloro <sup>a</sup> (kg/día - lb/día)
Flujo promedio diario de diseño (año 2000)	1360	1175 - 2588
Flujo máximo diario de diseño	2448	2115 - 4657
Flujo pico de 2 horas de diseño	3600	2177 - 4796
Flujo promedio diario de diseño (año 2010)	1800	1555 - 3425

<sup>a</sup> 9 mg/l con el flujo de diseño y 7 mg/l con el flujo pico

Antes de iniciar la operación de cualquiera de las dos líneas disponibles de cloración, el evaporador siempre debe precalentarse por un lapso de 20 minutos aproximadamente. También es importante revisar que los cilindros de los cuales se va extraer el cloro, hayan sido montados adecuadamente, donde las dos válvulas de salida se encuentre en la misma posición vertical.

Bajo condiciones normales de operación, sólo una báscula con dos cilindros de una tonelada estará en funcionamiento, conectando únicamente la válvula inferior de estos cilindros a un cabezal principal de tubería flexible para permitir que el cloro líquido pase al interior de uno de los evaporador. El gas cloro obtenido en el evaporador fluirá hacia el clorador, que por medio de una válvula de control de flujo manual y un rotámetro instalados sobre el panel frontal, se permitirá al personal de operación controlar el flujo de dosificación

de cloro en libras/día y en kilogramos/hora (carátula del rotámetro). Posteriormente el cloro es succionado por el eyector para combinarse con una corriente de agua tratada y así llevar esta solución por medio de una tubería de 0.0762 m (3") de diámetro hacia una de las cámaras de inyección de cloro. En seguida se mantendrá un tiempo de contacto entre el cloro y el efluente de la planta dentro de uno de los tanques de contacto. El agua clorada pasa por un medidor de flujo Parshall y es finalmente evacuada. La figura 3.5 presenta un esquema de este sistema.

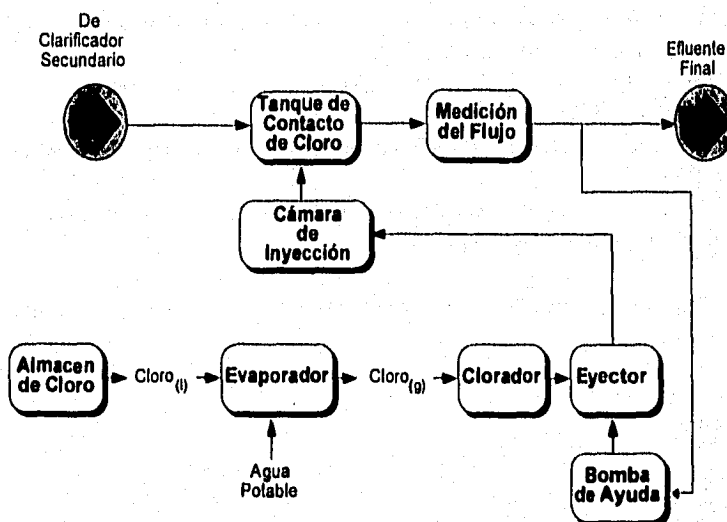


Figura 3.5 Diagrama del sistema de desinfección.

El agua tratada que se suministrará al eyector será por medio de una bomba de ayuda de 7.5 hp de potencia y tubería de 0.064 m (2 1/2"). Este sistema generará una alta presión y baja velocidad a través del inyector tipo venturi provocando un vacío dentro de éste. Este vacío abrirá la válvula de entrada del regulador de vacío en el clorador, permitiendo que el gas cloro fluya desde el clorador hacia el eyector. Debe cerciorarse del buen funcionamiento de esta operación, mediante la existencia de un "silbido" en el sistema; si no lo hay, verificar corriente arriba de la línea.

Es importante mencionar que cuando se realicen trabajos de mantenimiento en alguno de los tanque de contacto con cloro, hay que realizar una limpieza en el fondo de ellos, ya que se encontrarán sólidos depositados durante la operación.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

### 3.1.5 Sistema de Manejo de Lodos.

En esta etapa el equipo consiste de:

#### Recirculación de lodos.

1. *Bombas de recirculación.* Control del flujo de lodo del clarificador a la obra de cabeza (caja de distribución).

#### Purga de lodos.

2. *Tanques de retención.* Almacenar los lodos purgados del proceso biológico para su posterior aplicación a los lechos de secado.
3. *Sopladores.* Inyección de aire para mantener a los sólidos aireados y evitar el desarrollo de un lodo séptico.
4. *Bombas de purga.* Transportar el lodo de los tanques de retención a los lechos de secado.
5. *Lechos de secado.* Eliminación de agua contenida en el lodo (desechado), debido a la acción de evaporación y percolación.

En la figura 3.6 se muestra un diagrama del manejo de lodo, con los equipos mencionados.

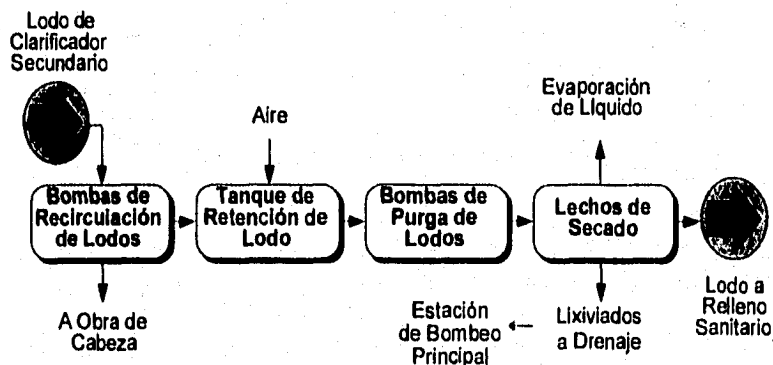


Figura 3.6 Diagrama del manejo de lodos.

La concentración de operación de lodos activados en las zanjas de oxidación debe estar entre 3,000 y 6,000 mg/l. Por ello, conforme parte del lodo sea recirculado del clarificador la otra parte se retirará como lodo de purga, para mantener la concentración de diseño de lodos en el tanque de aireación. Esto asegurará que los microorganismos que permanecen en el proceso sean saludables y tengan una edad de lodo de 20 días aproximadamente. La información relativa a los análisis y las decisiones que deben tomarse respecto a este procedimiento son discutidas en la sección 3.3.

#### **Recirculación de Lodos.**

Cuando el lodo sea recirculado a la obra de cabeza del tratamiento preliminar, debe verificarse la posición de las válvulas de succión de los dos grupos de bombas de recirculación (RSP-11,12,13 y RSP-21,22,23), para poder controlar el flujo del clarificador a la bomba. Así como las válvulas de descarga (bombeo simultáneo hacia las instalaciones de cabeza y tanques de retención). Cada grupo de bombas se conectan a dos clarificadores, compartiendo una entrada común hacia un cabezal principal. De esa forma cualquiera de las tres bombas podrá bombear lodo de cualquiera de los dos clarificadores.

En operación normal, el lodo de cada clarificador es bombeado simultáneamente hacia las instalaciones de cabeza (caja de distribución) y los tanques de retención a un régimen continuo por medio de su respectiva bomba. El flujo esperado en condiciones normales es de 26.9 l/s, con una concentración de lodo de 0.75 %. Esta operación asegura que el lodo no sea retenido en el clarificador por períodos demasiado largos.

#### **Purga de Lodos.**

La experiencia en la operación y el control analítico del proceso biológico ayudarán a determinar la cantidad apropiada de lodo que en un momento dado debe purgarse de los clarificadores secundarios. Como se verá más adelante, el valor del tiempo de retención celular es importante para tomar esta decisión.

Existen tres bombas de purga (WSP-01, WSP-02 y WSP-03) localizadas adyacentemente al tanque de retención de lodos. La tuberías de succión de estas bombas se encuentran conectadas a un cabezal que a su vez se conecta a ambas celdas del tanque de retención. Hay que recordar que el tanque de retención se divide en dos celdas por aspectos operativos. Respecto a las tuberías de descarga de las bombas de purga, éstas se conectan a un cabezal principal que es dirigido a los lechos de secado. Esta configuración permite que alguna de las tres bombas pueda succionar de cualquiera de las celdas del tanque de retención.

Bajo condiciones normales de operación, el tanque de retención tendrá un tiempo de descarga de 8 horas por día, si esta operación se divide en 2 turnos, se tendrá una doble operación de 4 horas. Mediante un sistema que minimiza la cantidad de agua en el tanque se espera una concentración del lodo descargado de 0.94 %, con un flujo de descarga de 21.5 l/s, manejando por lo tanto, para los dos ciclos de 4 horas un caudal de 64.5 l/s (1,022 GPM). En estas condiciones el tanque de retención sólo es capaz de almacenar el lodo por 3 días.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

Una vez que los lechos de secado se han identificado y preparado para aceptar lodo, deben abrirse tanto válvulas de succión y descarga de las bombas de purga, así como las compuerta de entrada de los lechos de secado programados. Las bombas de purga puede ser arrancadas o detenidas usando un interruptor a control remoto provisto para cada grupo de lechos.

Es importante que el operador configure correctamente las válvulas en el tanque de retención mientras se le envía lodo y se realiza simultáneamente la recirculación hacia las instalaciones de cabeza (ver figura 3.7). Debido a que se cuenta con bifurcación de la tubería de descarga de las bombas de recirculación (762-SSL-CS), dicha división consiste de una línea dirigida a la obra de cabeza (1067-RAS-CS) y otra línea en dirección a las instalaciones de purga de lodos (254-WAS-CS). Respecto a la configuración de las válvulas del influente del tanque de retención de lodo (254-LPEL-01/02) éstas se encuentran después de que la tubería principal de llegada se divide en dos en la parte sur de la pared del tanque de retención y entran a las dos celdas del tanque. Esta configuración permite que el lodo sea bombeado de los clarificadores secundarios a una o ambas celdas del tanque.

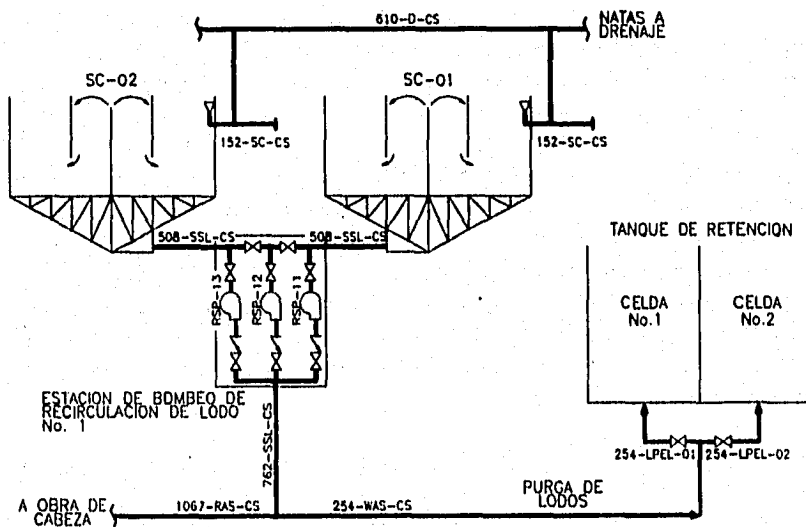


Figura 3.7 Arreglo del sistema de recirculación de lodos.

Ya que la última etapa de tratamiento es el secado del lodo, es importante minimizar la cantidad de agua que queda atrapada en el mismo. Por lo tanto, de una a tres horas



antes de que el lodo sea transferido a los lechos de secado, el flujo de aire en el tanque de retención debe suspenderse para permitir que los sólidos sedimenten en el fondo, separándose una pequeña porción de líquido (sobrenadante). El sobrenadante puede entonces ser removido mediante la abertura de las compuertas de los vertederos localizadas en la parte norte y superior de la pared de cada una de las celdas. Esta compuerta permite al sobrenadante fluir por las líneas de drenaje e ir a la estación de bombeo principal y nuevamente fluir a la obra de cabeza.

Bajo condiciones normales de operación sólo un soplador de los tres alimentará aire a una de las celdas del tanque. Los sopladores de aire comparten una tubería de descarga común (cabecal). Esta se encuentra conectada a una de las paredes del tanque de retención y entra en éste por la parte alta de la estructura, a través de un tubo de 0.203 m fabricado en acero inoxidable 304.

El lodo obtenido del tanque de retención es bombeado a los lechos, debiendo esparcirse homogéneamente a lo largo y ancho del lecho, hasta alcanzar un tirante de 0.30 metros. Sin embargo, basados en la predicción del clima (ambiente seco y condiciones de baja humedad), se podría tener una profundidad tan grande como 0.45 metros, logrando aún una buena deshidratación del lodo. Cuando se observe la formación de grietas en la superficie del lodo indicará que el lodo puede ser removido por medio de una pala mecánica (ver figura 3.8).

Los lechos de secado de la planta de Nuevo Laredo han sido diseñados con dos guías paralelas o "huellas" de concreto. Estas guías se extienden a lo largo de cada lecho para proporcionar acceso a una pala mecánica o camión de volteo. Para el lodo que se aloja en las esquinas del lecho y otras áreas donde el espacio es muy limitado para la operación del camión, será necesaria una remoción manual con palas. Durante la remoción del lodo seco, se debe evitar el disturbio de las camas de arena y grava o bien de la tubería del sistema de drenaje.

Programando la remoción diaria de lodos se puede sistematizar su manejo. Un ejemplo obvio es el tanque de retención de lodo de purga, cuya estructura en condiciones normales de operación sólo es capaz de almacenar por tres días la producción de lodo, como se mencionó anteriormente.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales



Figura 3.8 Lecho de secado típico con lodo listo para ser removido.

A continuación se mostrará un procedimiento para poder programar la cantidad de lodos a aplicar a los lechos de secado. La producción de lodo de purga de diseño es de 21.5 l/s (1,022 GPM) con una concentración estimada del 0.94 %, esto quiere decir 17,723.4 kg SST/día; este valor puede variar dependiendo de las características del sistema.

### Ejemplo de cálculo:

#### A. Datos necesarios.

Area de los lechos de secado =	525 m <sup>2</sup>
Tirante máximo permisible =	0.45 m
Volumen por lecho (V <sub>L</sub> ) =	236.25 m <sup>3</sup>
Concentración del lodo descargado =	0.94%
Densidad del lodo (ρ <sub>H<sub>2</sub>O</sub> ) =	1010-1020 kg/m <sup>3</sup>
Flujo de diseño de purga de lodo (Q <sub>w</sub> )=	26.8 l/s

#### B. Cálculo de los lodos aplicados a un sólo lecho de secado.

$$\text{kg de lodo a aplicar en los lechos} = (236.25 \text{ m}^3)(1015 \text{ kg/m}^3)(0.0094)$$

$$\text{kg de lodo a aplicar en los lechos} = 2,254.06 \text{ kg SST/lecho}$$

*C. Cálculo de los kg de lodo seco a remover por año.*

Generalmente un lodo para lechos de secado tarda de 10 a 15 días para secar en condiciones favorables (Metcalf & Eddy, 1991) y medio día para ser removido. De acuerdo a lo anterior la cantidad de lodo seco a remover por lecho tomando 13 días promedio es:

$$\frac{2,254.06 \text{ kg SST}}{13 \text{ d}} = 173.4 \text{ kg SST/d/lecho} = 63,287 \text{ kg SST/año/lecho}$$

La tasa de carga de lodo (kg SST/m<sup>2</sup>/año) puede calcularse de la siguiente manera:

$$\frac{63,287 \text{ kg SST/año/lecho}}{525 \text{ m}^2/\text{lecho}} = 120.6 \text{ kg/año/m}^2 \text{ (24.7 lb/año/ft}^2\text{)}$$

Para comprobar si efectivamente los 80 lechos tendrán capacidad para todo el año con esta producción se realiza el siguiente cálculo:

$$173.4 \text{ kg SST/d/lecho (80 lechos)} = 12,296.8 \text{ kg/d}$$

Comparados con la producción de 17,723.4 kg/d se puede observar que si se cuenta con la capacidad suficiente, pero realizando cálculo con el tirante de operación normal de 0.3m, se llegaría a una capacidad de 9,248 kg/d, que como puede verse no satisface los requerimientos, pero es claro que las condiciones climatológicas, el flujo de purga de lodos y la concentración de SST definirán el tiempo de remoción real. Como se verá más adelante para una planta de este tipo el dato de concentración de lodo descargado de diseño aún puede aumentar, ya que su rango recomendado es de 8,000 a 15,000 mg/l, con lo que se puede disminuir el caudal de purga. Esta deducción puede observarse de la ecuación 1.29, ya que la purga ( $Q_w$ ) es inversamente proporcional a la concentración  $X_r$ .

$$\theta_c \approx \frac{V_r X_r}{Q_w X_r} \quad 1.29$$

### 3.2 MONITOREO DEL PROCESO.

El monitoreo del proceso ayuda a disponer de información para poder diagnosticar en todo momento el estado de la planta y así aplicar alguna medida de control en caso necesario. Dentro de los métodos de monitoreo se encuentran los visuales y los analíticos. Muchas de las variables involucradas en la planta pueden ser controladas y

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

otras no, por ejemplo las características y variaciones del flujo del agua residual son condiciones que no se pueden variar.

Los indicadores sensoriales más importantes involucran observaciones tanto en el tanque de aireación como en el clarificador secundario:

**Tabla 3.4**  
**Indicadores sensoriales en el tanque de aireación.**

Color	Forma del flujo
Olor	Tacto en los equipos
Espuma	Burbujas *
Crecimiento de algas	Turbiedad del efluente *
Características de la agitación	Materia flotante *
Acumulación de sólidos	

\* Indicadores en el clarificador secundario.

Adaptada de Junkins, et al., 1985

En el caso de los indicadores analíticos, el oxígeno disuelto, los sólidos suspendidos totales y volátiles en el tanque de aireación son indispensables para el control de la operación. Las pruebas de sedimentabilidad, índice volumétrico de lodo y medición de la cama del lodo en el clarificador son también necesarias para determinar los flujos de purga y recirculación. Además, análisis complementarios de microbiología son de mucha utilidad. Una operación adecuada se verá en el grado de remoción que logra de la materia orgánica, por lo que su seguimiento es obviamente necesario, ya sea como DQO o DBO.

### 3.2.1 Monitoreo Sensorial del Proceso.

La observación principalmente de carácter visual de algún cambio en el proceso son parte de la experiencia, que habrá de adquirirse para poder tomar decisiones dentro de la planta, por ejemplo cómo saber que medidas son las pertinentes si se identifica una alteración debido a la presencia de una abundante espuma blanca.

#### 3.2.1.1 Monitoreo en el Tanque de Aireación.

Existen un gran número de problemas operacionales en un tanque de aireación; en esta sección sólo se verán los más comúnmente encontrados en un proceso de lodos activados, tales como olor y presencia de espuma entre otras. En la tabla 3.4 se muestran un resumen de los problemas más comunes, con sus causas más probables y remedios.

#### **3.2.1.1.1 Color del licor mezclado y olor.**

El color del licor mezclado puede indicar un lodo pobre o saludable. Si el color está entre un café tenue y café oscuro y además de un olor ligero a tierra húmeda o hongos, lo más probable es que el lodo se encuentre en buenas condiciones. Si el color es gris, la planta no está recibiendo suficiente aire, lo que probablemente significaría que los aireadores no operan lo suficiente, o bien la planta está recibiendo demasiada carga orgánica, o la planta está recibiendo materiales tóxicos. Un color negro acompañado de un olor a huevo podrido (ácido sulfhídrico), indica que la planta está trabajando en condiciones sépticas. Cuando eso ocurra debe suministrarse una aireación adecuada y continua hasta que la planta se encuentre en buenas condiciones. Una planta bajo estas condiciones es resultado de una pobre atención por parte del operador, a no ser que haya presentado un cambio drástico en el caudal y las características del influente.

Debido a que la edad de lodo afecta la purga y por consiguiente el color del licor mezclado, se abundará en este rubro en la sección 3.3.2 referente al control de la purga.

#### **3.2.1.1.2 Espuma.**

La espuma puede indicar si existe un inapropiado nivel de sólidos o edad de lodo. La formación excesiva de espuma blanca indica una concentración de SSLM mucho menor al de diseño (4,000 mg/l) y con una F/M mayor a 0.15 kgDBO<sub>5</sub>/kgSSVLM/d, lo cual es indicativo de que la edad de lodo está muy por debajo de 20 días también, por lo cual el flujo de purga debe reducirse. Una espuma espesa muy oscura o negra indica un lodo muy viejo, por lo tanto, para corregir este problema debe incrementarse la purga gradualmente; si la espuma se encuentra en cantidades moderadas (25 %-50 % de la superficie del tanque) la edad de lodo aún es aceptable.

#### **3.2.1.1.3 Crecimiento de Algas.**

El crecimiento excesivo de algas en forma de lama sobre las paredes y vertederos del tanque es una indicación de un alto nivel de nutrientes en el influente de la planta y de un inadecuado mantenimiento (limpieza) de estas partes. Cuando esto se presente, generalmente se tiene ya una baja concentración de materia orgánica soluble. Las algas requieren para su crecimiento de nitrógeno al igual que fósforo, sin embargo, aún conteniendo un mínimo de nitrógeno en el agua residual, una alta concentración de fósforo puede ocasionar este problema.

## **ARRANQUE Y OPERACIÓN**

### **Tratamiento de Aguas Residuales**

---

#### **3.2.1.1.4 Características de la Aireación.**

El grado de aireación pueden indicar si el aireador mecánico se encuentra adecuadamente sumergido, de acuerdo a la profundidad especificada. Si hay una baja concentración de oxígeno disuelto en el tanque de aireación, es indicativo que este parámetro de operación del aireador debe ajustarse.

#### **3.2.1.1.5 Acumulación de Sólidos.**

La acumulación de sólidos en la paredes del tanque o en la superficie de alguno de los aireadores, indicarán que existe una mezcla pobre. Este problema puede identificarse mediante la introducción de un dispositivo nucleador en el tanque de aireación y observar si se encuentra depositado lodo en el fondo del tanque. La acumulación de sólidos es indeseable, debido a que reduce el efecto del volumen del tanque de aireación y puede afectar la eficiencia de remoción de la DBO.

#### **3.2.1.1.6 Forma del Flujo.**

Conforme se adquiere experiencia, el operador identificará la velocidad mínima en el canal de la zanja a simple vista que es de 0.305 m/s (1 f/s), ya que el sistema ha sido diseñado para proporcionar esta velocidad, la cual es seguida en un gran número de plantas en operación. Para ello, los aireadores han sido específicamente diseñados para mantener los sólidos del licor mezclado en suspensión con esta velocidad.

En algunas plantas de tipo carrusel, bajo ciertas condiciones de operación se puede observar que el licor mezclado comienza a separarse en la superficie formando un estrato de agua clara. Esta condición generalmente ocurre corriente abajo de la zona de aireación y a medida que el licor mezclado se aproxima a los verterderos, lo que es completamente normal. En efecto, esta condición indica que el licor mezclado tiene buena floculación y que va a sedimentar adecuadamente en el clarificador secundario; además, con esto se confirma que no se está suministrando energía en exceso. Esta condición llamada "sedimentación superficial", no significa que los sólidos se estén depositando en el fondo del tanque de aireación.

**Tabla 3.5**  
**Monitoreo sensorial en el tanque de aireación de zanjas de oxidación.**

Observación	Causa probable	Remedio
<b>Olor:</b>		
Tierra húmeda	Operación correcta	Verificar condiciones de operación, procurando mantenerlas constantes.
Olores fétidos Huevo podrido	Problemas de aireación Baja tasa de aireación (presencia de ácido sulfhídrico)	Aumentar tasa de aireación.
<b>Superficie del tanque de aireación:</b>		
Separación del licor mezclado en la superficie de la zanja formando una capa de agua clara, contenida abajo de zona aireada.	Aunque esta operación puede considerarse apropiada, el consumo de energía sería inadecuado, por lo que se tendría un eventual exceso de suministro de oxígeno.	Disminuir la sumergencia del aireador verificando la concentración de OD en el reactor.
<b>Presencia de espuma:</b>		
Espuma fresca no abundante y ligeramente colorida de canela tenue a café.	No hay problemas y la calidad del efluente es excelente.	Identificar condiciones presentes y tratar de mantenerlas constantes.
Formación excesiva de espuma blanca (muy densa).	<ol style="list-style-type: none"> <li>Se presenta durante un arranque (planta nueva).</li> <li>Lodo con un <math>\theta_c \ll 20</math> días.</li> <li>La concentración de los SSLM <math>\ll 4,000</math> y la F/M es mucho mayor de 0.1, ocasionada por purga excesiva, o bien suele suceder después de un periodo de baja carga orgánica (fines de semana o mañanas).</li> <li>Cuando ocurre repentinamente, es debido a la presencia de algún desperdicio tóxico el cual mata o inhibe a los microorganismos (baja consumo de oxígeno en el tanque). Otras causas son el pH muy bajo o muy alto (<math>&lt; 6.5</math> ó <math>&gt; 9.0</math>), OD insuficiente, deficiencia de nutrientes o por cambios en la temperatura.</li> <li>Pérdidas de biomasa en el efluente del sedimentador debido a cargas hidráulicas, aspectos biológicos, deficiencias mecánicas o un alto nivel de la cama de lodo en el clarificador, o bien una mala distribución de flujo hacia los clarificadores.</li> <li>Mala distribución del agua residual y/o recirculación a las zanjas de oxidación.</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verificar el flujo de purga, tratando de mantener un caudal que conserve una cama de lodo más baja de un cuarto del volumen del clarificador, preferentemente de 0.3 a 0.9m del fondo.</li> <li>Detener la purga por unos días para incrementar la concentración de SSLM y del <math>\theta_c</math>, con valores a fijar nuevamente.</li> <li>Controlar el suministro de aire por medio de los aireadores mecánicos tratando de mantener una concentración de OD de 1.5 a 4 mg/l en el tanque de aireación.</li> <li>Verificar el flujo de recirculación comparando con el nivel de la cama de lodos y concentración de SST en el clarificador y con la concentración de los SSLM en el reactor.</li> </ul>
Espuma espesa, abundante, ligeramente grasosa y de color café oscuro.	<ol style="list-style-type: none"> <li>En cantidades moderadas, menores de un 25 a 50% de la superficie del tanque, indica que la edad del lodo es todavía aceptable.</li> <li>Cubriendo totalmente la superficie, es indicativo de un lodo viejo (<math>\theta_c</math> alto) que puede causar problemas en los clarificadores.</li> <li>Inapropiado programa del control de la purga.</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Incrementar gradualmente la purga en un 10% al día para incrementar la F/M y disminuir el <math>\theta_c</math>.</li> </ul>
Espuma muy oscura o negra.	Es indicativo de una insuficiencia de aireación, la cual da como resultado condiciones anaerobias, a tal vez por desechos industriales.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Incrementar la aireación.</li> <li>Disminuir la concentración de SSLM.</li> </ul>
<b>Licor mezclado:</b>		
Color pardo oscuro	Indicativo de un $\theta_c$ alto.	Aumentar purga
Color café claro	Indicativa de un bajo $\theta_c$ .	Reducir purga
Color negro	Indicación de deficiencia de OD.	Aumentar aireación o disminuir carga orgánica

Adaptado de Junkis, Deeny and Eckhoff, 1985

## **ARRANQUE Y OPERACIÓN**

### **Tratamiento de Aguas Residuales**

---

#### **3.2.1.1.7 Tacto en los Equipos.**

Aunque esto es parte de la rutina de mantenimiento, es posible que mediante el tacto breve en los equipos electromecánicos que se encuentran en operación se puedan identificar problemas. Por ejemplo, si las bombas, sopladores, aireadores mecánicos u otros motores se sienten más calientes de lo normal, deben revisarse inmediatamente para evitar costos adicionales por daños. Una excesiva vibración en una bomba y tubería previenen que un mal funcionamiento está sucediendo, y por ello deben corregirse también de inmediato para evitar serios problemas a futuro.

#### **3.2.1.2 Monitoreo en el Clarificador Secundario.**

Si el efluente final es claro o va mejorando día a día y la cama de lodos se mantiene baja o hasta un tercio de la profundidad del clarificador, obviamente debe continuarse con esta operación y no permitir que cambie. Sin embargo, si el efluente aparece turbio o contiene sólidos en demasía o la cama de lodo del clarificador se eleva a la superficie es posible que se presenten problemas en poco tiempo. Las características visuales y los análisis de laboratorio pondrán de manifiesto lo que se debe hacer.

##### **3.2.1.2.1 Lavado de Lodo.**

Este fenómeno puede ser algunas veces detectado repentinamente a pesar de que se observe una buena sedimentación en la prueba de sedimentabilidad del licor mezclado en 30 minutos (sección 3.2.2.1). En estos casos una gran cantidad de sólidos se eleva cerca del vertedero, a pesar de que la cama de lodo se encuentre más abajo de la mitad del sedimentador. La aparición de este problema puede confundirse con el abultamiento de lodos por encontrar la cama de lodo muy próxima a la superficie.

Algunas de las causas más probables del lavado de lodos son:

1. Mal funcionamiento del equipo.
2. Sobrecargas hidráulicas.
3. Altas concentraciones de sólidos.
4. Corrientes debidas a diferenciales de temperatura en el agua.

##### **3.2.1.2.2 Abultamiento del Lodo.**

El abultamiento de lodos se presenta cuando un grupo de sólidos esponjados flota y se extiende uniformemente a través de la superficie del clarificador, arrastrándose sólidos en el efluente final.



Generalmente si se observa en la prueba de sedimentabilidad que el licor mezclado sedimenta lentamente y poco compactado y con un sobrenadante claro, será indicativo de que **microorganismos filamentosos** están presentes. Esto puede corregirse mejorando las condiciones del tratamiento mediante la adición de nutrientes, tales como nitrógeno, fósforo u hierro y/o por corrección de la concentración del OD en el reactor, o bien por el acondicionamiento del pH.

Si durante la prueba de sedimentabilidad el sobrenadante es turbio y con sedimentabilidad lenta, indica un **abultamiento de crecimiento disperso** y esto es debido a una carga orgánica inadecuada, turbulencia debido a una sobreaireación o presencia de desechos tóxicos (metales pesados, ácidos o pesticidas).

Causas probables del abultamiento de lodos:

1. Si **microorganismos filamentosos** se encuentran presentes las causas podrían ser:
  - Existe una **baja concentración de OD** en el tanque de aireación.
  - **Insuficiencia de nutrientes.**
  - **Inapropiado pH**, debido a un valor bajo o una amplia variación.
  - **Presencia de una alta temperatura** en el agua residual.
  - **Amplia variación de la carga orgánica.**
  - **Desechos industriales con alta concentración de DBO** o deficiencia de nutrientes (N y P).
  - **Altas concentraciones de sulfuro.**
  - **Formación de *Nocardia* sp. propiciada por una baja F/M.**
2. Si hay muy pocos o no se encuentran presentan microorganismos filamentosos, indica un **abultamiento de crecimiento disperso** por:
  - Existir una **carga orgánica inapropiada**, debido a una muy baja o muy alta F/M.
  - **Turbulencia debida a una sobreaireación.**
  - **Se tienen presentes materiales tóxicos en el sistema.**

El primer paso para corregir este tipo de problemas es realizar un análisis al microscopio de los SSLM, para determinar si efectivamente microorganismos filamentosos se encuentran presentes.

#### **Presencia de microorganismos filamentosos.**

- Para verificar si efectivamente el abultamiento se debe a una baja concentración de OD, debe medirse ésta a una distancia de 20 a 30 m corriente arriba del vertedero de salida, cerciorándose de que, no se encuentre por debajo de 0.5 mg/l. Este

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

---

problema puede corregirse bajo ciertos criterios de operación de los aireadores mecánicos como se verá más adelante con mayor detalle.

La elaboración de un perfil de la concentración de OD en cada uno de los canales que componen la zanja ayudaría a corregir este problema.

- Aunque esta planta no está diseñada con un sistema de dosificación de reactivos (por tratarse de aguas de tipo municipal), es necesario corroborar si el problema de abultamiento se debe a una insuficiencia de nutrientes. Para esto hay que calcular las relaciones de DBO:nitrógeno (expresado como NTK), DBO:fósforo (expresado como P) y DBO:hierro (expresado como Fe). En los anexos se presentan algunos ejemplos de cálculo.

Si efectivamente existe una insuficiencia de nutrientes en el agua residual, dos cosas pueden pasar :

1. Las Bacterias filamentosas tienden a predominar o bien toman lugar en los SSLM.
2. La materia orgánica es sólo parcialmente convertida al producto final, debida a una ineficiente remoción de DBO o DQO.

Si se exceden en la adición de nutrientes al agua residual para compensar su deficiencia, podrían no incorporarse en el licor mezclado y eventualmente arrastrar el exceso al efluente final. Los nutrientes son caros y por ello si se decide aplicarlos debe realizarse con mucho cuidado.

- Si el pH en el tanque de aireación es menor de 6.5 o se presenta una amplia variación, la sedimentabilidad del licor se verá afectada, debido a que las bacterias a sedimentar se inhiben bajo estas condiciones. La causa principal es debido a desechos industriales, por lo que debe identificarse inmediatamente a la industria infractora.

También, un alto nivel de nitrificación destruye la alcalinidad y reduce el pH en el tanque de aireación. Si esta es la causa del problema y para asegurar una aceptable tasa de nitrificación, podría adicionarse bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ) ; sosa cáustica ( $\text{NaOH}$ ) o cal ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) a la entrada del reactor, tratando de mantener un pH por arriba de 7.0 (evitando llegar a los 9.0). La adición de estos reactivos pudiera ser costoso, por ello debe seguirse muy de cerca los cambios en el clarificador secundario. Si los cambios no muestran efecto alguno de 2 a 4 semanas, debe suspenderse el suministro de los reactivos.

- La presencia de una baja concentración de DBO soluble, propicia la formación de algunos tipos de microorganismos filamentosos los cuales compiten con la

formación de flóculos (abultamiento por baja F/M). Este problema no es muy claro aún, por lo que incluso se sigue estudiando este fenómeno (Kappeler & Brodmann, 1995). Una técnica sugerida para remediar este problema es instalando un dispositivo de mezclado en un punto del suministro del agua residual cruda y/o en alguna parte de la línea de la recirculación de los lodos. Con esto se propicia la formación de flóculos a expensas de los organismos filamentosos.

La cloración de la línea de recirculación es otra manera efectiva para controlar el abultamiento. Esto es gracias a que los microorganismos filamentosos se ven afectados por agentes oxidantes como el cloro.

Para determinar si el lodo sedimenta lentamente debido a que se encuentra abultado y tiene un  $\theta_c$  menor a 20 días o simplemente porque es espeso y tiene un  $\theta_c$  mucho mayor a 20 días, se puede realizar la siguiente prueba:

1. Correr tres pruebas de sedimentabilidad simultáneamente.
  - 1a prueba. Licor mezclado sin dilución.
  - 2a prueba. 50% de licor mezclado y 50% del efluente tratado.
  - 3a prueba. 25% de licor mezclado y 75% de efluente tratado.
2. Observe las pruebas en la forma habitual.
3. Si las muestras diluidas sedimentan significativamente más rápido que la muestra no diluida (especialmente durante los primeros 10 minutos) el sistema tiene un lodo con una edad mayor de 20 días, por lo que la purga de lodo debe incrementarse.
4. Si las muestras diluidas sedimentan a la misma velocidad o ligeramente más rápido que la muestra de licor mezclado sin diluir, el lodo tiene efectivamente una edad muy baja y está abultado. Esto es causado frecuentemente por el exceso de purga que reduce la edad del lodo por debajo del óptimo. La observación del color del licor mezclado y la cantidad y tipo de espuma en el tanque de aireación podría confirmar esto. Reduciendo la purga un poco cada día, puede corregirse este problema. Si los lodos sedimentan tan lento que se tiene una evacuación incontrolable en el efluente del clarificador (resultado de una purga no controlada), podría ser necesario agregar algún tipo de floculante para mejorar la sedimentabilidad del lodo hasta corregir la situación. La cloración en la recirculación de lodos también ayuda si el lodo contiene un exceso de bacterias filamentosas.

#### **No presencia de microorganismos filamentosos.**

- Si hay muy pocos o no hay microorganismos filamentosos presentes, hay que verificar la F/M observando si el sistema está operando a un mayor o menor valor de su F/M. La presencia de pequeños flóculos dispersos es una característica de un incremento en la F/M. Por ejemplo, si en un proceso convencional de lodos

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

---

activados la F/M es más alta de lo normal por 10% o más, debe disminuirse el flujo de purga, esta disminución debe reflejarse por la desaparición de los flóculos dispersos por un periodo de 2 a 3 veces el tiempo de retención celular (θ<sub>c</sub>).

- La turbulencia y la concentración de OD (como indicador) son también importantes, la turbulencia es más común en sistemas de mezcla completa que en sistemas como los tipo carrusel. En la mayoría de las plantas concentraciones mayores de 4.0 mg/l es indicativo de un exceso en el suministro de aire. Una excesiva turbulencia (sobreaireación) puede impedir la formación de flóculos y puede dar como consecuencia la flotación de flóculos diminutos que se arrastran con el efluente del clarificador secundario.
- Los tóxicos tales como desechos industriales pueden también causar crecimiento disperso. En este caso hay que identificar la procedencia de la fuente.
- Un perfil de temperaturas en el clarificador pueden ayudar a identificarán la presencia de una corriente de temperatura. Una medidor de temperatura sobre un sensor de OD es una excelente herramienta para este procedimiento (ya que se estaría incorporando esta variable). Para elaborar el perfil se toman varios puntos del clarificador secundario (orilla, ¼, ½, ¾ y final del tanque). En cada punto en el que se realice la medición, debe realizarse a diferentes profundidades, es decir en la superficie y en puntos de un cuarto debajo de ella (¼, ½, ¾ y final). Cuando la temperatura del punto más profundo es consistentemente más fría de 2 a 4 °F o más, significa que se tiene una corriente de temperatura, y para corregir esto podría dejarse fuera de servicio el clarificador.

#### 3.2.1.2.3 Levantamiento de Lodo (Flotación).

A veces paquetes de lodo (del tamaño de pelotas de tenis hasta pelotas de basket-ball) se elevan, revientan y esparcen en partes más pequeñas sobre la superficie del clarificador, de las cuales algunas sedimentan parcialmente y otras escapan por el vertedero del efluente. Esto ocurre aún cuando se adiciona algún coagulante como polímeros o alumbre. Junto a este fenómeno se notará la elevación de burbujas finas en la superficie del clarificador. El licor mezclado sedimenta bastante bien en la prueba de sedimentabilidad, sin embargo una porción de los lodos sedimentados suben a la superficie de una a dos horas después de haber iniciado el ensayo.

La causa de este fenómeno es el efecto de la flotación de sólidos por gas nitrógeno, resultado de la desnitrificación biológica ( $N-NO_3 \rightarrow N_{2(g)}$ ). Las burbujas de nitrógeno libre se adhieren a los flóculos de lodo cuando se produce suficiente gas, lo que hace que el lodo se eleve hacia la superficie en forma de paquetes oscuros. Influyen muchos factores

en la evolución de las burbujas del gas nitrógeno, pero el más importante es la tasa de desnitrificación biológica, pasando a segundo término la solubilidad del gas nitrógeno y la concentración de oxígeno en el influente del sedimentador. El oxígeno generalmente funciona como un buen indicador del proceso de nitrificación-desnitrificación en los canales internos de la zanja. Para esto hay que recordar que las zanjas de oxidación están diseñadas para que ocurra tanto una remoción de DBO<sub>5</sub> y nitrificación en la zona de aireación y una remoción de DBO<sub>5</sub> pero acompañada de una desnitrificación en la zona anóxica (sección 3.3.4).

El levantamiento de lodo no debe confundirse con la formación de natas las cuales son causadas por ciertos microorganismos tales como *Nocardia sp.* (Jenkins, 1992), o con el escape de una elevada cama de lodos causada por un sobrecarga e sólidos.

En general la concentración de nitratos en el efluente de las zanjas debe encontrarse por debajo de 6-8 g N-NO<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> a 20 °C. La concentración de oxígeno a la entrada del sedimentador y la profundidad de la cama de lodos sólo juegan un papel marginal en este problema. La mejor medida para evitar la elevación de lodos es comenzar la desnitrificación del agua residual corriente arriba del sedimentador (Henze, *et al.*, 1995).

Para que tome lugar la desnitrificación, también deben existir tres condiciones en la cama de lodo del clarificador:

1. Una concentración de OD menor de 0.5 mg/l.
2. Una alta concentración de nitrato (generalmente mayor de 5 mg/l).
3. DBO<sub>5</sub> residual mayor a 10 mg/l generalmente.

Una cama de lodo espesa (causada por su acumulación debido a un flujo de recirculación) y bajas concentraciones del OD en el licor mezclado por una alta tasa de respiración del licor mezclado, podrían ser indicativos de este problema.

Algunas de las causas más probables de esto es:

1. El proceso opera con baja relación F/M, en consecuencia, se presenta la nitrificación biológicamente y se arrastran nitratos en el efluente del licor mezclado.
2. El lodo se retiene por largos tiempos en el clarificador; en consecuencia, el OD disponible es utilizado por los microorganismos.
3. Alta tasa de actividad de la biomasa debido a un incremento en la temperatura del agua residual cruda, lo cual causa que el proceso nitrifique a una mayor F/M. Cuando se tiene una alta actividad de la biomasa indica también un mayor consumo de OD en el lodo sedimentado y consecuentemente se favorece la desnitrificación.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

---

### 3.2.1.2.4 *Effluente Turbio del Clarificador Secundario.*

Cuando el effluente del clarificador es turbio y en la prueba de sedimentabilidad el licor mezclado sedimenta pobremente y deja una sobrenadante turbio, el siguiente paso es examinar el licor mezclado y el lodo de recirculación al microscopio. Este punto será visto con más detalle en la sección 3.2.2.6. El propósito de este último análisis es determinar la presencia de ciertos protozoarios y su estado de actividad. Es importante también asegurarse de que este problema no se deba a la existencia de periodos de altas concentraciones de sólidos suspendidos y de que la prueba en laboratorio se ha realizado correctamente.

Algunas de las causas más probables son:

1. Baja concentración de SSVLM en el reactor. Normalmente sucede en el arranque de una planta.
2. Incremento en la carga orgánica.
3. Cargas tóxicas.
4. Sobreaireación (agitación) que ocasiona rompimiento de flóculos.

### 3.2.1.2.5 *Lodos Dispersos.*

Este fenómeno es identificado por la presencia de pequeñas partículas de lodo parecidas a cenizas que flotan sobre la superficie del clarificador, así como también en la prueba de sedimentabilidad. Estas partículas pueden ser aglomerados de células muertas, al igual que partículas de lodo normal y/o presencia de grasa.

Algunas de las causas más probables de los lodos dispersos son:

1. Se esta iniciando la desnitrificación en el clarificador.
2. La relación F/M es extremadamente baja (menor de 0.05). Generalmente ocurre a primeras horas de la mañana.
3. El licor mezclado tiene un alto contenido de grasa.

### 3.2.1.2.6 *Flóculos Pequeños y Dispersos.*

Existen dos tipos de estos lodos, los cuales tiene diferentes diámetros unos con un diámetro de 1/16 a 1/8 de pulgada conocidos como flóculos finos dispersos o "*straggler floc*" (en ingles), respecto a los otros que generalmente cuentan con un diámetro menor de 1/32 de pulgada llamados flóculos diminutos "*pin floc*".

**Flóculos finos dispersos.** Son casi transparentes, se extienden en pequeñas agrupaciones de lodo, acumulándose a través de las superficies tanto de la prueba de sedimentabilidad como del clarificador. Este es un problema que a menudo se debe a una baja concentración de SSLM.

Algunas de las causas probables de este problema son debido a:

1. El tanque de aireación está operando a una baja concentración de SSLM (Esto puede suceder durante el arranque inicial de una nueva planta). la purga es muy alta lo que pudiese provocar un bajo SSLM y un alta F/M.
2. El lodo esta siendo purgado en forma intermitente durante las primeras horas de la mañana, dando como resultado una corta edad de los microorganismos para el manejo diario de la carga orgánica.

**Flóculos diminutos.** Son compactos y tienen el tamaño de la cabeza de un alfiler, se encuentran suspendidos en el clarificador en menores cantidades que los flóculos finos dispersos "straggler floc". Este problema se presenta muy a menudo cuando se opera en valores altos de carga orgánica. Este problema se relaciona con un lodo que sedimenta rápidamente pero carece de buenas características de floculación, ya que tienden a agruparse ligeramente.

La causa más probables de este tipo de problema es el de operar constantemente con una F/M alta. Otro problema en sistemas donde el sistema de aireación se encuentra cerca del vertedero del efluente es la excesiva turbulencia (sobreaireación) en el tanque de aireación impidiendo la formación de flóculos.

### 3.2.2 Monitoreo Analítico del Proceso.

Los indicadores analíticos son las herramientas principales para los operadores de la planta. De acuerdo a las recomendaciones de EIMCO process, para sistemas tipo carousel el monitoreo los siguientes indicadores debe llevarse a cabo:

- Sedimentabilidad
- SST y SSV
- Calidad del lodo (Curva de la concentración del lodo)
- Análisis al microscopio
- Calidad del efluente
  - DBO o DQO
  - SST

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

---

- pH
- Fósforo
- Nitrógeno
- Surfactates (SAMM)
- Tóxicos
- Método de Secchi

La mayoría de los procedimientos de estos indicadores se muestran en los anexos, los faltantes pueden ser consultados en "Standard Methods for the Examination of Water, edición 18, 1992. Por el momento, sólo bastará con mencionarlos brevemente.

### 3.2.2.1 Medición de la Sedimentabilidad del Lodo.

El observar y medir la tasa y características de separación de los sólidos es esencial para el control del proceso. La prueba de sedimentabilidad en el proceso de lodos activados se emplea para evaluar las características de sedimentación del lodo y poder cuantificar entre otras cosas el flujo de recirculación. Para esta prueba hay que realizar la toma de la muestra en un punto entre el tanque de aireación y el sedimentador, pero nunca dentro de ellos. Cuando la prueba de sedimentación se realiza correctamente se obtienen tanto información numérica relacionada con el volumen de lodo sedimentado (VLS) a diferentes intervalos de tiempo como información relacionada con resultados visuales. Con estos datos se puede determinar también la velocidad de sedimentación.

El equipo de sedimentación de laboratorio ideal debe ser una versión en pequeño del clarificador secundario, de modo que pueda simular las condiciones reales en el clarificador. Los resultados de esta prueba pueden advertir de un problema o cambio en las condiciones de proceso con varios días de anticipación a los efectos graves, tiempo valioso para realizar ajustes necesarios.

El comportamiento de la sedimentabilidad del lodo se obtiene graficando tiempo (eje de las abscisas) contra volumen de lodo sedimentado (eje de las ordenadas).

#### **Tipos Generales de Lodos.**

La figura 3.9 muestra una familia de curvas de VLS para tres diferentes tipos de lodos activados a concentraciones similares de licor mezclado. El comportamiento de estas curvas son de acuerdo a la suposición de que el tiempo de retención celular óptimo es de 20 días y con una concentración de SSLM de 4000 mg/l.



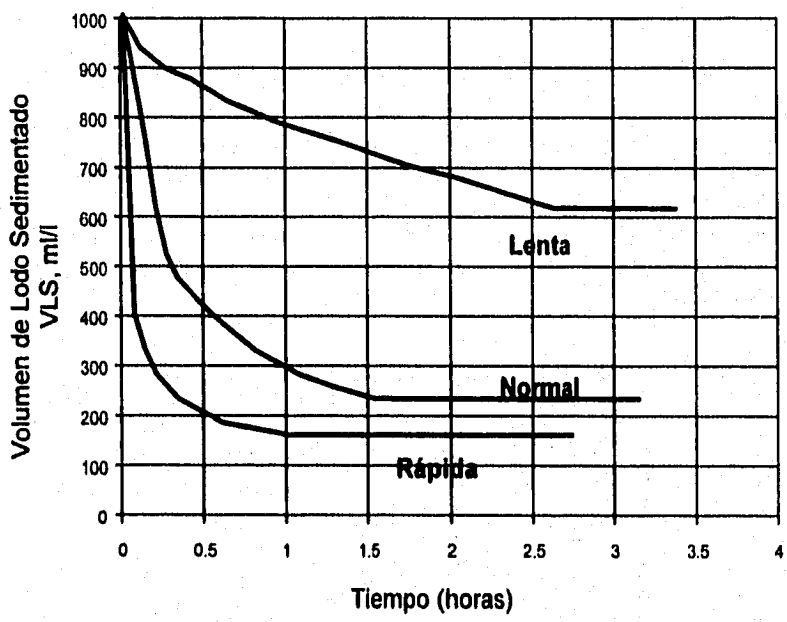


Figura 3.9 Familia de curvas para la prueba de sedimentabilidad.

EIMCO, 1994

**Sedimentación Normal.**

Un lodo "normal" puede alcanzar en 5 minutos de 800 a 500 ml/l y al cabo de 60 minutos el lodo debe haber sedimentado por completo. Un lodo de este tipo generalmente forma una buena cama y en la corriente de los vertedores del clarificador no se observan sólidos. En la figura 3.10 se muestra una curva típica para una planta paquete de aireación extendida (WPCF MP-7, 1985).

**Sedimentación Rápida.**

Una velocidad de sedimentación rápida normalmente se encuentra debajo de 500 ml/l en los primeros 5 minutos y generalmente alcanza su menor volumen en menos de 1 hora. La rápida sedimentación ocasiona que algunos flocúlos se retrasen y no se sedimenten con el resto del lecho. En el clarificador esto es evidente cuando aparecen flocúlos pequeños en el efluente.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

### Sedimentación Lenta.

Un lodo de baja sedimentabilidad puede tener un volumen de lecho de 800 ml/l o más después de 5 minutos, lo que ocasiona que la prueba se extienda por más de una hora para alcanzar su valor mínimo. La baja sedimentación de lodo no permite que éste sedimente por debajo de la marca de los 800 ml/ en 60 min. Aunque la baja velocidad de sedimentación pueda producir un líquido claro, algunos de los flocúlos sedimentados pueden volverse a levantar y ser arrastrados por el efluente. Este fenómeno puede ser detectado en la planta cuando se presenta una cama de lodo alta en el clarificador secundario.

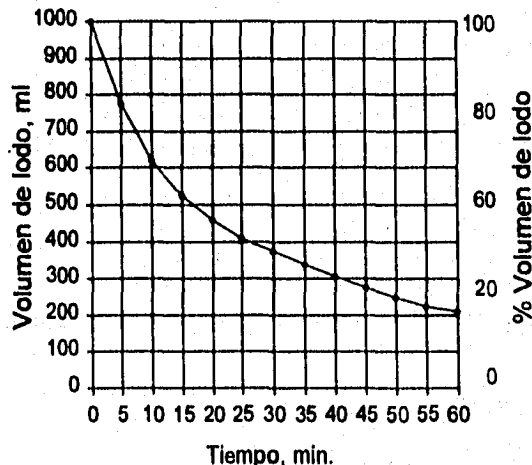


Figura 3.10 Curva de sedimentación típica para un sistema de aireación extendida.

Fuente: WPCF MP-7, 1985

### Interpretación.

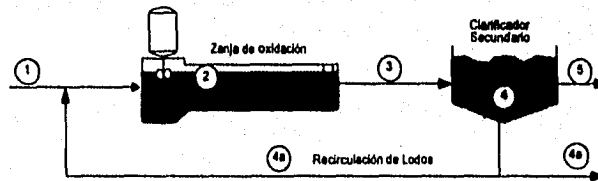
1. Muchas de las fuentes de información relacionadas con los procesos de lodos activados mencionan que si el lodo tiene una baja sedimentabilidad es porque es joven y puede ser corregido por la reducción de la purga de lodo, y si tiene una rápida sedimentación es indicativo de que el lodo es viejo y debe aumentarse la purga. En algunos casos esto es correcto, especialmente para plantas de gran caudal y de tipo convencional. Sin embargo, las zanjas de oxidación tipo carrusel operan con mayores edades de lodo que los sistemas convencionales, por lo que se podría tener otro tipo de comportamiento. La causa de esto, es que estos procesos de aireación extendida trabajan en fase endógena donde los microorganismos son forzados a metabolizar su propio protoplasma y los nutrientes que permanecen dentro de las células muertas, por la poca disponibilidad de alimento. Las membranas celulares que quedan son relativamente ligeras comparadas con el material del citoplasma de las células muertas

ocasionando una sedimentación con mayor dificultad. Aunque la sedimentación lenta puede atribuirse también a muy bajas edades de lodo. Anteriormente se mostró un procedimiento para determinar si el lodo se encontraba abultado (sección 3.2.1.2.2).

**3.2.2.2 Medición de la Concentración, Cantidad y Calidad del Lodo.**

Los métodos para determinar la concentración de microorganismos en diferentes puntos de la planta de tratamiento son descritos en el anexo. Los resultados de los cálculos del inventario de sólidos en la planta servirán para determinar la purga y la recirculación de lodos, así como para relacionar la información con las pruebas de sedimentabilidad y determinar la calidad del lodo. Las determinaciones a considerar son los sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos volátiles (SSV), concentración del lodo sedimentado y calidad del lodo (curva de la concentración de lodo).

Como ejemplo, el inventario de sólidos se utilizará para determinar la relación entre la cantidad de alimento ( $DBO_5$ ) que entra al tanque de aireación y la cantidad de microorganismos disponibles para el tratamiento (sólidos suspendidos volátiles en el tanque, SSVLM); dicha relación es conocida como F/M. La concentración y cantidad de sólidos pueden servir para corregir una distribución desigual de flujo y sólidos en la planta, determinar el tiempo de retención de lodo en el tanque de aireación y en los clarificadores.



Prueba	Punto de muestreo	Valor
DBO (mg/l): Influyente	1	~220
	5	5-30
DQO (mg/l): Influyente	1	~660
	5	15-90
OD (mg/l)	2	1.5-4
SSLM (mg/l)	2,3	3000-6000
SSVLM (mg/l)	2,3	2550-5100
SST (mg/l): Influyente	1	~220
	5	5-30
Recirculación, purga	4a	8000-15000
DQO/DBO	1	0.5-3
pH	2,5	6.5-8.5
Sedimentabilidad	3	Curva representativa
IVL (ml/g)	3	70-110
Coma de lodo	4	0.3-1.2 m

**Figura 3.11 Determinación de parámetros para la evaluación del proceso biológico.**  
Adaptada de WPCF MP-9, 1987

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

---

Los SST involucran a todos los sólidos suspendidos en la muestra de agua ya sean inorgánicos u orgánicos. La evaluación de los SST se puede realizar para el influente, efluente, recirculación, purga, en el reactor (SSLM) y de la línea de distribución del tanque de aireación al clarificador.

La prueba de los SSV es un medio para estimar la biomasa disponible. En esta determinación toda la materia orgánica contenida en los SST se quema a CO<sub>2</sub> y agua. La fracción volatilizada (SSV) se utiliza como una medición de los microorganismos presentes, aunque en la realidad también se incluye materia biológica no viva, tal como microorganismos muertos y otros materiales. Aún así, este método es aceptado para la medición de los microorganismos activos.

Es indispensable tomar la muestra en un sitio representativo, como lo es la zona de aireación dentro de la zanja de oxidación, en la cual los sólidos se encuentran perfectamente mezclados y de esa forma tener una muestra representativa. **Es importante no confundir la localización de los puntos de muestreo para el análisis de SST y SSV (dentro del tanque de aireación) con las muestras para las pruebas de sedimentabilidad (caja de distribución de flujo).**

### **Cantidad de Sólidos en Aireación.**

De los datos de concentración obtenidos en las pruebas de SST y SSV se puede obtener la cantidad en kg de lodo en el tanque de aireación, de la forma siguiente:

$$\text{kg de sólidos} = \frac{(\text{Conc., mg/l})(V_r)}{1,000 \text{ mg m}^3 / \text{kg l}} \quad 3.1$$

donde:

V<sub>r</sub> =Volumen del tanque de aireación, m<sup>3</sup>

Conc.=Concentración de sólidos, mg/l. Pueden ser SSLM o SSVLM

Expresado en alguno de los términos:

$$\text{SSLM bajo aireación, kg} = \frac{(\text{SSLM})(V_r)}{1000} \quad 3.2$$

donde:

SSLM =Concentración de los SST en el licor mezclado, mg/l

De igual manera pueden ser calculados los kilogramos de SSV bajo aireación, utilizando los SSVLM.

**Concentración de Sólidos en Sedimentador.**

En esta parte se combinan los resultados obtenidos en las pruebas de sedimentabilidad y los análisis de inventario de sólidos practicados al tanque de aireación para determinar la concentración del lodo sedimentado (CLS).

La concentración del lodo sedimentado estará expresada en mg/l y esta se incrementará conforme la prueba de sedimentabilidad avanza. Similarmente a las curvas de sedimentabilidad se construyen las gráficas con las curvas de la concentración del lodo sedimentado, como puede observarse en la figura 3.12, estas curvas muestran el comportamiento para una concentración de SSLM de 4000 mg/l en el reactor.

Para obtener la concentración de lodo la expresión es la siguiente:

$$CLS(t) = \frac{SSLM \text{ 1000 ml/l}}{VLS(t)} \quad 3.3$$

donde:

VLS(t) = Volumen de lodo sedimentado a un tiempo t, ml/l

CLS (t) = Concentración de lodo sedimentado a un tiempo t, mg/l

El IVL es otro parámetro de gran ayuda para identificar las características de sedimentabilidad de lodos. Generalmente esta evaluación se realiza junto con la velocidad de sedimentación por zonas y la concentración de sólidos suspendidos en el reactor (SSLM y SSVLM). Con datos descritos anteriormente se puede calcular el índice volumétrico de lodo (IVL), el cual es definido como el volumen en mililitros ocupado por un gramo de SSLM, expresado en peso seco, después de sedimentar durante 30 minutos.

$$IVL \text{ ml/g} = \frac{1 \times 10^6 \text{ mg ml/g l}}{CLS_{(t=30)} \text{ mg/l}} \quad 3.4$$

A continuación se muestra un ejemplo de cálculo:

$$CLS_{(t=30)} = \frac{4,000 \text{ mg/l} \times 1000 \text{ ml/l}}{310 \text{ ml/l}_{(t=30)}} = 12,900 \text{ mg/l}$$

$$IVL \text{ ml/g} = \frac{1 \times 10^6 \text{ mg ml/g l}}{12,900_{(t=30)} \text{ mg/l}} = 77.5 \text{ ml/g}$$

En la práctica este método es ampliamente utilizado con buenos resultados. Una buena aportación es el estudio realizado por Daigger y Roper (1985), donde desarrollan un método más práctico para la estimación de las características del lodo, correlacionando los resultados del IVL con datos de un prueba de sedimentación intermitente múltiple.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

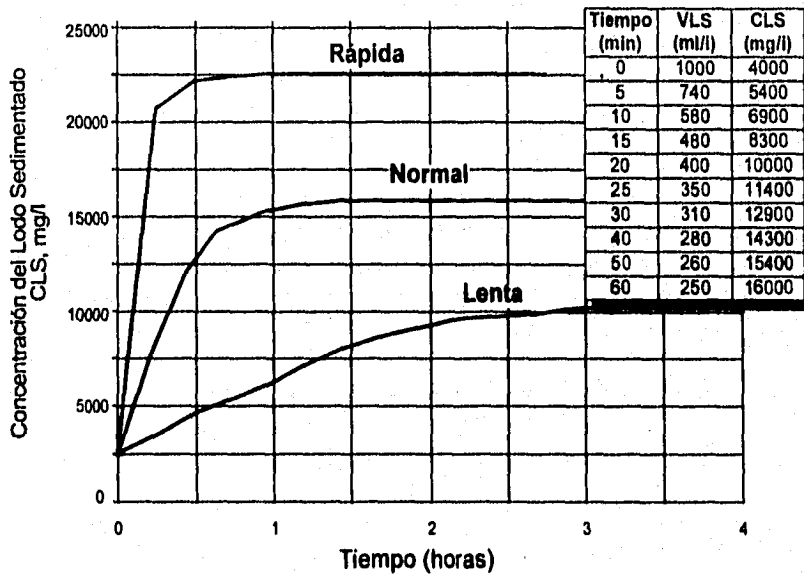


Figura 3.12 Familia de curvas para la prueba de concentración del lodo sedimentado.

Fuente: EIMCO, 1994

### 3.2.2.2.1 Definición de "Calidad del Lodo".

La calidad del lodo está definida por el perfil de la curva de la concentración de lodo sedimentado (CLS). La CLS final es de gran ayuda para poder realizar ajustes en el proceso. Similarmente a las pruebas de sedimentabilidad, se tiene una familia de curvas:

Una sedimentación "normal" y de buena calidad puede encontrarse en un intervalo de CLS de 10,000 a 15,000 mg/l en una hora, alcanzando la compactación final (donde no puede sedimentar más) entre una y dos horas.

Un lodo con rápida sedimentación tiene una concentración de más de 20,000 mg/l en una hora, alcanzando su concentración máxima en menos de una hora. Cuando se tienen un lodo con estas características seguramente se trata de un lodo que tiene un  $\theta_c$  menor a 20 días. Este lodo generalmente es indeseable ya que provoca la liberación de flocos dispersos, los cuales son evacuados junto con el efluente de la planta.

El lodo con baja sedimentación tiene una concentración de menos de 8,000 mg/l en una hora. Este lodo podría no sedimentar nada en los primeros 5 a 10 minutos; durante la

primer hora podría llegar a un valor de sólo 700 a 900 ml/l. La sedimentación y compactación del lodo se sigue llevando a cabo por un periodo de 3 a 4 horas más.

En resumen, si un lodo sedimenta rápido es probable que tenga una edad muy baja, por lo que debe disminuir la purga de lodos. Si el lodo sedimenta lentamente, es probable que la edad del lodo sea mayor a 20 días. El operador puede confirmar esto si el lodo sedimenta más rápidamente cuando está diluido y por su color café oscuro. Esta condición puede requerir incrementar la purga. Por otra parte, el lodo que sedimenta demasiado lento puede ser resultado de un lodo con muy poca edad, el cual se presenta con un ligero color café. Si estas son las características del lodo será necesario disminuir su purga.

Es normal que una planta de carrusel funcione mejor con un lodo que se encuentra entre el intervalo de sedimentación normal y baja. Se puede tener un lodo en el límite superior recomendado ( $t_c \approx 30$  d) y presentarse una buena calidad de efluente con una baja cantidad de sólidos suspendidos, además de un lodo estable (bajo en contenido volátil). La ecuación 1.29 representa el tiempo de retención celular en función del flujo de purga, suponiendo que el efluente no contiene SSV. Más adelante se abundará más sobre este tema.

### 3.2.2.3 Medición de la Concentración de Oxígeno Disuelto.

La aireación tiene un doble propósito: proveer de cantidades suficientes de oxígeno para que puedan respirar las bacterias responsables en la remoción de la DBO<sub>5</sub> (oxidación), además de mantener suficientemente mezclados a los microorganismos y el contenido del tanque de aireación. El oxígeno es poco soluble en agua: a 20 °C y 1 atm tiene una solubilidad de 9.2 mg/l en agua limpia.

En el caso de la zanja de oxidación se cuenta con una sección para el mezclado/aireación y otra sección sin aireación (canales). A lo largo de los canales se tendrán diferentes concentraciones de OD, inclusive existirán zonas donde la concentración sea cero, como parte de las zonas anóxicas. Para la zona de aireación la concentración de OD aumentará a niveles mayores (1.5-5.0 mg/l).

Las zonas anóxicas son zonas en el canal donde la concentración de oxígeno disuelto es muy baja o inclusive cero y una presencia de nitratos. En estas zonas las bacterias utilizan el oxígeno disponible en el ion nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y liberan el nitrógeno como gas, proceso llamado desnitrificación. Con un cuidadoso control del nivel de OD en las zanjas se puede controlar el metabolismo de los microorganismos en el licor mezclado. En la sección 3.3.4 se detallan los procesos de nitrificación y desnitrificación del agua.

## **ARRANQUE Y OPERACIÓN**

Tratamiento de Aguas Residuales

---

### ***Puntos de Muestreo.***

Es importante que las mediciones deban tomarse en el mismo sitio cada vez que se realicen, ya que la concentración de oxígeno disuelto varía a lo largo de la zanja de oxidación. El OD es elevado en la zona de aireación y generalmente decrece corriente abajo de los aireadores, motivo por el cual, también se requiere que las lecturas sean realizadas a diferentes horas, para su comparación.

Las lecturas deben tomarse aproximadamente a una distancia equivalente de 2 a 3 veces el ancho del vertedero de salida corriente arriba de éste. Es decir, si el vertedero tiene una longitud de 10 m, significa que el punto de muestreo debe localizarse entre 20 y 30 m antes de su llegada al vertedero y en ese punto el nivel de OD debe estar entre 0.5 y 1.0 mg/l, aunque este valor podrá ajustarse de acuerdo con el nivel de nitrificación que está siendo alcanzado en la zanja de oxidación.

Los equipos de medición de OD generalmente no son exactos para medir concentraciones por debajo de 0.5 mg/l. Si el OD en el punto recomendado es menor de 0.5 mg/l será necesario cambiar el sitio de muestreo corriente arriba hacia el aireador para que los niveles de OD aumenten y se pueda tener una medición confiable. Si el muestreo se hace en otro lugar, ahí deberán tomarse las muestras siguientes. El OD debe medirse a 1.0 m debajo de la superficie del agua aproximadamente y a unos 0.70 m de distancia de la pared del tanque. No es necesario medir el OD a diferentes profundidades ya que la sección del canal está perfectamente mezclada.

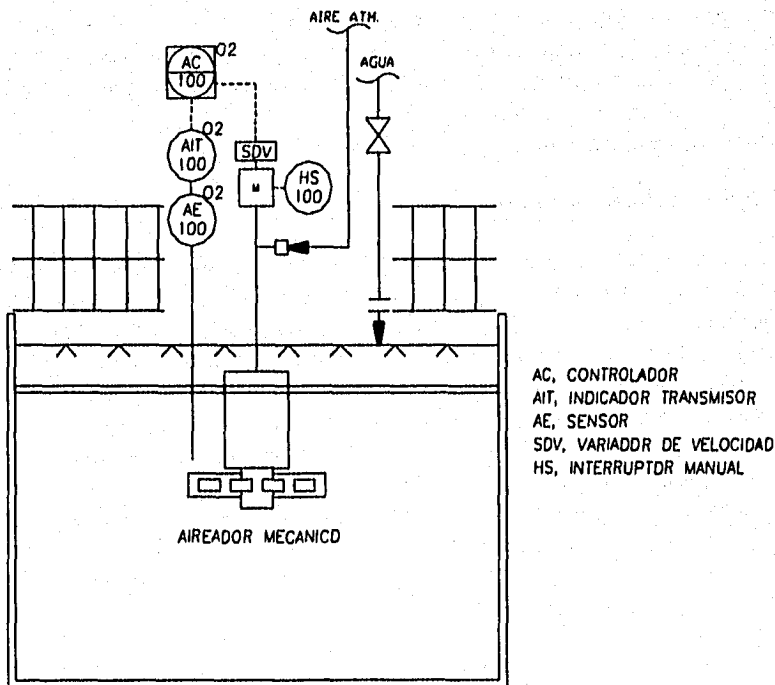
### ***Medición del Oxígeno Disuelto.***

El equipo necesario para esta prueba consiste de un medidor de electrodo, sonda y cable. Las instrucciones específicas para la calibración y uso del medidor de oxígeno no se analizarán, ya que cada marca y modelo tiene su método de calibración y uso. Sin embargo aquí se presentan algunas recomendaciones generales. La calibración se puede realizar a una temperatura de  $\pm 5$  grados centígrados de la temperatura del tanque de aireación. Después de la calibración, el OD se mide atando la sonda a una barra en el sitio donde se desea realizar la medición. La sonda se coloca a menudo con su lado superior hacia abajo (la membrana hacia arriba) para que las burbujas de aire no queden atrapadas en la membrana y causen lecturas erróneas. Antes de introducir la sonda en el licor mezclado, encender el aparato para obtener una lectura de la temperatura. Registrar la temperatura del agua como referencia y leer posteriormente el valor de OD. Puede tomar aproximadamente un minuto para que el equipo se estabilice en un valor de lectura de OD.



**Periodos de Medición.**

Las lecturas deben realizarse al menos una vez por turno, pero por el tamaño de la PTARNL podría ser conveniente efectuarlas cada 4 horas. Esto es de utilidad para verificar las variaciones de un día a otro. Si se realizan las mediciones una vez por turno, deben confirmarse en el periodo de flujo pico de dicho turno. De esta forma se puede asegurar que se tiene la cantidad adecuada de oxígeno durante los periodos de mayor demanda. Es recomendable verificar los cambios de OD causados por variaciones de carga orgánica, por lo que se puede medir ocasionalmente (una vez por mes) las variaciones del OD en el tanque de aireación en intervalos de una o dos horas. Lo anterior puede indicar si los microorganismos están recibiendo la suficiente cantidad de oxígeno cuando los flujos y carga de DBO son altos. El monitoreo en continuo del OD es una opción conveniente si se asocia al control de la velocidad de los motores de aireación, lo que llevaría a eficientar al máximo el consumo de energía para la aireación. En el control automático de procesos esto es muy común llevar a cabo (figura 3.13).



**Figura 3.13 Control automático en un reactor de lodos activados para el suministro de oxígeno.**

## **ARRANQUE Y OPERACIÓN**

Tratamiento de Aguas Residuales

---

### **3.2.2.4 Determinación de la Calidad del Efluente.**

El principal medio para conocer si una planta de tratamiento de aguas residuales está operando bien es conocer la calidad de agua que entrega. Mediante una comparación diaria del efluente se puede observar el efecto por cambios en la operación, tales como recirculación de lodo, flujo de purga y grado de aireación.

#### **3.2.2.4.1 Medición de la Materia Orgánica.**

Un punto que ha sido causa de confusión es la carencia de una medición consistente de la concentración de materia orgánica. Hasta el momento se tienen tres medidas que han ganado aceptación y son ampliamente utilizadas: demanda bioquímica de oxígeno (DBO), carbono orgánico total (COT), y demanda química de oxígeno (DQO). De estas la DQO es indudablemente la medida más representativa, debido a que proporciona un vínculo entre electrones equivalentes en el substrato orgánico, la biomasa y el oxígeno utilizado. Además, los balances de masa también pueden ser realizados en términos de DQO. Por otro lado, el análisis estándar de la DQO puede realizarse en algunas horas, a diferencia de la DBO que requiere de un período de incubación de 5 días; este tiempo es demasiado largo para realizar ajustes en el control del proceso. Además la DBO, requiere de más equipos de laboratorio y laboratoristas con más experiencia. Por otro lado, el COT tiene aún muy poco uso, principalmente por el alto costo del equipo analítico.

#### ***Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).***

La DBO es un procedimiento para determinar la cantidad de  $O_2$  utilizado por los microorganismos para oxidar la materia orgánica presente en una unidad de volumen de agua residual. La prueba de DBO se lleva a cabo colocando una muestra medida en un frasco, donde se adiciona una solución que contenga suficiente oxígeno disuelto, nutrientes, bacterias y un amortiguador de pH (para un ajuste de 6.5 a 7.5). Dentro de los nutrientes a considerar están el nitrógeno, fósforo, calcio, magnesio, potasio, sodio y azufre. Después de medir el oxígeno disuelto inicial en la muestra, se debe incubar en un lugar oscuro a 20 °C (68 °F) durante 5 días, midiendo nuevamente el oxígeno disuelto al final de la prueba para encontrar la cantidad de oxígeno utilizado por las bacterias para consumir la materia biodegradable en el agua residual.

#### ***Demanda Química de Oxígeno (DQO).***

El análisis de la DQO se basa en el hecho de que todos los compuestos orgánicos, con algunas excepciones, pueden ser oxidados por la acción de un agente oxidante fuerte bajo condiciones ácidas a dióxido de carbono y agua, sin considerar la biodisponibilidad de las sustancias. Una de sus ventajas es la rapidez con que se obtiene la información; sin embargo no evalúa si la materia orgánica es biodegradable.

La muestra es digerida con dicromato de potasio en un medio fuertemente ácido, en presencia de un catalizador a alta temperatura. Después de la digestión, el dicromato remanente es titulado con sulfato ferroso amoniacal. De esta forma se puede conocer la cantidad de materia orgánica oxidada en términos de equivalentes de oxígeno. Sin embargo, existen interferencias de ciertos iones inorgánicos que se oxidan bajo las condiciones de oxidación de la DQO, incrementando el resultado del análisis. Los cloruros por su parte pueden reaccionar con el catalizador (iones plata) precipitándolo e inactivándolo. Esta interferencia se puede eliminar con la adición de sulfato mercuríco a la muestra antes de la adición de los otros reactivos.

El método que se propone es el llamado de reflujo cerrado (micrométodo), debido a su economía en el empleo de reactivos y su simplicidad para el reflujo.

#### **3.2.2.4.2 Determinaciones Complementarias.**

Generalmente se determinan además de la DBO<sub>5</sub> y DQO, los SST ya que indica la concentración de sólidos en el efluente. La determinación de nitrógeno es importante para el control de la nitrificación y desnitrificación.

Algunas otras pruebas que pueden definir la calidad del efluente de la planta son:

- pH
- SST
- Fósforo
- Nitrógeno (total, orgánico, amoniacal, nitratos, nitritos)
- Surfactantes (detergentes)
- Tóxicos tales como fenoles, cloruros, metales pesados, etc.
- Coliformes

#### **3.2.2.4.3 Otros Métodos para la Evaluación de la Calidad del Efluente.**

Aunque las pruebas analíticas descritas previamente pueden definir perfectamente la calidad del efluente de la planta, su principal desventaja es el tiempo que toma la obtención de los resultados en laboratorio, la cantidad de equipo y la habilidad necesaria para obtener resultados confiables.

#### **Método del Disco de Secchi.**

En algunas ocasiones se requerirá de un método rápido y fácil para verificar la calidad del efluente. Un método muy común para esto es por medio de una evaluación visual realizada al clarificador. Es decir, el operador estima la calidad del efluente por una simple

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

---

observación del clarificador. Por ejemplo, si la tubería de alimentación al clarificador puede observarse a una profundidad mayor de un metro, puede decirse que la calidad del efluente es buena en ese momento. Por el contrario, si la pared del clarificador no es visible a 30 cm de profundidad aproximadamente, el operador supondrá que la calidad del efluente es pobre. Este es un trabajo fácil pero impreciso, ya que sería difícil comparar la calidad del efluente con la de hace dos semanas, un mes o un año. Pero existe una forma con mayor precisión, conocida como el método del disco Secchi, que se revisa en el anexo. El disco secchi consiste de un disco de metal de 15 - 30 cm de diámetro atado a una cuerda o cadena que es sumergido al clarificador. La cuerda o cadena debe marcarse en intervalos de cierta medida (pies con pulgadas o metros con centímetros) para determinar la profundidad a la cual el disco puede ser visible al ser introducido en el clarificador. El disco debe pintarse de blanco y negro como se muestra en la figura 3.14.

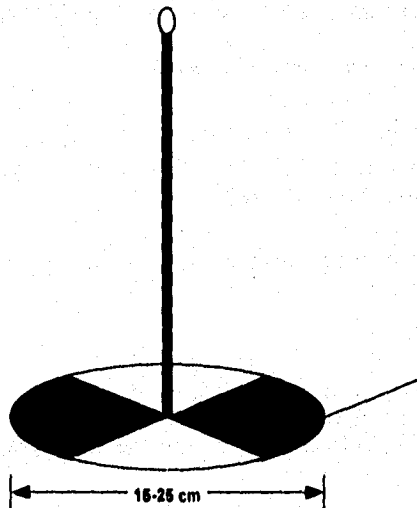


Figura 3.14 Disco Secchi.

El método consiste en realizar una gráfica de claridad vs SST medidos en laboratorio. En general mientras exista una mayor cantidad de sólidos suspendidos en el efluente, menor será la claridad del agua. Normalmente una planta de lodos activados si se encuentra operando adecuadamente presenta una claridad de un metro o más. Algunas plantas presentan una claridad de más de 1.5 metros llegando incluso a tener lecturas de 3 m. Estas plantas seguramente operan con una concentración de SST de 10 mg/l o menos.

### Ventajas y desventajas:

La prueba de claridad no es un sustituto de la información obtenida en laboratorio para medir la calidad del efluente (DQO o DBO, SST, pH, etc). Sin embargo, la prueba de

claridad nos dice aproximadamente cómo esta operando la planta y de esta manera se puede auxiliar para algún ajuste en la purga de lodos, recirculación de lodo y cantidad de aireación.

Las ventajas más obvias de la prueba de claridad son la simplicidad, velocidad y costo del material requerido. Otra ventaja importante es que permite al operador ver la calidad del efluente de la planta por sí mismo.

Como es de esperar, uno de los problemas obvios de la prueba son la variación en las lecturas debidas a la cantidad de luz que prevalece en determinado momento. No sería lógico realizar una prueba en la noche y compararla con los resultados de la mañana. Otro problema es la diferencia de distancias a la que se observa el disco en el transcurso del tiempo, ya que existe un menor reflejo a consecuencia del desgaste de la pintura en el disco. Por ello, debe aplicarse una capa de pintura fresca cada determinado tiempo.

### 3.2.2.5 Medición de la Cama de Lodo en el Clarificador Secundario.

El clarificador secundario normalmente se divide en tres zonas distintas (figura 3.15): (a) zona clara libre de sólidos, (b) zona con flóculos dispersos los cuales sedimentan y se depositan en el fondo, y (c) zona que contiene los sólidos que han sido separados del licor mezclado para formar la cama de lodos.

En condiciones normales de operación, la cama de lodos es una capa completamente homogénea y generalmente delgada. La profundidad de la cama de lodos es la distancia medida desde el espejo de agua al nivel superior de la cama sedimentada. El espesor de la cama sedimentada es la distancia del nivel superior de la cama sedimentada de lodos al fondo promedio del clarificador. Generalmente el espesor de esta cama varía desde 0.30 a 1.20 m en condiciones normales.

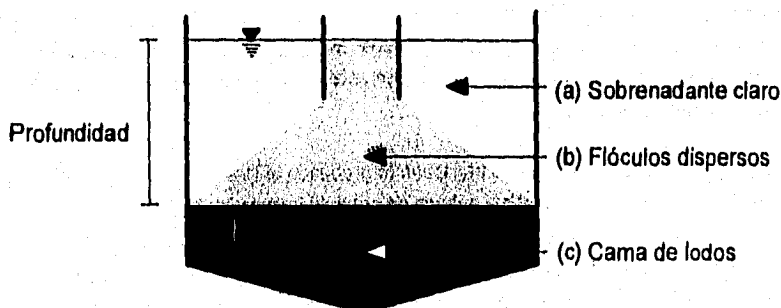


Figura 3.15 Sección del clarificador secundario.

## **ARRANQUE Y OPERACIÓN**

Tratamiento de Aguas Residuales

---

La profundidad de la cama de lodos en el clarificador secundario puede cambiar por los efectos de la variación de flujo del agua residual. Los cambios que ocurren durante largos periodos (días o semanas) generalmente son ocasionados por ajustes al proceso o por la falta de estos.

En algunas ocasiones se presentarán problemas de abultamiento y elevación de la cama de lodos, atribuyéndose a cambios climáticos o incluso a cambios en la presión, en estos casos se recomiendan que se realicen los ajustes hasta que estas variaciones "climáticas" hayan pasado.

La profundidad de la cama de lodo normalmente cambia muy poco de un día a otro cuando la operación de la planta es estable y mas aún si el tiempo de retención es alto. Si la purga y recirculación de lodos son casi constantes, la variación es normalmente menor de 30 cm. Una cama de lodos que se mantiene entre 0.3 a 0.7 m del fondo del clarificador no se eleva a la superficie ni se lava con el efluente en uno o dos días, a menos que haya ocurrido un incidente fácilmente identificable, por ejemplo:

1. Un sobreflujo en el clarificador que haya aumentado sensiblemente la carga superficial.
2. Un paro en la recirculación que puede ocasionar el levantamiento súbito del lecho de lodos, además de que se pueden observar burbujas y cúmulos de lodo en la superficie del clarificador.

Por todo lo anterior la medición de la profundidad del lecho permite al operador anticipar problemas, lo cual es importante en la toma de decisiones relacionadas con el ajuste en la recirculación y purga de lodos.

### ***Métodos para Medir la Profundidad de la Cama de Lodo.***

Existen diversos métodos para medir la profundidad de la cama de lodos en un clarificador secundario, entre los que figuran instrumentos permanentes tales como medidores ultrasónicos o detectores electrónicos, aunque los más usuales son las miras de vidrio y el nucleador. Éste último es actualmente el de mayor utilidad; a continuación se detallan sus características.

El nucleador es un tubo de plástico transparente graduado el cual posee una válvula en un extremo que se abre para permitir la entrada de agua cuando es introducido al clarificador y que se cierra cuando se saca del agua, permitiendo así, determinar la altura de la cama de lodos. Para la medición, es necesario sumergirlo lentamente en el agua hasta alcanzar el fondo; entonces se debe levantar el tubo para retirarlo del clarificador, momento en el cual la válvula se cerrará automáticamente y quedará un núcleo de muestra en el tubo.

De esta forma se determinará la profundidad por observación directa del nivel de lodo en el núcleo muestreado y cotejándolo con la escala del mismo nucleador.

De todos los tipos de medidores de la profundidad de la cama de lodos, se prefiere el nucleador ya que es relativamente simple, barato y fácil de usar. Otra ventaja es que también sirve para obtener muestras directas de la cama de lodos, las cuales pueden ser analizadas en el laboratorio para determinar la concentración de sólidos como complemento de las observaciones que se realizaron en sitio. También mediante un muestreo a diferentes puntos y profundidades se puede verificar la existencia de cortos circuitos o una inadecuada remoción de lodo u otros problemas comunes en los clarificadores.

Se recomienda realizar la medición una vez por turno en el punto donde la profundidad sea igual a la profundidad promedio del clarificador. En un clarificador secundario esta distancia es generalmente de  $1/3$  de la distancia medida desde el paño interior de la pared del clarificador hacia el centro del mismo, y que ese punto de la medición se encuentre haciendo un ángulo de  $90^\circ$  con la rastra del clarificador (ver figura 3.16).

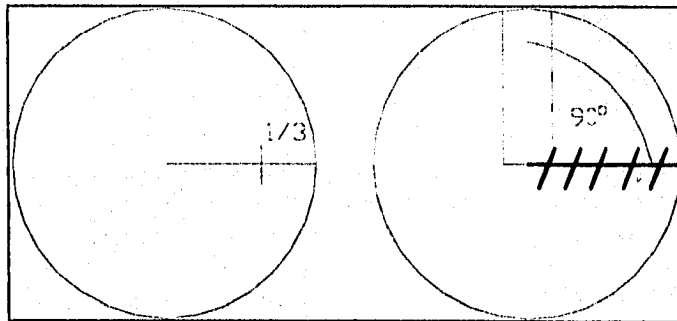


Figura 3.16 Medición de la cama de lodos en el clarificador secundario.

### 3.2.2.6 Análisis al Microscopio de Lodo Activado.

En el lodo activado existe una gran cantidad de organismos con diferentes funciones, lo que genéricamente se conoce como biomasa. El objetivo general del análisis al microscopio de los microorganismos que constituyen el lodo activado es obtener información diaria y rápida respecto a la eficiencia del proceso biológico con el fin de prever cambios o realizar algún ajuste. Por ejemplo, el análisis al microscópico puede ayudar a prevenir un problema de abultamiento (*bulking*) provocado por microorganismos filamentosos antes de que éste sea serio.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

---

En la práctica la microbiología se utiliza como una herramienta para el control, debido a que las determinaciones analíticas, cálculos y observaciones son esenciales para el control global de la operación de la planta de tratamiento. Concretamente, una estadística de la población de los microorganismos (en especial protozoarios) es el mejor método para determinar la condición de la biomasa.

Conforme se adquiere experiencia, el operador deberá conocer qué tipo de microorganismos deberán estar presentes en un buen tratamiento, así como, cuáles son los que lo afectan. Asimismo deberá reconocer los cambios ocasionados al proceso respecto a un determinado tipo microorganismo.

El operador deberá familiarizarse con las características de los siguientes microorganismos, debido a su importancia en el tratamiento biológico:

- Bacterias
- Hongos
- Algas
- Protozoarios
- Rotíferos
- Crustáceos
- Nemátodos

Aunque las bacterias son los miembros representativos más importantes en la remoción de la materia orgánica soluble en los lodos activados, normalmente los microorganismos indicadores del estado de la biomasa son los protozoarios, rotíferos y nemátodos.

Se ha observado que los protozoarios son los que se encuentran en mayor proporción, dentro de los que destacan tres clases: ciliados, flagelados y sarcodinas (formas amiboides). Para esto ya se cuenta con ciertas gráficas que representan la predominancia de cierto tipo. La figura 3.17 muestra los microorganismos indicadores encontrados en un lodo activado de un proceso convencional de acuerdo al tiempo de retención celular y la relación F/M. Además se ilustra el concepto de la aparición y cuantificación en relación al tipo de floculo observado en el clarificador secundario.



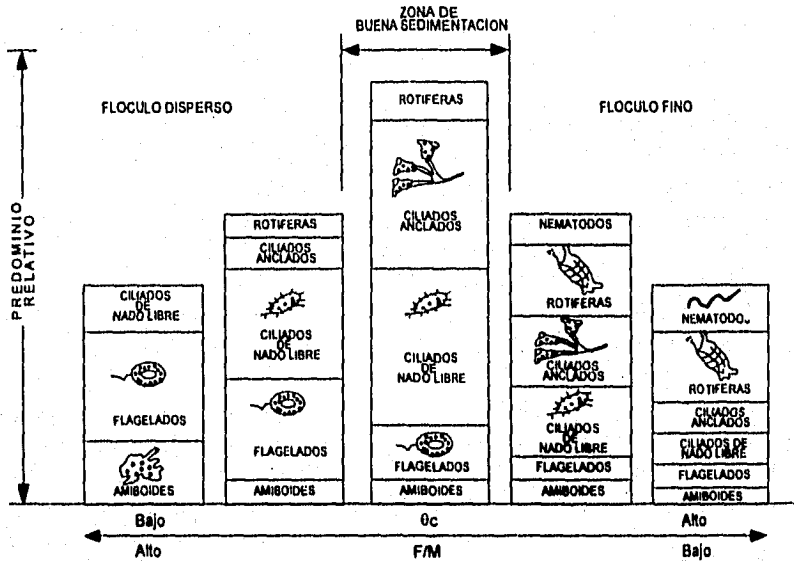


Figura 3.17 Tipos de protozoarios presentes en proceso de lodos activados convencional. Fuente: Jenkins et al., 1985

De acuerdo a la edad del lodo, el tipo de microorganismo predominante cambia. En general para edades de lodo bajas, se encuentran en mayor cantidad las sarcodinas y los flagelados; y para lodos más viejos los ciliados de nado libre, ciliados anclados y los rotíferos son los que están en mayor proporción. La presencia de los ciliados en el tratamiento de aguas residuales refleja un incremento en la calidad del efluente. El tipo de estructura de la comunidad de los ciliados está caracterizado de acuerdo al tipo de tratamiento, carga de lodo, carga orgánica, tiempos de retención celular y calidad biológica del lodo (Salvado et al., 1995). Pequeños protozoarios como los flagelados, amiboides y ciliados de nado libre prevalecen cuando  $\theta_c$  se encuentra por abajo de seis días. Flagelados mayores a 20  $\mu\text{m}$ , junto con amiboides más grandes de 50  $\mu\text{m}$  y ciliados anclados aparecen en lodos más viejos. Conforme el lodo es más viejo el número de microorganismos filamentosos (tipo 0914 y *Nocardia sp.*) se incrementa (Salvado, 1994). En el anexo C se muestran figuras de algunos microorganismos encontrados en lodos activados.

En seguida se presenta una guía general de predominancia de microorganismos relacionada con la eficiencia en un sistema de lodos activados.

- La sarcodina o formas amiboides rara vez predomina en operación normal y generalmente son asociadas con los flagelados. Las sarcodinas normalmente se

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

---

presenta en sistemas que están en etapa de arranque o se recuperan de un choque tóxico (anexo C1).

- Los flagelados son indicadores de una edad de un lodo joven. También es asociado con un arranque y una operación que se recupera de un choque tóxico. La presencia de abundante espuma blanca es asociada con esta etapa de desarrollo de biomasa. En los anexos C2 al C4 se muestran diferentes tipos de flagelados.
  - Los fitoflagelados se presentan cuando la carga orgánica es alta y el sistema trabaja a bajas eficiencias.
  - Los zooflagelados se presentan cuando decae el crecimiento en fitoflagelados. Y su presencia en una mayor cantidad indica un sistema ligeramente más eficiente.
- Los ciliados de nado libre indican un lodo de buena sedimentación con un sobrenadante claro. Este lodo prevé una buena remoción de DBO pero normalmente insuficiente para una consistente remoción de  $\text{NH}_3$ . Cuando estos ciliados se acompañan de una proporción mayor de flagelados indican una condición de baja eficiencia, mientras que junto con algunos ciliados anclados indican eficiencias más altas.
- Los ciliados anclados indican un excelente tratamiento. La remoción de DBO y  $\text{NH}_3$  están en el óptimo, así como la edad de lodo (anexo C5). Una planta estable y bien operada del tipo convencional presentaría en mayor proporción estas formas de protozoarios. La *Vorticella* es el ciliado más común en un lodo activado, pero según Salvado *et al.* (1995), plantas con especies no muy comunes como *Aclina tuberosa*, *Euplotes sp.* y *Zoothamnium sp.* son indicadoras de una alta calidad del efluente. En contraste, las especies más comunes, tales como *Uronema nigricans*, *Vorticella microstoma* y *Opercularia coarctata*, indica una menor calidad del efluente.
- Los rotíferos son comúnmente encontrados en lodos activados y son microorganismos multicelulares predadores. La predominancia de estos organismos indica una edad de lodo cercana al rango endógeno de crecimiento (anexo C6). Los rotíferos están presentes en condiciones de baja carga de  $\text{DBO}_5$  y altas eficiencias, indicando una aproximación hacia la oxidación total de la materia orgánica, como es el caso de un tratamiento de aireación extendida.
- Las algas verdes y verde-azules no son propiamente indicadores de la edad de lodo en el proceso de lodos activados. La presencia de estos microorganismos es normal en cualquier tratamiento. Su presencia es identificada cuando una cantidad de lama crece y se deposita en las paredes y/o vertederos del tanque de aireación, y esto es indicativo de un alto nivel de nutrientes o bien un choque de tóxicos en el influente. Cuando esto suceda debe verificarse las condiciones de la biomasa y posibles

condiciones tóxicas. En los anexos C7, C8, C9 se muestran algas verde-azules en forma de cocos, algas filamentosas verde-azules y algas verdes respectivamente.

- Las bacterias son los microorganismos que realmente trabajan en el lodo activado. Estos microorganismos consumen la materia orgánica soluble en el agua residual y la utilizan para poder respirar y reproducirse. Por ejemplo, las *Acinetobacter sp.* en un lodo activado, son asociada con plantas de tratamiento con remoción de nutrientes (figura 3.18(a)). El análisis al microscopio de estos microorganismos requiere de 1000X de potencia y técnicas de alto grado de limpieza. La observación de bacterias no son necesarias para el control de la operación. La figura del anexo C10 muestra un ejemplo de algunas bacterias y hongos vistos en lodos activados.

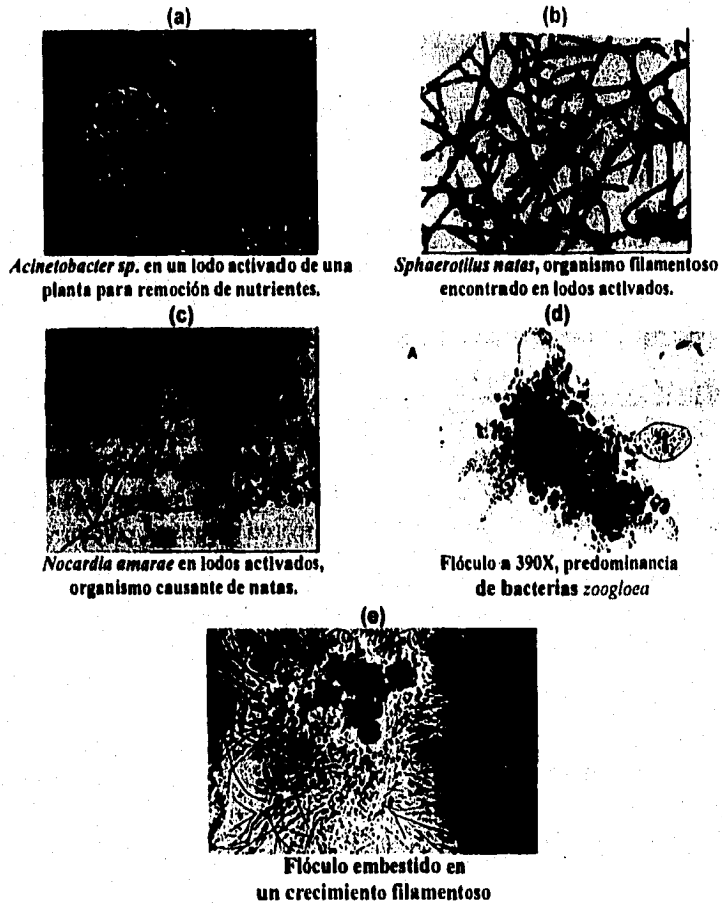
El sistema de zanjas de oxidación tipo carrusel, el cual opera con edades de lodo entre 10 y 30 días, no presenta una predominancia de protozoarios claramente definida. Un estudio realizado recientemente a la planta de South Valley, Water Reclamation Facility in West Jordan, Utah (EIMCO Process), que es de tipo carrusel, se observó que no se tenía una relación aparente entre la edad del lodo y el tipo de protozoario predominante. Sin embargo, el estado más favorable alcanzado por varios días fue cuando los flagelados disminuían y se tenía en mayor proporción a los ciliados anclados, ciliados de nado libre y rotíferos. Sin embargo, es importante que los operadores aprendan el significado de la presencia y abundancia de cada microorganismo de su propia planta.

Aunque se logre o no establecer una relación entre la eficiencia de la planta y el tipo de microorganismo que se encuentra en mayor proporción, es importante que la observación en el licor mezclado se más dirigido a los protozoarios, ya que son más sensibles a cambios en el proceso que las bacterias, por lo que una caída significativa en el número de protozoarios presentes, sería un primer indicador de que el proceso está en problemas o al menos ha ocurrido un cambio substancial en el mismo.

Otro beneficio del análisis al microscopio es cuando se verifica el número y longitud de los organismos filamentosos en las partículas del lodo. Estos organismos se encuentran en casi todos los lodos activados (de hecho son la estructura alrededor de la cual se forma la partícula floculada). Sin embargo, filamentos excesivamente largos o bien en un número excesivo causan baja sedimentación en el lodo, el cual no compacta adecuadamente, presentándose el fenómeno de abultamiento (bulking); el organismo filamentoso más común en este problema es el *Sphaerotilus natas* (figura 3.18 (b)). El desarrollo de estos organismos es favorecido por sustratos ricos en carbohidratos. También cuando se presentan grandes cantidades de *Nocardia* (figura 3.18 (c)) propicia la formación de una espuma de color canela oscuro y grasosa en el tanque de aireación (WPCF MP9, 1987).

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales



**Figura 3.18** Algunos microorganismos encontrados en un lodo activado.

Fuente: Biotechnology Research Centre, 1996

### 3.3 CONTROL DEL PROCESO.

#### 3.3.1 Control de la Aireación.

##### 3.3.1.1 Variación en la Tasa de Aireación.

El control de la aireación en las zanjas de oxidación puede realizarse de dos formas:

1. *Ajustando los vertederos para cambiar la sumergencia del impulsor del aireador.* Es decir, si se disminuye el nivel del licor mezclado la cantidad de oxígeno transferido al líquido también disminuye, y de igual manera si se aumenta el nivel incrementa la cantidad de oxígeno transferido.
2. *Realizando una operación intercalada de los aireadores.* Es decir se pueden cambiar los niveles de aireación apagando los aireadores que no sean necesarios en un momento dado.

Cuando se realiza un cambio en la tasa de aireación también cambia la velocidad en los canales de la zanja. Todos los sistemas de carrusel de la PTARNL están diseñados para tener una velocidad mínima en el canal de 0.305 m/s (1 ft/s). En realidad se ha observado que es necesaria una velocidad mínima de 0.21 m/s (0.7 ft/s) en el canal para prevenir la depositación de los sólidos. Una operación con menos de 158 hp totales provocará sedimentación debido a que la velocidad del agua en el canal aireado será inferior a 0.7 ft/s, por lo que no se recomiendan tiempos mayores a 24 horas.

Las zanjas de oxidación de la PTARNL cuentan cada una con tres aireadores de velocidad fija. Los tres aireadores en cada zanja operan a la misma sumergencia. Cuando los vertederos se encuentran en su nivel máximo, cada aireador demandará 150 hp, por lo que la máxima energía de aireación para cada tanque es de 450 hp. La tabla 3.6 muestra la potencia demandada en función del número de aireadores en operación y el nivel de sumergencia.

Cuando los aireadores se encuentran a su nivel máximo la sumergencia es de +0.26 m y cada aireador demandará 150 hp. A la mitad del intervalo de sumergencia, aproximadamente 0.093 m, cada aireador toma 117 hp. Cuando los vertederos se encuentran en su nivel mínimo la sumergencia es de -0.076 m y cada aireador demandará 84 hp. El sistema puede operar a tres diferentes sumergencias dentro de este intervalo para su ajuste en el consumo de energía (ver figura 2.15).

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

**Tabla 3.6**  
Variación del consumo de energía de los aireadores  
en función de la sumergencia del impulsor.

Aireadores en operación	Nivel de sumergencia* (m)	Potencia demandada (hp)
ON, ON, ON	Máximo (+0.26 m)	450
ON, ON, OFF	Máximo (+0.26 m)	300
ON, OFF, OFF	Máximo (+0.26 m)	150
ON, ON, ON	Medio (+ 0.093)	350
ON, ON, OFF	Medio (+ 0.093)	230
ON, OFF, OFF	Medio (+ 0.093)	117
ON, ON, ON	Mínimo (- 0.076 m)	251
ON, ON, OFF	Mínimo (- 0.076 m)	167
ON, OFF, OFF	Mínimo (- 0.076 m)	84

\* La sumergencia está referida a la parte superior del cono del impulsor.

Fuente: EIMCO 1994

En general las tasas de aireación que aseguran un OD entre 0.5 mg/l y 1.0 mg/l en los puntos de muestreo discutidos en la sección 3.2.4.1, se les considera adecuadas para mantener eficiencias favorables y buena sedimentabilidad de los lodos. Si el OD cae abajo de 0.5 mg/l, la eficiencia de tratamiento puede comenzar a disminuir debido al balance entre zonas aeróbicas y anóxicas, pudiendo llegar a condiciones anóxicas en zonas no deseables. Sin embargo, en algunos casos el OD del licor mezclado que sale por el vertedero puede permitirse que vaya tan bajo como cero, a menos que la desnitrificación en los clarificadores sea un problema.

Por otra parte, si el OD se encuentra por arriba de 1.0 en el punto de muestreo (20 a 30 m corriente arriba del vertedero), se estará desperdiciando energía debido a que los microorganismos no pueden consumir todo el OD proporcionado.

### 3.3.1.2 Factores que Afectan los Requerimientos de Oxígeno.

Existen tres factores que afectan los requerimientos de oxígeno, los cuales son:

- a) La concentración de la DBO.
- b) La concentración de SSLM
- c) El proceso de nitrificación.

a) Debido a que existe una relación directa entre la concentración de la DBO del influente y el OD en el tanque de aireación, el aumento de la DBO incrementa la cantidad de aire requerido para mantener concentraciones de OD adecuadas. Si no se responde al incremento de concentración de la DBO en el influente con un incremento en la tasa de aireación, los niveles de OD en las zanjas disminuirán.

- b) La tasa de aireación requerida para mantener un valor dado de OD es directamente proporcional a la concentración de los SSLM que se tienen en el tanque de aireación; cuando los SSLM en la zanja aumentan, la tasa de aireación debe incrementarse para mantener una concentración adecuada de OD. Si se tienen problemas para mantener una cierta concentración de OD y la cantidad de sólidos en el tanque de aireación es alta, la solución a estos problemas pueden ser resueltos incrementando la purga de lodos para disminuir la cantidad de microorganismos. Algunos operadores cometen un error al asumir que si el OD disminuye es debido a que un material tóxico ha entrado al tanque de aireación y por lo tanto mata o inhibe a los microorganismos, y bajo esta suposición llegan incluso a tomar medidas. En estos casos pasa algo diferente, ya que los microorganismos saludables son agentes que usan el oxígeno en el licor mezclado, por lo que si eliminamos o disminuimos los microorganismos, el OD en el tanque de aireación se incrementará.
- c) El proceso de nitrificación. El sistema de zanjas de oxidación generalmente tiene una edad de lodo suficientemente grande y una relación F/M suficientemente baja para lograr la nitrificación. La nitrificación ocurrirá independientemente de si lo deseamos o no; por lo tanto, por medio del control de la aireación, la nitrificación y desnitrificación pueden ser regulados, lo cual no sólo reduce la cantidad de nitrógeno descargado en el efluente, sino también permite la utilización del oxígeno consumido en la nitrificación. Esta parte se verá con mayor detalle en la sección 3.3.4.

En general para el cálculo de los requerimiento de oxígeno, debe tomarse en cuenta los puntos del siguiente balance:

- a) + O<sub>2</sub> para la respiración endógena de los microorganismos
- b) + O<sub>2</sub> consumido en la eliminación de DBO
- c) + O<sub>2</sub> consumido en la eliminación de TKN (nitrificación)
- d) - O<sub>2</sub> recuperado en el proceso de desnitrificación

Johnstone (1984) propone la siguiente ecuación para el cálculo de los requerimientos de oxígeno para sistemas de aireación extendida, en especial para zanjas de oxidación, donde incorpora el efecto de nitrificación-desnitrificación:

$$R = B + 4.34N_H - 2.85N_t + 0.024 X V r_{20} \theta^{(T-20)} \quad 3.5$$

donde:

R = consumo diario de oxígeno (kg/d)

B = remoción diaria del sustrato, DBO (kg/d)

X = concentración de sólidos en el licor mezclado (kg/m<sup>3</sup>)

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

---

$V$  = volumen del tanque ( $m^3$ )

$N_H$  = masa de nitrógeno amoniacal oxidado diariamente a nitrato (kg/d)

$N_T$  = masa total de nitrógeno removido diariamente (kg/d)

$r_{20}$  = tasa de respiración endógena a 20°C (mg  $O_2$ /g SSLM/h)

$\theta$  = factor de corrección por temperatura

$T$  = Temperatura del licor mezclado (°C)

### 3.3.2 Control de la Purga de Lodos.

Las técnicas de control basadas en la purga de lodos permite mantener un balance entre los microorganismos y la cantidad de alimento en forma de DBO o DQO (sustrato); básicamente estas técnicas permiten eliminar los microorganismos que están en exceso, manteniendo su nivel constante. Esta suposición se realiza en un "estado estacionario" que es una condición deseable para la operación; debe considerarse, por supuesto, que dicho estado estacionario es relativo dado que pueden tenerse ligeras variaciones en los valores de los parámetros de control debidas a las cambiantes características y naturaleza de la materia orgánica contenida en el agua residual y de la población de microorganismos.

En general, el control de la purga de lodos influye en los siguientes rubros:

- Estabilidad del sistema de lodos activados
- El crecimiento de los microorganismos
- El consumo de oxígeno
- La sedimentabilidad del licor mezclado
- La aparición de espuma
- La cantidad de nutrientes requerida, y principalmente
- La calidad del efluente final

La eliminación de los lodos puede hacerse en forma continua o intermitente. Generalmente es preferible la segunda, ya que se tiene un mayor control.

#### 3.3.2.1 Métodos de Control de la Purga de Lodos.

Si la concentración de sólidos es demasiado elevada, se necesita purgar lodo a un flujo mayor. Si la concentración es muy baja, se debe disminuir ese flujo de purga para permitir que se incremente la cantidad de sólidos. Ahora bien para saber cuánto hay que purgar, existen varias formas de determinar el flujo de purga, ya sea utilizando la concentración



de SSVLM, la relación alimento microorganismo (F/M), y el tiempo de retención celular ( $\theta_c$ ).

**3.3.2.1.1 Control Manteniendo Constante la Concentración de Sólidos Suspendedos del Licor Mezclado (SSLM).**

Esta técnica es simple de entender e involucra muy poco trabajo de laboratorio. Generalmente da una calidad de efluente buena mientras las características del influente no varíen demasiado.

Se basa en mantener constante el valor de los SSLM; por ejemplo, si para producir un efluente de calidad adecuada, se ha determinado que el valor de los SSLM sea de 4000 mg/l, el operador deberá ajustar la cantidad de lodo de purga para mantener constante dicha concentración. Si el nivel de SSLM aumenta sobre el valor deseado, debe purgarse más lodo para regresar a ese nivel y viceversa.

Esta técnica, sin embargo, no es suficientemente confiable pues ignora otras variables de importancia que sí se toman en cuenta en otros métodos. Cuando ocurren problemas operacionales, el operador no puede realizar ajustes racionales debido a la falta de datos de control del proceso.

Para calcular el valor de la purga se realiza de la siguiente manera:

**Ejemplo de Cálculo**

**A. Datos necesarios.**

Nivel de SSLM deseado ( $SSLM_d$ )=	4,000 mg/l
Valor de SSLM actual ( $SSLM_a$ )=	4,385 mg/l
Concentración de SST en la recirculación ( $SST_r$ )=	10,000 mg/l
Volumen de los tanques de aireación ( $V_r$ )=	107,014 m <sup>3</sup>

**B. Cálculo del gasto de purga por día.**

$$Q_w = \frac{(SSLM_a - SSLM_d) \times V_r}{SST_r \times (1 \text{ día})} \quad 3.6$$

$$Q_w = \frac{(4,385 \text{ mg/l} - 4,000 \text{ mg/l}) \times 107,014 \text{ m}^3}{10,000 \text{ mg/l} \times (1 \text{ día})}$$

$$Q_w = 4,120 \text{ m}^3/\text{día} = 47.7 \text{ l/s}$$

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

### 3.3.2.1.2 Control Mediante la Relación F/M.

Esta técnica asegura que el proceso reciba una carga orgánica tal que los microorganismos puedan remover la mayor parte. Si se alimenta demasiada o poca materia orgánica se producen alteraciones en el proceso y por consiguiente un descenso en la calidad de las aguas tratadas. Este balance se conoce como relación F/M. Dicha relación es la mostrada en la ecuación 1.25 y que se obtiene directamente de dividir la cantidad de sustrato alimentado por día entre la cantidad de sólidos contenidos en el tanque de aireación. El sustrato puede expresarse en kg/d de  $\text{DBO}_5$ , DQO, COT, etc.

#### Ejemplo de cálculo

##### A. Datos necesarios.

Concentración de $\text{DBO}_5$ en el influente =	195 mg/l
Caudal ( $Q_o$ ) =	1,360 l/seg
SSVLM en el tanque de aireación ( $\text{SSVLM}_a$ ) =	3,750 mg/l
Volumen de los tanques de aireación ( $V_r$ ) =	107,014 m <sup>3</sup>

##### B. Cálculo de la F/M.

$$F/M = \frac{S_o}{\theta X} \quad 3.7$$

donde  $\theta = V/Q_o$ , por lo tanto

$$F/M = \frac{Q_o \times S_o}{V_r \times X} = \frac{\text{Cantidad de sustrato que entra al tanque}}{\text{Cantidad de microorganismos dentro del tanque}} \quad 3.8$$

donde  $X = \text{SSVLM}$ , mg/l

$$F/M = \frac{1360 \text{ l/s} \times 195 \text{ mg/l} \times 86.4 \frac{\text{m}^3 \text{s}}{\text{d}}}{107014.2 \text{ m}^3 \times 3750 \text{ mg/l}}$$

$$F/M = 0.057 \frac{\text{kg DBO}_5}{\text{kg SSVLM} \cdot \text{d}}$$

##### C. Determinación de la purga ( $Q_w$ ).

La determinación del gasto de purga ( $Q_w$ ) se realiza utilizando la F/M deseada de la siguiente manera:

**Capítulo 3. Operación de la Planta**

Dada una F/M deseada ( $F/M$ ) = 0.075, se obtienen los SSVLM a purgar

$$\text{kg de SSVLM a purgar} = \text{kg SSVLM}_a \cdot \frac{\text{kg DBO}_5 \text{ en inf l uente/día}}{F/M} \quad 3.9$$

Para obtener los kg de SSVLM<sub>a</sub> se realiza el siguiente cálculo:

$$\text{kg SSVLM}_a = \text{SSVLM}_a \cdot V_r \quad 3.10$$

$$\text{kg SSVLM}_a = 3750 \text{ mg/l} (107014.2 \text{ m}^3) \left( \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ m}^3 \text{ mg}} \right)$$

$$\text{kg SSVLM}_a = 401303.25$$

Obteniendo los kg de DBO<sub>5</sub> por día en el influente

$$\text{kg DBO}_5 \text{ influente/d} = Q_0 (\text{DBO}_5, \text{ mg/l}) (0.0864 \text{ s kg/d mg})$$

$$\text{kg DBO}_5 \text{ influente/d} = 1360 \text{ l/s} (195 \text{ mg/l}) (0.0864 \text{ s kg/d mg})$$

$$\text{kg DBO}_5 \text{ influente/día} = 22913.28$$

retomando la ecuación 3.12 para el cálculo de los kg de SSVLM a purgar

$$\text{kg de SSVLM a purgar} = 401303.25 \text{ kg SSVLM}_a \cdot \left( \frac{22913.28 \text{ kg DBO}_5 / \text{ día}}{0.075 \frac{\text{kg DBO}_5 / \text{ día}}{\text{kg SSVLM}_a \cdot \text{ día}}} \right)$$

$$\text{kg de SSVLM a purgar} = 95792.85 \text{ kg}$$

Calculando los SSLM a purgar con una relación  $\left( \frac{\text{SSVLM}}{\text{SSLM}} \right) = 0.85$

$$\text{kg de SSLM a purgar} = \frac{95792.85 \text{ kg SSVLM a purgar}}{0.85} = 112077 \text{ kg}$$

$$Q_w = \frac{\text{kg SSLM}}{\text{SST}_r \times (1 \text{ día})} \quad 3.11$$

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

---

$$Q_w = \frac{112077 \text{ kg SSLM} \times 1000}{10000 \text{ mg/l} \times (1 \text{ día})}$$

$$Q_w = 11,207.7 \text{ m}^3/\text{d} = 129.7 \text{ l/s}$$

Un problema en este método es que se requiere de más muestreos y análisis de laboratorio. Si se desea conocer la cantidad de sustrato que ha entrado al tanque de aireación en las últimas 24 horas, se necesita una muestra compuesta para dichas 24 horas para realizar la determinación. Esto requiere un control estricto del flujo y equipo de muestreo automático, o un buen medidor de flujo y una persona hábil disponible para muestrear cada hora para luego conformar la muestra compuesta. Si se usa la DBO<sub>5</sub> como medida del sustrato, se requieren 5 días para el análisis, demasiados para el control de la planta, por lo que se prefiere la DQO o si existe el equipo necesario en la planta, el COT.

A causa de estos problemas, será mejor utilizar la medición de la F/M como método de verificación ocasional más que como una estrategia de control rutinaria. Por lo que se recomienda determinar la F/M ocasionalmente para ver si el sistema está trabajando con una carga razonable. La F/M para el sistema de zanjas de oxidación se encuentra en el intervalo entre 0.05 y 0.1 d<sup>-1</sup>.

### 3.3.2.1.3 Constante del Tiempo de Retención Celular Medio ( $\theta_c$ ).

Este método conocido también como edad de lodo, es considerado por muchos como el mejor método de control de proceso. Esto debido a que provee el control directo del tipo de microorganismos que predomina en el proceso de lodos activados. Por consiguiente, se puede tener control directo del tipo y comportamiento del lodo durante la sedimentación. El  $\theta_c$  se refiere al tiempo promedio en días que el lodo (biomasa) permanece en las zanjas antes de ser purgada. El método consiste fundamentalmente en seleccionar un  $\theta_c$  para el cual se obtenga un efluente de una calidad requerida. Como recomendación, la elección del mejor  $\theta_c$  debe efectuarse relacionando los valores de la F/M, SSVLM y DQO o DBO del efluente.

La fórmula para calcular el tiempo de retención celular esta representada por la ecuación 1.24, aunque para realizar un representación mas real existen varias formas de representarla:

1. Sólidos suspendidos contenidos en el tanque de aireación, despreciando el contenido en el clarificador (sólo cuando el volumen sea menor al 10%) y la concentración en el efluente.

$$\theta_c = \frac{V_r X}{Q_w X_r} \quad 3.12$$

2. Sólidos suspendidos contenidos en el tanque de aireación mas los contenidos en el clarificador secundario. Este forma asume que la concentración promedio de sólidos en el clarificador secundario es igual a la concentración de SSLM.

$$\theta_c = \frac{(V_r + V_s) X}{Q_w X_r} \quad 3.13$$

3. Similar al segundo concepto excepto que los sólidos suspendidos en el clarificador secundario son estimados por medio de la profundidad de la cama de lodos en el sedimentador. Esta forma asume que hay una cantidad constante de sólidos suspendidos en la cama de lodos.

$$\theta_c = \left[ \frac{\left( (X V_r) + \left( \frac{X + X_r}{2} \text{ Volumen de la cama de lodo} \right) \right)}{Q_w X_r} \right] \quad 3.14$$

donde:

$$\text{Volumen de la cama de lodo} = \left( \begin{array}{l} \text{espesor} \\ \text{de la} \\ \text{cama de lodo} \end{array} \right) \left( \begin{array}{l} \text{superficie} \\ \text{del} \\ \text{clarificador} \end{array} \right) \quad 3.15$$

Cualquier forma de cálculo puede representar el sistema, pero la clave es la consistencia y la continuidad de uso del mismo método seleccionado. Para el caso de la PTARNL se considera adecuada la segunda opción donde los sólidos en el clarificador secundario son considerados en el cálculo. Esto es válido porque en el sistema la participación de sólidos residentes en el clarificador es alta, ya que el volumen por los cuatro clarificadores es de 53,000 m<sup>3</sup>, y el volumen total de las zanjas de oxidación que es de 107,104.2 m<sup>3</sup>. Realizando un balance de sólidos podría observarse que el nivel de sólidos residentes en el sedimentador sobrepasa el 10% de los contenidos en el reactor.

Es importante que durante el arranque se trabaje con las tres formas para observar cual de ellas da mejores resultados.

La ecuación 3.15 de la segunda opción puede traducirse como:

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

$$\theta_c = \frac{\text{kg de sólidos en el sistema}}{\text{kg de sólidos en la purga de lodos}} \quad 3.16$$

El control mediante el  $\theta_c$  también nos permite controlar cuánto oxígeno consumen y a qué velocidad, qué tan activos están, cómo sedimentan y primordialmente qué tan buen efluente producen.

El  $\theta_c$  es un método muy fácil de usar, la única información que requiere para el cálculo son las lecturas de la concentración de sólidos en el tanque de aireación y en la línea de purga de lodos. Estos valores se pueden obtener usando los sólidos suspendidos volátiles ó totales (SST o SSV). Además se requerirá conocer el volumen de la zanja de oxidación y de los clarificadores.

Ejemplo de cálculo del  $\theta_c$ :

A. Datos necesarios.

$Q_o$ =	1360 l/s
SSL $M_s$ =	3235 mg/l
SST en la purga (SST $_p$ )=	10000 mg/l
Volumen de las zanja (Vr)=	107014.2 m <sup>3</sup>
Volumen de los clarificadores (Vs)=	53,000 m <sup>3</sup>
Flujo de purga actual (Q $_w$ ) $_a$ =	26.9 l/s
$\theta_c$ deseado ( $\theta_c$ ) $_d$ =	20 d

B. Cálculo del tiempo de retención celular actual ( $\theta_c$ ) $_a$ .

$$(\theta_c)_a = \frac{(3235 \text{ mg/l})(107014.2 \text{ m}^3 + 53,000 \text{ m}^3)}{(10000 \text{ mg/l})(26.9 \text{ l/s})(86.4 \text{ m}^3/\text{d})}$$

$$(\theta_c)_a = 22.3 \text{ d}$$

debido a que ( $\theta_c$ ) $_a$  es mayor el  $\theta_c$  de operación(20 d), se debe purgar

C. Cálculo del flujo de purga deseada, (Q $_w$ ) $_d$ .

$$\text{kg / d de sólidos a purgar} = \frac{\text{kg de sólidos en el sistema}}{(\theta_c)_d} \quad 3.17$$

$$\text{kg de sólidos en el sistema} = (3235 \text{ mg/l})(107014.2 \text{ m}^3 + 53,000 \text{ m}^3)(0.001 \text{ kg/m}^3 \text{ mg})$$

$$\text{kg de sólidos en el sistema} = 346190.9 \text{ kg}$$

$$\text{kg/d de sólidos a purgar} = \frac{346190.9 \text{ kg de sólidos en el sistema}}{20 \text{ d}}$$

$$\text{kg/d de sólidos a purgar} = 17309.5 \text{ kg/d}$$

$$(Q_w)_d = \frac{17309.5 \text{ kg/d}}{10000 \text{ mg/l} (0.0864 \text{ s kg/d mg})}$$

$$(Q_w)_d = 20.03 \text{ l/s}$$

Con este cálculo tenemos una variable que podemos manejar físicamente: el flujo de purga. Para mantener un  $\theta_c$  de 20 días en la zanja de oxidación.

Con el fin de utilizar este método, se sugiere coleccionar las muestras diariamente por la mañana, analizar la concentración de sólidos en el laboratorio, hacer los cálculos y luego proceder a purgar lo más pronto posible.

### 3.3.2.2 Selección del Método de Control de Purga.

Se ha discutido con anterioridad los diferentes métodos de control de purga, pero estos cálculos son basados sobre un valor fijo de diseño ( $\theta_c$ , la F/M o los SSLM) pero en la práctica se llega a un valor óptimo diferente a éste, ya que en la mayoría de las veces el valor de diseño suele no ser el adecuado. El ajuste del parámetro seleccionado estará en función de otros resultados y observaciones.

El siguiente análisis será enfocado al tiempo de retención celular, ya que como se ha visto ofrece mayores ventajas respecto a los otros parámetros de control.

Se ha definido el significado físico del  $\theta_c$  pero desde el punto de vista microbiológico una edad de lodos muy baja implica que la biomasa es purgada del sistema antes de que las bacterias tengan tiempo de aglomerarse y formar floculos. Esto se denomina "crecimiento disperso" porque las bacterias son demasiado jóvenes y se encuentran dispersas en el medio acuoso.

Un lodo de mayor edad tendrá floculos más grandes y consistentes, ligeramente coloridos en café y estará conformado por bacterias de edad equivalente a la adolescencia en un

## **ARRANQUE Y OPERACIÓN**

Tratamiento de Aguas Residuales

---

ser humano. Si requiere remover una gran cantidad de  $DBO_5$  en una emergencia, se desearía tener una fuerte concentración de lodos jóvenes en el tanque. Por supuesto, habrá algunos demasiado jóvenes o demasiados viejos, pero la mayoría podrá digerir esa cantidad de comida perfectamente. Los lodos jóvenes son los mejores en procesos de alta carga orgánica.

Como se revisó en el capítulo uno, en los sistemas de zanjas de oxidación o bien de aireación extendida, la edad de lodo es mucho mayor que en la mayoría de los procesos de lodos activados; esto es debido a que los sistemas prolongados proveen mucho más bacterias por cada kg de  $DBO$  entrante. Por consiguiente, tendremos lodos con una edad elevada en la planta. Los flocos formados por lodos viejos serán más pequeños, más oscuros y más compactos que los lodos más jóvenes, que serán más grandes y ligeros.

Sin embargo, el lodo de mayor edad también puede desechar materia como paredes celulares de los microorganismos muertos, que flotarían en el clarificador secundario. Pero a su vez, si el lodo es demasiado viejo la superficie del clarificador se podría cubrir parcialmente de pequeños flocos.

### ***Verificación del Valor del Flujo de Purga.***

Para saber si el flujo de purga es correcto, es necesario comparar las condiciones mediante los monitoreos sensorial y analítico que fueron descritos con anterioridad. Por ejemplo, si el lodo sedimenta correctamente, o la cama de lodo tiende a flotar en el clarificador; si los flocos están flotando y saliendo en el efluente; si existe o no espuma. Si es así, habría que determinar sólidos suspendidos, profundidad de la cama de lodo, el nivel de oxígeno disuelto, etc.

Esta información ayuda a saber si el flujo de purga actual es el adecuado para la planta en particular. Asimismo, ayudará a realizar los ajustes para mantener o incrementar la eficiencia del proceso.

En seguida se enlistan algunas de las pruebas y observaciones más útiles para determinar la condición del lodo:

- Cantidad y color de espuma en el tanque de aireación y en el clarificador
- Color del licor mezclado
- Tipo de sólidos ascendiendo a la superficie del clarificador
- Sedimentabilidad del licor mezclado
- Concentración de sólidos suspendidos de licor mezclado
- Cantidad de lodo en el clarificador secundario



Ahora se discutirá cada prueba u observación para evaluar el flujo de purga. Parte de esta información ya ha sido cubierta en capítulos anteriores y por tanto sólo se resumen los indicadores visuales:

- a) Cantidad y color de espuma en el tanque de aireación y en el clarificador. El color y tipo de espuma observado en la superficie de las zanjas de oxidación y el color del licor mezclado revelan los requerimientos de purga del sistema. Por ejemplo, cuando se observe espuma, no es motivo de preocupación si ésta es recién formada. Lo prioritario es observar primero la superficie del tanque corriente arriba de los aireadores. Lo importante es la espuma persistente, su color y consistencia. Muchos operadores han pensado que tienen una espuma ligera y blanca cuando en realidad se tiene una espuma café oscuro. Esto debido a que sólo observaban la espuma nueva y no aquella que tiende a acumularse por algunas horas, que es la de interés.

Cuando se tienen las mayores eficiencias de tratamiento para sistemas en carrusel generalmente se presenta una ligera acumulación de espuma café en la superficie del tanque que tiende a tener una apariencia grasosa de color café oscuro. Esta espuma no deberá cubrir más de  $\frac{1}{4}$  a  $\frac{1}{2}$  de la superficie del tanque de aireación. Si se acumula mayor cantidad, se requerirá aumentar la purga para disminuir la edad del lodo.

Es importante saber que información puede proporcionar el aspecto de la espuma acerca del flujo de purga. Por ejemplo, una espuma excesiva de color blanco, muy densa, significa que no hay suficientes microorganismos saludables para degradar la DBO entrente en el tanque. Esto puede deberse a que el sistema se encuentra en el arranque y no se haya desarrollado suficiente biomasa; que exista alguna toxina que inhiba a la biomasa; o bien que se hayan purgado demasiados lodos o se hayan lavado del sistema. A cualquier flujo, el efluente entonces se volverá turbio y contendrá excesiva DBO y SST hasta que se pueda aumentar de nuevo la cantidad de biomasa en las zanjas. Esto se logrará reduciendo la purga. Si la situación es grave, se podría considerar incluso el no purgar por algunos días.

Quizá con frecuencia no existirá espuma en el tanque de aireación, bajo esta situación, habrá que recurrir a otros indicadores de la edad del lodo, tales como el nivel de la cama de lodos en el clarificador, los SSLM, etc.

En general en las zanjas, una espuma espesa de color canela tenue a café oscuro indica condiciones deseables en el proceso mientras la cantidad sea moderada. Sin embargo, si la espuma se extiende más allá del superficie del tanque y se derrama cubriendo la superficie del clarificador, se necesita incrementar de inmediato la purga para disminuir la edad del lodo.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

---

- b) Color del licor mezclado. El color del licor mezclado está íntimamente relacionado con el nivel de purga. Mientras más oscuro sea, más alta será la edad del lodo. Obviamente, una coloración ligera del licor mezclado será normal para procesos convencionales, pero un color intermedio entre café oscuro y tenue será apropiado para las zanjas de oxidación.

Es muy común que los operadores poco habituados a evaluar el color del licor mezclado describan un color café oscuro como "ligeramente café". Hasta que se hayan visto las distintas variantes del proceso de lodos activados y se haya observado la apariencia del licor que les es típico, se podrá decir con precisión cuál es el color adecuado en cada caso.

- c) Tipo de sólidos en el clarificador. Este punto se muestra en la sección 3.2.1.2, y debido a su extensión es preferible mencionar sólo un caso. Por ejemplo, el clásico abultamiento del lodo ocurre cuando el clarificador se llena de lodo flotante. Esto se asocia con una velocidad muy lenta en la prueba de sedimentación. Si este es el caso y el lodo es de color arena, los microorganismos son demasiado jóvenes y hay que disminuir la purga.

- d) Sedimentabilidad. Generalmente una buena sedimentabilidad se presenta cuando el volumen del lodo sedimentado en 5 minutos (VLS como se definió anteriormente). Este cae en el rango de 800 a 500 ml/l (80 a 50%). Si el lodo ocupa más del 80 % del recipiente después de 5 minutos, el lodo se considerará de sedimentabilidad lenta. Si el lodo ocupa menos del 50 % del volumen del recipiente significa que la sedimentación es muy rápida y deja pequeñas partículas detrás. Estas partículas que no sedimentan en la cama de lodo del clarificador pueden arrastrarse con el efluente final.

Es importante mencionar que un lodo con sedimentación lenta es un problema muy común en muchas plantas. Esto puede atribuirse a muchas causas pero entre la que más destaca es que el lodo de este tipo puede ser el resultado de una excesiva purga, pero muy a menudo (especialmente en plantas de aireación extendida) es resultado de un bajo flujo de purga combinada con una edad de lodo alta.

- e) Concentración de sólidos en el licor mezclado. La relación entre la purga y la concentración de sólidos es muy alta. Si una purga no es suficiente para mantener condiciones estables, entonces la concentración de sólidos del licor mezclado incrementará. Si se excede en la purga, la concentración de sólidos disminuirá. Muchos operadores utilizan este concepto para decidir el flujo de purga o bien corregirla.

- f) Cama de lodo en el clarificador secundario. Anteriormente se discutió los diferentes métodos de medición del espesor de la cama de lodo en el clarificador secundario, la cual fue definida como la medida del fondo del clarificador a la parte superior de la cama.

En este caso si el flujo de purga se aumenta la cama de lodo tenderá a aumentarse lentamente. El exceso de sólidos que no son purgados incrementan la concentración del sólidos en el licor mezclado como en el sedimentador.

El argumentar que la cama de lodo es función del flujo de recirculación y no de la purga, es un concepto equivoco. Incrementando el flujo de recirculación el nivel de la cama de lodo en el clarificador secundario tenderá en ese momento a disminuir un poco, sin embargo, al cabo de un corto periodo el incremento en la recirculación provocará que se aumente la carga tanto hidráulica como de sólidos en el clarificador, propiciando nuevamente la elevación del nivel de la cama de lodo. Esto es debido a que el incremento en la recirculación es nuevamente retornado al tanque de aireación (zanjas de oxidación) para pasar nuevamente al clarificador secundario.

En otras palabras, si el nivel de la cama de lodo se eleva razonablemente por un periodo de una a 2 semanas aproximadamente, lo más indicado es aumentar la purga para reducir el inventario de sólidos en el sistema.

### **3.3.3 Control de la Recirculación de Lodos.**

En las secciones anteriores se mostró como controlar el proceso mediante el ajuste de la aireación y oxígeno disuelto (OD), y a través del control de la purga. En esta sección se hablará del control mediante el flujo de recirculación, el cual es considerado el mejor parámetro de control para sistema que trabajan con zanjias de oxidación.

Este método consiste en bombear de vuelta al tanque de aireación los sólidos suspendidos que han sedimentado en el fondo del clarificador, formando una cama de lodos en el mismo. El espesor de esta cama varia desde 0.30 a 1.20 m, debe tratarse de que nunca sea mayor a este último. Parte de los sólidos contenidos en la cama de lodo se retiran del fondo y se bombean de vuelta al tanque de aireación, acción denominada recirculación de lodos. En el caso de la PTARNL, los lodos son dirigidos hacia la caja de distribución de flujo de la obra de cabeza para que sean enviados de vuelta al tanque de aireación.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

---

#### 3.3.3.1 Propósito de la Recirculación.

Es obvio que si no se retira el lodo del fondo del clarificador, el nivel de la cama se incrementará y en poco tiempo saldrá por los vertedores del efluente y pasará hacia la unidad de desinfección de la planta de tratamiento. No se debe permitir que esto suceda ya que además de degradar la calidad del agua tratada, los sólidos arrastrados ejercen una excesiva demanda de cloro en la unidad de desinfección o bien de oxígeno en la corriente receptora, pudiendo ocasionar la muerte de la fauna acuática.

Ahora bien, ¿por qué no se retira el lodo del clarificador secundario y simplemente se desecha? El lodo que se deposita en el fondo del clarificador secundario se compone de licor mezclado cuyas partículas están formadas por microorganismos vivos. En el tanque de aireación estos microorganismos se alimentan del material orgánico contenido en el agua residual cruda y una vez consumidos estos materiales, los microorganismos crecen y se reproducen. Si las condiciones son las adecuadas en el tanque de aireación (disponibilidad de oxígeno, alimento orgánico, nutrientes y ausencia de tóxicos) los microorganismos se pueden reproducir aproximadamente cada 20 a 30 minutos. El resultado del consumo de material orgánico y reproducción de las bacterias es el incremento en la cantidad de lodo en el sistema.

Como puede verse, el alimento (material orgánico o DBO) que entra al tanque de aireación es convertido a organismos vivos y los flóculos del licor mezclado están formados por estos organismos.

Si no existen los suficientes microorganismos para consumir todo el material orgánico durante el periodo en el que el agua residual fluye a través del tanque de aireación, será necesario aumentar la cantidad de microorganismos en el tanque de aireación para acelerar el proceso de remoción de DBO, lo que se logra mediante la recirculación a partir de los lodos evacuados pero retenidos en el clarificador.

La recirculación no tiene que exceder, ya que podría provocar un aumento substancial en la carga hidráulica y en la carga de sólidos, pudiendo elevar el nivel de la cama de lodo en el clarificador secundario.

### 3.3.3.2 Importancia por Corregir la Recirculación de Lodos.

Las Implicaciones en la marcha del proceso, si éste se operara en cualquier de los dos extremos en el valor del flujo de recirculación:

a) Efectos de un flujo de recirculación nulo.

- El clarificador se llenará de lodo y se arrastrarán muchos sólidos con el efluente que llegarán a la corriente receptora.
- La cantidad de microorganismos en el tanque de aireación puede disminuir debido a que no se retorna nada del clarificador. Debido a esto no habrá suficientes microorganismos que consuman el sustrato (DBO) del influente al tanque de aireación, por lo que parte saldrá con el efluente.
- Si por cierto período no se cuenta con OD, en cuestión de una a dos horas los microorganismos en el clarificador secundario cambiarán su condición aerobia. En otras palabras: los microorganismos son facultativos y cuando cesa la operación aerobia se inicia el consumo de alimentos y generación de productos característicos de condiciones anaerobias, tales como gases que provocan que el lodo flote, olores indeseables, etc. Antes de que el lodo cambie y ocasione problemas, debe removerse del clarificador y retornado al tanque de aireación donde tendrá alimentos frescos y una cantidad adecuada de OD.

b) Efecto de operar el flujo de recirculación a una mayor capacidad de diseño (>150%).

- La cama de lodos del clarificador podría retornarse completamente al tanque de aireación.
- El lodo recirculado podría estar muy diluido debido a que en el bombeo se podría regresar una gran cantidad de agua junto con los sólidos.
- El agua extra que fue retornada con la recirculación de lodos activados puede reducir el tiempo de retención del tanque de aireación y afectar hidráulicamente al clarificador, disminuyendo la eficiencia de remoción de DBO, nitrógeno amoniacal, nitratos y fósforo. La carga superficial y turbulencia en el clarificador secundario se puede incrementar y causar una disminución en la calidad del efluente.

La figura 3.19 y la figura 3.20 ilustran ambos casos. Por ejemplo, si la planta ha sido diseñada para manejar un flujo promedio de 1,360 l/s, con un rango de recirculación de 40 a 150 %, esto significa que a bajo flujo de recirculación se tendría un caudal de 544 l/s, y para la máxima, un flujo de recirculación de 2,040 l/s. Cuando la planta opera con el flujo de diseño de 1,360 l/s y la recirculación total de lodos es de 544 l/s, el flujo total que

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

pasa por el tanque de aireación y el clarificador secundario es de  $1,360 + 544 = 1,904$  l/s (figura 3.18).

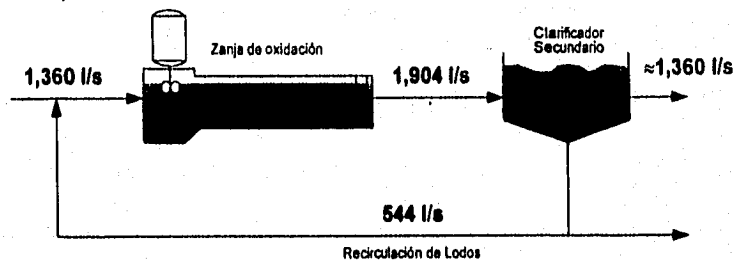


Figura 3.19 Flujo de recirculación bajo.

Si se realiza el bombeo de lodos de recirculación a la capacidad máxima, el flujo a través del tanque de aireación y el sedimentador será de  $1,360 + 2,040 = 3,400$  l/s (figura 3.20).

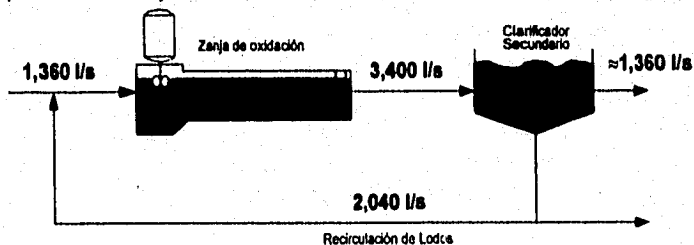


Figura 3.20 Flujo de recirculación elevado.

Cuando el flujo aumenta a 1.5 veces del flujo de diseño, la carga superficial en el clarificador también aumenta 1.5 veces, propiciado con esto mayor dificultad para que los sólidos sedimenten. Como consecuencia de esto, el tiempo de retención en el tanque de aireación se reduce considerablemente y se gasta energía innecesaria en el bombeo del lodo de recirculación.

#### 3.3.3.3 Métodos de Control de la Recirculación de Lodos.

La recirculación de lodos en el sistema de carrusel generalmente no requiere más del 150% y no menos del 40% del flujo del influente. Esto sirve de guía cuando se inicia la operación de la planta y proporciona un intervalo amplio para afinar el proceso. Pero es claro que no proporciona ningún indicio de cuándo o como debe ajustarse la recirculación para diferentes condiciones.

El control de la recirculación se efectúa de dos maneras (tabla 3.7):

- A caudal constante independientemente del caudal del influente secundario.
- A porcentaje constante del caudal del influente del secundario.

**Tabla 3.7**  
**Ventajas y desventajas de las formas de control del flujo de recirculación.**

Forma de Control	Ventajas	Desventajas
Recirculación a caudal constante independientemente del caudal del influente secundario	a) Simple. b) Requiere de menos tiempo de operación. c) La carga máxima de sólidos ocurre en el arranque o en las horas pico.	a) La F/M y $\bar{a}$ cambian constantemente. b) La cama de lodo puede aproximarse a la superficie del clarificador durante altos flujos promoviendo la pérdida de sólidos.
A porcentaje constante del caudal de influente secundario	a) Variaciones reducidas de la concentración de SSLM y por lo tanto, la F/M y $\bar{a}$ son más constantes, debido a que la carga de DBO <sub>5</sub> es generalmente proporcional al flujo. b) La cama de lodo tiende a permanecer constante, debido a que los SSLM en el sedimentador no se acumulan.	a) Complejo. b) Requiere de mayor atención por parte del operador.

Adaptado de WPCF MP9, 1987

En general el controlar el gasto de recirculación mediante la primera alternativa, es decir a un caudal constante independientemente del caudal del influente, ofrece ventajas considerables. En una planta de lodos activados convencional, la relación F/M puede tener variaciones considerables en un periodo de 24 horas, y este método no sería el adecuado, pero debido a que la PTARNL se base en un concepto de baja carga, la variación en la concentración de SSLM es más pequeña. La segunda alternativa hace necesario contar con un dispositivo automático de medición de flujo y un sistema programado o bien ajustes manuales continuos, por ello, se considera más complicado y requiere de más tiempo para su estabilización que el primer método. Por tal motivo a continuación se enfatiza en la utilización del método de caudal constante.

a) Para la aplicación del control del flujo de recirculación mediante un caudal constante, independientemente del caudal de influente, se dispone de las siguientes técnicas:

- Balance de masa en el clarificador secundario
- Balance en el tanque de aireación o en el clarificador secundario
- Sedimentabilidad
- Monitoreo de la profundidad de la cama de lodos en el clarificador secundario.
- Calidad de lodo

Para este trabajo se analizará con más detalle los tres últimos.

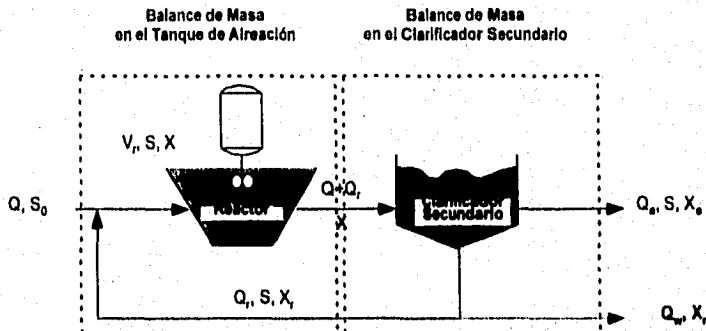
#### 3.3.3.3.1 Balances de Masa.

Esta técnica es una herramienta bastante útil para calcular el flujo de recirculación, sin embargo, requiere mantener la altura de la cama de lodos constante. Los cálculos usados en esta técnica se basan en la realización de un balance de masa de sólidos suspendidos

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

en el proceso, esto es, el conteo de toda la materia suspendida que entra y sale del proceso (figura 3.21).



Por ejemplo, realizando un balance sobre el reactor y para el flujo de la planta de 1360 l/s se requiere determinar el caudal de recirculación de acuerdo a los siguientes datos:

1. Sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado, mg/l (SSVLM)=939
2. Sólidos suspendidos volátiles en la recirculación, mg/l (SSV<sub>r</sub>)=2,945

$$Q X_0 + Q_r X_r = (Q + Q_r) X \quad 3.18$$

asumiendo  $X_0$  pequeño.

$$Q_r = \frac{Q X}{X_r - X} \quad 3.19$$

en término de los SSV:

$$Q_r = \frac{Q \times SSVLM}{SSV_r - SSVLM} \quad 3.20$$

$$Q_r = \frac{1360 \times 939}{2945 - 939} = 636.6 \text{ l/s}$$

### 3.3.3.2 Sedimentabilidad.

Esta técnica se basa en el resultado de la prueba de sedimentabilidad. La sedimentabilidad se define como el porcentaje de volumen ocupado por el lodo después de un intervalo de tiempo (ver sección 3.2.2.1).

Como se vió anteriormente, la sedimentabilidad puede no ser confiable si no se realiza sobre un modelo que represente las condiciones del clarificador secundario, ya que no



resultarían representativos los resultados obtenidos en laboratorio. Sin embargo, puede utilizarse como un método aproximado.

Como se recordará existen tres tipos de lodos:

- Lodo con sedimentación normal. En 5 minutos se tiene de 800 a 500 ml/l y al cabo de 60 minutos el lodo ha sedimentado por completo.
- Lodo con sedimentación rápida. Se encuentra alrededor de 500 ml/l en los primeros cinco minutos y alcanza su mayor volumen en menos de una hora.
- Lodos con sedimentación lenta. Da un volumen de lecho de 800 ml/l o más después de 5 minutos, ocasionando que la prueba se extienda más de una hora.

De acuerdo con lo anterior, se aumenta o disminuye el flujo de purga para llegar a un operación más adecuada. Es decir, si el lodo sedimenta muy rápido es probable que la edad del lodo sea aproximadamente de 10 días, por lo que hay que disminuir la purga. Pero si el lodo sedimenta lentamente, es probable que la edad del lodo se encuentre cercana a los 30 días y un incremento de la purga ayudará a mejorar la eficiencia del proceso.

Este método puede llegar a ser de gran ayuda, si se combina con otros parámetros para tomar alguna decisión, concretamente el contenido de SSLM, ya que algunas veces existen otros problemas que pueden alterar los resultados, como por ejemplo, una sedimentación lenta de lodo puede ser causa de un abultamiento del lodo de muy baja edad y abultado.

#### **3.3.3.3 Monitoreo del Nivel de la Cama de Lodos en el Clarificador Secundario.**

Constituye uno de los métodos de ajuste de la recirculación más directos de que se dispone. Este monitoreo se realiza en el sedimentador secundario y la recirculación se ajusta de tal manera que la profundidad de la cama de lodos no rebasa cierta altura, la cual puede determinarse con respecto a la calidad de efluente obtenida.

Tomar una decisión temprana a través de esta medición sin tomar en cuenta otros factores, puede realmente propiciarse un problema para la planta de tratamiento. Por ejemplo, pueden existir varias causas que provoquen el aumento de la cama de lodo:

- Se incrementaría la cama si las partículas floculentas se pusieran ligeras y esponjosas y por ende la sedimentabilidad se retardaría.
- Si el lodo sedimenta pobremente y se incrementa el flujo de recirculación puede provocar serios problemas entre los que destacan un aumento en la carga hidráulica.

## **ARRANQUE Y OPERACIÓN**

### **Tratamiento de Aguas Residuales**

---

- Podría verse aumentada la cama de lodo por tenerse una purga de lodo muy baja y una alta concentración de sólidos en el licor mezclado.

Por consiguiente no resulta conveniente hacer uso de esta técnica si no es en combinación con cualquier otra, recomendándose para ello la sedimentabilidad del lodo y los niveles de sólidos en el sistema.

La medición de la cama de lodos debe efectuarse a la misma hora cada día, preferentemente durante la hora de máximo flujo, que es cuando el sedimentador secundario opera a la carga máxima de sólidos. Una ventaja de esta técnica es que permite detectar problemas operacionales. La determinación de la cama de lodos en el sedimentador secundario puede determinarse mediante los dispositivos mencionados en la sección 3.2.6.

En el caso de los clarificadores de la PTARNL, esta técnica permite evaluar un funcionamiento simultáneo. Por ejemplo, si en uno de los clarificadores la cama de lodos aumenta mientras que en el otro disminuye, puede concluirse que el efluente de los tanques de aireación no está igualmente distribuido, ya que operan en paralelo con el flujo combinado de los tanques de aireación.

Un incremento en la altura de la cama de lodos puede indicar un flujo de recirculación inadecuado, flujos de purga insuficientes, o una mala calidad de lodos. En condiciones de operación normales la profundidad de la cama de lodos se considera adecuada si es menor de 1/3 de la profundidad del espejo de agua, realizando la medición en la pared del clarificador.

#### **3.3.3.3.4 Método de la Calidad del Lodo para el Control de la Recirculación.**

Este es el método más recomendable para mantener una alta calidad del efluente en la planta. Es un poco más complejo que los métodos anteriores, pero es la única estrategia de control que responde a cambios en el tipo de lodos que se tienen en el sistema. Este método ofrece una alta eficiencia a través de una recirculación determinada por diferentes parámetros.

Este control se basa en la optimización del tiempo de retención del lodo en el clarificador secundario. La selección del tiempo óptimo de retención ( $t$ ) se basa sobre el perfil de la curva de la concentración del lodo sedimentado (CLS).

Para esto, hay que recordar que la calidad del lodo se define por el perfil de la curva de concentración de lodos sedimentados (CLS) contra tiempo, ver sección 3.2.3.5. Se manejaron tres tipos de lodos: lodos con velocidad de sedimentación "normal" (de 10,000

a 15,000 mg/l en una hora), sedimentación "rápida" (de más de 20,000 mg/l en una hora) y sedimentación "lenta" (concentración de menos de 8,000 mg/l en una hora).

**Determinación de la Relación de Recirculación.**

Para la selección del tiempo óptimo  $t$ , dependerá del tipo de lodo del que se este hablando, es decir este tiempo se fijará justamente cuando la curva del lodo de sedimentabilidad rápida o normal o bien lenta muestre un punto de inflexión. Esto significa que la tasa de incremento en la concentración (CLS) comienza a disminuir, tal como se muestra en los puntos A y B de la figura 3.22.

Para los lodos de sedimentación lenta, el tiempo óptimo de sedimentabilidad es cercano al punto de inflexión A y para los lodos de sedimentación normal o rápida se localiza en el punto de rompimiento (el cual se muestra sobre la curva de sedimentación rápida como punto B).

Un tiempo de sedimentación largo puede deteriorar la calidad del efluente. Cuando se habla de tiempos de retención cortos estos fluctúan de 15 a 30 minutos e identifican a los lodos de sedimentación rápida. En el caso de tiempos de retención moderados que se identifican como lodos de sedimentación normal, estos se encuentran entre 40 a 60 minutos. Para tiempos largos el rango es de 100 a 140 minutos que muestra un comportamiento de lodos de sedimentación lenta.

Como se ha visto anteriormente, esta método es combinado con las mediciones de los SSLM y los SST en la recirculación. Las expresiones más importantes a utilizar son las siguientes:

- Sólidos suspendidos del licor mezclado (SSLM).
- Sólidos suspendidos en la recirculación (SSTr).
- Volumen del lodo sedimentado (VLS) en ml/l. Después de sedimentar por  $t$  minutos en la prueba de sedimentabilidad. Los tiempos típicos para la lectura son 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 y 60 minutos, como se muestra en los anexos.
- Concentración del lodo sedimentado (CLS). La concentración calculada después de sedimentar por  $t$  minutos. El  $t$  seleccionado es el tiempo óptimo de sedimentación basado sobre la curva de calidad de lodo.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

---

- Tasa de recirculación actual (TRA). Es la relación actual del flujo de recirculación entre el flujo de agua residual ( $Q_r/Q$ ). Esta relación es obtenida de un balance de masa sobre el clarificador secundario.

$$TRA = \frac{Q_r}{Q} = \frac{SSLM}{SSTr - SSLM} \quad 3.21$$

- Tasa de recirculación deseada (TRD). Es la relación deseada del flujo de recirculación entre el flujo de agua residual ( $Q_r/Q$ ).

$$TRD = \frac{Q_r}{Q} = TRA \left( \frac{SSTr - SSLM}{CLS_1 - SSLM} \right) = \frac{SSLM}{CLS_1 - SSLM} \quad 3.22$$

Para identificar si el lodo que se está recirculando (SSTr) se encuentra espeso o bien diluido, basta con comparar los valores de SSTr y CLS. Es decir si SSTr es menor el lodo se encuentra diluido y si esta por arriba se encuentra espeso.

Supongamos que se ha encontrado que el tiempo óptimo de sedimentabilidad fue a los 60 minutos y que en ese tiempo el volumen de lodo sedimentado ( $VLS_{60}$ ) fue de 400 ml/l, lo que significa un  $CLS_{60}$  de 10,000 mg/l ( $SSLM = 4000$  mg/l). Para esto se tomó una muestra de la línea de recirculación para llegar a determinar un SSTr de 9,100 mg/l. Esto implica que el lodo en la recirculación es diluido respecto a  $CLS_{60}$ .

Para determinar la recirculación adecuada, de acuerdo al método de la "Calidad del Lodo" se hacen los siguientes cálculos:

$$TRA = \frac{4000 \text{ mg/l}}{9100 \text{ mg/l} - 4000 \text{ mg/l}} = 0.784$$

Lo que representa una tasa actual de 78.4 %, corrigiendo se obtiene la siguiente disminución en la recirculación:

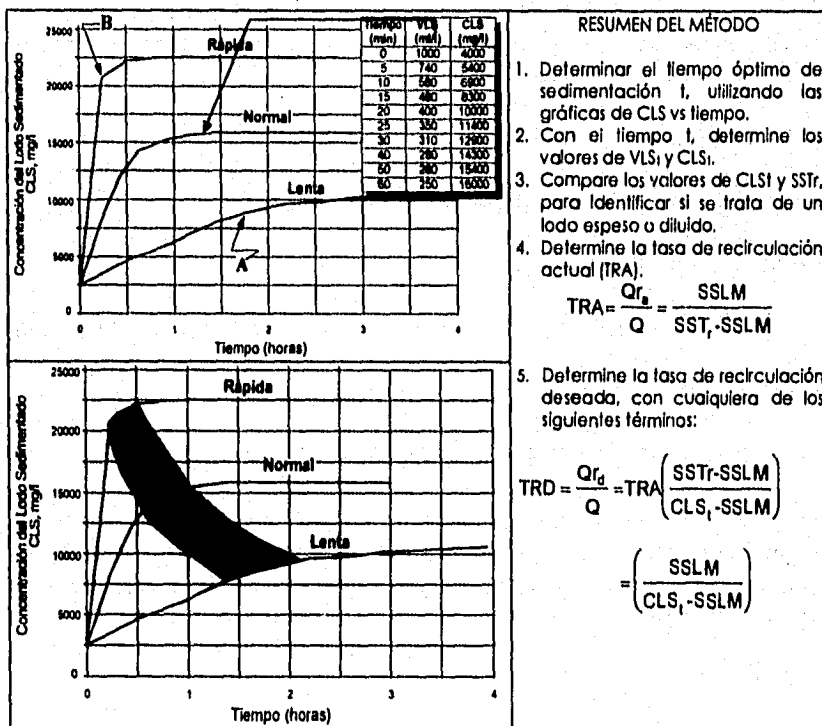
$$TRD = 0.784 \left( \frac{9100 \text{ mg/l} - 4000 \text{ mg/l}}{10000 \text{ mg/l} - 4000 \text{ mg/l}} \right) = 0.666$$

Para obtener una mayor eficiencia en el proceso debe llevarse la relación  $Q_r/Q$  al 66.6 %.

#### Comentarios Finales del Método de Calidad del Lodo.

- En algunas plantas existe un límite mínimo de recirculación que depende de la posibilidad de taponamiento de las tuberías. Si las pruebas y cálculos indican que el flujo de recirculación de lodos debe disminuirse a un valor tan bajo que pueda provocar problemas de este tipo, hay que disminuir hasta donde se asegure un flujo continuo de lodos.

- Si se requiere realizar grandes ajustes para satisfacer las demandas del proceso, es preferible realizar de 2 a 3 ajustes pequeños en un hora.
- Si la recirculación se ha reducido demasiado y la concentración en la recirculación permanece casi constante, mientras se observa que el lodo en el clarificador y/o el flujo de agua residual han variado substancialmente, significa que el lodo en el clarificador secundario alcanzó su máxima compactación.
- Si el licor mezclado sedimenta lentamente, tome la lectura siguiente a las 2 horas en lugar de hacerlo a los 60 minutos.



RESUMEN DEL MÉTODO

1. Determinar el tiempo óptimo de sedimentación  $t_1$ , utilizando las gráficas de CLS vs tiempo.
2. Con el tiempo  $t_1$ , determine los valores de VLS<sub>1</sub> y CLS<sub>1</sub>.
3. Compare los valores de CLS<sub>1</sub> y SST<sub>r</sub>, para identificar si se trata de un lodo espeso o diluido.
4. Determine la tasa de recirculación actual (TRA):

$$TRA = \frac{Q_{r_a}}{Q} = \frac{SSL_M}{SST_1 - SSL_M}$$

5. Determine la tasa de recirculación deseada, con cualquiera de los siguientes términos:

$$TRD = \frac{Q_{r_d}}{Q} = TRA \left( \frac{SST_r - SSL_M}{CLS_1 - SSL_M} \right) = \left( \frac{SSL_M}{CLS_1 - SSL_M} \right)$$

Figura 3.22 Método de la calidad del lodo.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

---

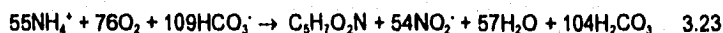
### 3.3.4 Nitrificación y Desnitrificación.

#### *Nitrificación.*

Las bacterias encargadas de la nitrificación son organismos muy sensibles a sus condiciones ambientales. Una gran variedad de agentes orgánicos e inorgánicos pueden inhibir el crecimiento y acción de estos microorganismos. Altas concentraciones de amoníaco y ácido nitroso son algunos ejemplos. El efecto del pH es también un factor que puede afectar este fenómeno, por lo que se recomienda que se maneje en un rango de 7.5 a 8.6. La temperatura también tiene una influencia significativa, sin embargo la cuantificación de este efecto ha sido difícil de identificar. Las concentraciones de oxígeno disuelto arriba de 1.0 mg/l son esenciales para que ocurra la nitrificación. Si los niveles de oxígeno disuelto caen por debajo de este valor, el oxígeno pasa a ser un nutriente limitante y la nitrificación decae.

En un sistema acuoso, el amoníaco es convertido a nitrito por bacterias autótrofas, del género *Nitrosomonas* y después a nitrato por *Nitrobacter*, las cuales también son autótrofas. La reacciones de la oxidación pueden representarse como sigue.

La ecuación para *Nitrosomonas* es:



La ecuación para *Nitrobacter* es:



Estas ecuaciones permitirán cuantificar la cantidad de oxígeno y alcalinidad (bicarbonatos) para el proceso. Aproximadamente 4.3 mg de  $\text{O}_2$  por cada mg de  $\text{N-NH}_4^+$  oxidado a  $\text{N-NO}_3^-$  será necesario, así como una importante cantidad de alcalinidad: 8.64 mg  $\text{HCO}_3^-$  por mg de  $\text{N-NH}_4^+$  oxidado.

#### *Desnitrificación.*

El nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y el nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) tienen oxígeno combinado químicamente, el cual es utilizado por los microorganismos desnitrificantes en el proceso de desnitrificación. En este proceso la concentración de OD en el tanque es pequeña o bien nula, pero se tienen nitratos, lo cual no significa que esté en condiciones anaeróbicas, sino en condiciones anóxicas. El producto obtenido en la desnitrificación es el nitrógeno gas ( $\text{N}_{2(g)}$ ) que se separa del agua, el cual corresponde al punto final del ciclo del nitrógeno (ver figura 3.23).

Este proceso suele ser acompañado por varios géneros de bacterias, los cuales incluyen *Achromobacter*, *Aerobacter*, *Alcaligenes*, *Bacillus*, *Brevibacterium*, *Flavobacterium*, *Lactobacillus*, *Micrococcus*, *Proteus*, *Pseudomonas* y *Spirillum*.

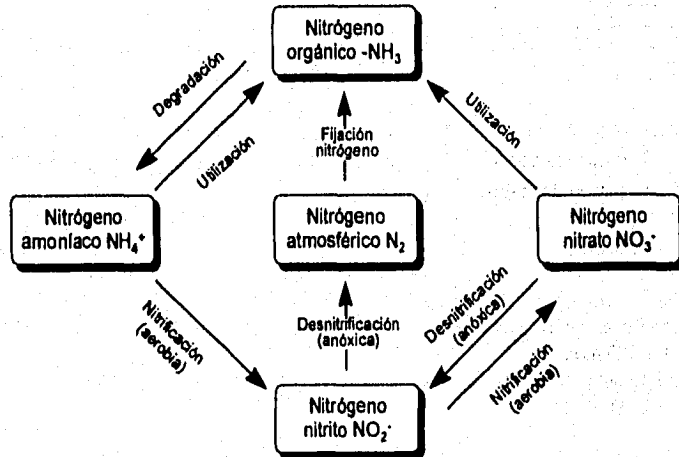


Figura 3.23 Ciclo del nitrógeno en agua residual.

La desnitrificación produce alcalinidad perdida durante la nitrificación e incrementa el pH. Generalmente el factor limitante para la desnitrificación es la fuente de carbono la cual puede ser provista mediante aguas residuales, material celular durante el metabolismo endógeno, o por una fuente externa, como metanol (Metcalf & Eddy, 1991).

La tasa de desnitrificación puede describirse por la siguiente ecuación :

$$U'_{DN} = U_{DN} \times 1.09^{(T-20)}(1 - OD) \quad 3.25$$

- donde  $U'_{DN}$  = Tasa de desnitrificación global  
 $U_{DN}$  = Tasa de desnitrificación específica, mg N- $\text{NO}_2^-$ /mg SSVLM/d  
 T = Temperatura del agua residual, °C  
 OD = Oxígeno disuelto en el agua residual, mg/l

El factor (1-OD) en la ecuación anterior indica que la tasa de desnitrificación disminuye linealmente a cero cuando la concentración de oxígeno disuelto alcanza un valor de 1.0 mg/l. Las tasas de desnitrificación para varias fuentes de carbono son dadas en la tabla 3.8.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

Tabla 3.8  
Tasas de desnitrificación para varias fuentes de carbono.

Fuente de carbono	Tasa de desnitrificación mg NO <sub>2</sub> /mg SSV /d	Temperatura °C
Melanol	0.21-0.32	25
Melanol	0.12-0.90	20
Aguo residual	0.03-0.11	15-27
Metabolismo endógeno	0.017-0.048	12-20

Melcali & Eddy, 1991

A continuación se muestra un cálculo para identificar el tiempo de residencia hidráulica entre una determinada concentración de nitrato (NO<sub>3</sub>) producido en la zanja de oxidación y una concentración deseada en el efluente.

Ejemplo de cálculo :

Concentración de nitrato en el tanque = 22 mg/l  
Concentración de nitrato deseada en el efluente = 5 mg/l  
SSVLM = 4,000 mg/l  
Oxígeno disuelto promedio = 0.2 mg/l  
 $U_{DN(20^{\circ}C)} = 0.048 \text{ d}^{-1}$

Solución :

Cálculo e la tasa de desnitrificación para 25 °C de la ecuación 3.25.

$$U'_{DN} = (0.048) \times 1.09^{(25-20)} (1-0.2) \\ = 0.0411 \text{ d}^{-1}$$

Calculando el tiempo de residencia usando el último término de la ecuación 1.23.

$$U = \frac{S_0 - S}{\theta X} \\ \theta = \frac{22 - 5}{0.0411 \times 4,000} \\ = 0.103 \text{ d} \\ = 2.5 \text{ h}$$

### 3.3.4.1 Operación de los Aireadores.

Si los aireadores son operados con alto consumo de energía, se tendrá una alta concentración de oxígeno en la zona de aireación y gran parte del tanque de aireación será aerobio con lo que el tamaño de las zonas anóxicas se reducirá y los costos de



aireación se elevarán. Sin embargo, a bajos niveles de energía ocurrirá lo contrario. Un nivel bajo de oxígeno en la zona de aireación reduce las zonas aerobias y crea mayores zonas anóxicas en los canales.

Es necesario un balance cuidadoso de los niveles de OD para mantener el equilibrio entre los procesos de nitrificación y desnitrificación. Una medición directa del OD es de gran ayuda, pero a partir de esta información, también se puede obtener la tasa de utilización de oxígeno (OUR; Oxygen Uptake Rate). Esta es una medida de la cantidad de oxígeno consumida por unidad de tiempo. La OUR es expresada en mg/l/h. Para sistemas convencionales y aguas municipales, esta tasa se encuentra normalmente entre un rango de 20 a 30 mg/l/h (Junkis, Deeny and Eckhoff, 1985). Para un procesos que trabaja en condiciones endógenas la OUR puede tener este rango o inclusive valores menores (WPCF MOP-9, 1987).

La tasa a la cual los microorganismos descomponen la materia orgánica (substrato) es medida por el monitoreo de la rapidez con que es utilizado el OD en una muestra de licor mezclado. Con esta prueba el personal de operación se dará cuenta de cuán activo son los microorganismos en el proceso. Una baja OUR (de 0 a 5.0 mg/l/h) podría indicar un desajuste en la planta, por ejemplo, la presencia de tóxicos en el influente, o bien, podría ser indicativo de una población de microorganismos inactivos.

Si la aireación es demasiado baja, los niveles de nitrógeno amoniacal en el efluente pueden incrementarse ya que el oxígeno requerido para convertir el amonio a nitratos no esta siendo suficiente. Por el contrario, si la aireación es alta se tendrá un efluente de calidad pero quizá con desperdicio de energía. La tabla 3.9 es un resumen de la relación entre los niveles de energía de aireación y las características del efluente.

**Tabla 3.9**  
Relación entre niveles de energía consumida por la aireación y características del efluente.

Condición	Características del efluente	Consecuencias
Energía baja	alto $N-NH_4^+$ , bajo $N-NO_3^-$	Se rebasa la especificación de descarga
Energía alta	bajo $N-NH_4^+$ , alto $N-NO_3^-$	Se cumple con la descarga pero quizá se desperdicia energía
Energía correcta	bajo $N-NH_4^+$ , bajo $N-NO_3^-$	Se cumple con la descarga y se ahorra energía

En general, para aguas residuales municipales una planta de tipo carrusel entrega un efluente con 2 mg  $N-NH_4^+$ /l y 10 mg  $NO_3-N$ /l (Mandt & Bell, 1982).

### 3.3.4.2 Establecimiento de los Niveles de Energía para Aireación para el Control de la Nitrificación y Desnitrificación.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

---

El siguiente es un procedimiento para determinar el nivel de energía para balancear la nitrificación y desnitrificación en el tratamiento del agua residual:

1. Medir la concentración de OD en el tanque de aireación corriente arriba de los vertederos aproximadamente a una distancia de 2 a 3 veces el ancho del canal. El OD en este punto debe ser de 0.5 a 1.0 mg/l.
2. Verificar en el efluente la concentración de nitratos y nitrógeno amoniacal.

a) Si el OD se encuentra entre 0.5 y 1.0 mg/l pero la concentración de nitratos en el efluente se eleva es señal que se está introduciendo demasiado oxígeno al sistema.

Se recomienda reducir la energía de aireación para disminuir la concentración de OD a valores entre 0.3 y 0.7 mg/l.

b) Si el nivel de OD se encuentra entre 0.5 y 1.0 mg/l y la concentración de nitrógeno amoniacal es elevada, será necesario aumentar la energía para favorecer a la nitrificación total del nitrógeno amoniacal.

Incremente la energía de aireación para mantener una concentración de OD en el intervalo de 0.8 a 1.2 mg/l.

3. Continúe el monitoreo del OD, nitrógeno amoniacal y nitratos en el efluente. Con la experiencia se pueden determinar las condiciones adecuadas de operación para minimizar la energía de aireación y mantener el efluente dentro de los límites de descarga permitidos. En ciertos periodos del año el flujo influente y la carga de materia orgánica suelen incrementarse. Se deben verificar continuamente los requerimientos de energía de aireación y ajustarlos para mantener la máxima eficiencia de remoción de DBO y nitrógeno.

La clave para el control de la nitrificación-desnitrificación es el análisis del OD en el tanque de aireación. El OD debe medirse al menos dos veces al día, de preferencia a las 9:00 y 15:00 hr. Luego siga las recomendaciones dadas en la sección 3.2.2.3, que menciona entre otras cosas :

- Realizar una medición cuidadosa del OD, incluyendo un mantenimiento periódico al electrodo.
- Calibrar diariamente el aparato antes de la medición de OD.
- Establecer un sitio y hora para la medición.
- Realizar la medición alejado de la pared del canal.

Lo anterior se recomienda para poder comparar las variaciones promedio de OD durante los 7 días de la semana. Ajuste la energía de aireación tomando como referencia una variación promedio de los 7 días de la semana, en lugar de basarse en lecturas individuales, lo que reduce las diferencias causadas por las variaciones diarias en carga orgánica y temperatura del aire.

Tomando una OUR de 20 mg/l/h para ejemplificar un balance dentro de la zanja se tendría lo siguiente en el sistema de la PTARNL (figura 3.24).

Datos necesario:

Tasa de consumo de oxígeno, OUR =	20 mg/l/h
Longitud de la zanja, l =	98.6 m
Arco interno promedio, A1=	22.5 m
Arco exterior promedio, A2=	45 m
Velocidad en el canal, v =	0.305 m/s
Transferencia de O <sub>2</sub> en zona aireada, Tt=	2.0 mg/l

**ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA**

Tiempo en que toma en trasladarse el licor mezclado en la longitud de la zanja considerando régimen permanente:

Recorrido A (interior) = 98.6 + 22.5 = 121.1

Recorrido B (exterior) = 98.6 + 45.0 = 143.6

Para recorrido A:

$$t = \frac{121.1 \text{ m}}{0.305 \text{ m/s}}$$

$$t = 397.05 \text{ seg}$$

$$O_2 \text{ consumido}_{\text{distancia=d}} \text{ mg/l} = \text{OUR} \times t$$

$$O_2 \text{ consumido}_{\text{d}=121.1 \text{ m}} \text{ mg/l} = 20 \text{ mg/l/h} \times 397.05 \text{ s} \left( \frac{1}{3600} \right)$$

$$O_2 \text{ consumido}_{\text{d}=121.1 \text{ m}} = 2.2 \text{ mg/l}$$

Para recorrido B:

$$t = \frac{143.6 \text{ m}}{0.305 \text{ m/s}}$$

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

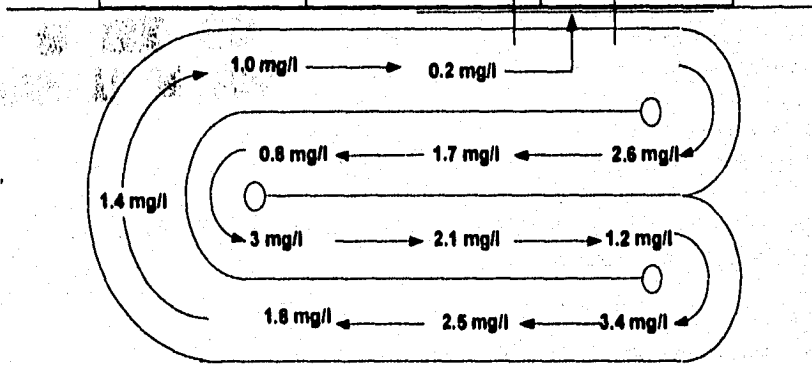
Tratamiento de Aguas Residuales

$$t = 470.08 \text{ seg}$$

$$O_2 \text{ consumido}_{d=143.6 \text{ m}} = 2.6 \text{ mg/l}$$

Realizando un análisis, sobre la zanja se tendría el siguiente perfil:

Recorrido (m)	O <sub>2</sub> consumido (mg/l)	O <sub>2</sub> real (mg/l)
121.1	2.2	0
143.6	2.6	*



\* Para este caso se tiene que operar con una potencia mayor en el último aireador.

Figura 3.24 Perfil de concentraciones de oxígeno disuelto en la zanja de oxidación.

Para determinar el consumo de hp se realiza de la siguiente manera.

1. Utilizando la siguiente ecuación para el cálculo de la transferencia de oxígeno bajo condiciones normales de operación (Metcalf & Eddy, 1991):

$$N = N_0 \left( \frac{\beta C_{Wah} - C_L}{C_{L20}} \right) 1.024^{T-20} \alpha \quad 3.26$$

$N$  = kg O<sub>2</sub>/hp h, transferencia bajo condiciones de operación.

$N_0$  = kg O<sub>2</sub>/hp h, transferencia en agua a 20 °C y con una concentración inicial de OD de cero (3.55 lb O<sub>2</sub>/hp h).

$\beta$  = Factor de corrección de tensión superficial, 0.95 para el proyecto.

- $\alpha$  = Factor de corrección de transferencia de oxígeno (para agua residuales = 0.98)
- $C_{sat}$  = Concentración de saturación de  $O_2$  en agua a temperatura y altura dada (7.5 mg/l).
- $C_{s,20}$  = Concentración de saturación de  $O_2$  en agua a 20 °C (9 mg/l).
- $C_L$  = Concentración de oxígeno en condiciones de operación.
- T = Temperatura en °C (30 °C promedio).

2. Calcular lo requerimientos de oxígeno y transferencia.

Esta puede ser realizada mediante las siguientes fórmulas (Metcalf & Eddy, 1991).

Cálculo de mayor precisión :

$$\text{kg } O_2/d = \frac{Q (S_o - S) \times (10^3 \text{ g/kg})^{-1}}{f} - 1.42(P_x) + 4.57Q(N_o - N) \times (10^3 \text{ g/kg})^{-1} \quad 3.27$$

- $S_o$  = Substrato total del influente, mg/l
- S = Substrato total del efluente, mg/l
- $N_o$  = Nitrógeno total del influente, mg/l
- N = Nitrógeno total del efluente, mg/l
- 4.57 = factor de conversión para la cantidad de oxígeno requerido para la oxidación completa del TKN.

Cálculo aproximado :

$$\text{kg } O_2/d = Q(1.15S_o + 4.57TKN) \times (10^3 \text{ g/kg})^{-1} \quad 3.28$$

Q = flujo en Mgal/d

3. Finalmente para el cálculo de la potencia :

$$\text{hp total en la planta} = \frac{\text{kg } O_2/d}{\text{kg } O_2/\text{hp h}} \quad 3.29$$

## Capítulo 4



## El Arranque de la Planta

## CAPÍTULO IV EL ARRANQUE DE LA PLANTA.

### 4.1 ESTRATEGIA DE ARRANQUE.

Hasta hace unos años el arranque y operación de una planta de tratamiento de aguas residuales se basaba en la experiencia y sentido común de los ingenieros responsables, pero hoy en día las plantas son más grandes y de mayor complejidad en sus procesos, más costosas en su construcción, además de requerir de un sistema de control más completo, el cual a veces resulta confuso hasta para operadores con instrucción.

La preparación para el arranque empieza mucho antes de completarse la construcción del sistema de tratamiento, con la elaboración de los Manuales de Operación y Mantenimiento, así como con el programa y protocolo de arranque, de modo que puedan utilizarse en la capacitación de los operadores.

La preparación del programa y protocolo de arranque debe realizarse en una secuencia lógica de modo tal que conduzca a una conclusión exitosa.

#### **Arranque**

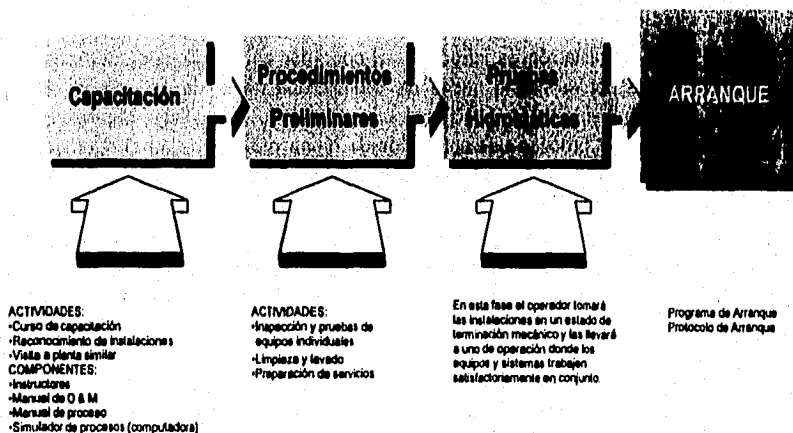


Figura 4.1 Estrategia de Arranque.

## **ARRANQUE Y OPERACIÓN**

Tratamiento de Aguas Residuales

---

A continuación se presenta una guía secuencial para el arranque de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Nuevo Laredo con las siguientes etapas:

- Capacitación.
- Procedimientos preliminares.
- Pruebas hidrostáticas.
- Arranque.

### **4.2 CAPACITACIÓN.**

El curso de capacitación del operador dependerá de su experiencia y la complejidad de la unidad o unidades a operar. Para complementar la capacitación es conveniente realizar alternamente visitas a las instalaciones para el reconocimiento de los equipos que estarán a cargo de los operadores, así como de ser posible, una visita a una planta similar.

#### **4.2.1 Curso de Capacitación.**

La capacitación del personal de operación y mantenimiento es crítica para el buen funcionamiento de los equipos, tanto de proceso como mecánicos, así como sistemas eléctricos y aspectos de medición e hidráulica. Otra etapa importante será la capacitación del personal de laboratorio en las técnicas analíticas requeridas para el monitoreo y control de la operación de la planta.

El propósito de la capacitación es introducir al operador en los aspectos del proceso, evitando que opere por el simple hecho de cumplir una rutina de actividades diaria. Debido a que comúnmente las instrucciones son demasiado específicas, al presentarse un problema dentro del proceso diferente a los de rutina provocará que el operador no resuelva inteligentemente o en su defecto tardíamente.

Por su importancia en el arranque las medidas de seguridad deberán ser analizadas en los cursos, por ello serán incluidas tanto en la capacitación como en el Manual de Operación y Mantenimiento, discutiéndose riesgos de operación bajo diferentes condiciones y políticas de la planta.

Esta planta cuenta con instrumentación en algunos de sus procesos unitarios, requiriendo entonces de menos operadores, pero con mayor capacidad y habilidad individual. La planta cuenta con un tiempo de retención hidráulico alto (22 horas), lo cual permite una cierta capacidad de amortiguamiento, además de contar con unidades de reserva, pero el tamaño y tipo de los equipos requiere de mecánicos altamente capacitados para conservarlos en buen estado.



Respecto al personal de operación, es conveniente que además de proporcionársele en salón de clase la descripción de las operaciones unitarias básicas, debe completarse con el tipo de tecnología a utilizar. Por ejemplo, por que se decidió utilizar sopladores de desplazamiento positivo tipo Roots y no otro.

El periodo de entrenamiento pueden variar de planta a planta; sin embargo, dos semanas son un periodo inicial aproximado. Un horario preliminar del curso de capacitación propuesto es de 8:00 a.m. a 17:00 p.m., de lunes a viernes durante dos semanas, con una hora de comida y dos descansos de 15 minutos. Al final de cada día, es importante que las lecciones revisadas se evalúen por medio de un breve examen y los resultados de éstos sean revisados al siguiente día. Esta capacitación también debe cubrir varias de las secciones del manual de operación y mantenimiento.

Los principales componentes a identificar para las sesiones de clase son:

- Selección de los instructores.
- Manual de operación y mantenimiento, y
- Un simulador del proceso (si está disponible).

Algunas recomendaciones propuestas para la homogeneidad en el curso son las siguientes:

- **Proveer de información al operador** la cual pueda utilizar y relacionar con las actividades que se le encomendarán.
- **Utilizar herramientas visuales fácilmente asimilables** tales como diagramas de flujo, esquemas y gráficos con ideas principales. Por ejemplo, un diagrama del proceso o un diagrama de bloques bien elaborado, tiene la misma información que diez páginas con la descripción del mismo. Para dar uniformidad al material será necesario plantear un estilo de diapositiva (filmina) a utilizar para facilitar la comprensión del operador.
- **No agobiar al los operadores con matemáticas.** Asegúrese que ellos comprendan el razonamiento y trate de inducirlos a utilizar una fórmula o teoría que represente el fenómeno del que se esté hablando; ayúdelos si existen dudas y proponga problemas reales resolviéndolos en conjunto.
- **Realice propuestas para que participen todos**, mediante la resolución o simulación de operaciones que se presentarán en la planta o problemas operativos más probables.
- Normalmente dentro de la capacitación se contará con diferentes grupos, tales como personal de laboratorio, ingenieros para la operación de la planta y personal de mantenimiento. Un poderoso dispositivo para **evitar conflictos** entre estos grupos es proponer problemas que requieran de la experiencia de todos.
- **Proveer al operador de notas completas**, que incluya las filminas utilizadas durante la capacitación, además de lecturas suplementarias, datos y lista de referencias.
- Asegúrese de que algunos operadores no cometan el error de creer que con un sólo curso de capacitación se convertirán en verdaderos expertos, pero si **motívelos** con la idea de que con la experiencia adquirida día con día y con actualización por medio de lecturas y nuevos cursos lo lograrán.

## **ARRANQUE Y OPERACIÓN**

Tratamiento de Aguas Residuales

---

### *Selección de los Instructores.*

La primera parte del programa de capacitación es la evaluación y selección de los instructores. Los instructores podrán ser operadores con experiencia previa, un ingeniero de procesos o proyectos, e incluso en algunas ocasiones un representante de los fabricantes de equipos. Se evaluará en un instructor la capacidad de comunicar claramente sus conocimientos a los oyentes.

### *Secciones del Manual de Operación y Mantenimiento cubiertas en el curso.*

**Descripción general.** En esta parte se describirán las condiciones de diseño y cambios químicos o físicos que ocurren durante el proceso. Bases de diseño que incluyen cargas de alimentación, especificaciones del influente y efluente, y condiciones en límites de batería. Flujos en corriente de proceso y estimación de insumos, requerimientos de servicios, dosificación de químicos y sus especificaciones. Esta sección además incluirá una explicación del diagrama de flujo de proceso y balance de masa.

**Control y condiciones de operación.** En esta sección se describirán las características de las reacciones químicas y biológicas involucradas, y variables de control del proceso, incluyendo operaciones y procesos unitarios de cada procesos de tratamiento.

**Equipo mayor.** Se discutirán los equipos más representativos de la planta, como por ejemplo: clarificadores, equipo de desinfección, bombas, sopladores, etc.

**Equipo de emergencia.** Válvulas de seguridad, discos de ruptura, al igual que fluidos asociados, dimensiones, localización, puntos de ajuste y puntos de descarga. Alarmas y circuitos de seguridad incluyendo sistemas de paro.

**Preparación para el arranque inicial.** Aquí se discutirán las fases de procedimientos preliminares y pruebas hidráulicas y de equipos.

**Arranque normal.** Se enlistarán fases de operación del sistema y procedimientos generales para la alimentación del agua residual cruda. Explicación de flujos y condiciones, además de situaciones de emergencia.

**Paro normal.** Aquí debe contener una descripción muy breve en condiciones de mantenimiento preventivo.

**Paros de emergencia.** Se discutirán tipos de problemas en condiciones de emergencia, fallas de energía eléctrica, condiciones de flujo anormal, fallas en el control e instrumentación e incendios.

*Uso del Simulador de Proceso.*

Se propone este implemento siempre y cuando se disponga de él. El simulador de proceso por computadora es una herramienta de gran ayuda, ya que proporciona un medio excelente para conocer la dinámica del control del proceso y permite variar condiciones sin riesgo alguno. Con el simulador, el personal de operación puede prever diversas situaciones en planta. El simulador debe estar perfectamente adaptado al proceso existente en la planta, ya que de no ser así puede conducir a contradicciones en las formas de operación.

Bajo esta misma modalidad, si no se cuenta con el simulador, una hoja de cálculo con el modelo podría ser de gran ayuda.

**4.2.2 Reconocimiento de las instalaciones.**

Es necesario combinar las sesiones de clase con recorridos en la planta para proporcionar una mayor comprensión del proceso. Cada uno de estos recorridos deberán tener un propósito específico. Por ejemplo, el día en que se discuta la sección de tratamiento preliminar, debe inspeccionarse dicha sección. Cada sección de estudio debe ser tan pequeña como sea posible, de manera que los operadores puedan aprenderla en detalle.

**4.2.3 Visita a una planta similar.**

La visita a alguna planta similar proporciona al personal de operación una visión más completa del proceso. Es importante que esta planta a visitar sea del mismo tipo o al menos contenga algunas formas similares de operación. Es decir, es importante observar el comportamiento en plantas de gran caudal ya que bajo esta modalidad estaría trabajando la planta y a su vez que sea de tipo biológico prefiriendo ser aerobio y sería mucho mejor contar con un proceso de lodos activados. Esta visita debe realizarse al terminar el curso para finalizar y completar el entrenamiento. Aunque el final real del entrenamiento se realiza después de las pruebas hidrostáticas de instalaciones y equipos, pues es ahí donde adquiere un contacto real con los equipos, cuando éstos contienen un fluido de prueba y simulan al proceso verdadero.

**4.3 PROCEDIMIENTOS PRELIMINARES.**

Antes de proceder a arrancar la planta, es necesario llevar a cabo una serie de trabajos preliminares para evitar demoras o impedimentos en el arranque inicial, además de verificar qué cargas de contaminantes y caudales serán los adecuados, y de disponer de

## **ARRANQUE Y OPERACIÓN**

### **Tratamiento de Aguas Residuales**

---

los servicios auxiliares necesarios. Por lo anterior, se debe empezar a trabajar de acuerdo al alcance que se desee respecto a los criterios de diseño generales descritos anteriormente en la tabla 2.3 (condiciones de diseño).

Estos trabajos preliminares se refieren principalmente a inspección, limpieza, prueba de equipo, tuberías y drenajes. En esta fase aún no es suministrada agua residual y/o insumos auxiliares. Si es posible, dentro de este periodo el operador junto con el personal de construcción revisarán la infraestructura para complementar conocimientos.

Es aconsejable para el operador establecer en un gráfico el progreso o demora de estos procedimientos, siendo también importante asegurarse de que todos los detalles sobre el diagrama de flujo de ingeniería han sido incluidos en el programa. En seguida se proporciona una lista de procedimientos recomendados.

Los operadores deberán dominar los siguientes rubros:

- a) Limpieza y prueba de líneas de servicios auxiliares.
- b) Revisión y limpieza del equipo y tuberías de proceso
- c) Tubería fuera de los límites de la planta.
- d) Inspección y prueba del equipo eléctrico.
- e) Comprobación de circuitos de control e instrumentación.
- f) Pruebas de bombas y equipos rotatorios.
- g) Prueba de los sopladores.
- h) Prueba y revisión de los aireadores mecánicos.
- i) Prueba y revisión del equipamiento de los sedimentadores.
- j) Prueba y revisión del equipamiento del área de desinfección.
- k) Prueba y revisión del equipamiento del tanque de retención.
- l) Revisión de los lechos de secado.

#### **4.3.1 Limpieza y prueba de líneas de servicios auxiliares.**

Estas pruebas se llevarán a cabo seleccionando grupos interconectados de tuberías, que trabajen con la misma presión de diseño, de acuerdo a la siguiente secuencia:

1. Es indispensable lavar cuidadosamente las líneas de servicios auxiliares con agua tratada (no potable) y agua potable para eliminar residuos tales como soldaduras, estopas, cables, tuercas y otros materiales extraños. Por lo que se recomienda abrir los extremos de las tuberías para evitar obstrucciones.
2. Para el caso del drenaje, verificar que no haya obstrucciones y desalojar bien los registros, tanto en la red de drenaje pluvial como en la red de drenaje de lodos. Verificar que los sellos en los registros estén listos para operar satisfactoriamente, confirmando que no haya obstrucciones.
3. Como en toda limpieza de tubería, debe retirarse previamente los cedazos, elementos de medición y control y las válvulas de seguridad.

4. Una vez que las tuberías se encuentren limpias, colocar nuevamente los elementos de medición que se hayan retirado y proceder a efectuar las pruebas hidrostáticas de las tuberías de acuerdo a las condiciones de diseño. Se debe tener especial cuidado de que no se instalen los elementos que no pueden soportar la prueba.
5. Aumentar la presión del agua en las tuberías hasta obtener la presión de prueba. Conservando esta presión se verifican las posibles fugas. Comprobar que no se pierda la lectura manométrica y usar jabonadura en la detección de fugas.
6. Al vaciar las tuberías después de la prueba, cuidar que estén abiertas las válvulas de drenado para que el agua se desaloje fácilmente.

#### *Sistemas contra incendio*

Verificar la existencia y buen funcionamiento de los sistemas contra incendio instalados cerca de los equipo electromecánicos, cuarto de control del proceso, del edificio administrativo, instalaciones eléctricas, laboratorio y áreas de desinfección (almacén y sección de dosificación).

#### **4.3.2 Revisión y limpieza de equipo y tuberías de proceso.**

Los equipos que conforman la planta equipos que han sido probados hidrostáticamente en los talleres de construcción de fabricante y equipos construidos en campo. Por lo tanto, los trabajos a realizar en este punto sólo serán para estos últimos. Se revisará que no se encuentren residuos dentro de los recipientes, tales como varillas de soldadura, pernos, guantes, estopa, pedazos de madera, cables y otros materiales de construcción. Los restos pequeños como tiras cortas de estopa, tuercas, etc. serán eliminados mediante el lavado con agua que se realizará junto con las pruebas hidrostáticas. Esta limpieza debe efectuarse a las zanjas de oxidación, al equipamiento de sedimentación, la zona de desinfección, al tanque de retención de lodos, cajas de distribución, tuberías de proceso y a las secciones de los lechos de secado que aplique.

La revisión a tuberías de la línea principal se realiza seleccionando grupos interconectados, tanto para aquellas que trabajan a gravedad como para las líneas a presión. La tubería involucra las conducciones siguientes:

- I. Del cárcamo a la obra de cabeza.
- II. de la caja de distribución a las zanjas de oxidación.
- III. línea de conducción de zanjas a clarificadores.
- IV. del clarificador a los tanques de contacto con cloro.
- V. de recirculación.
- VI. purga
- VII. Sección de desinfección.

## **ARRANQUE Y OPERACIÓN**

### **Tratamiento de Aguas Residuales**

---

Es indispensable que antes de proceder al lavado de las estructuras se efectúe una revisión ocular en el interior con el fin de comprobar su estado y poder sacar residuos mayores que un lavado no pueda arrastrar.

Como parte de las pruebas hidrostáticas que se revisarán más adelante, ciertos empaques de bridas pueden resultar dañadas. Al final conviene revisar el buen estado de estas piezas. Una vez que la tubería y estructuras hayan quedado limpios, revisar cuidadosamente, usando herramientas si es necesario, que los registros, bridas, válvulas, etc., que se hayan quitado estén muy bien instalados y cerrados para evitar fugas posteriores.

#### **4.3.3 Tuberías fuera de los límites de la planta.**

Todas las tuberías fuera del límite de la planta de tratamiento, deben verificarse con cuidado y asegurarse de que puedan dar entrada a las corrientes de aguas negras y de los servicios de agua potable. Utilizar los planos de montaje de estas tuberías para su inspección. Para el caso de agua potable, confirmar previamente con el departamento encargado de enviar este servicio, la posibilidad y la disponibilidad para hacerlo en el momento de iniciar el bombeo.

#### **4.3.4 Inspección y prueba del equipo eléctrico.**

1. Leer los instructivos de los fabricantes de los diferentes equipos (instrumentos de control, transformadores, bombas, sopladores, etc.) y realizar las pruebas recomendadas por los mismos.
2. Abrir todos los circuitos.
3. Verificar que todas las barras de los tableros estén libres de materiales extraños.
4. Verificar la continuidad y resistencia del sistema de tierras, asegurándose que todo el equipo electromecánico y estructuras estén conectados al sistema de tierras de acuerdo a los planos y especificaciones.
5. Verificar que todos los dispositivos de protección estén debidamente ajustados y calibrados.
6. Verificar que la tensión de la alimentación sea la adecuada.
7. Cerrar el interruptor principal.
8. Verificar que todas las cubiertas de los equipos y accesorios a prueba de explosión estén cerradas y aseguradas (si es que existen).
9. Cerrar el primer alimentador del circuito, luego el segundo y así sucesivamente, según lo indicado en el diagrama unifilar.
10. Cerrar el primer circuito del centro de control de motores y entonces cerrar cada circuito del arrancador de motores.
11. Verificar que todos los circuitos de control funcionen correctamente.
12. Verificar la rotación de los motores.

13. Verificar los accesorios de los motores y su lubricación, asegurando que las bombas y sus guardas estén correctamente instalados.

#### 4.3.5 Comprobación de circuitos de control e Instrumentos.

Antes de iniciar alguna operación en el sistema hay que revisar de acuerdo a las indicaciones del manual de fabricante, que todos los instrumentos estén instalados, calibrados y ajustados adecuadamente. Por ejemplo, en el caso de las zanjas oxidación, debe verificarse en los sistema de aireación que el nivel de las paletas sea el adecuado acorde a la instrumentación en los vertederos. La tabla 4.1 muestra la instrumentación con la que cuenta la planta.

**Tabla 4.1**  
**Instrumentación principal de la planta.**

Etapa	Control e Instrumentación	Acción
Tratamiento preliminar	Cronómetros (limers) y Sensores de nivel (presión)	Regular la frecuencia de operación de las rejillas de barras mecánicas.
	Válvulas solenoides	Suministrar por periodos agua no potable a las tolvas de arena, para iniciar su ciclo de bombeo.
	Luces indicadoras	Indican la existencia de una falla de un motor o pérdida de potencia.
	Indicador para energía	Situado en el edificio eléctrico para dar aviso por pérdida de energía en la obra de cabeza
	Indicador para motores	Ubicado en el edificio de administración, avisa si un motor de la obra de cabeza está fallando.
Tratamiento secundario	Controladores de nivel	Regulan el nivel de agua residual alrededor del aireador.
	Medidores de oxígeno disuelto	Miden el oxígeno disuelto en la zanjas de oxidación.
	Sensores de nivel	Ubicados en las vertederas, para determinar su altura.
	Vertederas automatizados	Regulan la transferencia de oxígeno de acuerdo a la sumergencia del aireador.
Sistema de Cloración	Indicador de fallas	Localizadas en las zanjas de oxidación.
	Controladores de temperatura	Se utilizan en los evaporadores para monitorear la temperatura del baño.
	Medidor de presión	Localizados en los cloradores para la medición de la presión del gas cloro.
	Rotámetro	Provisto para el clorador. Mide el gasto de alimentación del gas cloro dentro de los inyectores.
	Control automática para la dosificación de cloro	No se ha especificada.
	Sistema de detección de fugas	Indicador que se acciona en caso de detectar una fuga de cloro, en las líneas y/o equipos.
Tratamiento de Lodo	Sistema de protección catódica	Provisto para la protección de los evaporadores.
	Indicador de falla de energía	Señala una pérdida de energía en las instalaciones.
	Sensores de nivel	Indican un alta nivel de lodo en una de las celdas.
	Indicador por alto nivel	Ubicado en el edificio eléctrica por alto nivel de lodo en alguna de las celdas.
	Indicador de fallas	Indica una falla en uno de los tres compresores o una de las tres bombas de purga.

## **ARRANQUE Y OPERACIÓN**

### **Tratamiento de Aguas Residuales**

---

1. Verificar que los instrumentos de control estén instalados adecuadamente. Verificar su calibración de acuerdo a las recomendaciones de fabricante.
2. Revisar los instrumentos de control observando que estén libre de materiales extraños, aceite o agua.
3. Revisar que todos los transmisores estén debidamente interconectados con los sistemas controladores.
4. Revisar el sistema de suministro eléctrico a todos los sistemas de control local.
5. Revisar la acción de las válvulas solenoides.
6. Revisar que no existan fugas en la interconexión de instrumentación.
7. Revisar que las alarmas operen de acuerdo a la señal correspondiente.
8. En general, verificar que todos los instrumentos en los CCM's y en campo, estén bien instalados y calibrados. Ajustar de acuerdo a la operación deseada.
9. Colocar los implementos correspondientes en todos los instrumentos de medición.

#### **4.3.6 Prueba de bombas y equipos rotatorios.**

1. Seguir las instrucciones de los manuales de operación y mantenimiento de los fabricantes para todas las bombas, sopladores y demás equipos rotatorios.
2. Revisar que las instalaciones sean correctas. Verificar los soportes y las expansiones que protegen a las bombas. Evite tensiones en las bridas.
3. Revisar que las conexiones del sello hidráulico a las cajas de baleros, estén instaladas correctamente.
4. Verificar que la instalación del sistema de lubricación sea correcta, incluyendo los accesorios: filtros, orificios de restricción, bomba de relevo, etc.
5. Verificar que los sellos o empaques estén instalados de acuerdo a las especificaciones. Comprobar también que las válvulas de drenado y venteo estén conectadas.
6. Verificar que los cedazos se encuentren instalados en la succión de las bombas.
7. Verificar que la bomba, el motor y los coples, tengan el lubricante recomendado por el proveedor o similar.
8. Verificar tanto la bomba como el motor, giren libremente al moverlos con la mano.
9. Para arrancar las bombas realizar los siguientes pasos:
  - 9.a Verificar el sello hidráulico.
  - 9.b Abrir lentamente las válvulas de succión y conservar cerradas las válvulas de descarga, verificando que la bomba quede llena de líquido.
  - 9.c Arrancar la bomba e inmediatamente abrir la válvula de descarga a flujo mínimo.
  - 9.d En cuanto alcance su velocidad y se registre presión en el manómetro, continuar abriendo lentamente la válvula de descarga, conservando la presión hasta abrirla totalmente.

Debe recordarse que las bombas de purga de lodo son de desplazamiento positivo tipo cavidad progresiva, las cuales no pueden operar contra una válvula cerrada sin que la bomba se dañe. Para el caso de las bombas de arena que son de desplazamiento positivo de flujo en torsión y trabajo pesado (impulsor abierto e



inatascables), no es recomendable arrancarlas si antes no se ha introducido agua (tratada) en las tolvas de arena de la obra de cabeza.

10. Cuando la bomba esté operando, revisar lo siguiente:

10.a Determinar el amperaje del motor.

10.b Verificar la presión de descarga y confirmar que se tiene el flujo deseado.

10.c En caso de observar alguna condición anormal, como vibración, sobrecalentamiento, ruidos, etc., parar la bomba inmediatamente y reportarla para su revisión.

#### **4.3.7 Prueba de los sopladores.**

1. Seguir las indicaciones de los manuales de operación y mantenimiento de los fabricantes y actividades correspondientes a equipos rotatorios del punto anterior.
2. Revisar que la instalación y montaje sean correctos, de acuerdo a los planos de cimentación, revisando el alineamiento y nivelación de cada unidad.
3. Para lograr un funcionamiento satisfactorio se recomienda dar limpieza al filtro de aire teniendo presente que la humedad es el peor enemigo de las juntas y válvulas.
4. Todas las válvulas de seguridad y manómetros deben estar probados y mantenidos en buenas condiciones.
5. La presión normal es mayor de 8 psig, esta presión podrá variar dependiendo de las condiciones de servicio y de la viscosidad del aceite. Si la presión desciende el sistema de lubricación deberá ser revisado cuidadosamente (ver manual del fabricante).

Para proteger este equipo, los sopladores cuentan con los sistemas de protección y alarmas asociadas, por lo que se recomienda que se compruebe si el sistema de protección está en condiciones de servicio.

#### **4.3.8 Prueba y revisión de los aireadores mecánicos.**

1. Realizar las actividades de mantenimiento iniciales propuestas por fabricante (adición de aceites, lubricantes, etc.).
2. Ajustar los aireadores mecánicos de acuerdo a las recomendaciones de fabricante, para evitar cualquier oscilación de la flecha de impulsión y/o movimiento eventual de las monturas de los motores.
3. Aplicar para todos los aireadores una prueba inicial de encendido rápido, seguido por una corrida de "confirmación de operación". Esto permite confirmar la estabilidad de los aireadores sin daños, si es que éste presenta inestabilidad.
4. Si no presentan inestabilidad, se puede operar el aireador por un lapso corto de tiempo para confirmar su buen funcionamiento.

## **ARRANQUE Y OPERACIÓN**

### **Tratamiento de Aguas Residuales**

---

#### **4.3.9 Prueba y revisión del equipamiento de los sedimentadores.**

1. Quite cualquier basura que haya caído al fondo del clarificador.
2. Revise que las barras de rastras se encuentren firmes y seguras, sin objetos metidos debajo de ellas.
3. Verifique que toda la longitud del canal del vertedero del clarificador y tubería del effluente esté libre de obstrucciones.
4. Probar el mecanismo de transmisión de la tornamesa del clarificador, inicialmente accionándolo por unos cuantos segundos para confirmar su ajuste con el centro de la flecha, así como también la adecuada rotación del colector.
5. Ajustar el mecanismo de transmisión, activando nuevamente el equipo permitiendo que las rastras completen dos revoluciones.
6. Verificar que el movimiento de las rastras sea uniforme y controlado sin forzamiento del equipo y sin tirones, permitiéndose sólo vibraciones mínimas y un nivel de ruido bajo.
7. Verificar que la tolva de natas se encuentre libre de cualquier material extraño.

#### **4.3.10 Prueba y revisión del equipamiento del área de desinfección.**

Estas pruebas deben realizarse durante las pruebas hidrostáticas y antes del arranque definitivo, como se muestra en la sección 4.5.2.4 (sistema de desinfección). Es importante que estas actividades se lleven a cabo junto con un representante técnico del fabricante.

#### **4.3.11 Prueba y revisión del equipamiento del tanque de retención.**

1. Inspeccionar que la tubería de aire y los difusores estén libres de cualquier desperfecto y/o obstrucción; limpiar donde sea requerido.
2. Inspeccionar las válvulas del influente que están localizadas cerca de la pared sur de cada celda, liberar de basura o material de construcción.
3. Verificar que se hayan realizado las actividades de las secciones 4.3.3, 4.3.5, 4.3.6 y 4.3.7.
4. Comprobar la integridad de la tubería de suministro de aire, verificar tanto externa e internamente al tanque de retención para prevenir una fuga.

#### **4.3.12 Revisión de los lechos de secado.**

1. Verificar la operación de las compuertas que controlan el flujo de lodo en los lechos. Incluir en esta revisión la instalación de la compuerta de cierre (tablón de madera) a la entrada de la rampa del lecho.

2. Cerciorarse si el drenaje subterráneo se encuentra instalado, libre de obstrucciones y en condiciones de operación.
3. Verificar que la profundidad y cantidad del medio filtrante sea la adecuada, de acuerdo a lo siguiente (del fondo hacia la superficie, ver anexos):
  - 2.a. Tubería perforada de 0.152 m de diámetro.
  - 2.b. Cama mayor de 75 mm de espesor con grava de 20 mm.
  - 2.c. Cama de 75 mm de espesor con grava de 6-12 mm.
  - 2.d. Cama de 75 mm de espesor con grava de 3-6 mm.
  - 2.e. Cama de 75 mm de espesor con arena de 1.5-3 mm.
  - 2.f. Cama de 200 mm de espesor con tamaño de partícula no. 200 (0.6 a 1.0 mm).
3. Afloje las camas de arena que se encuentren compactadas.
4. Después de aflojar la arena compactada, utilice un apisonador para uniformizar la superficie.

#### 4.4 PRUEBAS HIDROSTÁTICAS.

En esta fase el operador tomará las instalaciones en un estado de terminación mecánico y las llevará a uno de operación donde los equipos y sistemas trabajen satisfactoriamente en conjunto. Es decir, hasta esta parte se probó, verificó y corrigió tuberías, circuitos eléctricos, instrumentación e instalaciones de equipo mayor de proceso, por lo que la siguiente etapa consiste en probar y rectificar en presencia de agua la hermeticidad de las unidades principales de proceso individuales y posteriormente en conjunto con sus accesorios, para finalmente terminar con una prueba en serie.

Las actividades a realizar son las mismas que se encontrarán en la sección 4.5.2, pero con la diferencia del fluido a utilizar (agua tomada del Río Bravo o agua residual cruda) y sin el paro continuo por las constantes fugas.

Los ingenieros encargados del arranque y operadores deben estar alertas para localizar los errores de diseño y construcción que no fueron observados durante las primeras inspecciones ni cuando se efectuaron las pruebas de los equipos.

Se debe probar la estabilidad e integridad de las estructuras, tales como cajas de distribución, tanques de contacto y retención, así como el reactor y sedimentador. Estos últimos merecen una especial atención para asegurar que no existan fugas en sus paredes. Esta prueba se recomienda hacerla hasta el nivel máximo de operación de las estructuras y con agua extraída del río Bravo. Si alguno de los sistemas presentase fuga debe corregirse de inmediato. Se recomienda que se lleve a cabo con agua tomada del río por los problemas que se pudieran presentar con el uso de agua negra; por ejemplo,

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

---

es más seguro para el personal inspeccionar, reparar y/o cambiar un elemento que no se ha expuesto al agua residual cruda.

Otra función de esta fase es permitirle a los operadores familiarizarse totalmente con la operación de la planta, antes de introducir en ella agua residual cruda o productos químicos. Por ello, la simulación debe efectuarse a un paso moderado, programado por varios días, de manera que el personal de cada turno tenga oportunidad de tomar parte en dicha prueba.

Al final de esta prueba, el agua debe drenarse, y el equipo secado y purgado. Dependiendo del proceso, tanto la purga como el secado pueden no ser necesarios.

Las estructuras en que se manejan sólidos también deben probarse. Si los sólidos son la materia prima a la entrada, se pueden efectuar arreglos temporales para las operaciones cíclicas. Si el producto es sólido se puede adquirir alguna cantidad de él, para simular operaciones con el equipo que maneja el producto.

El control se realiza por medio de la prueba de una sección, es decir de una operación o proceso unitario. Por medio de una lista se verificará que el sistema se encuentre listo, tanto por secciones como globalmente:

- A. Estación de bombeo**
  - Cárcamo de bombeo ✓
  - Tubería de conducción ✓
  
- B. Tratamiento preliminar (obras de cabeza)**
  - Canales de la obra de cabeza ✓
  - Caja de distribución de flujo ✓
  - Sección del sistema de remoción de arena ✓
  - Tubería en general ✓
  - Prueba en serie ✓
  
- C. Tratamiento secundario**
  - Zanjas de oxidación ✓
  - Caja de distribución de flujo ✓
  - Clarificadores secundarios ✓
  - Tubería en general ✓
  - Prueba en serie ✓
  
- D. Sección de desinfección y medición**
  - Tanques de contacto con cloro ✓
  - Cámara de inyección ✓
  - Canal Parshall ✓
  - Sistema de aireación en cascada ✓
  - Prueba en serie ✓

**E. Tratamiento de lodos**

Línea de recirculación	✓
Línea de purga	✓
Tanque de retención	✓
Lechos de secados	✓
Prueba en serie	✓

Las actividades a realizar para estas pruebas son las mismas que se verán en el protocolo de arranque (sección 4.5.2), por lo que debe ejecutarse de acuerdo a ellas. Las pruebas hidrostáticas (hermeticidad de los equipos e instalaciones) no deberán realizarse por separado, sino que se probará totalmente cada sección y posteriormente se verificará la planta en su totalidad.

En la simulación deben incluirse las pruebas de los sistemas de control e Instrumentación para comprobar su adecuada operación y nuevamente ajustar donde sea requerido.

**4.5 ARRANQUE.**

Finalmente el arranque definitivo comienza con la introducción del agua residual cruda y cuando todas las actividades anteriores han sido completadas (procedimientos preliminares y pruebas hidrostáticas).

Para cualquier proyecto de esta índole, siempre es importante haber terminado el protocolo y programa de arranque antes de impartir los cursos de capacitación, para que puedan ser utilizados en dichas sesiones.

Las actividades a programar deben realizarse cuidadosamente para evitar demoras e involucrar de alguna forma a los ingenieros de arranque para comprometer sus tiempos de respuesta.

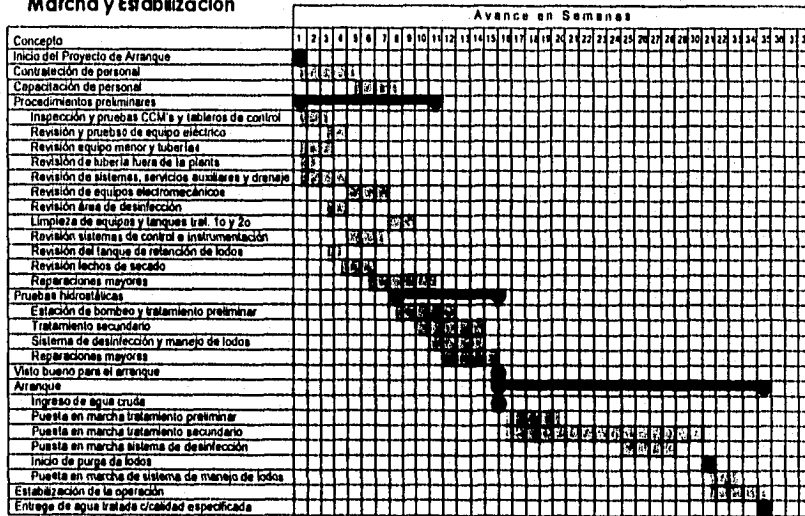
**4.5.1 Programa de Arranque.**

De acuerdo a las actividades especificadas en los procedimientos preliminares, pruebas hidráulicas y del protocolo de arranque, se propone el siguiente programa de arranque:

# ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

## Programa de Puesta en Marcha y Estabilización



<sup>1</sup> Incluye los sistemas contra incendio (extinguidores, lomas, etc.).  
<sup>2</sup> Incluye equipamiento tanto del tanque de retención y de los sedimentadores.

Figura 4.2 Programa de puesta en marcha y estabilización.

### 4.5.2. Protocolo de Arranque.

Para esta parte, la utilización del término de prearranque manifiesta las actividades que en su mayoría fueron realizadas con anterioridad, tanto en los procedimientos preliminares y las pruebas hidrostáticas, por lo que dentro de esta sección sólo se comprobará que hayan sido realizadas adecuadamente y para aquellas donde no se operó adecuadamente, deben realizarse nuevamente.

Las actividades de arranque servirán de igual forma cuando se requiera nuevamente poner en marcha un equipo que haya quedado fuera de servicio por mantenimiento.

#### 4.5.2.1 Estación de bombeo.

La estación de bombeo consiste de dos cárcamos separados equipados cada uno con tres bombas sumergibles de 684 l/s, con motores de 281 hp (figura 4.3). Bajo condiciones de operación normal, estos equipos bombearán a la planta de tratamiento 1,360 l/s. Durante el arranque debe cerciorarse de que pueda utilizarse el polipasto, que servirá

tanto para sacar las canastillas que retienen el material voluminoso a la entrada de los cárcamos como para cuando se requiera de un mantenimiento, cambios alternos de operación o bien en caso de alguna falla en alguna de las bombas de uno de los cárcamos.

El arranque comenzará cuando el agua residual cruda llegue a uno de los cárcamos de bombeo, y de ahí los controladores de nivel iniciarán la operación de las bombas sumergibles. Las perillas de nivel, dependiendo del flujo, iniciarán y accionarán las bombas sumergibles a entrar en servicio de acuerdo a la secuencia de arranque preestablecida.

Así, según los datos del proyecto, la tabla 4.2 muestra los niveles recomendados para las maniobras de paro y arranque de bombas.

**Tabla 4.2**  
**Maniobras de paro y arranque de bombas**

	1ª bomba	2ª bomba	3ª bomba
Nivel de arranque (msnm)	103.95	104.20	104.35
Nivel de paro (msnm)	103.50	103.95	104.20

El flujo mínimo de 684 lps se desprende de la operación de un sólo equipo. Dicho flujo es propuesto como fase inicial para la inoculación de los lodos. Para cuando se requiera alcanzar el gasto medio de diseño del influente (1,360 lps), podrá ser bombeado con la operación de dos equipos de bombeo, pudiendo ser: un equipo por cárcamo (1,368 lps) o dos equipos en un sólo cárcamo de bombeo (1,342 lps). Para esto, no existe diferencia apreciable entre ambas formas de operación respecto a su eficiencia y potencias requeridas. Sin embargo, es recomendable que siempre se mantenga en funcionamiento los dos cárcamos, por lo que el gasto medio del influente deberá ser bombeado con la operación de un equipo por cárcamo. Para satisfacer el flujo pico de dos horas de diseño (3,600 lps) sólo podrá bombearse con la operación simultánea de las seis bombas en los dos cárcamos (3,792 lps).

Los gastos del influente analizados sólo corresponden a condiciones de diseño, por lo que en cualquier momento podrán presentarse gastos entre 0 y 3,792 lps. De aquí que resulte muy importante establecer criterios específicos para las maniobras de paro y arranque de bombas, mismos que deberán revisarse durante la operación del sistema.

Se recomienda programar periódicamente la alternancia de los equipos de bombeo de tal modo que, en un periodo de por ejemplo una semana, se conmute la secuencia de arranque de bombas según se muestra en la tabla 4.3.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

#### Procedimientos de Arranque General

El arranque comenzará cuando el agua negra cruda llega al cárcamo de bombeo y de ahí los medidores de nivel iniciarán la operación de las bombas sumergibles.

No. de Bombas	Gasto p/bomba (lps)	Eficiencia (%)	Potencia (hp)	Gasto p/cárcamo (lps)
1	684	78.8	275	684
2	671	78.3	274	1,342
3	632	78.5	270	1,896

Una vez que el agua entra a la planta de tratamiento, el primer paso es el tratamiento preliminar.

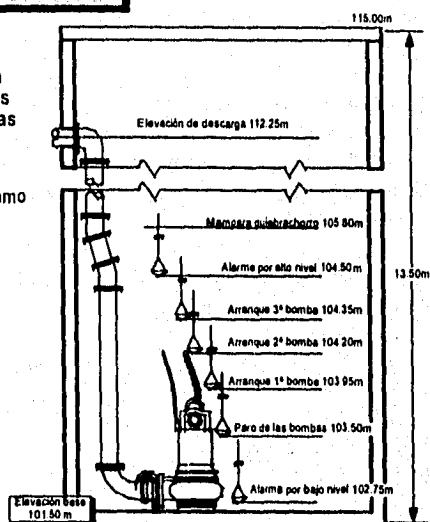


Figura 4.3 Arranque de la Estación de Bombeo Principal.

Tabla 4.3  
Programa de Secuencia del arranque de las bombas.

Secuencia	1ª bomba	2ª bomba	3ª bomba
A	I	II	III
B	III	I	II
C	II	III	I

#### Arranque

1. Antes de arrancar la bomba, mantenga los controles locales en OFF y verifique en el CCM se encuentre en ON.
2. Coloque los controles del panel local en posición de ON para:
  - 2.a. Principal
  - 2.b. Todas las bombas, y
  - 2.c. Transformador
3. Abra completamente la válvula de descarga de la bomba localizada en el cuarto superficial de las válvulas.
4. Abra completamente las conexiones del bypass fuera de la bomba (si las hay).
5. Posicione el interruptor selector H/O/A para Manual (H, HAND) y realice un monitoreo de la operación de la bomba por un corto tiempo.



6. Posicione el interruptor selector H/O/A en Automático (A, AUTO).
7. Repita los pasos de cinco a seis veces para todas las bombas.
8. Coloque el interruptor selector en la posición deseada (1/AUTO/2). La posición normal es AUTO.
9. Para el paro de una bomba sólo coloque el interruptor selector H/O/A en OFF, O.

#### 4.5.2.2 Tratamiento Preliminar.

Una vez iniciada la entrada de agua residual a la planta de tratamiento, el primer paso es el tratamiento preliminar, el cual se realiza en las obras de cabeza llevándose a cabo la remoción de material voluminoso del influente de agua residual cruda.

Para este tratamiento es necesario realizar las siguientes actividades preliminares:

##### **Equipo y accesorios auxiliares**

1. Verificar que el camión de carga se encuentre listo para recibir los materiales de descarga de la banda transportadora.
2. Revisar que todas las tuberías de influentes y efluentes, canales y cámaras en las obras de cabeza estén libres de obstrucciones.
3. Verificar que los tubos de flujo en la caja de distribución correspondientes a las zanjas de oxidación que no serán utilizados estén cerrados con sus tapones; y los tubos que si se utilizarán estén abiertos.

##### **Sopladores de aire**

4. Inspeccionar que no haya obstrucción en la succión o descarga de los sopladores de aire.
5. Encender brevemente los sopladores de aire dos veces y revisar que operen uniformemente, sin vibraciones ni ruidos irregulares.
6. Si no se registró ninguna anomalía en el arranque rápido de los sopladores, entonces deben operarse por un período de prueba para asegurar un abastecimiento adecuado de aire.

##### **Rejillas de limpieza mecánica**

7. Observar que todas las compuertas corredizas tanto las que se encuentran antes y después de las rejillas de barras estén adecuadamente colocadas.
8. Las rejillas de limpieza mecánica deben ponerse en funcionamiento dos veces brevemente, constatando que los *peines* operen uniformemente, sin ruidos ni vibraciones.
9. Si no se observan irregularidades durante los arranques en las rejillas, entonces deben hacerse funcionar continuamente por dos ciclos.
10. Asumiendo que la operación de las rejillas durante el período de prueba es uniforme, los *timers* deben programarse por intervalos de 15 minutos.

##### **Rejilla de limpieza manual**

11. Realizar una inspección y confirmar que no existen obstrucciones al libre flujo a través de la rejilla y verificar que se encuentre disponible en sitio el rastrillo manual.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

### Tratamiento de Aguas Residuales

---

#### ***Banda transportadora***

12. Probar la banda transportadora mediante una puesta en marcha breve dos veces, verificando su funcionamiento.
13. Si las pruebas anteriores que se realizaron a la banda transportadora no se observaron irregularidades, debe operarse por un período de prueba para asegurar que funcione correctamente.

#### ***Desarenador***

14. Confirmar que las paletas que están sujetas a los mecanismos de impulsión puedan rotar libremente.
15. Poner en marcha dos veces brevemente los dos mecanismos de impulsión, revisando su correcta operación.
16. Si no se observan problemas, los mecanismos de impulsión deben dejarse funcionar por un período de prueba.

#### ***Bombas de arena***

17. Antes del arranque, deben programarse los *timers* que activan las válvulas solenoides y las bombas de arena por un intervalo de tiempo apropiado.
18. Confirmar la distribución de agua a las bombas de arena (temporalmente usar agua potable).

**Si todas las partes móviles y motores han funcionado satisfactoriamente durante las actividades de prearranque anteriores, el arranque con agua residual cruda debe hacerse en el orden mostrado abajo:**

- Notificar que se accione la estación de bombeo.
- Abrir las compuertas deslizantes programadas para permitir que el agua residual entre desde la estación de bombeo.
- Poner en funcionamiento las rejillas de barras.
- Poner en funcionamiento los mecanismos de impulsión de arena
- Poner en funcionamiento la banda transportadora
- Iniciar la operación de las bombas de arena

#### ***Recomendaciones:***

Las bombas de arena no deben operarse antes de que se introduzca agua potable (arranque inicial) o agua tratada (cuando se cuente con efluente).

Cada rejilla tiene capacidad de operar con el flujo de entrada, sin embargo en el arranque se abrirán los dos canales, esto debido a que durante el inicio de la operación es muy probable que se tenga que estar cambiando más frecuentemente los tiempos de operación de los *timers*, pues la cantidad de basuras y despojos que pudieran estar acumuladas en los colectores y que llegarían al inicio de la operación será mayor que cuando la planta tenga más tiempo operando. Mientras se adquiere experiencia en la operación de las rejillas mecánicas se propone un intervalo inicial de 15 minutos.

#### 4.5.2.3 Tratamiento secundario.

Los objetivos primordiales en esta fase son confirmar que todo el equipo mecánico esté funcionando adecuadamente y que el agua residual que entra a la unidad de oxidación presente las condiciones ideales para el desarrollo de lodos activados saludables

Para el arranque del tratamiento secundario es necesario realizar las siguientes actividades preliminares:

##### **CCM's**

1. Verificar que la energía eléctrica se encuentre disponible para todos los componentes del tratamiento secundario.

##### **Zanjas de oxidación**

2. Entradas, salidas y canales de cada zanja de oxidación deben inspeccionarse para localizar cualquier obstrucción.
3. Verificar que las líneas de drenaje estén cerradas apropiadamente en todos los componentes del tratamiento secundario.

##### **Aireadores mecánicos**

4. Verificar que todas las actividades de la sección 4.3.8 hayan sido realizadas:
  - Mantenimiento inicial.
  - Ajuste de aireadores.
  - Prueba de encendido breve.

##### **Vertederos ajustables**

5. Revisar cada unidad para verificar que el vertedero pueda ser movido a cualquier punto entre el límite superior e inferior. No debe percibirse ninguna dificultad en el movimiento de los vertederos.

##### **Caja de distribución de flujo**

6. Inspeccionar la estructura, incluyendo las compuertas deslizables, para asegurarse de que esté libre de cualquier basura u obstrucción.
7. Abrir las compuertas deslizantes correspondientes, para permitir la distribución de flujo al sedimentador.

##### **Clarificador secundario**

8. Verificar la existencia de cualquier basura que haya caído al fondo del clarificador.
9. Revisar la rastra para asegurar que las estructuras de barras son firmes y seguras y que no hay objetos metidos debajo de ella.
10. Examinar la longitud entera del canal del vertedero del efluente y que la tubería del efluente no tenga obstrucciones.

##### **Colector de lodos del clarificador**

11. Verificar que todas las actividades de la sección 4.3.9 hayan sido realizadas:
  - Ajuste del mecanismo de la tornamesa y centro de la flecha.
  - Pruebas del equipo verificando el movimiento de las rastras.

##### **Colector de natas**

12. Verificar el método de disposición de los residuos, ya que la tolva de natas cuentan con dos tuberías de drenaje: una de ellas es dirigida a la estación de bombeo de agua

## **ARRANQUE Y OPERACIÓN**

Tratamiento de Aguas Residuales

---

residual cruda, mientras que la otra envía los residuos a un contenedor que se colocará debajo de la tolva de natas.

13. Confirmado el método de disposición configurar las válvulas correspondientes.

**Comprobado que todas las partes móviles y motores funcionan adecuadamente, el arranque será de la siguiente manera:**

### ***Zanjas de oxidación***

- Ya que el agua residual haya sido introducida a las zanjas programadas (que pudieran ser todas), verifique la distribución. Es preferente seleccionar tres tanques para lograr un llenado parcial ya que con esto se logra la sobreoxidación de la biomasa para promover un crecimiento bacteriano e incrementar lo más rápido la población.
- Cuando las paletas de los aireadores mecánicos comiencen a sumergirse en el agua residual, entonces deben ser accionados los motores de los aireadores.
- Evitar la formación de gran cantidad de espumas con la operación intermitente de los aireadores (debido a la falta de biomasa al inicio). Es importante no detener el suministro de oxígeno por largos periodos (ver capítulo 3), ya que la inyección de aire es crítica. Es importante mencionar que el control de la aireación no deberá basarse en la formación de espuma, sino que de acuerdo con los análisis durante el arranque (sección 4.5.3), se determinará la tasa de transferencia de oxígeno requerida, como se ha visto en el capítulo 3. También se recomienda la aireación intermitente debido al ahorro de energía. Esta operación se irá haciendo continua según convenga el control del proceso biológico.
- Eventualmente, el agua residual comenzará a ser descargada en los vertederos hacia los clarificadores secundarios.
- Ya que el primer reactor haya alcanzado el nivel, se desviará el flujo a otro de los reactores y se aireará según su programa diario y se procederá de igual forma para los reactores faltantes.

### ***Clarificador Secundario***

- Verificar que la distribución de flujo del agua residual sea uniforme y suave.
- Cuando el agua comience a cubrir las rastras, activar el motor del mecanismo de transmisión para asegurar que los sólidos que entran en el clarificador se depositen en el fondo y sean removidos hacia el centro.

### ***Recomendaciones:***

Los reactores (zanjas de oxidación) se consideran arrancados cuando los parámetros de control (F/M,  $0_c$ , SSLM, OD y IVL) sean los de diseño o bien aquellos que cumplan con la calidad del efluente especificado en proyecto.

La inyección suficiente de aire es tan crítica como el flujo del influente de agua residual. Por ninguna circunstancia debe detenerse el suministro de oxígeno a los lodos por más de 6 hr; de ser así, los microorganismos contenidos en el reactor morirán teniendo como

consecuencia la pérdida completa del proceso. Para evitar esto, se recomienda monitorear la concentración de OD cada 2 hrs para detectar a tiempo una deficiencia de éste. Bajo este mismo rubro, es importante comparar que el sistema de aireación suministre oxígeno dentro del rango especificado por proveedor, el cual debe estar aproximadamente entre 2 - 4 lbO<sub>2</sub>/hp-h (1.20 a 2.4 kgO<sub>2</sub>/kw-h) para aireadores comerciales. Otra situación importante es la altura de los vertederos mencionados en el capítulo 3 (sección 3.3.1, tabla 3.10).

Hasta que el proceso alcance su estabilidad, el OD debe mantenerse aproximadamente en 2 mg/l. Cuando se alcance una concentración adecuada de SSLM se puede mantener la concentración de OD por debajo de 2.0 mg/l. En ningún momento la concentración de oxígeno debe ser menor de 0.5 mg/l ni mayor de 4.0 mg/l, ya que esta última opción repercutiría en los costos de operación y podría generar flotación de lodos en los clarificadores.

Para la propagación de lodos durante el proceso de arranque en un principio se propone alimentar con agua residual a un 50% del flujo de diseño (684lps) recirculando el 100% de los lodos generados, es decir no purgar lodos hasta alcanzar una concentración de SSLM de 3000 mg/l aproximadamente. El flujo de 684lps es obtenido por el arranque de sólo una bomba de uno de los cárcamos (ver figura 4.3). Bajo estas condiciones será necesario operar con tres zanjas de oxidación un volumen para los tres tanques de 54172.8 m<sup>3</sup>, que si se operaran en continuo tendrían un tiempo de retención hidráulico de 22 horas. El incremento del flujo se realizará conforme se aumente la concentración de los SSLM y se dé una remoción de al menos del 60% de DQO en el efluente.

Si se propone que la puesta en marcha de la planta se realice como si ésta fuera un sistema en continuo de lodos activados puede tenerse dificultad para alcanzar una concentración de 4000-6000 mg/l de SSLM prontamente, dependiendo de las características del efluente.

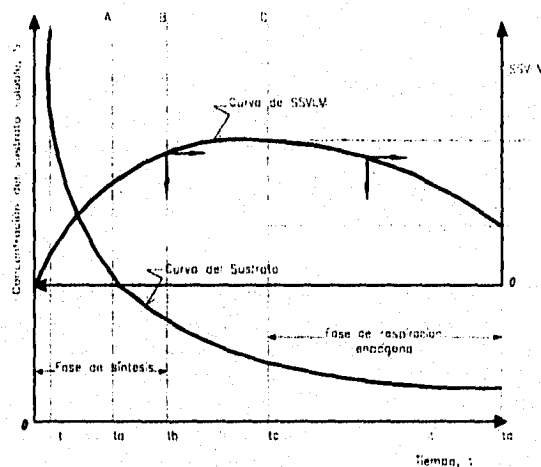
Para alcanzar una estabilidad lo más rápido posible, se propone que la planta sea arrancada como un sistema intermitente (*batch*). Es decir, en la figura 4.4 se puede observar que la concentración de SSVLM aumenta conforme disminuye el sustrato; con esto puede alcanzarse un valor de la concentración de SSVLM en menos tiempo que en un sistema en continuo, siempre y cuando se mantenga alrededor del tiempo *t<sub>c</sub>* de la gráfica 4.4 (Ramalho, 1982). Debido a que la bimoasa a partir de ese tiempo disminuye por estar en la fase endógena. Esta forma de arranque se logrará siempre y cuando se cuente con un sistema de desvío del influente antes de la llegada a los cárcamos de bombeo y así poder parar la estación de bombeo temporalmente o bien se utiliza una zanja de oxidación como medio de desvío.

Otra situación de importancia en el arranque es que antes de la carga de sustrato por medio de un nuevo lote, se pongan fuera de servicio los aireadores por un corto tiempo (de 1 a 2 horas) para que la biomasa formada se deposite en el fondo de la zanja y

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

posteriormente ingresar el agua bruta y verter el agua tratada. En esta etapa debe evitarse que el lodo pase a ser anaerobio. Para evitar esto, debe monitorearse el oxígeno disuelto para determinar la tasa de utilización de oxígeno (OUR) por parte de los microorganismos. Para esto también se propone dentro del análisis de arranque una simulación de la tasa de consumo de oxígeno.



- A Proceso de lodos a alta carga
- B Proceso de lodos activados convencional
- C Proceso de aireación extendida
- D No existe remoción de sustrato

**Figura 4.4 Comportamiento de la Concentración del Sustrato y de los SSVLM en un Reactor Intermitente.**

La operación en forma intermitente será detenida cuando se alcance una concentración de 1500 mg/l de SSVLM para operar en forma convencional. Después de alcanzar la concentración de biomasa deseada en el reactor, se varían gradualmente las condiciones de operación hacia las características operativas de las zanjas de oxidación.

Cuando se haya alcanzado un estabilidad, los sólidos deben sedimentarse rápidamente, ser de color café oscuro y debe de existir una diferencia marcada en la apariencia del flóculo respecto al sobrenadante en el cual flota, además los lodos deben tener un olor a tierra húmeda lo cual indica una buena operación del sistema.

### 4.5.2.4 Sistema de Desinfección.

Para el sistema de desinfección es necesario realizar actividades preliminares, para ello es importante poner el evaporador en funcionamiento 20 minutos antes para su precalentamiento. Las labores preliminares son las siguientes:

**Tubería y accesorios**

1. Líneas de agua. Inspeccione tubería, "codos", válvulas y "Tes".
2. Líneas de cloración. Inspeccione tubería, "codos", válvulas y "Tes".
3. Líneas de Control automático. Purgar las líneas de posible humedad. En sistemas a vacío o neumático, purgar todo el aire de los sistemas de presión diferencial.
4. Líneas eléctricas. Asegúrese que no se encuentren obstruidas en las terminales para cable.
5. Líneas nuevas. Usar cinta de teflón sobre las juntas.

**Suministro de agua tratada**

6. Verificar que las bombas funcionen correctamente de acuerdo a las recomendaciones de fabricante (presiones de operación y sin vibraciones, ni ruidos permitidos).
7. Verificar la tubería y accesorios a la succión de la bomba y de la descarga de ésta al eyector.
8. Realizar una prueba para observar que el sistema si suministra agua, mediante la apertura de la válvula correspondiente. Debe existir un "silbido", si no lo hay verifique corriente arriba de la línea.

**Evaporador**

9. Abrir la válvula que controla el flujo de agua potable desde su fuente hasta el evaporador.
10. Una vez que el agua ha entrado al evaporador, debe activarse el calentador eléctrico para incrementar la temperatura del agua hasta la temperatura de operación prescrita en el manual de 71 °C (160 °F).
11. Una vez alcanzada la temperatura prescrita, debe abrirse la válvula sobre el evaporador para permitir que el gas cloro fluya hacia el clorador.

**Existencia de fugas de cloro**

12. Verificar visualmente si existe algún deterioro en la tubería, válvulas, codos y/o conexiones en las líneas de cloro.
13. Si no se detecta alguna fuga por deterioro, proceder a verificar el sistema de vacío. Observar si en el calibrador de vacío del clorador se indica una lectura, si no, desconectar la línea de vacío que va al eyector y posicione su pulgar sobre la conexión del eyector para que físicamente se observe donde hay una succión.
14. Verificar que todas las válvulas entre el clorador y los cilindros estén abiertas excluyendo la válvula inferior y superior (salida de cloro líquido y gaseoso respectivamente). Esta verificación asegurará purgar el sistema en caso de fugas.
15. Girar el control de dosificación (V-notch) del clorador a cualquier posición de apertura.
16. Abrir la válvula inferior del cilindro para permitir el paso de cloro líquido. Si existe una fuga en el sistema, la válvula inferior debe cerrarse inmediatamente. Si al girar la válvula se encuentra apretada, bastará con un golpe rápido con la mano en la parte giratoria.
17. Girar el control de dosificación (V-notch) en cero del clorador y observar la presión de cloro en el calibrador.
18. Verificación de fugas de cloro. Aplicar hidróxido de amonio debajo de todas las juntas y tubería en las líneas del cloro, si aparece una nube blanca indicará un fuga de cloro.

## ARRANQUE Y OPERACIÓN

Tratamiento de Aguas Residuales

---

19. Si no existe ninguna fuga de cloro pasar al paso 22. De lo contrario realizar los siguientes pasos:
    - 19.a. Cerrar la válvula del cilindro de cloro.
    - 19.b. Desactivar el calentador del evaporador.
    - 19.c. Mantener abierta la válvula del evaporador.
    - 19.d. Girar el control de dosificación al máximo para purgar.
    - 19.e. Salir del cuarto de cloro y entrar al mismo hasta que la presión en el indicador marque cero y el gas haya escapado a la atmósfera.
  20. Cuando el calibrador este en cero, proceder con el mantenimiento correctivo a la(s) fuga(s) localizadas.
  21. Después de haber reparado la fuga repetir los pasos del 9 al 18.
  22. Llevar el clorador a su punto de ajuste de dosificación.
  23. Si el sistema es manual, entonces la verificación esta completa. Si el sistema es automático, verificar los componentes de control para un apropiado funcionamiento de acuerdo a las especificaciones de fabricante.
- Tanque de contacto con cloro y cámara de inyección**
24. Verificar que no se encuentre ningún desecho que haya quedado como resto de la construcción, mantenimiento o actividades de rehabilitación en los tanques de contacto.
  25. Inspeccionar que no haya obstrucción en los tubos de aplicación de la solución de cloro con agua tratada.
  26. El agua de la cámara de inyección de cloro debe ser removida con una bomba portátil ya que ésta no está equipada con una línea de evacuación.

**Si todas las partes del sistema de desinfección han funcionado satisfactoriamente durante las actividades de prearranque, el arranque con agua residual tratada debe hacerse en el orden mostrado abajo:**

- Ponga en funcionamiento el evaporador 20 minutos antes de usarse.
- Una vez alcanzada la temperatura especificada en el manual de fabricante, abra la válvula sobre el evaporador para permitir el paso.
- Ponga en funcionamiento las bombas de ayuda (de agua tratada).
- Ya que las bombas de cloración estén circulando el agua, proceda a abrir las válvulas de los cilindros de cloro conectados al cabezal principal.
- Verifique que haya flujo de cloro líquido de los cilindros al evaporador.
- Abra la válvula de control de la entrada de clorador y ajuste con el control manual la tasa de dosificación mediante el uso del rotámetro.
- Verifique el funcionamiento en el eyector y la aplicación de la solución de cloro a las cámaras de inyección y luego a los tanques de contacto.

### *Recomendaciones:*

La cantidad de cloro dosificada debe ser tal que la cantidad de coliformes fecales remanentes a la descarga sea a lo más de 200 col/100 ml. Para la cuantificación de la cantidad de cloro suministrada al sistema se usa la siguiente ecuación.



$$\text{Tasa de dosificación de cloro } \text{Cl}_2, \text{ kg/día} = \left( \begin{array}{l} \text{dosificación} \\ \text{de } \text{Cl}_2, \text{ mg/l} \\ \text{de cloro} \end{array} \right) \left( \begin{array}{l} \text{flujo} \\ \text{de la } Q, \text{ l/s} \\ \text{de la planta} \end{array} \right) \left( \frac{1 \text{ kg}}{1 \times 10^6 \text{ mg}} \right) (86400 \text{ s/d})$$

El sistema de cloración se debe poner en marcha inmediatamente después de que se tenga effluente de la planta, para de este modo disminuir la concentración de organismos patógenos a la descarga. Para la cuantificación de la cantidad de cloro que está siendo consumida por el sistema se utiliza la siguiente relación.

$$\text{Demanda de cloro } \text{mg/l} = \left( \begin{array}{l} \text{dosificación} \\ \text{de } \text{Cl}_2, \text{ mg/l} \\ \text{de cloro} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{l} \text{cloro} \\ \text{residual } \text{mg/l} \end{array} \right)$$

Las bombas de agua no potable de servicio, se pondrán en operación tan pronto el tanque de contacto de cloro cuente con el nivel de agua y estas puedan arrancar sin problemas de cavitación. Estas son independientes de si se está clorando o no.

Es necesario restablecer un punto de ajuste en la dosificación de cloro de acuerdo a los datos del análisis del cloro residual, o hacer otro tipo de ajustes de acuerdo al control de flujo, ya sea por el sistema Parshall y/o el sensor ultrasónico. Este último podría requerir de ajustes más específicos en un control automático proporcional al flujo.

#### 4.5.2.5 Tratamiento de lodos.

En el sistema de tratamiento de lodos, los lodos de purga de las zanjas de oxidación son deshidratadas para que puedan ser dispuestos finalmente. La purga de lodos se lleva a cabo mediante la evacuación del lodo en exceso de las zanjas de oxidación el cual es recolectado en el fondo del clarificador y de aquí enviado hacia el tanque de retención de lodo para que de éste sea distribuido hacia los lechos de secado de lodo. Cuando los lodos se secan, estos son recogidos mediante una pala mecánica pequeña y depositados en un camión para su envío a la disposición final.

Este sistema se pondrá en operación después de que se haya alcanzado la concentración de SSVLM en las zanjas de oxidación, momento a partir del cual los lodos generados en el sistema serán lodos que se encuentren en exceso, por lo que será necesaria su evacuación del sistema para evitar que se acumulen trayendo problemas a la operación.

Para esta sección es necesario realizar las siguientes actividades preliminares:

## **ARRANQUE Y OPERACIÓN**

Tratamiento de Aguas Residuales

---

### ***Equipo de bombeo de recirculación***

1. Inspeccionar y limpiar toda basura en el equipo, tubería y tanque destino.
2. Verificar la posición de las válvulas.
3. Asegurarse que toda protección y dispositivos de seguridad hayan sido instalados apropiadamente.
4. Verificar que todas las conexiones eléctricas sean adecuadas de acuerdo a las recomendaciones de fabricante.
5. Realizar dos arranques breves del equipo de acuerdo a las recomendaciones.
6. Al operar la bomba observe que no exista ruido excesivo, vibraciones, calentamiento y fuga.
7. Verificar la existencia de problemas en la línea de descarga debido al arreglo de la válvula o alguna fuga.
8. Verificar el sello de agua y ajuste si es necesario.
9. Verificar los interruptores del panel de control para su apropiada posición.
10. Verificar el flujo de descarga.
11. Verificar la presión de succión y de descarga.

### ***Equipo de bombeo de purga***

12. Realizar de igual forma las recomendaciones de fabricante.
13. Realizar las recomendaciones pertinentes, recordando que estas bombas de desplazamiento positivo de cavidad progresiva no pueden operar contra una válvula cerrada sin que la bomba se dañe. Por consiguiente, antes de activar esta bomba el personal de operación debe abrir las válvulas en la tubería de descarga así como la compuerta del influente a los lechos de secado.

### ***Tanque de retención de lodo***

14. Verificar que los procedimientos preliminares de limpieza hayan sido realizados.
15. Verificar que durante las pruebas hidrostáticas no haya permanecido sin reparación alguna fuga.
16. Verificar que la tubería de aire y los difusores hayan sido inspeccionados para una correcta operación antes de introducir lodo en el tanque.
17. Inspeccionar las válvulas del influente que están localizadas cerca de la pared sur de cada celda, identificando cuál de las celdas recibirá el lodo para confirmar su disponibilidad.

### ***Sopladores de Aire***

18. Verificar de igual forma que las recomendaciones de fabricante y los procedimientos preliminares.
19. Cerciorarse de la estabilidad de los mecanismos internos del soplador.
20. Inspeccionar los soportes debido a que existirá una constante vibración.
21. Comprobar la integridad de la tubería externa e interna respecto al tanque de retención para prevenir una fuga de aire.

22. Por seguridad de la operación, cada uno de los difusores debe estar libre de cualquier desperfecto. La negligencia del personal en la revisión de este punto podría provocar zonas muertas una vez que el aire es aplicado.

**Lechos de Secado de Lodo**

23. Realizar una revisión de la operación de las compuertas que controlan el flujo de lodo en los lechos, la instalación de la compuerta de cierre (tablón de madera) a la entrada de la rampa del lecho, así como la profundidad y cantidad del medio filtrante, incluyendo el drenaje subterráneo.

24. Antes de que el lodo sea bombeado al lecho, aflojar las camas de arena, que se encuentren compactadas, con un bielgo o herramienta con puntas de 20 a 30 cm de longitud. Introducir las puntas al lecho para aflojar y deshacer terrones de arena. No ocasione un disturbio entre las capas de grava y arena ni mezcle las dos capas.

25. Después de aflojar la arena, aplicar un apisonador para lograr una superficie uniforme.

**Posterior a la realización de las actividades de prearranque, se procederá a arrancar con lodo en el orden mostrado abajo:**

- Posicionar adecuadamente todas las válvulas del sistema de recirculación de acuerdo a las unidades que serán utilizadas para retornar el lodo a las zanjas de oxidación vía obras de cabeza.
- Cuando los clarificadores secundarios empiecen a trabajar, sólo las bombas de recirculación de lodo serán accionadas, manteniendo el flujo de purga nulo.
- Después de que las bombas de recirculación han sido activadas, verificar que funcionen uniformemente y que haya movimiento del fluido. Verifique la existencia del sello hidráulico a las bombas durante su operación y que la presión de descarga sea la recomendada.
- Se pondrá en operación el sistema de tratamiento de lodo después de alcanzar la concentración de SSVLM en las zanjas de oxidación.
- Cuantificar la cantidad de lodo que será purgada sobre una base diaria e identificar el tanque de retención al que será enviado esta cantidad. La purga diaria total de lodo será dividida en flujos pequeños y desechada en intervalos aproximados de 4 horas (dos veces por turno).
- Por medio de las bombas de recirculación y mediante la configuración correspondientes de las válvulas, dirigir la cantidad de lodo programada al tanque de retención.
- Confirmar que el lodo esté entrando a la celda, detectando algún movimiento tanto en un punto próximo a la descarga o lo largo de la pared de la celda.
- Los sopladores de aire serán arrancados cuando haya lodo presente en el tanque de retención o esté siendo introducido.
- Verificar la abertura de las válvulas correspondientes en la tubería de descarga de la bomba de lodos, así como de las compuertas del influente a los lechos de secado.

## **ARRANQUE Y OPERACIÓN**

Tratamiento de Aguas Residuales

---

- Arrancar las bombas de lodo desde la estación remota después de cumplirse el intervalo de tiempo establecido en el tanque de retención y de cerciorarse de que los lechos hayan sido preparados.
- Después de ese momento el flujo de lodo en el lecho de secado debe ser constante y sin interrupciones.
- Revisar el nivel de lodo en el tanque de retención y el flujo de lodo en los lechos de secado, no permitiendo que el nivel del lodo en el tanque de retención baje tanto que exponga el punto de succión de las bombas.
- Verificar que en el lecho de secado no se exceda de la profundidad recomendada (30-46cm). Una vez alcanzada esta profundidad, la operación de bombeo debe detenerse.

### *Recomendaciones*

Cuando el lodo es purgado, el personal de operación debe recordar que la capacidad combinada de dos celdas del tanque de retención es de 2937 m<sup>3</sup>. Por lo tanto, debe estar sobre aviso del volumen disponible en el tanque de retención antes de admitir el lodo para evitar tener un sobreflujo.

Si es posible, después de que el lodo ha sido aplicado al lecho, la bomba de purga y la tubería serán limpiadas con gran cantidad de agua no-potable para que los sólidos no se solidifiquen en la pared de la tubería. Este lavado asegura también que los sólidos no se endurezcan en el rotor o las paredes del impulsor de las bombas.

### **4.5.3 Rutinas de Muestreo y Análisis Durante el Arranque.**

La rapidez en el arranque de la planta dependerá en gran medida de los resultados obtenidos del muestreo y análisis del agua efectuados durante todas las etapas de tratamiento. El valor de cualquier resultado de análisis en laboratorio, dependerá de que tan representativa sea la muestra. Para ello, en el capítulo 3 (sección 3.2, seguimiento del proceso) se revisaron las técnicas, zonas y valores de muestreo para los parámetros más representativos, donde sólo se abordó el tratamiento secundario y en condiciones estables del proceso. Por tal motivo, en este apartado se considerará al proceso en forma global y durante su fase de arranque inicial.

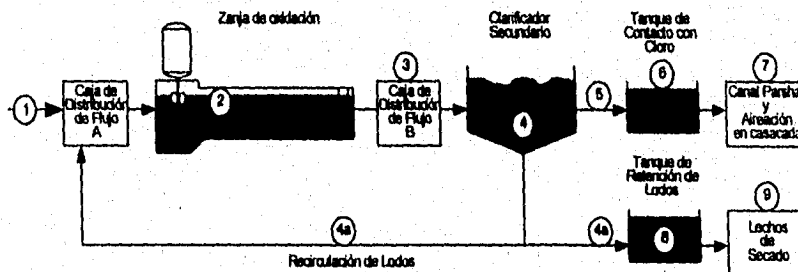
Antes de definir los puntos de muestreo es recomendable tener en cuenta ciertos puntos generales:

1. El punto de muestreo debe ser seguro y accesible.
2. En la mayoría de los casos se ubicará la toma de la muestra donde el agua represente una mezcla uniforme.

3. Cuidar que la muestra no contenga partículas mayores de ¼ de pulgada.
4. No incluir sedimentos o materia flotante acumulada en el sitio de muestreo.
5. Las muestras tienen que ser entregadas y analizadas tan rápido como sea posible. Las muestras que vayan a ser conservadas por más de una hora, deben estar almacenadas a una temperatura de 3 a 4°C.

*Localización de puntos de muestreo y análisis.*

La localización de los puntos de muestreo, análisis típicos a efectuar, frecuencia del muestreo y tipo de muestra requeridos se presentan en la tabla 4.4. Tan pronto como la operación se encuentre estabilizada, será posible cambiar la frecuencia de algunos parámetros.



**Figura 4.5 Localización de Puntos de Muestreo**

# ARRANQUE Y OPERACIÓN

## Tratamiento de Aguas Residuales

Tabla 4.4. Localización de puntos, análisis, frecuencia y tipo de muestreo.

Análisis	Muestreo			Tipo de Muestreo	Rango de valores esperados	No. de Muestras
	Uso	Método	Frecuencia			
<b>Efluente del tratamiento primario (obras de cabeza)</b>						
Flujo, lps	CP	---	RC	---	600-1800	1
DBO <sub>5</sub> , mg/l	FP	MA	C/3 días	M. compuesta	220	1
DQO, mg/l	FP	MA	Diario	M. compuesta	500	1
Temperatura, °C	FP	MA	1 vez/turno	M. simple	18-30	1
SST, mg/l	FP	MA	Diario	M. compuesta	220	1
SSV, mg/l	FP	MA	Diario	M. compuesta	154	1
S.sed., mg/l	FP	MA	1 vez/turno	M. simple	10	1
NTK, mg/l	FP	MA	2/semana	M. compuesta	40	1
N-NH <sub>3</sub> , mg/l	FP	MA	2/semana	M. compuesta	25	1
pH	CP	MA	C/4 horas	M. simple	6-8	1
Alcalinidad (CaCO <sub>3</sub> ), mg/l	FP	MA	1 vez/turno	M. simple	100	1
<b>Lícor mezclado (zanjas de oxidación)</b>						
OD, mg/l	CP	MA	C/2 horas	M. simple	1.6-4	2
OUR, mg O <sub>2</sub> /l/h	CP	MA	C/2 horas	M. simple	>20	2
Temperatura, °C	CP	MA	1 vez/turno	M. simple	18-30	2
SST, mg/l	CP	MA	1 vez/turno	M. compuesta	3000-6000	2
SSV, mg/l	CP	MA	1 vez/turno	M. compuesta	2550-5100	2
pH	FP	MA	1 vez/turno	M. simple	6-8	2
NO <sub>3</sub> , mg/l	FP	MA	Diario	M. simple		2
Suministro aire, kg O <sub>2</sub> /hp h	FP	---	Diario	---		2
Análisis al Microscopio	CP	---	Diario	M. simple	Representativo	2
<b>Caja de distribución de flujo (zanjas-clarificadores)</b>						
Prueba sedimentabilidad	CP	MA	1 vez/turno	M. simple	Curva repres.	3
Calidad del lodo	CP	MA	1 vez/turno	M. simple	Curva repres.	3
IVL <sub>30 min.</sub> , ml/g	CP	MA	1 vez/turno	M. simple	70-110	3
IVL <sub>60 min.</sub>					66-100	
<b>Clarificador secundario</b>						
Profundidad/cama de lodo	CP	MF	Diario	---	0.30-0.91 m	4
<b>Recirculación de lodos</b>						
Flujo, lps	CP	---	RC	---	550-2000	4a
SST, mg/l	CP	MA	1 vez/turno	M. compuesta	8000-15000	4s
SSV, mg/l	CP	MA	1 vez/turno	M. compuesta	<0.60(SST)	4s
<b>Efluente de la planta</b>						
Flujo, lps	CP	---	RC	---	1320-1350	7
DBO <sub>5</sub> , mg/l	FP	MA	Diario	M. compuesta	20	7
DQO, mg/l	FP	MA	Diario	M. compuesta	45	7
OD, mg O <sub>2</sub> /l	FP	MA	1 vez/turno	M. simple	2	7
SST, mg/l	FP	MA	Diario	M. compuesta	20	7
SSV, mg/l	FP	MA	Diario	M. compuesta	<20	7
Coliformes, NMP/100ml	FP	MA	Diario	M. simple	200	7
Cl <sub>2</sub> , mg/l	FP	MA	Diario	M. simple	0.5	7
NTK, mg/l	FP	MA	Diario	M. simple		7
N-NH <sub>3</sub> , mg/l	FP	MA	Diario	M. simple		7
pH	FP	MA	Diario	M. simple	6-9	7
NO <sub>3</sub> , mg/l	FP	MA	Diario	M. simple		7
NO <sub>2</sub> , mg/l	FP	MA	Diario	M. simple		7
<b>Tratamiento de lodos</b>						
OD, mg O <sub>2</sub> /l			Diario			
SST, mg/l	FP	MA	Diario	M. simple	8000-15000	8
SSV, mg/l	FP	MA	Diario	M. simple	<0.60(SST)	8
pH	CP	MA	Diario	M. simple		8
<b>Lechos de secado</b>						
No. de Lecho	FP	---	Diario	---		9
Contenido de humedad			Diario			
Profundidad, cm	FP	MF	1/turno	---	30-46	9

Adaptado de WPCF, 1989

CP=control del proceso; FP=funcionamiento del proceso; MA=método analítico; MF=método físico; RC=control continuo

Cuando se realice el control de la recirculación ( $Q_r$ ), se recomienda utilizar el método de calidad de lodo como base, pero combinando éste con la medida de la cama de lodos en el clarificador secundario y sedimentabilidad, sin olvidar conjuntar las demás variables.

Normalmente las variables  $Q_w$  y  $Q_r$  no son variadas simultáneamente; la adquisición de un simulador por computadora sería una herramienta de gran ayuda para este fin, con el objeto de optimizar el proceso, involucrando por supuesto, los costos de operación.

Sin importar en que momento sea manipulada cualquiera de las variables, siempre debe cumplirse con las características del efluente de la planta, apoyándose siempre con análisis al microscopio y monitoreos visuales descritos en este trabajo.

El arranque y la operación dependerán grandemente de la capacitación que se les de a los operadores de la planta. El manual de operación y mantenimiento, la capacitación continua, cooperación en equipo, monitoreo de resultados e información de diseño son partes interrelacionadas para un buen programa de arranque y operación.

Se propone que la planta sea arrancada en forma intermitente (*batch*). Debido a que bajo esta forma se podría alcanzar con mayor rapidez la concentración de SSLM (3,000-6,000 mg/l).

Para evitar demoras durante el arranque es importante haber realizado todos los procedimientos preliminares y pruebas hidrostáticas adecuadamente. La planta se considera arrancada cuando las condiciones de descarga sean las especificadas por el proyecto, sin olvidar mantener los indicadores de control dentro de los rangos recomendados.

Por último, esta tesis sirvió para apoyar actividades en el arranque y operación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Nuevo Laredo, Tamaulipas. Consiguiéndose con ello, colaborar en la protección del ecosistema acuático, en especial del Río Bravo.

## CONCLUSIONES

En los procesos de lodos activados, hay básicamente tres variables a manipular, las cuales pueden ser modificadas de acuerdo al control que se quiera dar al sistema biológico: suministro de oxígeno, flujo de purga de lodos ( $Q_w$ ) que a su vez controla la edad del lodo y flujo de recirculación de lodos ( $Q_r$ ). Las dos últimas servirán para dar un control sobre los lodos activados.

Cuando se controle el suministro de oxígeno en una zanja de aireación, hay que recordar que se persigue lo siguiente: proveer de cantidades suficientes de oxígeno a los microorganismos responsables de la remoción de la DBO<sub>5</sub> con concentraciones no menores de 2 mg/l en zonas de aireación; mantener suficientemente mezclados a los microorganismos y el contenido del tanque, así como proporcionar una velocidad mínima en el canal de 0.305 m/s, y establecer un balance entre la zona de aireación y la zona anóxica. Este último concepto definirá en gran parte la cantidad de oxígeno necesaria. Para este fin, el nivel de oxígeno disuelto (OD) será el indicador de control primordial, su concentración debe ser de 0.5 a 1.0 mg/l entre 20 a 30 m corriente arriba del vertedero de salida. También es importante cuantificar la tasa de utilización de oxígeno (OUR), para establecer un perfil de las concentraciones del oxígeno disuelto a lo largo de la zanja.

Cuando se este considerando el control de la purga de lodos ( $Q_w$ ) en el sistema, se recomienda utilizar el tiempo de retención celular o edad de lodo ( $\theta_c$ ) como primer método de control, sin olvidar verificar regularmente la concentración de sólidos (SST y SSV) y la relación F/M para cerciorarse que se encuentre en el rango recomendado ( $F/M=0.05$  a  $0.01$  kg DBO/kg SSVLM/d y  $SSLM=3000$  a  $6000$  mg/l). El método seleccionado como base siempre debe conjuntarse con los métodos de control de recirculación y por su puesto con el análisis al microscopio. Toda esta información permitirá evaluar con mayor precisión la eficiencia del proceso. El valor del tiempo de retención celular de diseño es de 20 días, aunque en la operación real puede estar dentro de un rango de 10 a 30 días.



## BIBLIOGRAFÍA

- ATLATEC (1995). "Oferta de arranque de la planta de tratamiento de aguas negras ciudad de Nuevo Laredo, Tam.", Ago., Cydsa.
- APHA-AWNA-WPCF (1989). "Standard methods for the examination of water and wastewater", 15<sup>th</sup> Edition.
- Camp Dresser & McKee, Inc., S.A. Garza Engineers, Inc., Eco-Ingeniería, S.A., Ponciano Morales, A.I.A. (1991). "Informe de diseño conceptual: planta de tratamiento de aguas residuales de Nuevo Laredo".
- EIMCO carousel system (1994). "Installation, operation and maintenance manual", Wilfley Weber, Inc.
- Fischer & Porter. "Chemical feed: technical data".
- Jerzy J. Ganczarzyk (1993) "Activated sludge process: Theory and practice" Marcel Dekker, Inc. pp. 7-25, 148-150.
- Gujer W. (1990) "Activated sludge simulation Program - ASIM, MS-DOS, public domain"
- Henze M., Grady C.P.L., Gujer W., Marais G. & Matsuo T. (1986). "Scientific and technical reports no. 1: Activated sludge model no. 1", *International Association on Water Pollution Research and Control*.
- N.J. Horan (1990) "Biological wastewater treatment systems: Theory and operation", John Wiley & Sons.
- International Boundary & Water Commission (1994). "Operations and maintenance manual for the Nuevo Laredo wastewater treatment plant", Camp Dresser & McKee.
- International Boundary & Water Commission (1994). "Staffing guide for the Nuevo Laredo wastewater treatment plant", Camp Dresser & McKee.
- Lettinga G. y Hulshoff Pol. L.W. (1991). "Application of modern high rate anaerobic treatment processes for wastewater treatment", *New Developments in industrial wastewater treatment*, 33-64.
- Mejía M. (1995). "Situación actual del tratamiento de aguas residuales en México", *Curso: Tratamiento de aguas residuales municipales para cumplir con la NOM-067-ECOL/1994, SMISA*, 8-13.
- Metcalf & Eddy (1991). "Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse", *Mc Graw Hill Publishing Co. U.S.A.*
- Michael Richard, Ph. D., (1989) "Activated sludge microbiology", Water Pollution Control Federation.
- Randy Junkins, Kevin Deeny & Thomas Eckhoff (1983) "The activated sludge process: Fundamentals of operations" Ann Arbor Science, p 37.
- Roman K. F. (1994). "Programa de control de descargas industriales", Comisión Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Nuevo Laredo, Tamaulipas, México (COMAPA).
- Wallace & Tiernan, (1991), "Chlorine handling manual", *Wallace & Tiernan, Inc.*
- Water Pollution Control Federation (1985) "Operation of extended aeration package treatment plants: Manual of practice No. 7"
- Water Pollution Control Federation (1987) "Activated sludge: Manual of practice No. 9"
- Water Pollution Control Federation, Washington, (1989). "Operation Manual of Municipal Wastewater Treatment Plants: Manual of practice No. 11, Volume I"
- Water Pollution Control Federation, Washington, (1989). "Operation Manual of Municipal Wastewater Treatment Plants: Manual of practice No. 11, Volume II"
- Water Pollution Control Federation, Washington, (1989). "Operation Manual of Municipal Wastewater Treatment Plants: Manual of practice No. 11, Volume III"
- W. Wesley Eckenfelder & Petr Grau (1992) "Activated sludge process design and control: Theory and practice", Technomic, p 110.

## REVISTAS

### AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION

Ontario Water Resources Com. (1972). "Basic gas chlorination manual: I", *American Water Works Association*, May., 319-322.

Ontario Water Resources Com. (1972). "Basic gas chlorination manual: II", *American Water Works Association*, Jun., 395-404.

Ontario Water Resources Com. (1972). "Basic gas chlorination manual: III", *American Water Works Association*, Aug., 522-536.

Ontario Water Resources Com. (1972). "Basic gas chlorination manual: IV", *American Water Works Association*, Oct., 683-688.

### BIOTECNOLOGÍA

Noyola A. y Saval S. (1992). "Aportaciones de la biotecnología al tratamiento anaerobio de aguas residuales", *Biotecnología*, Vol. 2, No. 5 y 6., 155-172.

### CHEMICAL ENGINEERING

Bjurstrom E. & Smelser B. (1988). "Commercializing Biotechnology Processes", *Chemical Engineering*, Jan. 18, 81-84.

Butler M. (1993). "How to facilitate startup a commonsense approach breaks this monumental task into manageable components", *Chemical Engineering*, Jun., 82-92.

Felder R. & Huvad G. (1993). "Technical training: hit the ground running", *Chemical Engineering*, Jun., 133-136.

Gans M. (1976). "The A to Z of plant startup", *Chemical Engineering*, Mar. 15, 72-82.

Isaacs M., Heywood N. Blake N. & Alderman N. (1995). "An A-to-Z guide for testing and handling of sludges", *Chemical Engineering*, Oct., 80-90.

Meier F. (1982). "Is your Control System Ready to Start-up", *Chemical Engineering*, Feb. 22, 76-87.

### ENVIRONMENT PROGRESS

Givens, S. W., et al., (1991) "Biological process design and pilot testing for a carbon oxidation, nitrification and denitrification systems", *Environ. Prog.*, 10, 133.

### ESTRATEGIA INDUSTRIAL

Calatayud E. (1993). "Estrategias para el Ahorro y Reuso del Agua en la Industria: parte I", *Estrategia Industrial*, Ejem. 115, 5-8.

Calatayud E. (1993). "Estrategias para el Ahorro y Reuso del Agua en la Industria: parte II", *Estrategia Industrial*, Ejem. 116, 5-8.

"Hacia el Uso Racional del Recurso Hidráulica", *Estrategia Industrial*, 5-8, Ejemplar 116 (1993).

### HYDROCARBON PROCESSING

Capps R., Matelli G. & Bradford M. (1993). "Design more flexibility into wastewater treatment", *Hydrocarbon Processing*, Dec., 81-92.

### **JOURNAL WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION**

Applegate, C.S., B. Wilder and J.R. Deshaw (1980) "Total nitrogen removal in a multi-channel oxidation system", *JWPCF*, 52 (3) :568-577.

Argaman, Y. and Brenner, A. (1986) "single-sludge nitrogen removal: modelling and experimental results", *JWPCF*, 58, 853-860.

Bishop, D.F., J.A. Heidman and J.B. Steinberg (1976) "Single-stage nitrification-denitrification", *JWPCF*, 48(3) :520-532.

Chudoba, J., and Tucek F., (1985) "Production, degradation and composition of activated sludge in aeration systems without primary sedimentation", *JWPCF*, 57, 201.

Daigger, G. T., and Roper, R.E., (1985) "The relationship between SVI and activated sludge settling characteristics", *JWPCF*, 57, 859.

Drews, R.J. (1972), "The orbital extended aeration activated sludge plant", *JWPCF*, 44.

Huang, J. Y. C., and Cheng, M. D., (1984) "Measurement and new applications of oxygen uptake rates in activated sludge process", *JWPCF*, 56, 259.

Huang, J. Y. C., and Drew, D. M., (1985) "Investigation of the removal of organics and nitrogen in the oxidation ditch", *JWPCF*, 57, 151.

Johnson J. (1981). "Start-up and Operation of an Oxygen-Activated Advanced Wastewater Treatment System", *JWPCF*, Vol. 53, No. 4, 451-455.

Maiti, S.K., et al., (1988) "Nutrients removal and conservation by activated algae in oxidation ditch", *JWPCF*, 60, 2115.

McClontok, S.A., et al., (1988) "Nitrate versus oxygen respiration in the activated sludge process", *JWPCF*, 60, 342

Mueller, J.A. and Boyle, W.C. (1988) "Oxygen transfer under process conditions", *JWPCF*, 60, 332-41

Novak, J. T., et al., (1984) "Stabilization of sludge from an oxidation ditch", *JWPCF*, 56, 950.

Panicker, P.V.R.C. and Krishnamoorthis, K.P. (1981) "Parasite egg and cyst reduction in oxidation ditches and aerated lagoons", *JWPCF*, 53, 1413-19.

Rittman, B. E., and Langeland, W.E., (1985) "Simultaneous denitrification with nitrification in single-channel oxidation ditches", *JWPCF*, 57, 300.

Sanks R. & Connell J. (1981). "Operator Training is Key to Oxidation Ditch Star-up and Operation", *JWPCF*, Vol. 53, No. 4, 444-450.

Starkey, J. E., and Karr, P.R., (1984) "Effect of low dissolved oxygen concentration on effluent turbidity", *JWPCF*, 56, 837.

Stensel, H. D., R.C. Lochr and A. W. Lawrence (1973) "Biological kinetics of the suspended growth denitrification", *JWPCF*, 45 (2) :249-261.

Stukenberg, J. R., (1984) "Physical aspects of surface aeration design", *JWPCF*, 56, 1014.

Wilson, R.W., Murphy P.M. Sutton and S.L. Lackey (1981) "Design and cost comparison of biological nitrogen removal process", *JWPCF*, 1294-1302.

### **WATER ENGINEERING & MANAGEMENT**

Edward, J. Haller, (1991) "Bugs in Activated sludge : How do they work", *Water Eng. & Manag.*, 138, 8, 30.

Jarski, R.S., et al., (1989) "Get Control of your activated sludge process", *Water Eng. & Manag.*, 136, 7, 33.

Rozich, A. F., and Colvin, R. J., " Formulating strategies for activated sludge systems", *Water Eng. & Manag.*, 137, 10, 39.

Yingst, J. L., and Azose, S., (1988) "Implementing DO control systems that work", *Water Eng. & Manag.*, 135, 33.

### **WATER POLLUTION CONTROL (GB)**

Johnstone, D. W. M., Rachwal, A. J., and Hanbury, M.J. (1979) "Settlement characteristics and settlement tank performance in the carousel activated sludge system", *Water Pollution Control*, Vol. 78, No. 3, p. 337.

Johnstone, D. W. M., and Carmichael, W.F. (1982) "Cirencester carousel plant: some process considerations", *Water Pollution Control*, Vol. 81, No. 5, p. 587.

### **WATER RESEARCH**

Dudley, J. (1995) "Process testing of aerators in oxidation ditches", *Water Res.*, 29, 9, 2217-2219.

Henze, M., *et al.*, (1993) "Rising sludge in secondary settlers due to denitrification", *Water Res.*, 27, 231-236

Huang, J. Y. C., (1985) "OUR for determination microbial activity and application", *Water Res.*, 19, 373.

Nakajima, M., *et al.* (1984) "Inhibitory effect of oxygen on denitrification in sludge from an oxidation ditch", *Water Res.*, 18, 339.

Padukone, N., and Andrews, G.F., (1989) "A simple conceptual mathematical model for the activated sludge process and its variations", *Water Res.*, 23, 1535.

Stenstrom, M.K., and R.A. Poduska (1980) "The effect of dissolved oxygen concentration on nitrification", *Water Res.*, 14 :643-649.

Warn, A.E. and Brew, J.S. (1980) "Mass balance" *Water Res.*, 14, 1427-34.

### **WATER SCIENCE AND TECHNOLOGY**

Araki, H., *et al.*, (1990) "Intermittent aeration for nitrogen removal in small oxidation ditches", *Water Sci. Technol.*, 22, 131.

Barnard, J.L., and Melring, P. G. J., (1988) "Dissolved Oxygen Control in the Activated Sludge Process", *Water Sci. Technol.*, 20, 93.

Boyle, W.C., *et al.*, (1989) "Simultaneous DO control and respirations estimation", *Water Sci. Technol.*, 21, 1185.

Gujer, W., and Henze M., (1991) "Activated Sludge Modelling and simulation", *Water Sci. Technol.*, 23, 1011-1023.

Gujer, W., *et al.*, (1995) "The activated sludge Model No. 2 : biological phosphorus removal", *Water Sci. Technol.*, Vol. 31, No. 2, 1-11.

Maler, W., and Krauth, K., (1988) "Optimizing nitrification in aeration basins with surface aerators", *Water Sci. Technol.*, 20, 23.

von Schulthess, R., Wild, D. and Gujer, W. (1995) "Nitric and nitrous oxides from denitrifying activated sludge at low oxygen concentration", *Water Sci. Technol.*, Vol. 30, No. 6, 123-132.

Silegrist, H., *et al.*, (1995) "Denitrificación in secondary clarifiers", *Water Sci. Technol.*, Vol. 31, No. 1, 205-214.

Skogman, R., and Lammi, R., (1988) "The efficiency of a biological activated sludge effluent treatment plant with extended aeration", *Water Sci. Technol.*, 20, 65.

Sollfrank, U., and Gujer, W., (1991) "Characteristics of domestic wastewater for mathematical modelling of the activated sludge process", *Water Sci. Technol.*, 23, 1057.

Sperling M. & Lumbers J. (1989). "Control objectives and the modelling of MLSS in oxidation ditches", *Water Sci. Technol.*, Vol. 21, 1173-1183.

Sperling M. & Lumbers J. (1991). "Optimization of the operation of the oxidation ditch process incorporating dynamic model", *Water Sci. Technol.*, Vol. 24, No. 6, 225-233.

Spies, P.J., and Seyfried, C.F., (1988) "Ammonia controlled activated sludge process for nitrification-denitrification", *Water Sci. Technol.*, 20, 29.

Wild, D., von Schulthess, R. and Gujer, W., (1995) "Structured modelling of denitrification intermediates", *Water Sci. Technol.*, Vol. 31, No. 1, 45-54.

"Determination of the maintenance requirements of Activated Sludge", *Water Sci. Technol.*, 139-142, 7 (1993).

---

**ANEXO A**

**INDICADORES ANALÍTICOS**

---

## **A.1 MEDICIÓN DE LA SEDIMENTABILIDAD DEL LODO.**

La prueba de sedimentabilidad en el proceso de lodos activados se emplea para evaluar las características de sedimentación del lodo y poder cuantificar entre otras cosas la tasa de recirculación.

### **A.1.1 Recolección de muestras.**

1. Cuando se realice una ronda por las instalaciones como parte de la operación, es importante que la recolección de muestra de licor mezclado sea lo último que se haga.
2. Tomar la muestra con un recipiente de boca ancha e inmediatamente llevarla al laboratorio (no tardar más de 10 minutos). Evite agitar la muestra y exponerla a aireación en su traslado.
3. No tome lentamente la muestra, ni recolecte espuma (situaciones no representativa del sistema).
4. Como el licor mezclado esta contenido en seis zanjas separadas y combinan su flujo a los cuatro clarificadores secundarios, debe asegurarse que la muestra represente el flujo combinado. Por ello, se recomienda que la muestra deba ser recolectada en la caja de distribución de flujo.
5. Es recomendable medir ocasionalmente la sedimentabilidad en cada tanque de aireación individual para verificar las diferencias en las características de lodo, esto puede ser logrado tomando la muestra en los vertederos automatizados después de su vertido y no en el tanque de aireación.

### **A.1.2 Equipo.**

El método de sedimentabilidad en ocasiones es sólo una aproximación a la realidad, debido a que rara vez se tiene un equipo que pueda representar las condiciones del clarificador secundario. Esto se asume por el importante efecto sobre la sedimentación que presentan las paredes del equipo de sedimentabilidad y por el diferente comportamiento que tiene el líquido dentro del recipiente.

El equipo de laboratorio más utilizado es el siguiente:

- a) Aparato de sedimentación. Cilindro de plástico o vidrio transparente de 1 a 2 litros, graduado con una relación cercana a la del clarificador de la planta y con un diámetro mayor de 100 mm (4"). Evitar la probeta graduada de 1000 ml, ya que no representa condiciones reales del clarificador.

a) Paleta de mezclado. Se utilizará al principio de la prueba para mezclar la muestra ya contenida en el equipo. Como una opción, podría utilizarse esta misma paleta para realizar una agitación suave (1 a 2 rpm) al licor mezclado durante el ensayo para reducir la diferencia de comportamiento entre el sedimentador y la prueba.

c) Cronómetro. De preferencia, este debe tener alarma que suene a intervalos de cinco minutos.

### **A.1.3 Procedimiento de análisis de muestras.**

1. Realizar la prueba en un sitio libre de vibraciones y lejos de la luz directa del sol. Evite en lo posible el cambio de temperatura de una prueba a otra.
2. Mezclar con cuidado la muestra y vaciarla en el aparato evitando generar turbulencias. Agitar suavemente con una paleta ancha para asegurar un mezclado completo, posteriormente retirar la paleta.
3. Active el cronómetro (programado por intervalos de 5 min.), desde este momento no debe abandonarse la prueba. Durante los primeros cinco minutos debe observar las características físicas del lodo sedimentado y del sobrenadante.
4. Al finalizar los primeros cinco minutos, debe registrarse el volumen que ha ocupado el lodo sedimentado. Es importante realizar estas lecturas durante toda la prueba.
5. Continúe las lecturas y registre el volumen de lodo sedimentado (VLS) a intervalos de cinco minutos durante los primeros 30 minutos. La observación del VLS a los 60 minutos es el segundo valor más importante, necesario para realizar ajustes operacionales de control.
6. Continúe realizando las lecturas de lodo sedimentado hasta que el VLS cambie muy poco de lectura a lectura. Si la sedimentación del lodo es muy lenta (si el VLS a los 5 minutos es mayor de 900 ml), continúe realizando las lecturas a los 90, 120, 150, 180 y 240 minutos de ser necesario.
7. Después de que las lecturas hayan sido realizadas, dejar reposar la muestra por varias horas más. Registre el tiempo en el que el lodo sedimentado comience a oler mal y/o subir a la superficie del aparato.
8. Lave el aparato después de cada prueba.

### **A.1.4 Registro e interpretación de resultados.**

En la siguiente se muestra una forma diseñada para registrar los datos de la prueba de sedimentabilidad. Esta forma cuenta con espacios para el registro de otros resultados. En las próximas secciones se discutirá las pruebas y cálculos complementarios.



### Hoja de verificación de la prueba de sedimentabilidad

PRUEBA DE SEDIMENTABILIDAD Datos y Cálculos				Fecha: _____	Hora: _____
				Punto de Muestreo: _____	SSLM: _____
t (min)	VLS (ml/l)	CLS (mg/l)	COMENTARIOS	OBSERVACIONES	
0	1000		CLS a 0 minutos (SSLM)	<b>a) Durante los primeros 5-10 min:</b>	
5				I. ¿Cuál es el aspecto del floculo? Granular ___ Compacto ___ Floculento ___ Frágil ___	
10			Llenar incisa a)	II. ¿Cuál es el tamaño de las floculos aglomerados? Pequeños ___ Grandes ___	
15				III. ¿Cómo es la sedimentación del lodo? Partículas discretas ___ Como lecho ___	
20				IV. ¿Cuál es el aspecto del sobrenadante? Clara ___ Turbio ___	
25				V. ¿Se observan floculos dispersos en sobrenadante? Sí ___ No ___	
30			Llenar incisa b)	<b>b) Al final de los primeros 30 minutos</b>	
40				VI. ¿Cuál es el aspecto del lodo sedimentado? Homogénea ___ Espumoso ___ Con borde visible ___	
50					
60					
90			Se requieren lecturas de VLS y CLS del minuto 90 al 240 sólo en caso de tener sedimentación lenta		
120					
150					
180					
240					

Como se mencionó anteriormente, la prueba de sedimentabilidad ofrece tanto información numérica respecto al volumen de lodo sedimentado a diferentes intervalos de tiempo como información que servirá para confrontar los análisis con el monitoreo visual. El comportamiento de la sedimentabilidad del lodo puede representarse graficando tiempo (eje de las abscisas) contra volumen de lodo sedimentado (eje de las ordenadas).

## **A.2 DETERMINACIÓN DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST) Y SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES (SSV).**

### **A.2.1 Recolección de muestras.**

Es indispensable tomar la muestra en un sitio representativo, como lo es la zona de aireación dentro de la zanja de oxidación, en la cual los sólidos se encuentran perfectamente mezclados y de esa forma tener una muestra representativa. **Es importante no confundir la localización de los puntos de muestreo para el análisis de SST y SSV (dentro del tanque de aireación) con las muestras para las pruebas de sedimentabilidad (caja de distribución de flujo).**

Una vez tomada la muestra, llevar esta al laboratorio tan rápido como sea posible. Evitando dejarla a temperatura ambiente o a la luz del sol. Si no se va a procesar inmediatamente, debe guardarse en un refrigerador.

### **A.2.2 Procedimiento de análisis de muestras.**

Los SST involucran a todos los sólidos suspendidos en la muestra de agua ya sean inorgánicos u orgánicos. La evaluación de los SST se puede realizar para el influente, efluente, recirculación, purga, en el reactor (SSLM) y de la línea de distribución del tanque de aireación al clarificador.

El método para la medición de la concentración de los sólidos en muestras de lodos activados es ampliamente aceptado, el cual se detalla a continuación.

1. Llevar los filtros a peso constante en una mufla a 550 °C, para las pruebas de los SST y SSV.
2. Preparar un filtro de fibra de vidrio. Este debe enjuagarse con agua destilada y secarse en estufa a 103 °C.
3. Pesar el filtro con una precisión de 0.1 mg ( $P_1$ ).
4. Filtrar una parte de la muestra a través del filtro ya preparado. Los sólidos disueltos pasan a través del filtro reteniéndose los sólidos suspendidos.
5. Secar el filtro en estufa a temperatura de 103-105 °C.
6. Enfriar a temperatura ambiente en un desecador
7. Pesar el filtro con una precisión de 0.1 mg ( $P_2$ ).
8. Calcular la concentración de los SST ( $P_2 - P_1$ )/volumen de muestra.

La prueba de los SSV es un medio para estimar la biomasa disponible. En esta determinación toda la materia orgánica contenida en los SST se quema a  $\text{CO}_2$  y agua. La fracción volatilizada (SSV) se utiliza como una medición de los microorganismos presentes, aunque en la realidad también se incluye materia biológica no viva, tal como microorganismos muertos y otros materiales. Aún así, este método es aceptado para la medición de los microorganismos activos.

El procedimiento siguiente es la continuación de los pasos anteriores para la prueba de los SST con el mismo filtro y muestra:

9. Colocar el filtro con los sólidos suspendidos en una mufla a  $550\text{ }^\circ\text{C}$  por 15 minutos. Los sólidos volátiles u orgánicos deben calcinarse totalmente en la mufla.
10. Enfriar a temperatura ambiente en un desecador y pesar el filtro ( $P_3$ ).
11. Calcular los SSV por el peso perdido en la mufla ( $P_2 - P_3$ ).

### A.3 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO)

La DBO es un procedimiento para determinar la cantidad de  $O_2$  utilizado por los microorganismos para oxidar la materia orgánica presente en una unidad de volumen de agua residual.

**Muestreo.** Se recolecta suficiente cantidad de muestra a analizar la cual debe estar fresca y no almacenada. Cuando se almacene por algún motivo, no debe exceder de 6 horas a una temperatura de  $4^\circ C$ .

**Aparatos:**

- Botellas de DBO (Winckler) de 300 ml de volumen.
- Incubadora a  $20 \pm 1^\circ C$ .
- Dispositivo de aireación para agua de dilución.
- Medidor de pH.
- Medidor de OD con electrodo de membrana.
- Pipetas, buretas, matraces Erlenmeyer.

**Reactivos:**

- Solución buffer de fosfatos. Disolver 8.5 g  $KH_2PO_4$ , 21.75 g  $K_2HPO_4$ , 33.4 g  $NaHPO_4 \cdot 7H_2O$  y 1.7 g  $NH_4Cl$  en aproximadamente 500 ml y diluir a un litro con agua destilada. Debe estar a un pH de 7.2 si no ajustarlo.
- Solución de sulfato de magnesio. Disolver 22.5 g  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$  en agua destilada y diluir a un litro.
- Solución de cloruro férrico. Disolver 0.25 g de  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$  en agua destilada y diluir a un litro.
- Soluciones ácidas y alcalinas 1N para neutralización, de sosa cáustica o ácido clorhídrico.

Los pasos necesarios para medir la cantidad de  $DBO_5$  en la muestra son los siguientes:

#### 1. Tomar una muestra representativa

Estimar la dilución requerida mediante la ecuación

$$\text{alícuota de muestra a añadir} = \frac{1200}{DBO_5 \text{ estimada en el frasco}} \quad 3.5$$

La fórmula anterior asume que se están utilizando frascos de 300 ml y que la concentración inicial de OD se encuentra entre 8 y 9 mg/l. No se debe diluir demasiado

ya que esto puede traer problemas al momento de medir la DBO, principalmente en el efluente de la planta; por tal motivo es recomendable realizar una serie de tres diluciones, cada una de ellas cubriendo un intervalo de concentración probable de DBO en la muestra:

<u>alícuota de muestra necesaria en el frasco de 300 ml.</u>	<u>Intervalo de DBO cubierto, mg/l</u>
30 ml	20 - 50
60 ml	10 - 25
120 ml	5 - 12
250 ml	2 - 5

Por supuesto, será necesario tomar una alícuota pequeña para aquellas muestras con una alta concentración de DBO. Si este es el caso a veces se deberá reducir la alícuota vertida en el frasco de DBO o todo el oxígeno disuelto será consumido y habrá que repetir la prueba.

2. Preparación del agua de dilución. Utilizar el volumen de agua destilada necesaria para el llenado de las botellas que se van a requerir en la prueba. Se pone a airear por lo menos de 4 a 12 horas antes de ser utilizada. Si se airea por espacio de 4 horas se recomienda introducir una gran cantidad de aire (creando una gran turbulencia en el recipiente).
3. Adición de nutrientes e inoculación. La adición de nutrientes se hace por lo menos 15 minutos antes de empezar a agregar el agua de dilución a las botellas, se adiciona 1 ml de cada una de las soluciones por cada litro de agua de dilución. La inoculación se realiza de la siguiente manera: se agrega 1 ml de inóculo por litro de agua de dilución, en caso de que la fuente de inóculo sea efluente de la planta sin desinfección.
4. Llenado de botellas. Después de prepararse el agua de dilución, se adiciona la alícuota de muestra predeterminada en las botellas, luego se afora con el agua de dilución.
5. Prepare el blanco. Este frasco contendrá sólo agua de dilución (sin agregar alícuota). El blanco debe tratarse igual que las muestras.
6. Medición del OD. Una vez que todos los frascos han sido llenados, el OD inicial de cada solución (muestras y blanco) es determinado con el medidor. Después de esto se tapan, cuidando de que no tengan burbujas de aire dentro de ellas. Una vez cerradas se les agrega agua en la parte superior para formar un sello hidráulico, con objeto de evitar la introducción de oxígeno al interior de la botella.
7. Incube las muestras en la oscuridad a 20 °C durante 5 días.
8. Después de los cinco días de incubación, se mide nuevamente el OD en cada una de las muestras y el blanco. Esta medición será el OD final (calibrar el medidor de OD antes).
9. Calcule el valor de la DBO con la siguiente fórmula

$$\text{DBO}_5, \text{ mg/l} = \frac{(\text{OD inicial} - \text{OD final})(300)}{\text{alícuota en ml}}$$

3.6

**10. Deseche los resultados de las diluciones que no muestren una diferencia mínima de 2 mg/l de OD (OD Inicial - OD final) o que no tenga al menos 2 mg/l al final de la prueba.**

Los mejores resultados se dan cuando el valor de OD inicial y final para el blanco son similares, lo cual indica un nivel adecuado de inoculación de organismos y un equipo confiable. La diferencia recomendada de OD en el blanco debe ser de 0.2 mg/l aproximadamente. Si el nivel de oxígeno en el blanco disminuye durante los 5 días de incubación, es señal que se tiene algún problema con el agua de dilución, por lo que la prueba debe realizarse de nuevo.

#### A.4 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO).

El análisis de la DQO se basa en el hecho de que todos los compuestos orgánicos, con algunas excepciones, pueden ser oxidados por la acción de un agente oxidante fuerte bajo condiciones ácidas a dióxido de carbono y agua, sin considerar la biodisponibilidad de las sustancias. Una de sus ventajas es la rapidez con que se obtiene la información; sin embargo no evalúa si la materia orgánica es biodegradable.

El método que se propone es el llamado de reflujo cerrado (micrométodo), debido a su economía en el empleo de reactivos y simplicidad para el reflujo.

##### Material

1. Tubos de borosilicato de 20x150 mm con cuello roscado y tapa recubierta de teflón.
2. Equipo de filtración Millipore.
3. Filtros Whatman GF/A de 5 cm de diámetro (para DQO soluble).
4. Estufa a 150 °C, o bloque calefactor.
5. Pipetas volumétricas.
6. Matraces Erlenmeyer de 50 ml.
7. Gradilla.
8. Matraz Kitasato.
9. Guantes de asbesto.

##### Soluciones.

10. Reactivo de ácido sulfúrico. Añadir 10.12 g de  $\text{AgSO}_4$ , sea en cristales o en polvo (grado analítico) por cada litro de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado, esto da una proporción 5.5g  $\text{AgSO}_4/\text{kgH}_2\text{SO}_4$ . Para un garrafón de 3.5 litros de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado se requieren 35.42 g de  $\text{AgSO}_4$ . Permitir su solubilización de 1 a 2 días, a temperatura ambiente.
11. Solución estándar de dicromato de potasio 0.25N. Disolver 12.259 g de  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ , previamente secado a 103 °C por 2 horas, en 1000 ml de agua destilada.
12. Solución indicadora de ferroína. Disolver 1.485 g de 1,10 fenantrolina monohidratada y 695 mg de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  en 80 ml de agua destilada. Aforar a 100 ml. Puede utilizarse el reactivo disponible comercialmente.
13. Solución FAS (sulfato ferroso amoniacal). Disolver 39.2 g de  $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  en 600 ml de agua destilada. Agregar cuidadosamente 20 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado, enfriar y aforar a 1000 ml con agua destilada. Esta solución tiene una concentración aproximada 0.1 N; su concentración exacta se conoce al momento de la prueba cuando se titula el "blanco frío", el cual se corre junto con las muestras.

### Procedimiento

1. Lavar previamente los tubos y tapones a utilizar con  $H_2SO_4$  al 20% para evitar contaminación de las muestras. Para análisis subsecuentes lavar los tubos con agua de la llave y agua destilada, secar perfectamente antes de adicionar los reactivos.
2. En un tubo de 16 x 150 mm, colocar 5 ml de muestra o de su dilución, adicionar 3 ml de la solución de dicromato y con la punta de una espátula una pequeñísima porción de sulfato mercurico.  
En los blancos se adiciona agua destilada en lugar de la muestra. Si se desconoce completamente la DQO de la muestra, se prueban diluciones 1:100 y 5:100; la dilución más recomendable será aquella que no cambie la coloración del dicromato al inicio de la prueba.
3. Adicionar cuidadosamente 7 ml del reactivo de ácido sulfúrico, permitiendo que resbale por las paredes internas del tubo. Si es necesario, colocar el tubo en un baño de agua fría para disipar el calor de la reacción.
4. Cerrar herméticamente los tubos, invertir cada tubo varias veces para mezclar completamente y verificar que no hay fuga. En caso de haber fuga preparar otro tubo con la muestra correspondiente.
5. Colocar los tubos en una gradilla dentro de la estufa precalentada a 150 °C, para permitir la digestión durante 2 horas.
6. Preparar un tubo adicional con agua destilada en lugar de la muestra que servirá como "blanco frío" para conocer la concentración exacta de la solución FAS. Este tubo se prepara simultáneamente a las muestras, pero se mantiene bien tapado a temperatura ambiente.
7. Dejar enfriar los tubos a temperatura ambiente, retirar las tapas y verter su contenido a matraces.
8. Enjuagar el tubo con un volumen de agua destilada igual a la muestra y adicionarle al matraz. En estos dos últimos puntos cuidar que todo el contenido del tubo sea vertido en el matraz.
9. Agregar 2 gotas del indicador de ferroína y titular con la solución FAS agitando constantemente, hasta vire del indicador de azul-verdoso a café rojizo.
10. La normalidad de la solución FAS se calcula una vez titulado el blanco frío, de la manera siguiente:

$$N_{FAS} = \frac{(\text{ml de solución de dicromato})(N \text{ dicromato})}{\text{ml de solución FAS gastados para titular}}$$

3.7

1. La DQO expresada en  $mgO_2/l$  se calcula a partir de la siguiente fórmula:



$$\text{DQO,mg/l} = \frac{(\text{ml FAS}_{bc} - \text{ml FAS}_{muestra})(\text{NFAS})(8)(1000)}{\text{ml muestra}} \times \text{dilución} \quad 3.8$$

donde:

- ml FAS<sub>muestra</sub> =volumen de la solución FAS empleado para titular la muestra.
- ml FAS<sub>bc</sub> =volumen de la solución FAS empleado para titular el blanco caliente.
- NFAS =normalidad de la solución FAS obtenida al titular el blanco frío.
- 8 =peso equivalente del oxígeno.
- 1000 =factor para convertir ml a litros.

## **A.5 MÉTODO DEL DISCO SECCHI**

a) Equipo necesario: Un disco secchi de marca o fabricado en planta. El disco secchi consiste de un disco de metal de 15 - 30 cm de diámetro atado a una cuerda o cadena. La cuerda o cadena debe marcarse en intervalos de cierta medida (pies con pulgadas o metros con centímetros).

### **b) Procedimiento:**

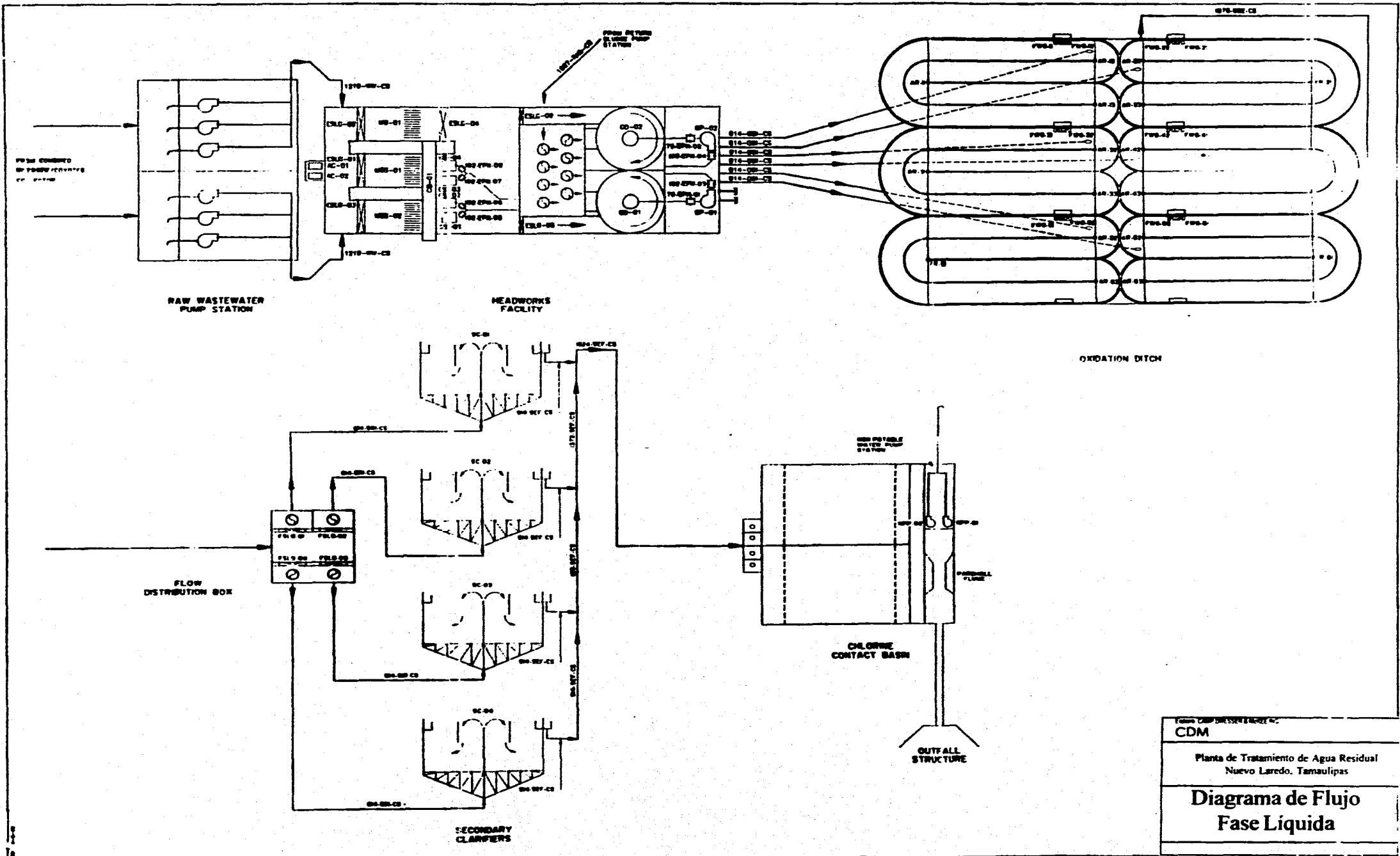
1. Realice la prueba en el clarificador cerca de la canaleta de efluente. La prueba es más efectiva si se realiza a la misma hora y sitio todos los días pues las lecturas de distintos días pueden ser comparadas.
2. Asegúrese que el disco esté limpio y bien atado a la cuerda o cadena (para que no lo pierda).
3. Baje el disco lentamente en el sobrenadante del clarificador cerca de la canaleta de efluente hasta que lo pierda de vista.
4. Levante el disco lentamente hasta el punto en el que pueda diferenciar los cuadrantes y su orientación en el disco.
5. Anote la profundidad del disco en el agua. Es común tener un patrón de referencia pintado en la pared del clarificador.
6. Registre la lectura de profundidad en la bitácora de operación. La profundidad a la que se encuentra el disco representa la claridad del efluente.
7. Proteja el disco de la luz solar para evitar deterioro en la capa de pintura.

---

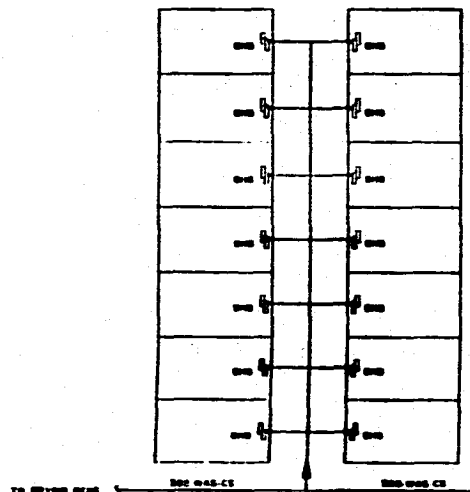
**ANEXO B**

**PLANOS**

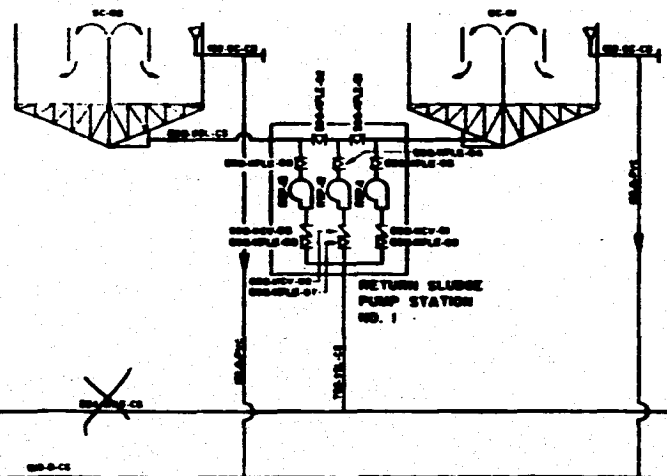
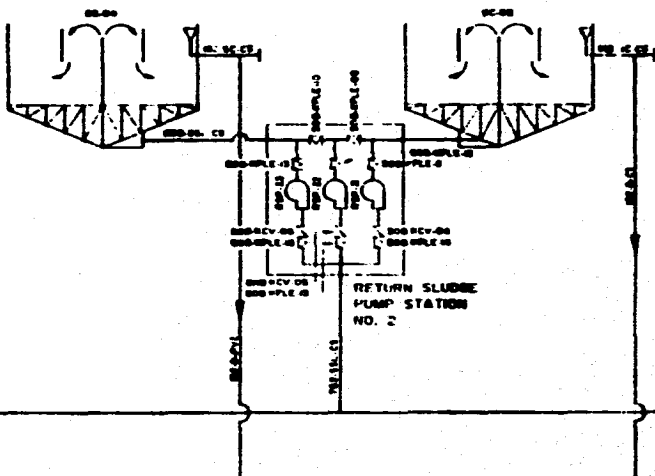
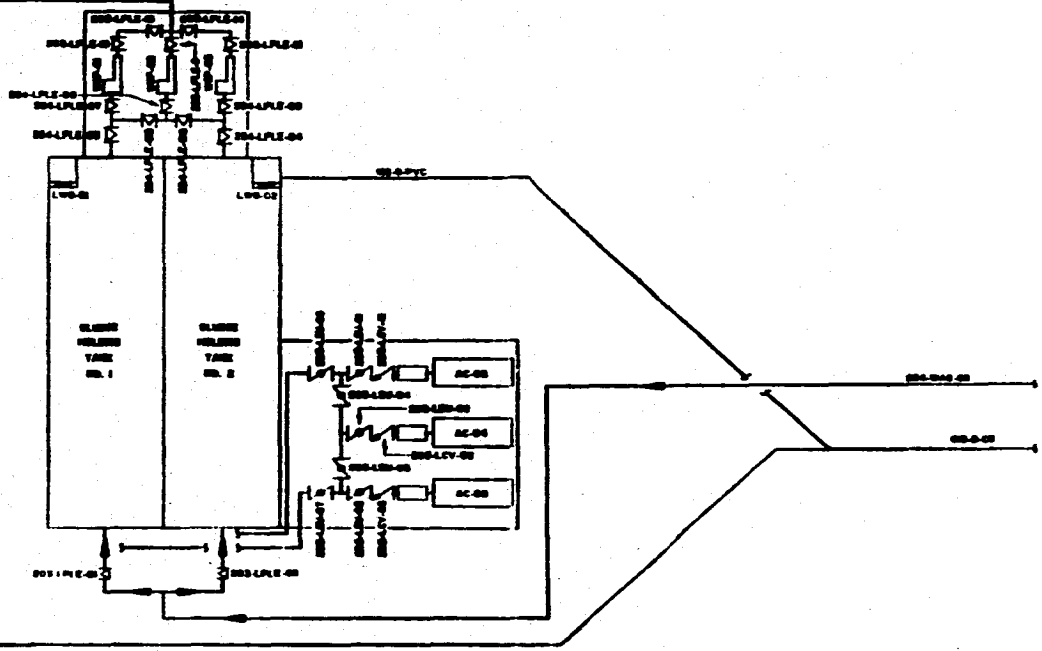
---



From CAMP DRESSER & BUCKLE INC.  
**CDM**  
 Planta de Tratamiento de Agua Residual  
 Nuevo Laredo, Tamaulipas  
**Diagrama de Flujo**  
**Fase Líquida**



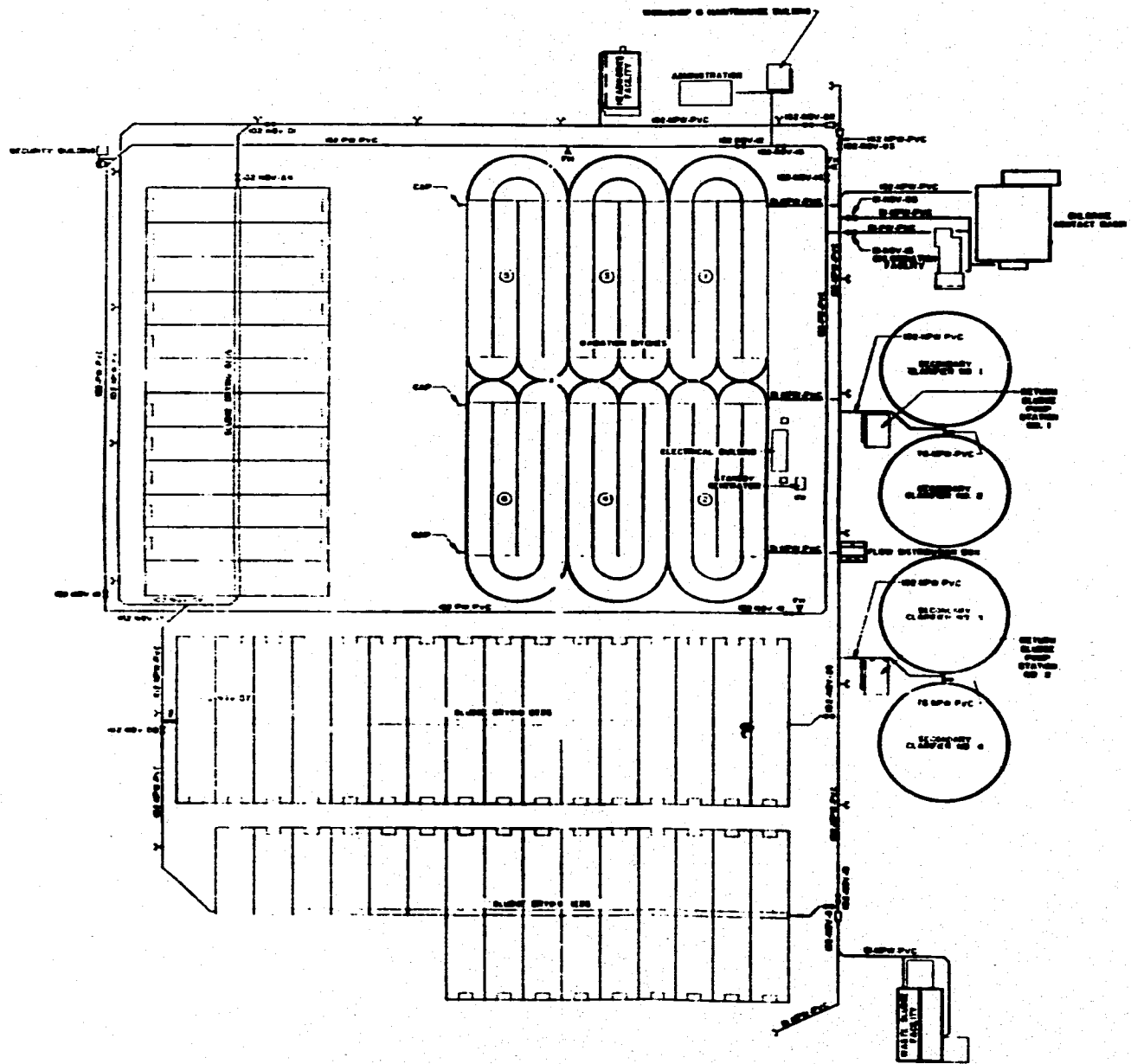
SLUDGE DRYING BEDS



SECONDARY CLARIFIERS

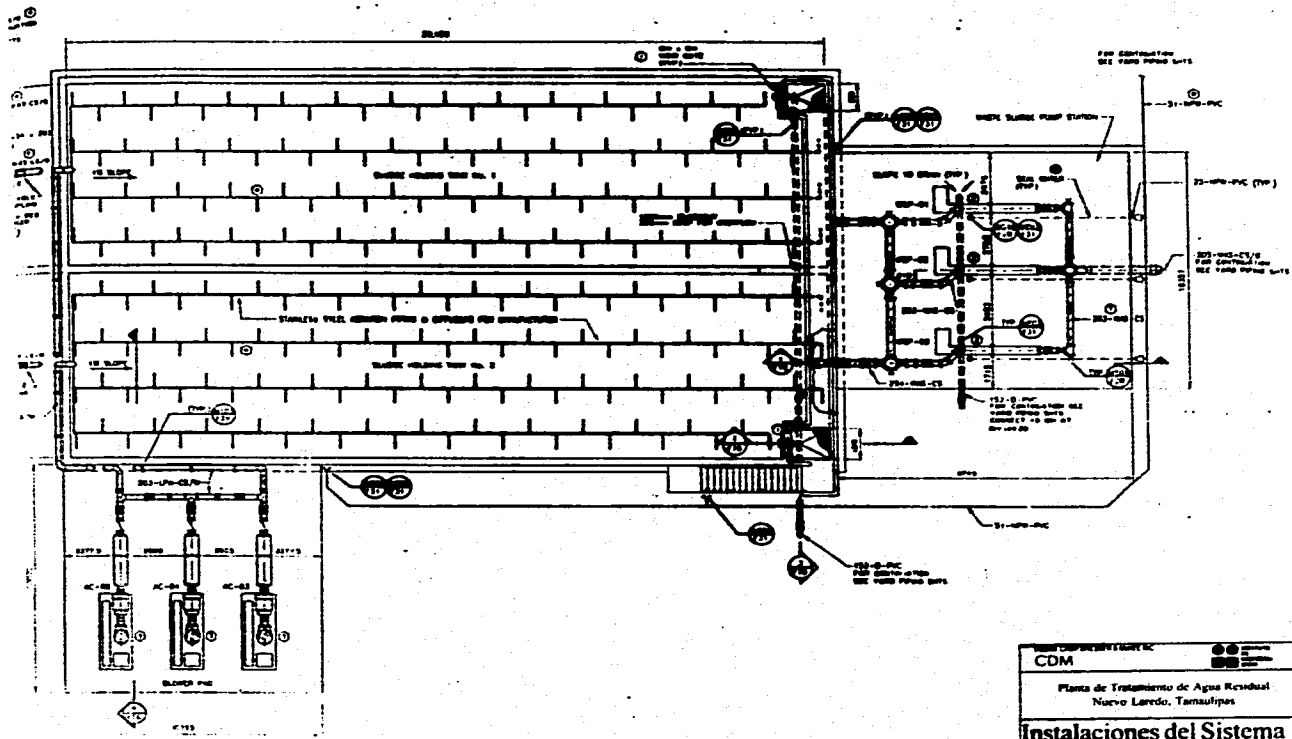
800-040-02 TO WASTEWATER FACILITY  
800-040-03 TO SAND COLLECTION PUMP STATION

CDM Planta de Tratamiento de Agua Residual Nuevo Laredo, Tamaulipas
<h3>Diagrama de Flujo</h3> <h3>Fase Sólida</h3>



CDM
Planta de Tratamiento de Agua Residual Nuevo Laredo, Tamaulipas
<b>Sistema de Agua          Potable y Tratada</b>

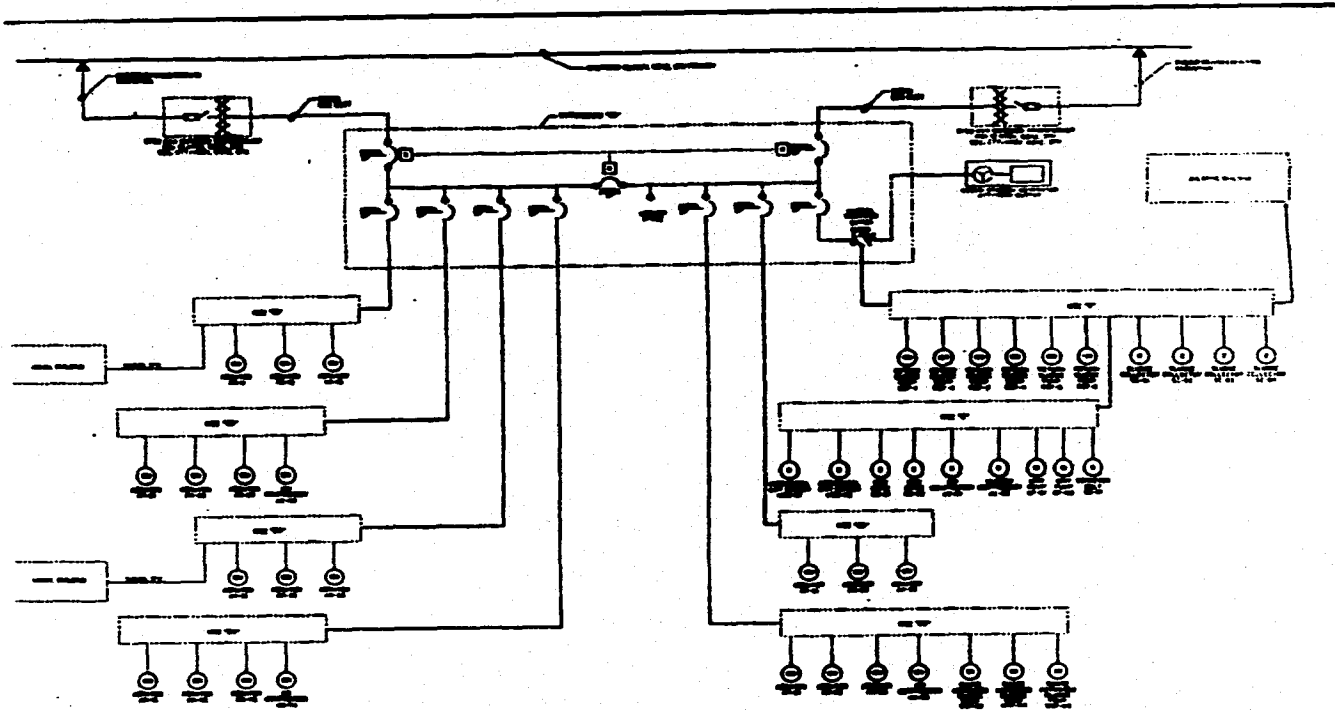




ESTACION DE BOMBEO







<small>INGENIERIA CONSULTORIA E INGENIERIA S.C.</small> <b>CDM</b>	<small>PROYECTO</small> <small>CONSTRUCCION</small>
Planta de Tratamiento de Agua Residual Nuevo Laredo, Tamaulipas	
<b>Diagrama Unifilar</b> <b>Sistema de Distribución</b>	

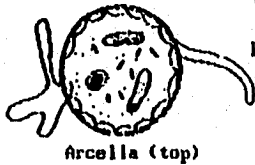
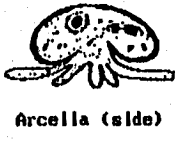
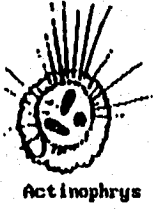
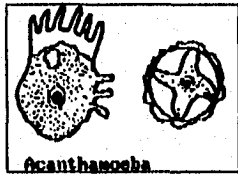
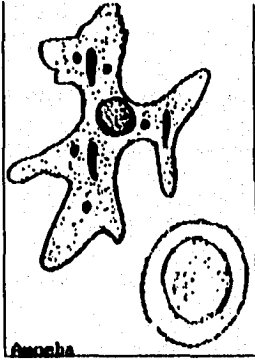
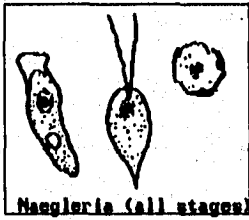
---

**ANEXO C**

**MICROORGANISMOS EN LODOS ACTIVADOS**

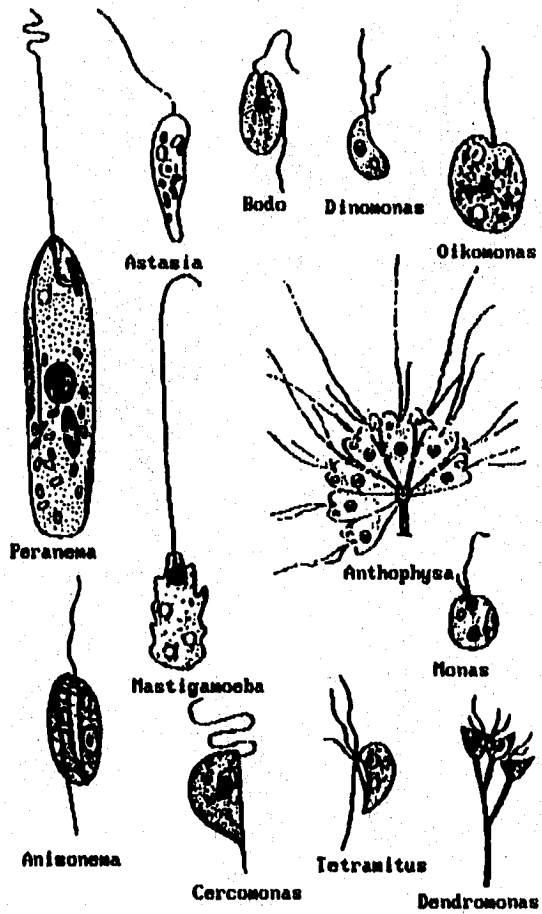
---

**ANEXO C1**  
**SARCODINAS**



**ANEXO C2**

**FLAGELADOS 1**



**ANEXO C2 (continuación)**

**FLAGELADOS 2**



**Pteromonas**



**Lobomonas**



**Trachelomonas**



**Haematococcus**



**Phacus**



**Chromulina**



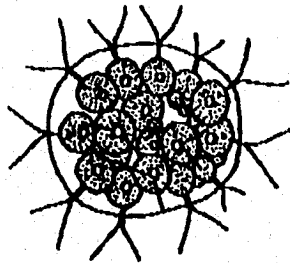
**Cryptomonas**



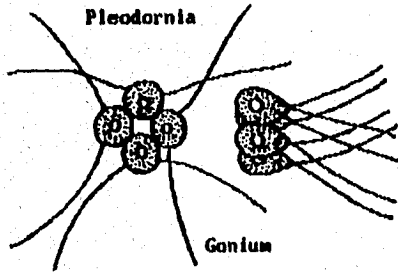
**Ochromonas**

**ANEXO C2 (continuación)**

**FLAGELADOS 3**



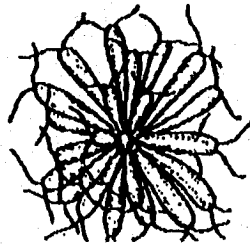
**Pleodorina**



**Gonium**

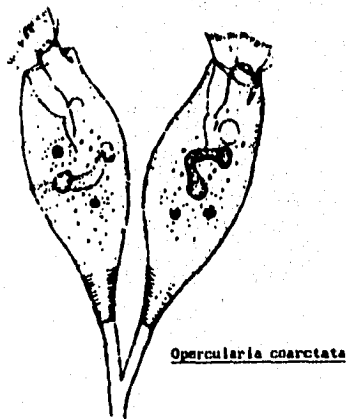
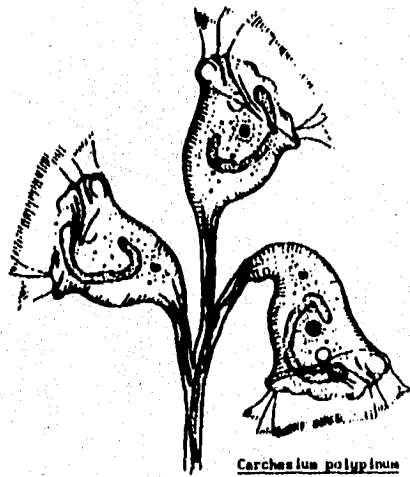
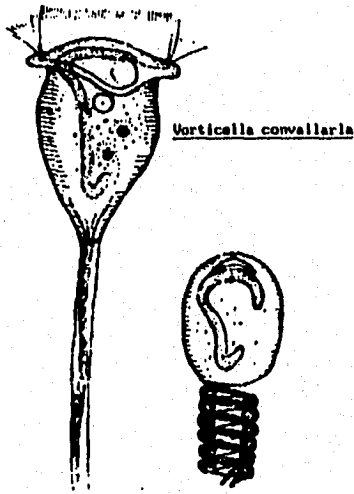


**Dinobryon**



**Synura**

**ANEXO C3**  
**CILIADOS ANCLADOS**





**ANEXO C4**  
**ROTIFEROS**



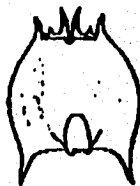
**Epiphanes**



**Philodina**



**Euchlanis**



**Brachionus**



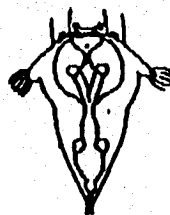
**Monostyla**



**Kellicottia**



**Trichocerca**



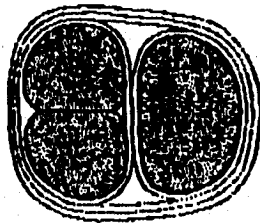
**Synchaeta**



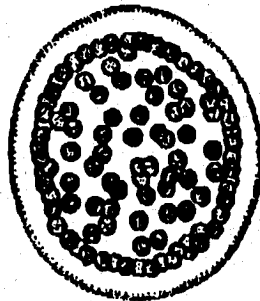
**Filinia**

**ANEXO C5**

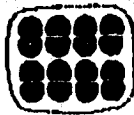
**ALGAS VERDE AZULES: COCOS**



**Anacyclops**



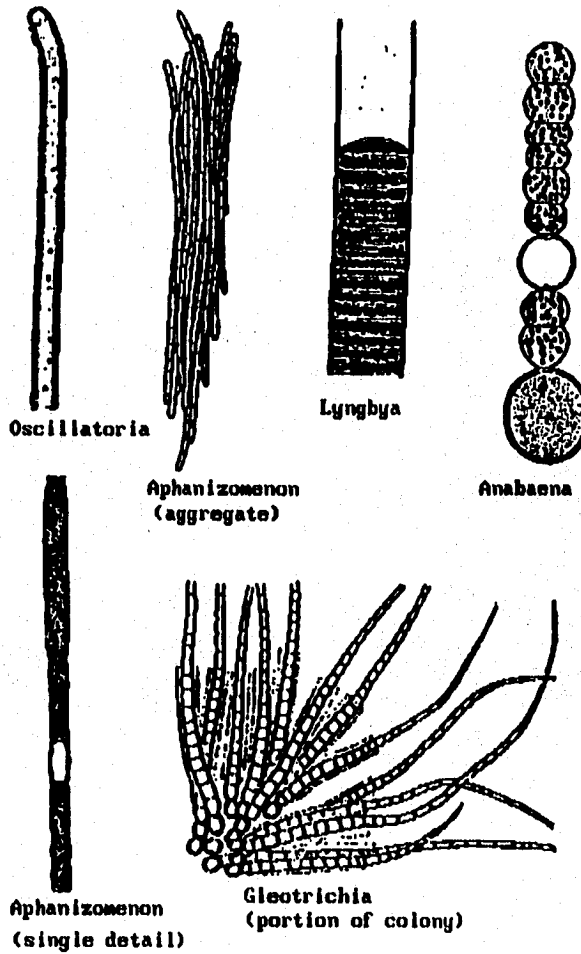
**Gomphosphaeria**



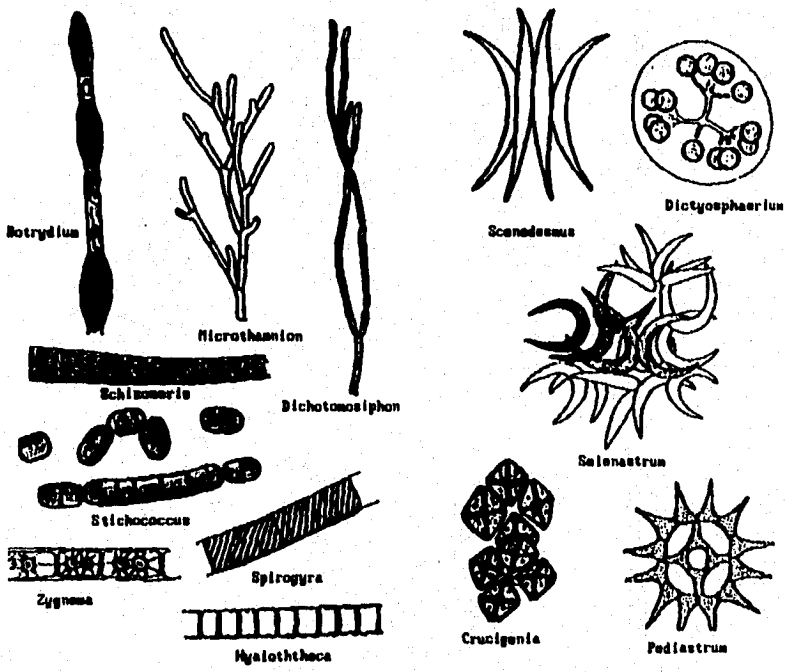
**Acanthocyclops**

**ANEXO C6**

**ALGAS VERDE AZULES: FILAMENTOSAS**



**ANEXO C7**  
**ALGAS VERDES**



---

**ANEXO D**

**MODELO No. 1 DE LODOS ACTIVADOS  
IAWPRC TASK GROUP ON MATHEMATICAL MODELLING FOR DESIGN  
AND OPERATION OF BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT**

---

Muchos modelos matemáticos para lodos activados habían sido propuestos antes de que fuera realizado el Modelo No. 1 de Lodos Activados por la IAWPRC Task Group on Mathematical Modelling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment (1987). Pero ninguno de los modelos anteriores alcanzó una aceptación en la práctica, excepto aquellos trabajos simplificados los cuales estaban definidos para procesos en estado estacionario y de mezcla completa.

El modelo No. 1 de Lodos Activados, es una síntesis de varias experiencias en Europa, Norteamérica, Sudáfrica y Japón. Este modelo permite la simulación dinámica de la mayoría de las variantes de lodos activados, incluyendo degradación de materia orgánica, nitrificación, desnitrificación e inclusive composición de la biomasa (e.g. abultamiento).

Las principales características de este modelo son:

- Representa la materia carbonácea tanto biomasa como sustrato en términos de la DQO.
- Toma por separado el comportamiento de la materia carbonácea sin contener nitrógeno y de nitrógeno orgánico.
- Contabilización por hidrólisis de nitrógeno orgánico a nitrógeno amoniacal.
- Hidrólisis de orgánicos de lenta biodegradación para producir especies realmente degradables pero asumiendo que no utilizan OD en esta reacción.
- El decaimiento de la biomasa trae como resultado la formación de DQO de lenta biodegradabilidad.
- No se adopta el concepto del co-metabolismo y actividad pos-tratamiento.
- Asume que la materia rápidamente biodegradable se encuentra disuelta y que la materia de lenta biodegradabilidad se encuentra suspendida.

Este modelo se ha convertido en una herramienta muy útil para un amplio campo de investigación, diseño y control de sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales. La tabla siguiente muestra el Modelo de Lodos Activados No.1 que está expresado en una matriz de la estequiometría y cinética del proceso para la oxidación de carbono, nitrificación y desnitrificación.

El Modelo No. 2 de Lodos Activados es introducido como un desarrollo adicional del Modelo No.1. El Modelo No. 2 introduce el fenómeno de acumulación de organismos por fósforo y permite simular el comportamiento de sistemas de lodos activados con remoción de nutrientes. Sin embargo, el modelo aún no ha sido calibrado o verificado en un gran número de aplicaciones reales (Henze, 1995).

**ANEXO E**

**DETERMINACIÓN DE LA ADICIÓN DE NUTRIENTES  
PARA CORREGIR UNA DEFICIENCIA**

Una deficiencia de nutrientes puede causar algunas veces un problema de abultamiento de filamentosos. El siguiente ejemplo muestra como saber si hay una deficiencia de nutrientes, y como calcular la cantidad de nutrientes a adicionar para corregir este problema. Una vez que la tasa de alimentación es determinada (en kg/día), los químicos deben alimentarse en el influente del tratamiento secundario, preferentemente en proporción al flujo.

Ejemplo A. Calculo de la cantidad de nutrientes a adicionar para corregir una deficiencia de nutrientes

Datos proporcionados:

Influente	DBO <sub>5</sub> , mg/l	170
	TKN, mg/l	4.5
	P, mg/l	1.0
	Fe, mg/l	0.5
	Q, l/s	1,360
Relaciones sugeridas por peso	DBO <sub>5</sub> /N	100/5 = 20
	DBO <sub>5</sub> /P	100/1 = 100
	DBO <sub>5</sub> /Fe	100/0.5 = 200
Relaciones de peso atómico	NH <sub>3</sub> /N	17/14 = 1.2
	Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> /P	164/31 = 5.3
	FeCl <sub>3</sub> /Fe	162.5/56 = 2.9

Solución:

Paso 1. Calcular la cantidad de nutrientes necesarios para conseguir la relaciones sugeridas.

$$\text{Nutriente necesario, mg/l} = \frac{\text{DBO}_5, \text{ mg/l}}{\text{Relacion sugerida en peso, DBO}_5 / \text{nutriente}}$$

$$N_{\text{necesario, mg/l}} = \frac{\text{DBO}_5, \text{ mg/l}}{\text{Relacion DBO}_5 / \text{N}}$$

$$N_{\text{necesario}} = \frac{170}{20} = 8.5 \text{ mg/l}$$

$$P_{\text{necesario, mg/l}} = \frac{\text{DBO}_5, \text{ mg/l}}{\text{Relacion DBO}_5 / \text{P}}$$

$$P_{\text{necesario}} = \frac{170}{100} = 1.7 \text{ mg/l}$$



$$Fe_{necesario}, \text{ mg/l} = \frac{DBO_5, \text{ mg/l}}{\text{Relacion } DBO_5 / P}$$

$$Fe_{necesario} = \frac{170}{200} = 0.85 \text{ mg/l}$$

Paso 2. Calcular la diferencia entre la disponibilidad de nutrientes y la necesidad de nutrientes. Si el resultado es cero o negativo, no hay deficiencia de nutrientes y por lo tanto no será necesario adicionar.

$$\text{Nutriente en deficiencia, mg/l} = \left( \text{nutriente}_{necesario}, \text{ mg/l} \right) - \left( \text{nutriente}_{disponible}, \text{ mg/l} \right)$$

$$N_{deficiencia}, \text{ mg/l} = N_{necesario} - TKN$$

$$N_{deficiencia} = 8.5 - 4.5 = 4.0 \text{ mg/l}$$

$$P_{deficiencia}, \text{ mg/l} = P_{necesario} - P_{disponible}$$

$$P_{deficiencia} = 1.7 - 1.0 = 0.7 \text{ mg/l}$$

$$Fe_{deficiencia}, \text{ mg/l} = Fe_{necesario} - Fe_{disponible}$$

$$Fe_{deficiencia} = 0.85 - 0.5 = 0.35 \text{ mg/l}$$

Paso 3. Calcular el peso de nutrientes que son necesarios adicionar.

$$\text{Nutriente a adicionar, kg/día} = \text{Nutriente en deficiencia} \times \text{Flujo}$$

$$N_{a\text{ adicionar}} = (4.0 \text{ mg/l}) \times (1,360 \text{ l/s}) \times (0.0864) = 470 \text{ kg/día}$$

$$P_{a\text{ adicionar}} = (0.7 \text{ mg/l}) \times (1,360 \text{ l/s}) \times (0.0864) = 82 \text{ kg/día}$$

$$Fe_{a\text{ adicionar}} = (0.35 \text{ mg/l}) \times (1,360 \text{ l/s}) \times (0.0864) = 41 \text{ kg/día}$$

Paso 4. Calcular el peso de compuesto químico comercial a adicionar por día, por deficiencia de nutriente.

$$\text{Compuesto químico comercial, kg / día} = \frac{(\text{nutriente a adicionar, kg / día}) \times (\text{relacion de peso atomico}) (100\%)}{\text{Concentracion del compuesto, \%}}$$

Para el amoniaco ----, la solución es de grado comercial con concentración de 80%.

$$\text{Amoniaco, kg / día} = \frac{(\text{N}_{\text{a adicional, kg / día}}) (1.2 \text{ NH}_3 / \text{N}) (100\%)}{\text{Concentracion en \% de NH}_3}$$

$$\text{Amoniaco, kg / día} = \frac{(470) (1.2) (100)}{80} = 705$$

Para el fosfato de sodio, la solución de grado comercial, es de una concentración del 75 %.

$$\text{Fosfato de sodio, kg / día} = \frac{(\text{P}_{\text{a adicional, kg / día}}) (5.3 \text{ Na}_3\text{PO}_4 / \text{P}) (100\%)}{\text{Concentracion en \% de Na}_3\text{PO}_4}$$

$$\text{Fosfato de sodio, kg / día} = \frac{(82) (5.3) (100)}{75} = 579$$

Para el cloruro férrico, la solución de grado comercial es de 39 % de concentración.

$$\text{Cloruro ferrico, kg / día} = \frac{(\text{Fe}_{\text{a adicional, kg / día}}) (5.3 \text{ FeCl}_3 / \text{Fe}) (100\%)}{\text{Concentracion en \% de FeCl}_3}$$

$$\text{Cloruro ferrico, kg / día} = \frac{(41) (5.3) (100)}{39} = 557$$

---

**ANEXO F**

**DETERMINACIÓN DE LA ADICIÓN DE CLORO PARA EL  
CONTROL DEL ABULTAMIENTO DE FILAMENTOSOS**

---

La cloración del lodo de recirculación o el licor mezclado es la una forma de controlar los microorganismos filamentosos que causan un abultamiento. Sin embargo, el cloro solo trata el síntoma y no trata la causa del problema. La cloración tiene un cierto riesgo, por lo que debe seguirse muy de cerca.

El cloro tiene un efecto drástico sobre todos los microorganismos participantes, por ello debe alimentarse una dosis que no afecte a los microorganismos benéficos. El cloro debe aplicarse directamente en la línea de recirculación dentro de un punto de excelente mezcla.

La dosis de cloro debe realizarse a un nivel bajo (0.9 a 1.5 kg Cl<sub>2</sub>/día/490 kg de SSVLM) a un IVL objetivo que será seleccionado como un límite aceptable máximo. Esto es posible para requerir de 2.5 a 5 kg Cl<sub>2</sub>/día/490 kg de SSVLM). Una vez adicionado el cloro, el proceso debe ser seguido muy de cerca.

Ejemplo B. Calculo de la cantidad de cloro a adicionar para el control de abultamiento por filamentosos.

Datos proporcionados:

SSVLM en el tanque de aireación, mg/l	2,000
Volumen del tanque de aireación, m <sup>3</sup>	17,850.7
Dosis de cloro recomendada, kg Cl <sub>2</sub> /día/490 kg de SSVLM	3.5

Solución

Paso 1. Calcular el peso de los sólidos volátiles bajo aireación.

$$\begin{aligned} \text{SSVLM, kg} &= (\text{SSVLM, mg/l}) \times (\text{V, m}^3) / (1,000) \\ &= (2,000) \times (17,850.7) / (1,000) = 35,701 \text{ kg} \end{aligned}$$

Paso 2. Calcular la tasa de alimentación de cloro.

$$\text{Tasa de alimentación de Cl}_2, \text{ kg/día} = \frac{(\text{Cl}_2 \text{ dosis, kg/día})(\text{SSVLM, kg})}{490 \text{ kg SSVLM}}$$

$$= \frac{(3.5)(35,701)}{490} = 255 \text{ kg/día}$$

---

**ANEXO G**

**DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE COAGULANTE A ADICIONAR  
PARA AYUDAR A SEDIMENTAR EL LICOR MEZCLADO**

---

Una gran variedad de químicos se utilizan para ayudar a los lodos activados a sedimentar. Cada químico tiene sus ventajas y desventajas. Antes de seleccionar un químico, primero correr un banco de pruebas de jarras en el laboratorio y comparar las ventajas y desventajas de cada una, incluyendo costos por unidad de volumen tratado por cada químico en su dosis óptima. Estos bancos de prueba servirán para identificar la dosis a aplicar.

En algunas áreas de baja alcalinidad de aguas residuales, suficiente alumbre o cloruro férrico no pueden adicionarse en cierta dosis, ya que afectan un cambio en la sedimentabilidad del lodo. En estos casos, la aplicación a un tasa que reduzca el pH no más bajo de 6.5 en varios días puede llevar a los mismos resultados. La más baja tasa de alimentación da como resultado una inapropiada sedimentación. Una vez que la tasa de alimentación de químico es peso o volumen por día es calculada, el coagulante debe alimentarse dentro del licor mezclado, preferentemente en proporción al flujo. Los ajustes en la tasa de alimentación deben realizarse en base a la eficiencia actual.

Los siguientes ejemplos muestran como calcular la tasa de alimentación para algunos químicos comunes para ayudar a la sedimentación. Estas dosis son para ejemplos que no significa que sean guías generales de uso. La dosis que se aplique puede variar ampliamente y por tanto debe ser probada.

Ejemplo C. Cálculo de la cantidad del químico a adicionar a aplicar en el licor mezclado.

Datos proporcionados:

Flujo de la planta Q, l/s	1,360
Flujo de recirculación Qr, l/s	1,020
SSVLM en el tanque de aireación, mg/l	2,000
Dosis en los resultados de los bancos de prueba	
Alumbre (49 %, 1.33 g/cm <sup>3</sup> ), mg/l	50
Cloruro férrico (30 %, 1.29 g/cm <sup>3</sup> ), mg/l	80
Aluminato de sodio (38 %, 1.45 g/cm <sup>3</sup> ), mg/l	20

Paso 1. Cálculo de la tasa de flujo del licor mezclado.

$$\begin{aligned} \text{Flujo en el licor mezclado (Q+R), l/s} &= (Q, \text{ l/s}) + (R, \text{ l/s}) \\ &= 1,360 + 1,020 \\ &= 2,380 \text{ l/s} \end{aligned}$$

Paso 2. Cálculo del peso del químico.

$$\text{Químico necesario, kg/día} = \left( \text{Flujo del licor mezclado, l/s} \right) \left( \text{Dosis del químico, mg/l} \right) (0.0864)$$

$$\text{Alumbre necesario, kg/día} = \left( \text{Flujo del licor mezclado, l/s} \right) \left( \text{Dosis de alumbre, mg/l} \right) (0.0864)$$

$$\text{Alumbre necesario, kg/día} = (2,380)(50)(0.0864) = 10,282$$

$$\text{FeCl}_3 \text{ necesario, kg/día} = \left( \text{Flujo del licor mezclado, l/s} \right) \left( \text{Dosis de FeCl}_3 \text{, mg/l} \right) (0.0864)$$

$$\text{FeCl}_3 \text{ necesario, kg/día} = (2,380)(80)(0.0864) = 16,451$$

$$\text{Aluminato necesario, kg/día} = \left( \text{Flujo del licor mezclado, l/s} \right) \left( \text{Dosis de aluminato, mg/l} \right) (0.0864)$$

$$\text{Aluminato necesario, kg/día} = (2,380)(20)(0.0864) = 4,113$$

Paso 3. Cálculo de la tasa de alimentación de químicos.

$$\text{Tasa de alimentación del químico, l/d} = \frac{\text{Químico necesario, kg/día}}{\text{densidad del químico, g/cm}^3 = \text{kg/l}}$$

$$\text{Tasa de alimentación de alumbre, l/d} = \frac{10,282}{1.33} = 7,730 \text{ l/d}$$

$$\text{Tasa de alimentación de FeCl}_3 \text{, l/d} = \frac{16,451}{1.29} = 12,753 \text{ l/d}$$

$$\text{Tasa de alimentación de aluminato, l/d} = \frac{1,585}{1.45} = 1,093 \text{ l/d}$$

---

**ANEXO H**

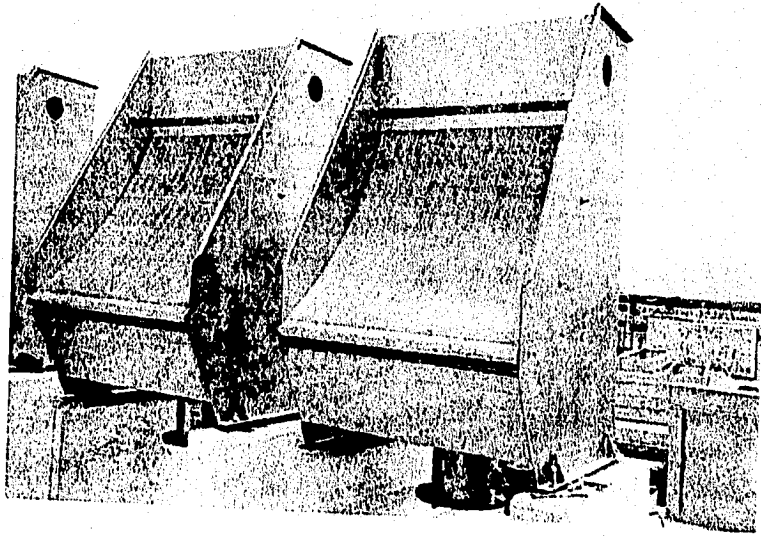
**FOTOS**

---

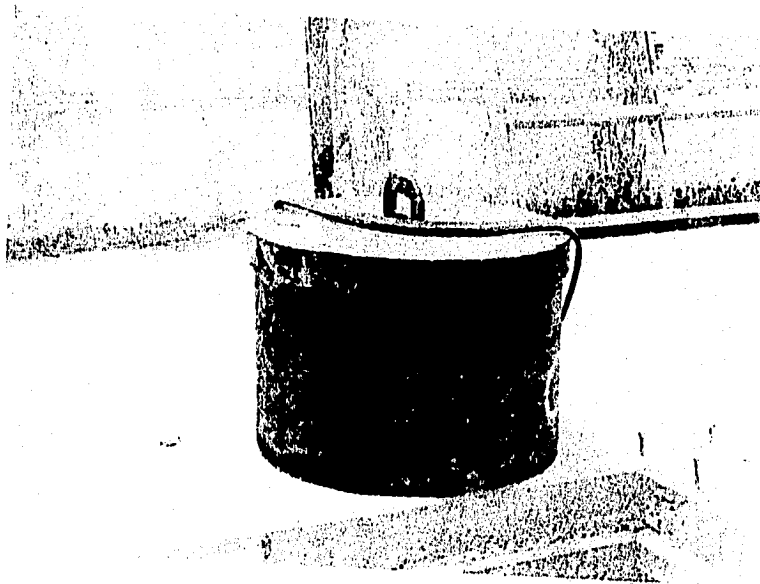


**ANEXO H1**

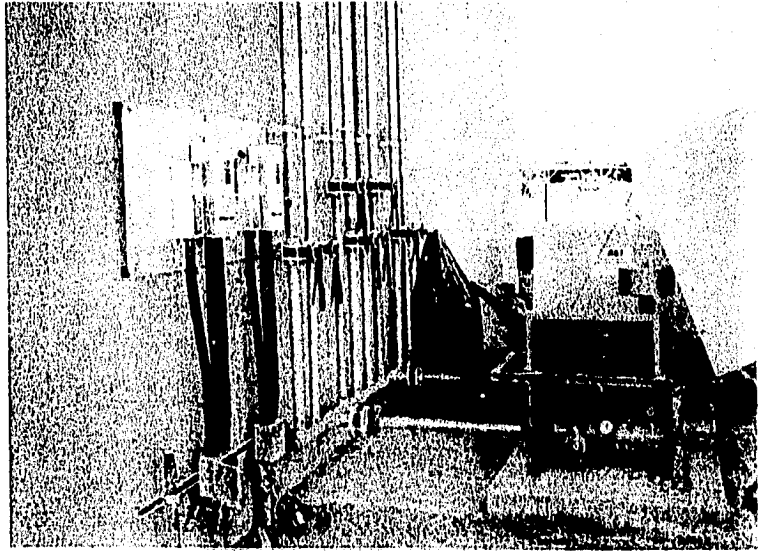
**EQUIPOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE NUEVO LAREDO**



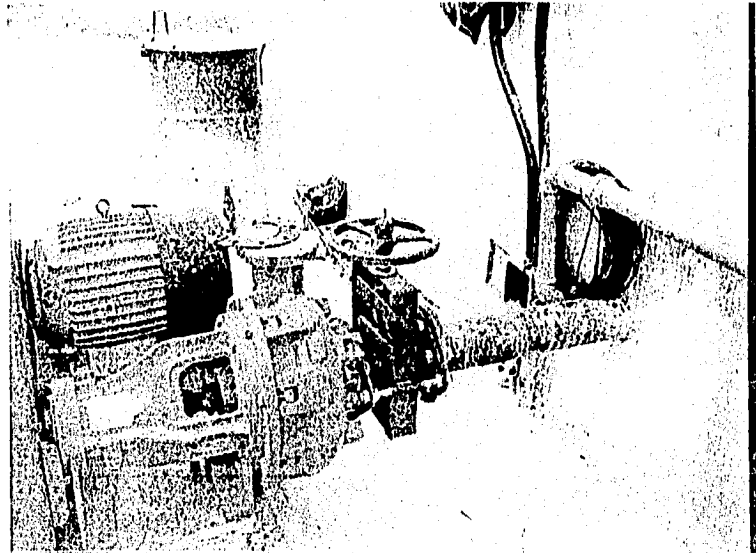
*Cribas estáticas auto-limpiantes*



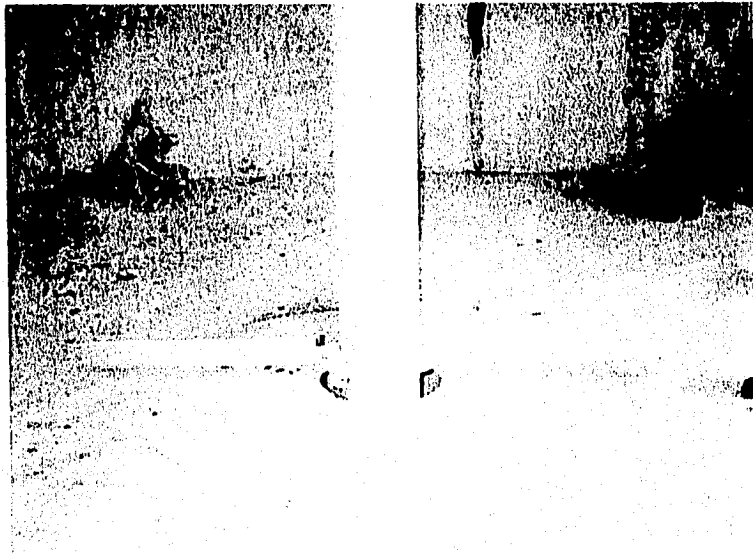
*Tapón con sella de neopreno*



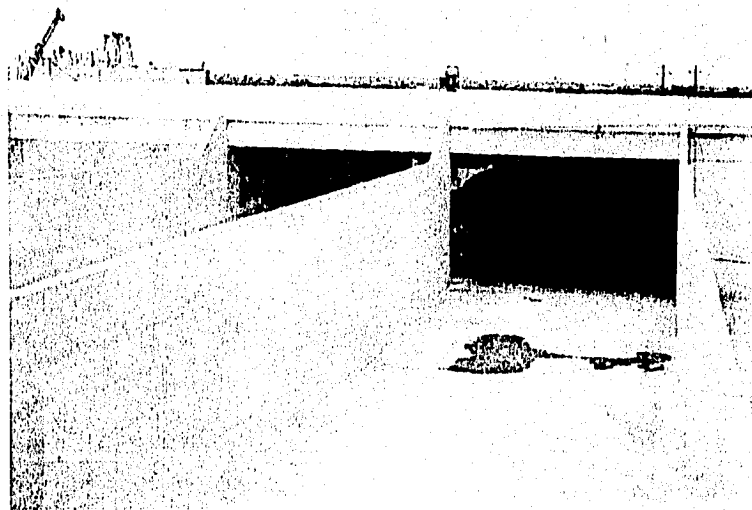
Sopladores de aire



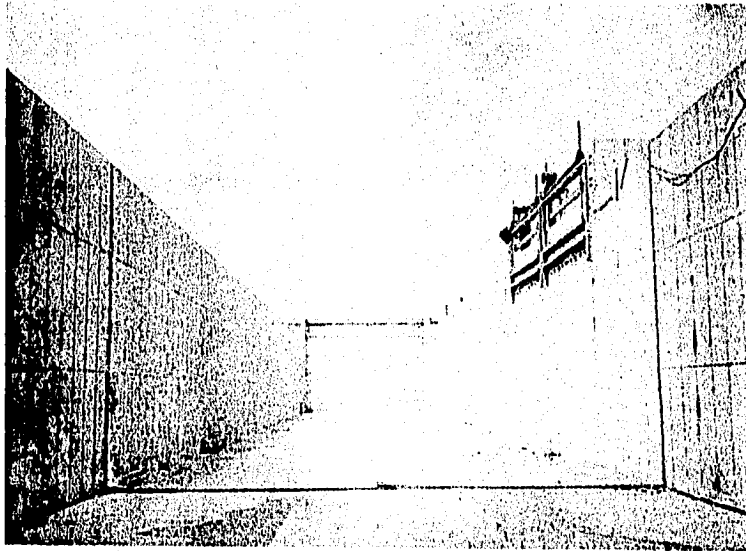
Bomba de arena



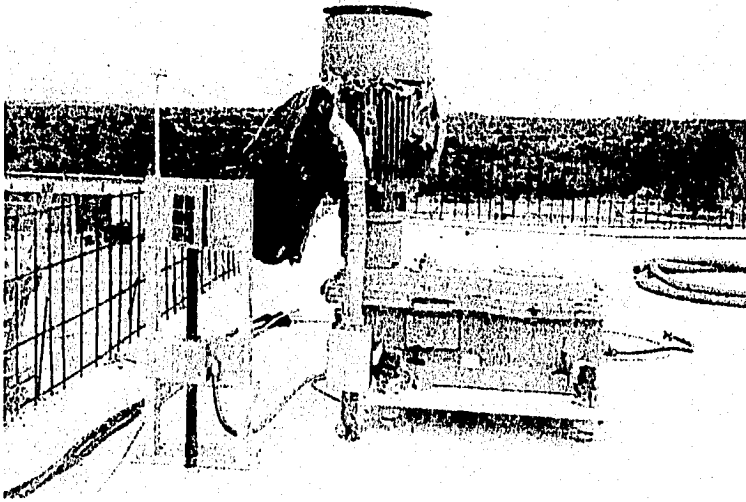
Desarenador



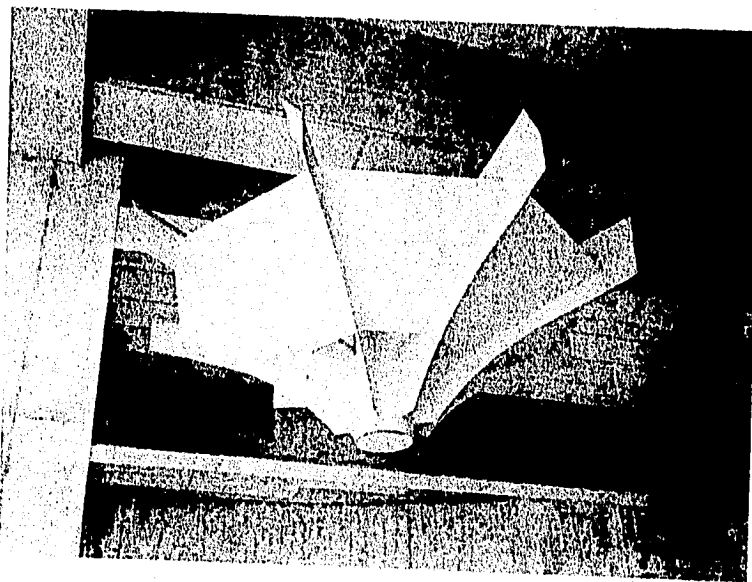
Zanja de oxidación



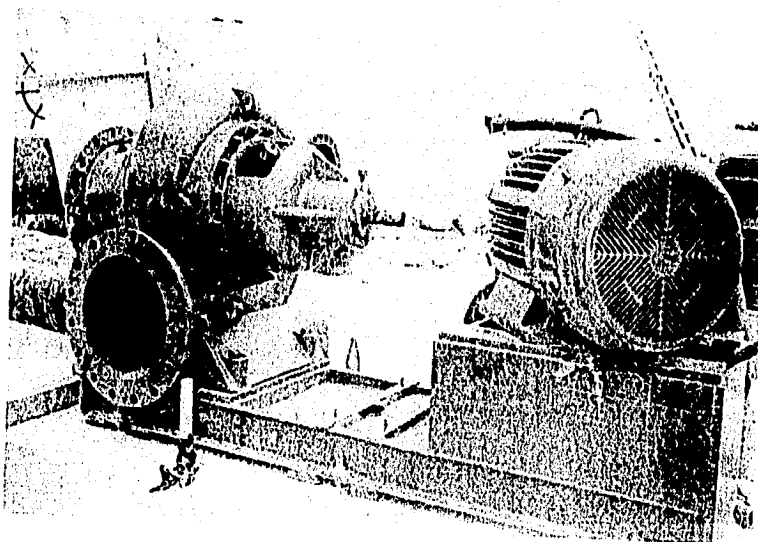
Interior de zanja de oxidación



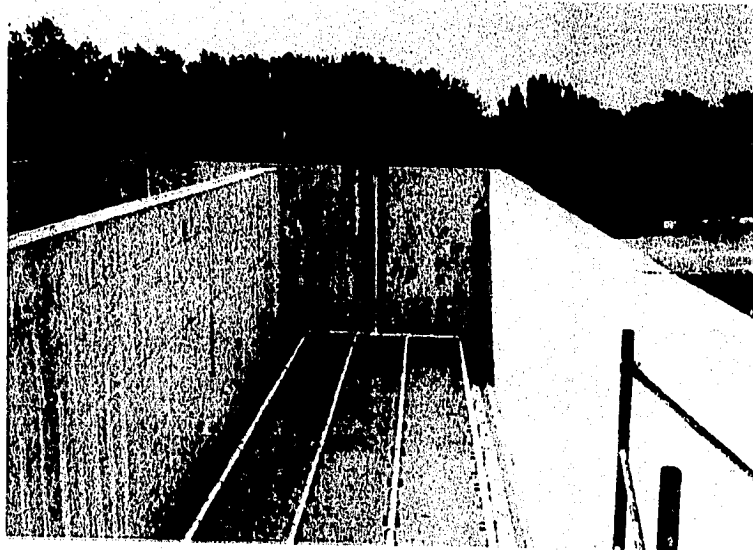
Aireador mecánico superficial



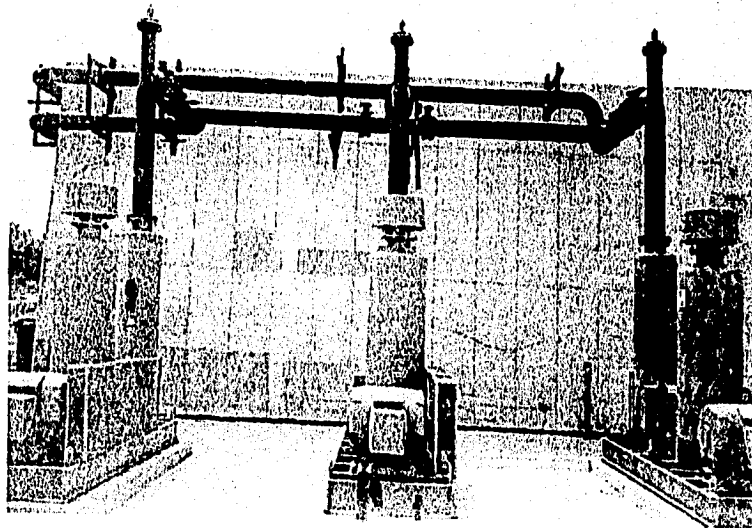
Impulsor de aireador mecánico



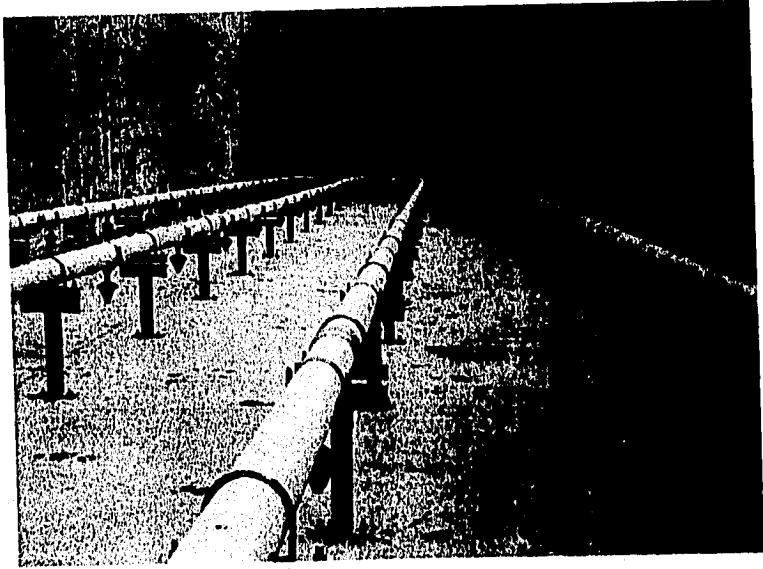
Bomba de recirculación



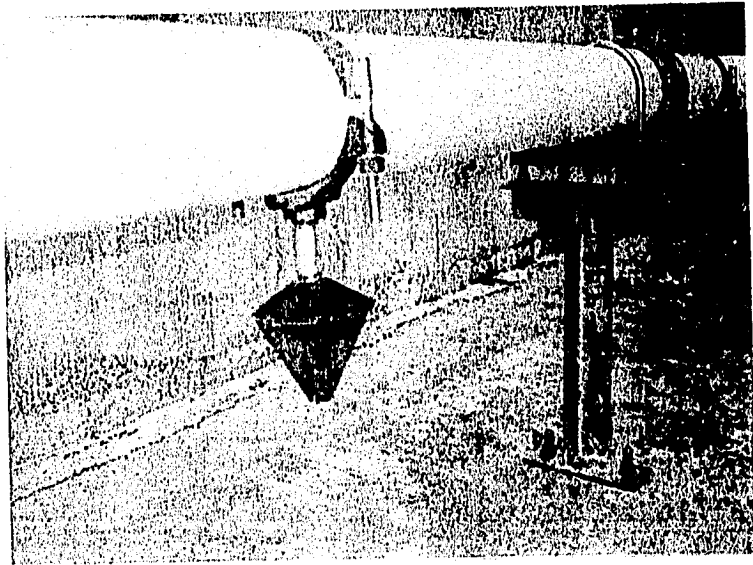
Tanque de retención



Sopladores de aire para lodos

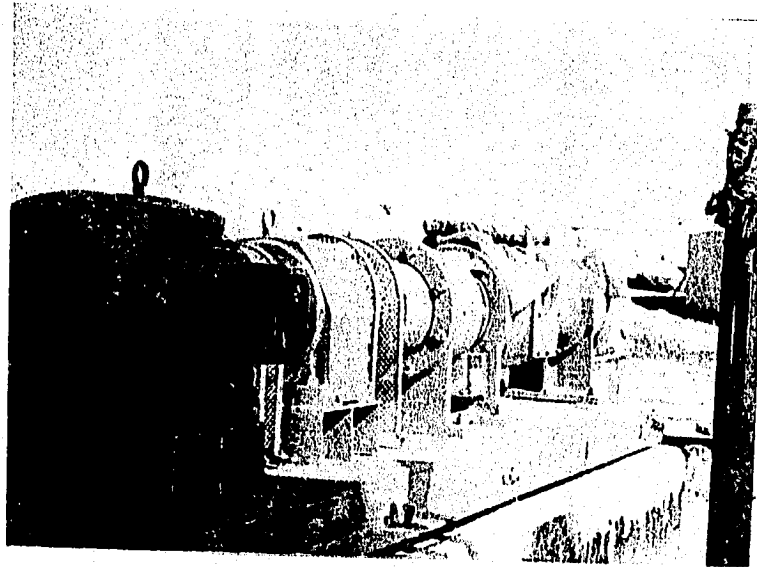


Sistema de suministro de aire

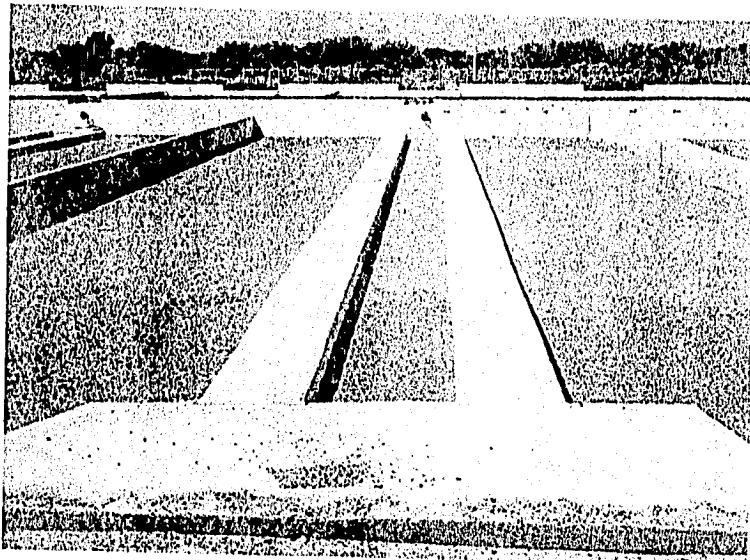


Detalle de un difusor

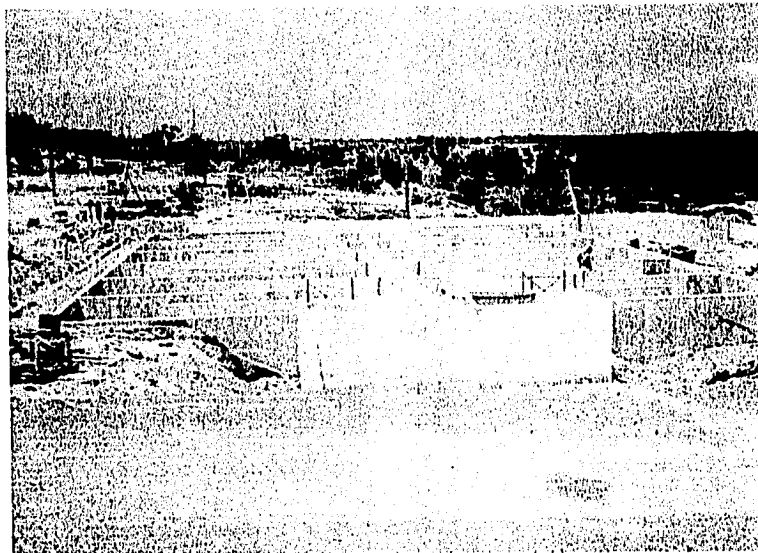




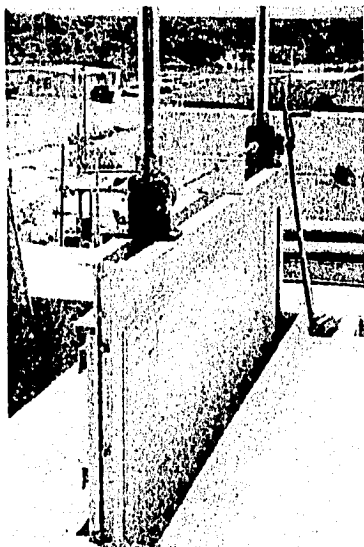
Bombas de purga



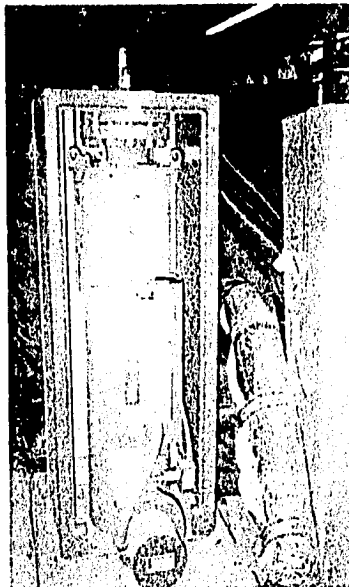
Lecho de secado



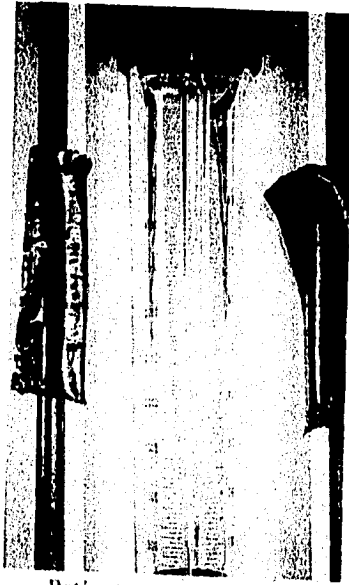
Tanque de contacto con cloro



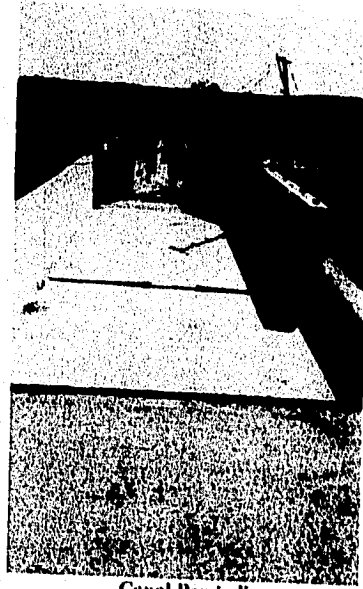
Compuerta deslizando



Evaporador de cloro



**Rotámetro montado en clorador**



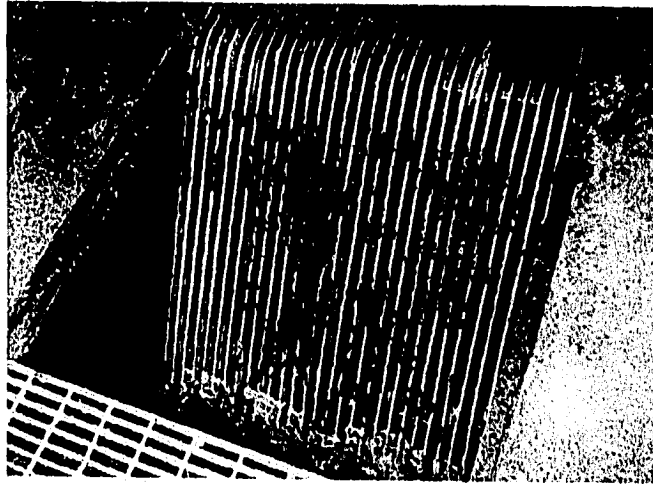
**Canal Parshall**

---

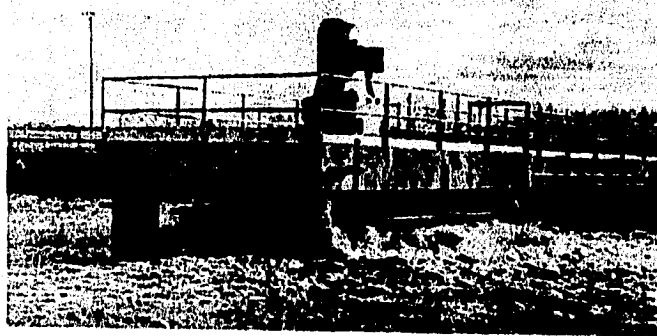
**ANEXO H2**

**EQUIPOS VARIOS EN OPERACIÓN**

---



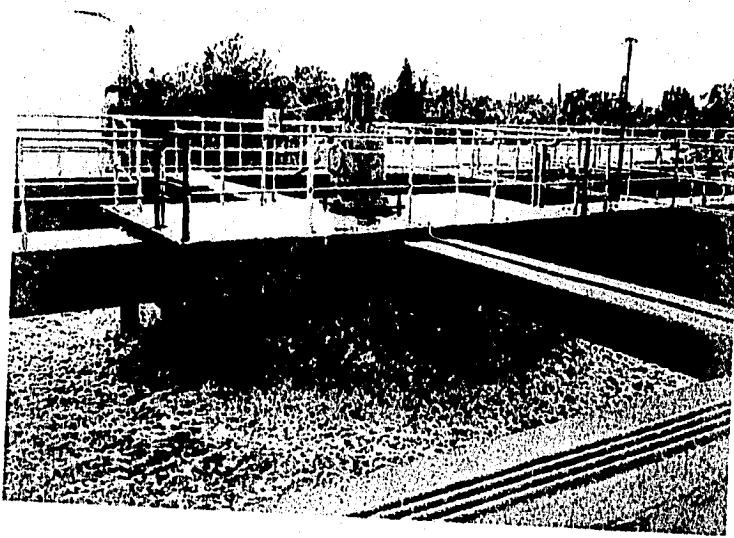
**Rejilla de barras manual**



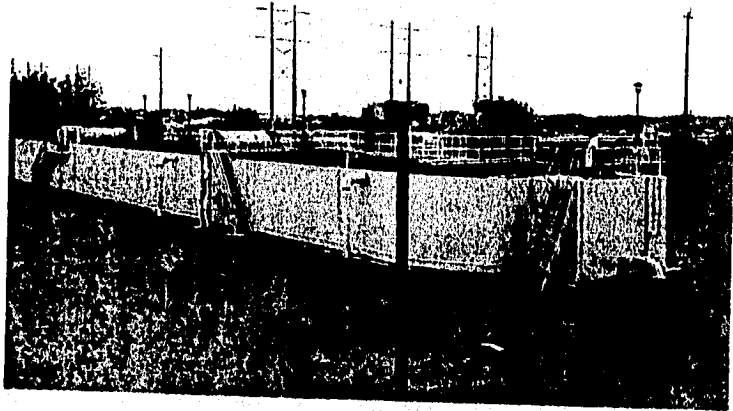
**Alredar mecánico de superficie**



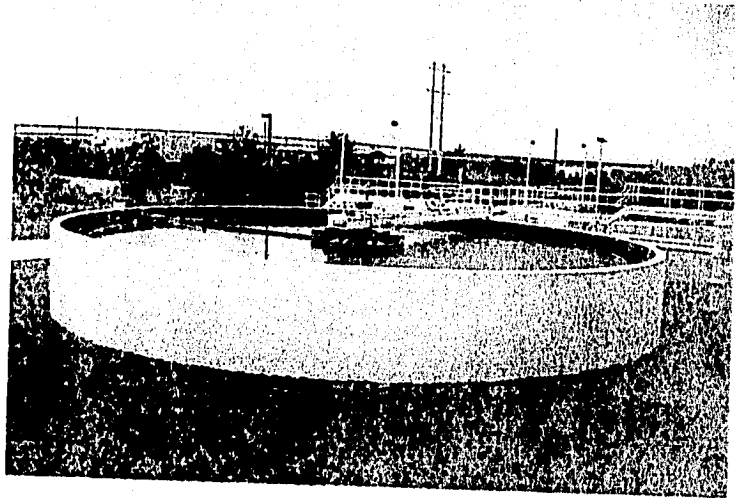
Analizador de oxígeno disuelto (OD)



Reactor aerobio



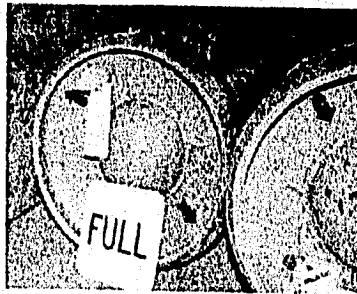
Zanja de oxidación



Clarificador secundario



**Análisis al microscopio**



**Cilindros de cloro de una tonelada**





**Rejilla de barras mecánica**