



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL PARA UNA PLANTA DE  
ENVASADO DE BEBIDAS POR MEDIO DE LODOS ACTIVADOS**

**LUIS FERNANDO GALINDO RODAS**  
ASESORADO POR EL  
**INGENIERO QUÍMICO MARIO RENÉ FONG ESCOBAR**

**GUATEMALA, MARZO DE 2004**

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL PARA UNA PLANTA DE  
ENVASADO DE BEBIDAS POR MEDIO DE LODOS ACTIVADOS**

TRABAJO DE GRADUACION PRESENTADA A JUNTA  
DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA POR

**LUIS FERNANDO GALINDO RODAS**

ASESORADO POR EL

**INGENIERO QUÍMICO MARIO RENÉ FONG ESCOBAR**

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, MARZO DE 2004

## FACULTAD DE INGENIERÍA



### NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

### TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing.	Gerberth René Miranda Barrios
EXAMINADOR	Ing.	Manuel Gilberto Galvan
EXAMINADOR	Ing.	Héctor Ruiz Godoy
EXAMINADOR	Ing.	William Álvarez
SECRETARIA	Inga.	Gilda Marina Castellanos de Illescas

**HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

**TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL PARA UNA PLANTA DE ENVASADO DE BEBIDAS POR MEDIO DE LODOS ACTIVADOS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Química de la Facultad de Ingeniería con fecha 24 de octubre del 2003.

**LUIS FERNANDO GALINDO RODAS**

**Guatemala, 7 de noviembre del 2003.**

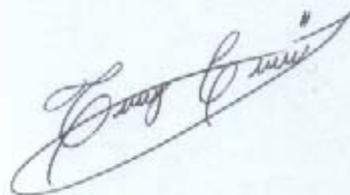
**Ingeniero  
Julio Rivera  
Director de la Escuela de Ingeniería Química  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
Presente.**

**Estimado Ingeniero Rivera:**

**Atentamente me dirijo a usted, para informarle que el informe final del trabajo de graduación del estudiante universitario LUIS FERNANDO GALINDO RODAS, con carne: 90-12609, titulado, "TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL DE UNA PLANTA DE ENVASADO DE BEBIDAS POR MEDIO DE LODOS ACTIVADOS", que fue revisado por mi persona.**

**Espero que el mismo llene los requisitos que la Escuela de Ingeniería Química requiere, por lo cual lo remito con usted para que se le asigne un revisor y pueda continuar con los trámites respectivos.**

**Agradeciendo su atención a la presente, le saluda atentamente.**



**Mario René Fong Escobar.  
Ingeniero Químico.  
Colegiado 787.**



Guatemala, 25 de noviembre de 2,003.

Ingeniero  
Julio Alberto Rivera Palacios  
Director Escuela Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Presente.

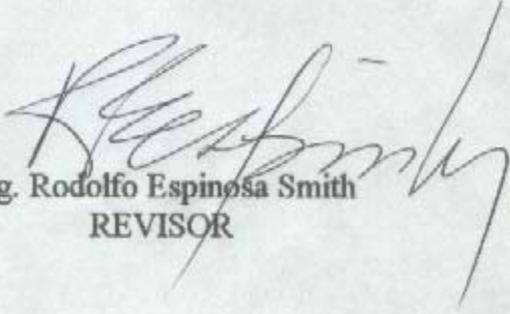
Estimado Ingeniero Rivera.

Por este medio hago de su conocimiento que he revisado el trabajo de Graduación del estudiante Luis Fernando Galindo Rodas titulado: TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL PARA UNA PLANTA DE ENVASADO DE BEBIDAS POR MEDIO DE LODOS ACTIVADOS, considero que el presente trabajo de graduación llena los requisitos por lo que queda aprobado.

Sin otro particular y agradeciéndole la atención que se sirva dar a la presente, le saluda.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

  
Ing. Rodolfo Espinosa Smith  
REVISOR



El Director de la Escuela de Ingeniería Química, Ing. Julio Rivera Palacios, después de conocer el dictamen del Asesor con el Visto Bueno del Jefe de Departamento al trabajo de Graduación del estudiante LUIS FERNANDO GALINDO RODAS titulado: "TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL PARA UNA PLANTA DE ENVASADO DE BEBIDAS POR MEDIO DE LODOS ACTIVADOS", procede a la autorización del mismo.

Ing. Julio Rivera Palacios

DIRECTOR ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

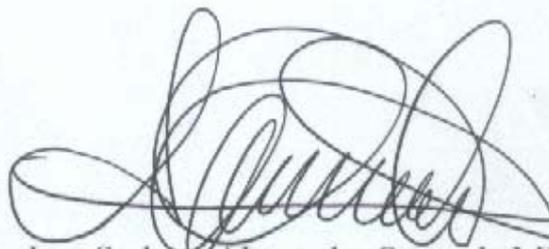


Guatemala, marzo de 2,004.



El Decano de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL PARA UNA PLANTA DE ENVASADO DE BEBIDAS POR MEDIO DE LODOS ACTIVADOS**, presentado por el estudiante universitario **Luis Fernando Galindo Rodas** procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Ing. Sydney Alexander Samuels Milson  
DECANO



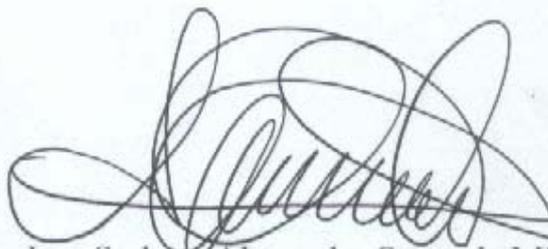
Guatemala, marzo 11 de 2,004

/gdech



El Decano de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL PARA UNA PLANTA DE ENVASADO DE BEBIDAS POR MEDIO DE LODOS ACTIVADOS**, presentado por el estudiante universitario **Luis Fernando Galindo Rodas** procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Ing. Sydney Alexander Samuels Milson  
DECANO



Guatemala, marzo 11 de 2,004

/gdech



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IV
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XIII
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XVIII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Operaciones físicas unitarias.....	2
1.2.1 Cribado.....	2
1.2.1.1 Velocidad de paso entre barrotes.....	3
1.2.1.2 Anchura del canal en la zona de las rejillas.....	3
1.2.1.3 Pérdida de carga a través de una reja.....	4
1.2.2 Desarenado.....	5
1.2.2.1 Determinación de la velocidad.....	6
1.2.2.2 Sección transversal.....	6
1.2.2.3 Longitud del desarenador.....	7
1.2.2.4 Comprobación de la velocidad ascensional.....	8
1.2.3 Decantación primaria.....	9
1.2.3.1 Velocidad ascensional y tiempo de retención.....	9
1.2.3.2 Relaciones dimensionales.....	10
1.2.3.3 Producción de lodos.....	11

1.2.4	Regulación de caudal.....	12
1.2.4.1	Regulación de caudal en línea.....	13
1.2.4.2	Regulación de caudal en derivación.....	13
1.2.4.3	Diseño del regulador de caudal.....	15
1.2.4.3.1	Medición de caudal.....	15
1.2.4.3.2	Canales abiertos.....	15
1.2.4.3.2.1	Instrumentos de medición.....	16
1.2.4.3.3	Sistemas cerrados.....	18
1.2.4.3.4	Localización del regulador de caudal.....	19
1.2.4.3.5	Volumen del tanque de regulación.....	19
1.3	Procesos químicos unitarios.....	19
1.4	Procesos biológicos unitarios.....	20
1.5	Biodegradabilidad de un efluente.....	21
1.6	Objetivo del tratamiento biológico.....	21
1.6.1	Factores que afectan a los microorganismos en el tratamiento biológico.....	23
1.6.1.1	Fuente de energía y carbón.....	23
1.6.1.2	Fuente de nutrientes.....	23
1.6.2	Microorganismos que intervienen en el proceso de degradación biológica.....	24
1.6.2.1	Origen animal.....	24
1.6.2.2	Origen vegetal.....	24
1.6.2.3	Protistas.....	25
1.6.2.4	Bacterias.....	25

2.	TRATAMIENTO BIOLÓGICO.....	27
2.1	Proceso de lodos activados.....	27
2.1.1	Elección del reactor.....	28
2.1.2	Criterios de carga.....	29
2.1.3	Necesidades de transferencia de oxígeno.....	33
2.1.3.1	Transferencia de oxígeno.....	36
2.1.3.2	Técnicas de aireación y potencia a instalar.....	39
2.1.4	Producción de lodo.....	41
2.1.4.1	Recirculación de lodos.....	42
2.1.4.2	Espesamiento de lodos por gravedad.....	43
2.1.4.3	Tratamiento de lodos.....	44
2.1.5	Necesidades de nutrientes.....	45
2.1.6	Control de organismos filamentosos.....	45
2.2	Tipos de procesos y sus modificaciones.....	45
2.3	Control del proceso.....	46
2.3.1	Control del oxígeno disuelto.....	46
2.3.2	Control de la recirculación del lodo activado.....	46
2.3.3	Tasa de utilización de oxígeno.....	47
	RESULTADOS.....	49
	CONCLUSIONES.....	53
	RECOMENDACIONES.....	55
	BIBLIOGRAFÍA.....	56
	APÉNDICE.....	58
	ANEXOS.....	77

## INDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1	Coeficiente $K_2$	6
2	Grafica de Hazen (relación $t/t_0$ )	8
3	Regulación de caudal en línea	14
4	Regulación de caudal en derivación	14
5	Vertedero trapezoidal, rectangular y triangular	16
6	Instalación de un sistema de medición de caudal por burbujeo	17
7	Diagramas para la determinación del volumen del regulador de caudal necesario	20
8	Mecanismos de transferencia de oxígeno	34
9	Diagrama típico del proceso de lodos activados de flujo en pistón	48
10	Diagrama típico de un proceso de lodos activados de mezcla completa con recirculación	48
11	Relaciones dimensionales de un desarenador	50
12	Diagrama de flujo planta de tratamiento	52
13	Gráfica de volumen acumulado lunes 22/04/2002	67
14	Gráfica de volumen acumulado martes 23/04/2002	67
15	Gráfica de volumen acumulado miércoles 24/04/2002	68

16	Gráfica de volumen acumulado jueves 25/04/2002	68
17	Fases del crecimiento bacteriano	95
18	Crecimiento relativo de los microorganismos en el curso de la estabilización de un residuo orgánico en un medio líquido	97
19	Diagramas de flujo para los procesos biológicos más utilizados en el tratamiento de agua residual	98
20	Dimensiones fundamentales para la fabricación de un vertedero de 90°, con capacidad de recibir hasta 64 l/s.	99

## TABLAS

I	Secuencia de cálculo, diseño etapa de cribado	58
II	Secuencia de cálculo, diseño etapa desarenado	59
III	Secuencia de cálculo, diseño etapa decantación primaria	61
IV	Caudales medidos a través del medidor de caudal por burbujeo marca ISCO modelo 4230, lunes 22/04/2002	63

V	Caudales medidos a través del medidor de caudal por burbujeo marca ISCO modelo 4230, martes 23/04/2002	64
VI	Caudales medidos a través del medidor de caudal por burbujeo marca ISCO modelo 4230, miércoles 24/04/2002	65
VII	Caudales medidos a través del medidor de caudal por burbujeo marca ISCO modelo 4230, jueves 25/04/2002	66
VIII	Valores de caudal máximo, mínimo, caudal promedio durante las horas de descarga 7: 00 a 17:00 horas y volumen del tanque regulador de caudal por día	69
IX	Secuencia de cálculo, diseño etapa lodos activados	71
X	Análisis de agua residual muestra compuesta, promedio de los análisis realizados del lunes 22/04/2002 al jueves 25/04/2003	76
XI	Límites máximos permisibles de contaminación para la descarga de aguas residuales industriales	77
XII	Aplicaciones de las operaciones físicas unitarias en el tratamiento de aguas residuales	78
XIII	Valores del coeficiente $K_3$	79
XIV	Datos de sedimentación de partículas	79

XV	Velocidad de caída de una partícula esférica es agua residual	80
XVI	Velocidad ascensional según Imhoff	80
XVII	Valores de diseño en la decantación primaria	81
XVIII	Caudales y factores de carga típicos empleados para el proyecto y explotación de plantas de tratamiento de aguas residuales	82
XIX	Efecto de los caudales y las cargas contaminantes sobre la selección y dimensionamiento de las instalaciones de plantas de tratamiento secundario	83
XX	Principales aplicaciones de los procesos químicos unitarios, en el tratamiento del agua residual	84
XXI	Principales procesos biológicos en el tratamiento de agua residual	85
XXII	Clasificación de los microorganismos en base a la obtención de energía	86
XXIII	Clasificación de las bacterias en base a intervalos de temperatura	87
XXIV	Relación entre la edad del fango ( $\theta_c$ ) y las concentraciones de $\text{DBO}_5$ y S.S. en el agua depurada	87

XXV	Coeficiente A y B para el cálculo de las necesidades de oxígeno	88
XXVI	Valores de $C_s$ en función de la temperatura	89
XXVII	Valores del coeficiente $K_{t3}$ .	89
XXVIII	Parámetros decantación secundaria de lodos activados	90
XXIX	Parámetros para espesamiento por gravedad	90
XXX	Descripción de las diferentes modificaciones al proceso de lodos activados	91
XXXI	Características que definen el funcionamiento de las diferentes variantes del proceso de lodos activados	93
XXXII	Parámetros de diseño del proceso de lodos activados	94

## LISTADO DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
$Q_{\max}$	Caudal máximo
$DBO_5$	Demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días
X	Concentración de sólidos suspendidos volátiles en el tanque de aireación
$V_r$	Volumen del tanque de aireación
DQO	Demanda química de oxígeno
pH	Potencial de hidrógeno
$k_d$	Coefficiente de degradación endógena
Y	Coefficiente de producción celular
F/M	Relación alimento / microorganismos
$S_o$	Concentración de DBO en el afluente
E	Rendimiento del proceso

DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
W	Ancho de canal en el área de rejillas
$V_{\text{paso}} (Q_{\text{med}})$	Velocidad de paso a caudal medio
$V_{\text{paso}} (Q_{\text{max}})$	Velocidad de paso a caudal máximo
a	Ancho de los barrotes, etapa cribado
s	Separación libre entre barrotes, etapa cribado
$r_{\text{su}}$	Tasa de utilización de sustrato
$\theta_c$	Tiempo retención celular
$C_{\text{rej}}$	Coefficiente de seguridad rejillas finas
$\Delta h$	Pérdida de carga
g	Aceleración de la gravedad
$v_s$	Velocidad de sedimentación
$V_H$	Velocidad horizontal

$t_R$	Tiempo de retención
L	Longitud del desarenador
$V_{asc}$	Velocidad ascensional
$t_o$	Tiempo de sedimentación partículas en aguas en reposo
$P_{(ssv)}$	Producción de lodos
EFI	Eficiencia del difusor
$\theta$	Tiempo de retención hidráulica
MLSSV	Sólidos suspendidos volátiles en el líquido mezcla
$K_t$	Coefficiente global de transferencia
P	Potencia a instalar
$Q_{aire}$	Caudal de aire
T	Temperatura

$Q_r$	Caudal de recirculación de lodos
$X_r$	Concentración de lodos en la recirculación
I	Indice de Mohalman

## GLOSARIO

<b>Aireación</b>	Transferencia de oxígeno del aire al agua por medios naturales o artificiales.
<b>Aireación mecánica</b>	El líquido contenido en el tanque de aireación la superficie del líquido se pone en contacto con la atmósfera, por medio de un agitador mecánico.
<b>Afluente</b>	Agua, agua residual u otro líquido que ingrese a un reservorio o planta de tratamiento.
<b>Agua residual</b>	El agua luego de ser usada por una comunidad o industria, que contiene material disuelto y en suspensión.
<b>Anaeróbico</b>	Condición en la cual hay ausencia de aire u oxígeno libre.
<b>Biodegradabilidad</b>	La degradación de la materia orgánica por acción de microorganismos, en el suelo, cuerpos receptores o procesos de tratamiento del agua residual.
<b>Biomasa</b>	Masa de materia viva que se encuentra en un medio.

<b>Coagulación</b>	Aglomeración de partículas coloidales y dispersas en coágulos visibles.
<b>Criba</b>	Artefacto generalmente de barras paralelas de separación uniforme utilizado para remover sólidos flotantes de cierto tamaño, generalmente aguas arriba de bombas o procesos de tratamiento.
<b>Demanda Bioquímica De Oxígeno (DBO)</b>	Cantidad de oxígeno usado en la estabilización de la materia orgánica bajo condiciones de tiempo y temperatura específicos (generalmente 5 días y 20°).
<b>Demanda química de Oxígeno (DQO)</b>	Medida de la cantidad de oxígeno requerido para la oxidación química de la materia orgánica del agua residual, usando como oxidantes sales inorgánicas en una prueba que dura horas.
<b>Desarenador</b>	Tratamiento diseñado para reducir la velocidad del agua residual y permitir la separación de sólidos minerales (arena) por sedimentación.
<b>Difusor</b>	Placa porosa, tubo u otro artefacto a través del cual se descarga aire comprimido en burbujas bajo la superficie de un líquido.

<b>Edad del lodo</b>	Parámetro de diseño y operación en el proceso de lodos activados que resulta de la relación entre la masa de sólidos volátiles en el tanque de aireación entre la masa de sólidos volátiles removidos del sistema. Se expresa en días.
<b>Efluente</b>	Líquido que sale de un proceso de tratamiento.
<b>Lodo Activado</b>	Lodo recirculado del fondo del sedimentador secundario al tanque de aireación en el proceso de lodos activados, que consiste en biomasa y una pequeña cantidad de sólidos inorgánicos.
<b>Muestra Compuesta</b>	Combinación de muestras individuales a cada cierto intervalo de tiempo, y cuyo volumen se determina en proporción al caudal del agua residual al momento de cada muestreo.
<b>Nutriente</b>	Cualquier sustancia que al ser asimilada por organismos, promueve crecimiento.
<b>Oxígeno disuelto</b>	Concentración de oxígeno medida en un líquido, por debajo de la saturación.
<b>pH</b>	Logaritmo con signo negativo de la concentración de iones hidrógeno, expresado en moles por litro.

<b>Planta de tratamiento</b>	Conjunto de obras, facilidades y procesos en una planta de tratamiento de aguas residuales.
<b>Regulador de caudal</b>	Tanque utilizado para almacenar y homogenizar el líquido a tratar, eliminando las descargas violentas.
<b>Sedimentación Primaria</b>	Remoción de una porción de la materia en suspensión, pero poco o nada de la materia orgánica en estado coloidal o disuelto.
<b>Sustrato</b>	Representa la materia orgánica o los nutrientes que sufren una conversión.

## RESUMEN

En el presente trabajo se dan a conocer los diferentes conceptos de las operaciones físicas unitarias, procesos químicos unitarios y procesos biológicos unitarios, que se pueden aplicar al agua residual, haciendo énfasis en las físicas unitarias y los procesos biológicos unitarios. Se describen los diferentes factores que intervienen en el crecimiento y reproducción de los microorganismos, en los procesos biológicos unitarios

Se presentan las diferentes variables a considerar en el diseño de un tratamiento biológico de lodos activados, como los criterios para determinar el volumen del reactor biológico. También se consideran los conceptos para la transferencia de oxígeno y la potencia necesaria en un sistema de aireación por difusión. Así como los conceptos para realizar el espesamiento de los lodos generados, en el tratamiento por medio de un decantador secundario.

Se determinan los parámetros de diseño para una planta de tratamiento de agua residual, de una planta de envasado de bebidas, y se utiliza para ello la medición del caudal a tratar, por medio de un medidor de caudal por burbujeo, y una caracterización completa del agua residual, dichos parámetros cumplen con los límites de contaminación permitidos en el reglamento nacional de aguas residuales.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Diseñar las diferentes etapas del tratamiento para el agua residual, que cumpla con los límites permisibles de contaminación industrial, definidos en el reglamento nacional de aguas residuales.

### **Objetivos Específicos**

1. Dimensionar el tratamiento primario para el agua residual a tratar con las siguientes etapas: cribado, desarenado, decantación primaria y regulación de caudal,
2. Definir el volumen del reactor
3. Definir la cantidad de oxígeno que se debe transferir y la potencia requerida para dicha transferencia
4. Dimensionar el tanque decantador secundario para el espesamiento de lodos por gravedad, así como la cantidad de lodos en exceso

## INTRODUCCIÓN

Los resultados obtenidos en el presente estudio, son aplicables para todo proceso productivo, al igual que las comunidades, donde las descargas del agua residual varían ampliamente en cuanto al caudal y las cargas contaminantes. El tratamiento biológico del agua residual basado en lodos activados se ha generalizado, por su versatilidad de adaptarse a un amplio rango de requerimientos de tratamiento. El diseño del tratamiento del agua residual, cumple con el reglamento nacional, en base a los límites máximos permisibles de contaminación, definidos en dicho reglamento.

El trabajo representa una alternativa de solución, en la etapa de diseño del tratamiento del agua residual generada en una planta de embotellado de bebidas, cuyas descargas poseen variaciones significativas en los valores de caudal y cargas contaminantes.

En el presente trabajo se presentan los conceptos necesarios para el diseño de las operaciones físicas unitarias, procesos químicos unitarios y proceso biológicos unitarios. En el apéndice se encuentra un detalle de los cálculos realizados, para determinar cada uno de los parámetros del tratamiento del agua residual, así como los resultados tabulados de la medición de caudal y la caracterización del agua residual. En los anexos se encuentran los valores de diseño para las diferentes variables y parámetros de operación a considerar en el tratamiento del agua residual.

# 1. TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

## 1.1 Antecedentes

El tratamiento de aguas residuales ha sufrido una constante evolución y desarrollo. En los años ochenta el tratamiento de aguas residuales estaba más relacionado con criterios estéticos y ambientales. La reducción de la DBO, los sólidos en suspensión, los organismos patógenos, la eliminación de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, se logró en base a una mayor comprensión de los impactos medio ambientales producidos por los vertidos de aguas residuales, y el conocimiento, cada vez más profundo, de los efectos a largo plazo de las descargas al ambiente. Por lo que, los objetivos de todo tratamiento de aguas residuales, deben estar íntimamente ligados a los requerimientos de las autoridades estatales.

En el medio nacional, los límites máximos permisibles de contaminación para la descarga de aguas residuales industriales, se pueden encontrar, en el Reglamento de Aguas Residuales. Ver la Tabla XI.

En el diseño de los elementos que formarán parte del proceso de tratamiento debe considerarse el período de vida útil de las instalaciones, desarrollo del diagrama de flujo de las instalaciones, establecimiento de los criterios de proyecto de los procesos, pre-dimensionamiento de las unidades de tratamiento, balances de sólidos, distribución física de los elementos y cálculo hidráulico de la planta.

Los contaminantes, presentes en el agua residual, pueden eliminarse con procesos físicos, químicos y / o biológicos. Los métodos individuales se llaman operaciones físicas unitarias, procesos químicos unitarios y procesos biológicos unitarios, respectivamente.

## **1.2 Operaciones físicas unitarias**

Predomina la acción de fuerzas físicas, estos métodos evolucionaron a partir de observaciones de la naturaleza por parte del ser humano. Son las primeras aplicaciones al tratamiento de aguas residuales, dichas operaciones son la base para los procesos actuales. (Ver tabla XII del anexo). A continuación realizamos un estudio de las principales operaciones físicas unitarias.

### **1.2.1 Cribado**

Se realiza generalmente a través de rejillas, mallas o cribas. Su objetivo es separar y retener los objetos flotantes voluminosos y en suspensión. Sus ventajas, es que evitan depósitos de estos objetos en procesos posteriores, evita obstrucciones en tuberías, canales y medios de conducción general. También aumenta la eficiencia de los procesos posteriores. Las rejillas pueden clasificarse en base a diferentes criterios: horizontales, verticales, curvas e inclinadas; finas medias y gruesas; fijas o móviles; de limpieza manual, automática o semiautomática.

### 1.2.1.1 Velocidad de paso entre barrotes

Este es el parámetro fundamental, se recomiendan los siguientes valores a caudal medio

$$v_{\text{paso}} (Q_{\text{med}}) > 0.6 \text{ m/s}$$

$$v_{\text{paso}} (Q_{\text{max}}) < 1.0 \text{ m/s (con limpieza a favor de la corriente)}$$

$$v_{\text{paso}} (Q_{\text{max}}) < 1.2 \text{ m/s (con limpieza contra la corriente)}$$

### 1.2.1.2 Anchura del canal en la zona de las rejillas

Este se puede calcular a través de la siguiente expresión

$$W = \frac{Q_{\text{max}} * ((a+s)/s)}{v * D} + C_{\text{rej}} \quad (1.1)$$

donde	W	=	ancho de canal de rejillas (m),
	$Q_{\text{max}}$	=	caudal máximo ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
	v	=	velocidad de paso del agua de rejillas (m/s)
	D	=	nivel de aguas arriba de la rejilla a caudal máximo (m)
	a	=	ancho de los barrotes (m)
	s	=	separación libre entre barrotes (m)
	$C_{\text{rej}}$	=	coeficiente de seguridad (m), finas 0.1 m, gruesas 0.3 m

Para determinar el valor de D, en la ecuación 1.1, se puede utilizar la siguiente ecuación, calculada para una velocidad de paso de 1 m/s, los términos son los definidos con anterioridad, para que sea válida esta expresión, es necesaria que la relación de anchura del canal (A) por la altura de la lámina de agua (H), esté entre  $1 \leq A/H \leq 3/2$

$$D = 0.15 + 0.74\sqrt{Q_{\max}} \quad (1.2)$$

### 1.2.1.3 Pérdida de carga a través de una reja

Se establece según la fórmula,

$$\Delta h = K_1 * K_2 * K_3 * (v^2/2g) \quad (1.3)$$

donde  $\Delta h$  = pérdida de carga (m)  
 $v$  = velocidad de paso en el canal (m/s)  
 $g$  = aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

El valor de  $K_1$ , se le llama constante por atascamiento,  $K_1 = 1$ , cuando la reja está limpia y obedece a la siguiente fórmula cuando está atascada

$$K_1 = (100/C)^2 \quad (1.4)$$

donde  $C$  = porcentaje de la sección de paso en atascamiento máximo

El valor de C se mantiene en el orden del 60 al 90%, el cual depende del tipo de limpieza de la reja (manual o automática), y las dimensiones de las materias que se retienen.

La velocidad de paso, con la reja limpia debe de limitarse de 0.6 a 1.2 m/s, para que se cumpla la ecuación 1.4. El valor de  $K_2$ , se determina en base a la forma de la sección horizontal de los barrotes, en base a la figura 1.

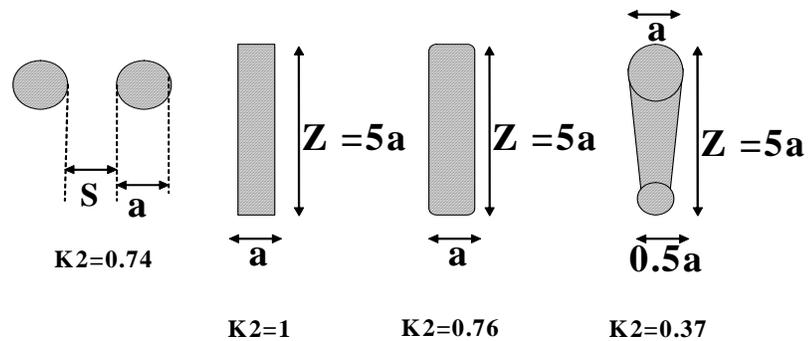
El valor de  $K_3$ , se determina en la sección de paso a través de los barrotes, los valores del coeficiente  $K_3$ , se encuentran en la tabla XIII del anexo.

### **1.2.2 Desarenado**

Su función es separar elementos pesados en suspensión (arenas, arcillas, limos), los cuales podrían generar los siguientes problemas sobrecargas de lodos, depósitos en las conducciones hidráulicas, tuberías y canales, abrasión en bombas y equipos, disminución de la capacidad hidráulica. Esto se logra al bajar la velocidad del agua y que se aumente la sección de paso, de manera que las partículas pesadas se depositan en el fondo. Luego se clasifican en desarenadores de flujo horizontal, flujo vertical y flujo inducido. Dos técnicas son la base de los procedimientos utilizados en la separación de arenas: la separación natural, por decantación en canales o depósitos apropiados, separación dinámica, que utiliza inyección de aire o separación centrífuga.

Para realizar el cálculo de las dimensiones de un desarenador se necesita conocer el caudal de entrada, diámetro de la arena a eliminar, y temperatura del agua. Las cantidades de arena retirada varía mucho entre instalaciones, ya que depende del tipo de red; unitaria o separativa y tipo de urbanización. Los valores de arena retiradas suelen estar entre 4 a 150cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> de agua bruta.

**Figura 1. Coeficiente  $K_2$**



Fuente: HERNÁNDEZ LEHMANN, AURELIO. Manual de diseño de estaciones depuradoras de aguas residuales. Página 14.

donde

s	=	separación libre entre barrotes
a	=	anchura de barrotes
z	=	espesor de los barrotes

### 1.2.2.1 Determinación de las velocidades

Se debe considerar la velocidad de sedimentación ( $v_s$ ) y la velocidad horizontal ( $V_H$ ). Ver tablas XIV y V, del anexo, respectivamente.

### 1.2.2.2 Sección transversal

Por las condiciones de pared y por la formación de líneas de corriente, la relación de anchura y la altura útil debe cumplir la siguiente relación

$$1 < h/a < 5 \tag{1.5}$$

donde

a	=	anchura de la sección transversal (m)
h	=	altura útil (m)

### 1.2.2.3 Longitud del desarenador

El tiempo de sedimentación de las partículas en aguas de reposo se define a partir de la siguiente ecuación: tiempo que una partícula con velocidad de sedimentación  $V_s$ , utiliza para sedimentar una altura  $h$  del tanque.

$$t_0 = h/V_s \quad (1.6)$$

donde  $V_s$  = velocidad de sedimentación (m/s)

$t_0$  = tiempo de sedimentación partículas en aguas en reposo (h)

Se debe tener en cuenta el tiempo requerido para atravesar el tanque desarenador ( $t$  = volumen del tanque / caudal), es el tiempo de retención de una particular dentro del desarenador. Para desarenadores simples el tiempo de retención puede estar entre 2.5 y 5 minutos. La relación entre  $t / t_0$ , se determina a través de la grafica de Hazen, figura 2. El valor de  $n$ , se encuentra entre 1 y 8, y depende, del ángulo de divergencia del canal de llegada, influencias de viento y temperaturas del tanque. Con el valor de  $t$  calculado se determina la longitud del desarenador

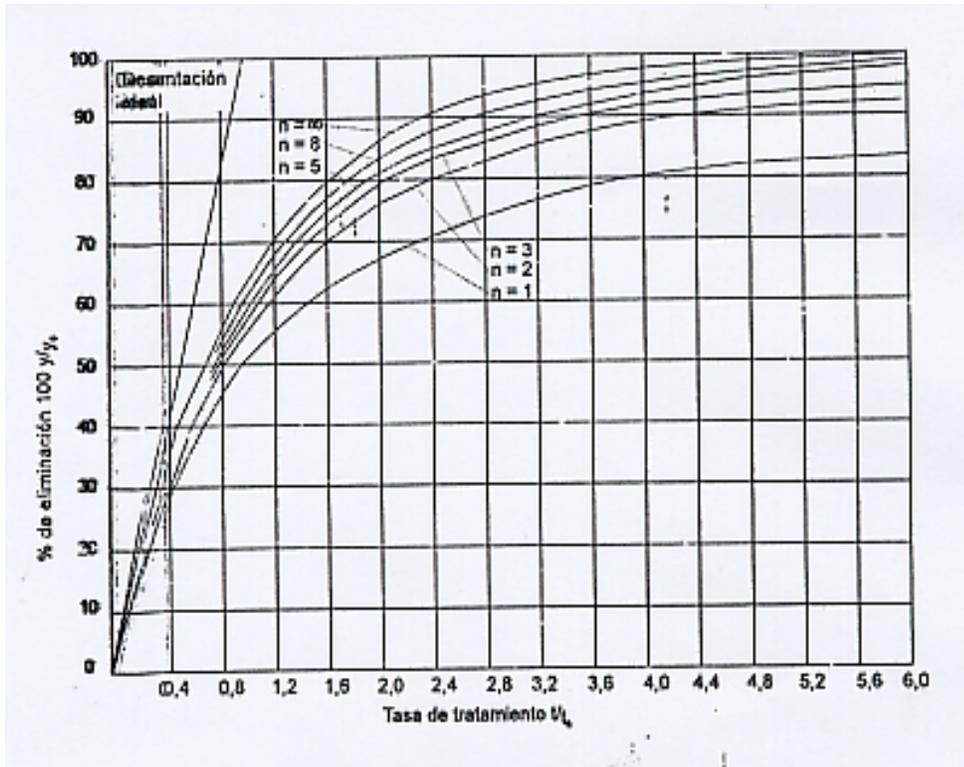
$$L = t * V_H \quad (1.7)$$

donde  $V_H$  = velocidad horizontal (m/s),

$L$  = longitud del desarenador (m)

$t$  = tiempo de retención (s)

Figura 2. Gráfica de Hazen (relación  $t/t_0$ )



Fuente: HERNÁNDEZ LEHMANN, AURELIO. Manual de diseño de estaciones depuradoras de aguas residuales. Página 26.

Donde  $t/t_0$  = tasa de tratamiento  
 $y$  = cantidad de partículas de velocidad  $v_s$  sedimentadas  
 $y_0$  = cantidad de partículas de velocidad  $v_s$  entrante desarenador

#### 1.2.2.4 Comprobación de la velocidad ascensional

Se utiliza la tabla XVI, es una comprobación en base al diámetro de las partículas y el rendimiento de sedimentación. Es recomendado no exceder dichos valores de velocidad.

### 1.2.3 Decantación primaria

Su objetivo es la eliminación de sólidos sedimentables. La reducción de velocidad, de los materiales en suspensión según el valor determinado, es el fundamento de la eliminación de un 50 a 60%. Al sedimentarse estas partículas de fango, arrastran en su caída algunas bacterias, con lo que se alcanza cierto grado de tratamiento biológico y una reducción de DBO. Se debe tomar en cuenta, en todo decantador, las siguientes consideraciones: la entrada del afluente, debe ser tal que la corriente de alimentación se difunda homogéneamente, colocar deflectores en la entrada y salida, el primero para conseguir una buena repartición del caudal afluente, el segundo para retención de materias flotantes, colocar un vertedero de salida, con el fin de evitar el levantamiento de los lodos sedimentados, dentro de sus características geométricas, puede ser cuadrada o rectangular, la sedimentación puede ser horizontal o vertical.

#### 1.2.3.1 Velocidad ascensional y tiempo de retención

Los valores pueden tomarse de la tabla XVII, del anexo, donde se encuentran las velocidades y tiempo de retención para caudal medio y máximo, para decantadores circulares y rectangulares. Se define por la siguiente ecuación:

$$V_{asc} = Q/S \quad (1.8)$$

donde

S	=	superficie del decantador (m <sup>2</sup> )
Q	=	caudal a tratar (m <sup>3</sup> /h)
V <sub>asc</sub>	=	velocidad ascensional (m/h)

$$t_R = V/Q \quad (1.9)$$

donde

$t_R$	=	tiempo de retención (h)
$Q$	=	caudal a tratar ( $m^3/h$ )
$V$	=	volumen del decantador ( $m^3$ )

### 1.2.3.2 Relaciones dimensionales

En decantadores circulares de flujo vertical, el diámetro se recomienda no ser mayor de 40 m y una altura que no exceda los 3m. En la tabla XVII del anexo, se puede encontrar los valores recomendados de las dimensiones de los decantadores primarios rectangulares, las dimensiones de la zona de entrada de decantadores son de importancia para evitar turbulencia. Siempre en la tabla XVII del anexo se encuentran la relaciones dimensionales para decantadores circulares. En el caso de los tipo rectangular, la pérdida de carga ocasionada por el sistema de entrada al decantador no debe ser mayor de 0.2 a 0.3 m. En la tabla XVII del anexo, se encuentran los valores de las cargas sobre vertedero de los decantadores circulares y rectangulares.

Dentro de las dimensiones de los decantadores primarios se debe considerar la longitud del vertedero de salida, dicho valor está definido por la siguiente ecuación,

$$L = Q/ V_{vert} \quad (1.10)$$

donde

$L$	=	longitud necesaria de vertedero (m)
$Q$	=	caudal a tratar ( $m^3/h$ )
$V_{vert}$	=	carga sobre vertedero ( $m^3/h/m$ ).

### 1.2.3.3 Producción de lodos

Se calcula de la concentración de sólidos en suspensión en el agua bruta, por un coeficiente de reducción de sólidos en suspensión. Este coeficiente oscila entre 40 y 60%, su valor está definido a través de la siguiente ecuación

$$F1 = K * \text{Kg. SST}/d_{\text{agua bruta}} \quad (1.11)$$

donde

F1	=	producción de lodos (Kg. /d)
K	=	coeficiente
Kg. SST/d <sub>agua bruta</sub>	=	concentración de sólidos en suspensión agua bruta (Kg. /d)

Para la extracción de las partículas sedimentadas se acostumbra colocar barredoras de fondo, cuyas velocidades lineales acostumbran estar entre 0.3 a 1.2 m/min. El valor típico es de 0.6 m/min. Las inclinaciones de los fondos de las rasquetas de las barredoras se encuentran en decantadores circulares entre 2 y 8%, para decantadores rectangulares entre 0.5 a 2%. Dentro de la producción de lodos se debe instalar una poseta para retener el caudal de fango producido, los tiempos de retención se encuentran en la tabla XVII del anexo. En los decantadores circulares con rasquetas se logra alcanzar concentraciones de fango de hasta 8%. Las purgas de lodos en las posetas, se acostumbra realizar en forma continua o por temporizaciones cortas. El volumen de dicha poseta se encuentra definido por la siguiente ecuación

$$V = Q_f * T_r \quad (1.12)$$

donde

V	=	volumen de la poseta de lodos (m <sup>3</sup> )
Q <sub>f</sub>	=	caudal medio de lodos producidos (m <sup>3</sup> /h)
T <sub>r</sub>	=	tiempo de retención del fango en posetas (h)

#### 1.2.4 Regulación de caudal

Esta operación física unitaria, es también conocida como homogenización de caudal o ecualización de caudal. Los tanques de regulación de caudal son una medida de evitar caudales pico, y también reducen las cargas puntuales en la planta de tratamiento.

Las unidades que forman parte del tratamiento del agua residual, deben tener capacidad para absorber y amortiguar las variaciones. La mayoría de las operaciones y procesos unitarios trabajan mejor a caudal constante, aunque permiten cierta variación, si ésta se amplía, es necesario amortiguarla para mantener dicho caudal. Las principales aplicaciones son: caudales en tiempo seco, caudales provenientes de redes de drenajes separativos en época de lluvia y redes de drenaje unitarias, combinación de aguas pluviales y aguas residuales unitarias. La regulación de caudal debe mezclarse y airearse, con el fin de prevenir sedimentación y putrefacción. En el caso del mezclado, se consigue por medio de distribución del flujo de entrada a través de deflectores, turbinas mecánicas (más común), aereación ( $3.7 \text{ m}^3 \text{ aire/m}^3$  de agua residual) y aereación mecánica en superficie (3 a 4  $\text{W/m}^3$ ). La aereación para un agua residual con sólidos en suspensión cercano a 220 mg/l, oscila entre 0.004 y 0.008  $\text{Kw. /m}^3$ . Ver la tabla XVIII del anexo, en la que se describen cómo, los diferentes elementos que forman parte de las plantas de tratamiento, son afectados en base a los caudales y cargas punta. Los factores punta (relación entre caudal punta y caudal medio) más utilizados, son el máximo horario y el máximo diario. Normalmente dichos factores se obtienen de datos históricos.

Cuando el agua residual proviene de actividades industriales, puede variar ampliamente la concentración de DBO y de sólidos en suspensión. Por lo que se deben establecer los rangos de variación del efluente a tratar y en qué medida pueden afectar los diferentes procesos y operaciones unitarias consideradas. En el caso de lodos activados el caudal máximo horario afecta el tiempo de residencia hidráulica, existe arrastre de sólidos a caudales elevados, y si el caudal baja mucho, puede darse el caso de una recirculación del 100 % del efluente tratado, para mantener el proceso.

En la tabla XIX del anexo, se encuentra descrito el efecto de los caudales y las cargas contaminantes sobre la selección de las instalaciones de plantas de tratamiento secundario.

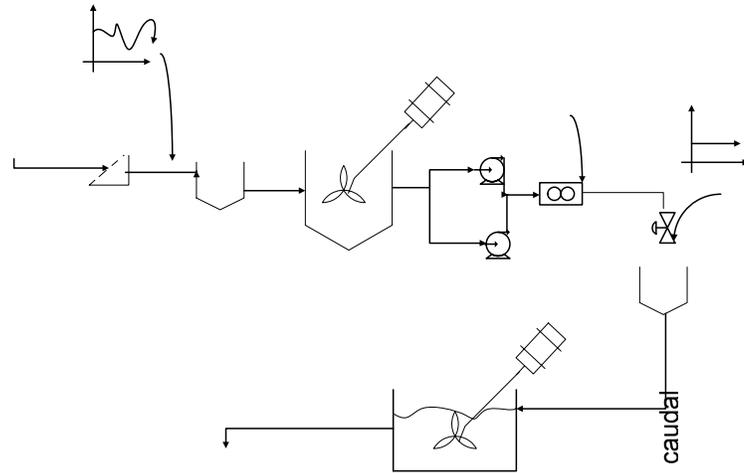
#### **1.2.4.1 Regulador de caudal en línea**

En esta disposición, todo el caudal del efluente a tratar pasa a través del tanque, con lo que se consigue, diluir la concentración de los contaminantes y amortiguar el caudal. En la figura 3 se muestra un regulador de caudal en línea.

#### **1.2.4.2 Regulación de caudal en derivación**

En este caso, el caudal excedente de un valor dado se traslada al tanque de homogenización, por ejemplo: por medio de un vertedero de crecidas, donde se necesita menor capacidad de bombeo, pero la amortiguación de las cargas contaminantes no es tan marcada como en la regulación de caudal en línea. En la figura 4, se encuentra un diagrama de regulación en derivación.

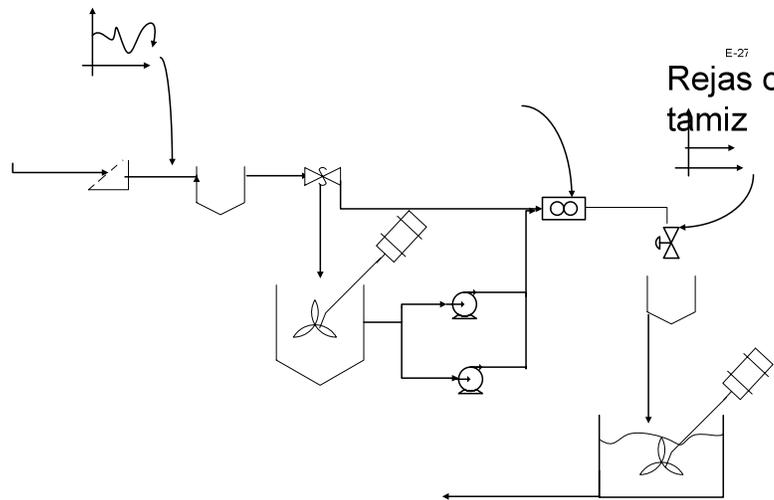
**Figura 3. Regulador de caudal en línea**



Fuente: METCALF & HEDÍ, Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización .Página 233.

Agua Residual Cruda

**Figura 4. Regulación de caudal en derivación**



Rejas o tamiz  
Desarenador

Fuente: METCALF & HEDÍ, Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización .Página 233.

### **1.2.4.3 Diseño del regulador de caudal**

#### **1.2.4.3.1 Medición de caudal**

La selección, uso y mantenimiento de los equipos de medición de caudal influyen en la explotación de la planta de tratamiento de agua residual. El sistema normalmente está formado por un sensor que emite una señal, y un convertidor de señal, el cual con frecuencia es registrado y mostrado en un *display*. Existen dos formas de transportar el agua residual y en cada una se mide en forma diferente el caudal.

#### **1.2.4.3.2 Canales Abiertos**

Éstos tienen la superficie del líquido expuesta a la atmósfera. Las variaciones de caudal se miden en función del nivel del agua. Son utilizados cuando la alimentación del agua residual es por gravedad y normalmente el canal no está lleno. Para medir el caudal, la sección de éste normalmente se estrecha, de esta forma se puede determinar el mismo en función de la velocidad del líquido, la sección húmeda en función del nivel del líquido. Se distinguen tres sistemas de medida en canales abiertos: por medio de una esclusa en la que, la parte superior (arista de la esclusa) es más alta que el nivel de aguas abajo, esclusa de fondo, donde la parte superior es más baja que el nivel aguas abajo, y canal Venturi, es un canal con estrechamiento o reducción de su sección transversal. Los más utilizados son los canales Venturi y las esclusas tipo vertedero, el perfil es en forma geométrica tales como un trapecio, un rectángulo o un triángulo.

En la figura 5 se muestra un vertedero trapezoidal, un rectangular y un triangular. Los vertederos sólo se pueden utilizar si la vena cae libremente sin adherirse a la pared del vertedero.

**Figura 5. Vertedero trapezoidal, rectangular y triangular**

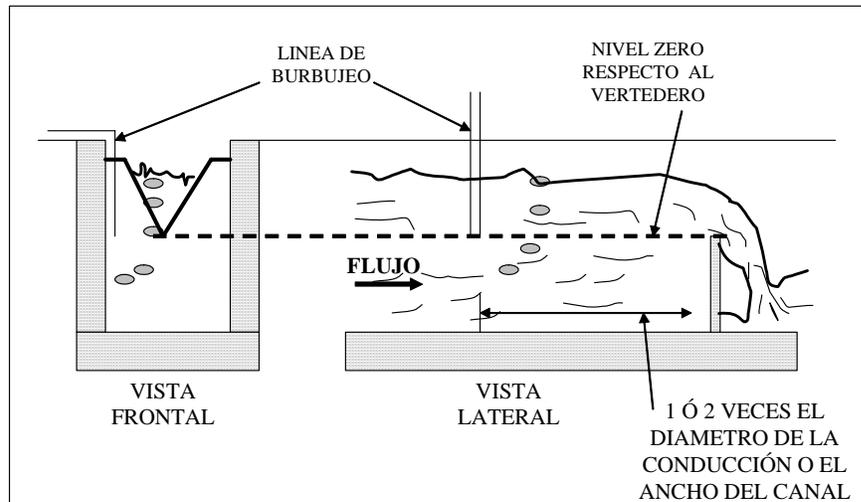


Fuente: página de Internet: [www. dininstrumentos. Com.](http://www.dininstrumentos.com) Consultada en Julio del 2002.

#### **1.2.4.3.2.1 Instrumentos de medición**

Lo que se mide en este caso, es el nivel en un punto de poca turbulencia, o bien en un *by-pass*, en un lugar accesible para la limpieza y el mantenimiento. Existe la medición con el sistema de burbujeo, que es un sistema de medición neumático el cual no es difícil de instalar, y sólo existe un tubo de burbujeo en el interior del agua. El equipo posee un pequeño compresor, el cual inyecta aire dentro del canal de agua, la resistencia que le opone el nivel del líquido al aire es medida como presión, un transductor convierte a una señal eléctrica, y dicha señal se linealiza para convertirla en nivel. La limitación de este sistema podría ser que el tubo de burbujeo se tape por basura, existen equipos que tienen un sistema de purga, y que descarga una gran cantidad de aire. En la figura 6, se muestra la forma correcta de realizar la instalación de un sistema de medición de caudal por burbujeo.

**Figura 6, Instalación de un sistema de medición de caudal por burbujeo**



Fuente: ISCO, Inc. Manual de instrucciones Medidor de flujo modelo 4230. Página 50.

Otro tipo de medición es a través el nivel hidrostático, los cuales están instalados en un *by-pass* o en una pared lateral del canal. Para mayor exactitud debe estar compensada la variación de la presión atmosférica. También se puede realizar la medición de caudal y nivel por medio de sensores de eco ultrasónico, son los más utilizados por su fácil instalación, emite pulsos ultrasónicos y miden con exactitud el nivel del agua, así como el tiempo que tarda el pulso para viajar desde la sonda hasta la superficie del líquido y volver. Su mantenimiento es muy bajo. La espuma puede afectar la reflexión de la superficie y la medida, adicional debe existir una cierta distancia entre la sonda y la superficie, sí esta distancia no existe, no se debe utilizar esta alternativa de medición.

La elección del sistema está en función de la velocidad aguas arriba, no debe ser mayor de 6 m/s, la pendiente del sistema, ya que al instalar la cámara de medición, incrementa el nivel aguas arriba y puede causar una inundación. El punto de medición en el canal abierto, debe tener una longitud previa, lo suficiente para convertir posibles turbulencias en líneas de corriente. La forma del vertedero está en función del caudal a medir, si hay grandes variaciones de caudal, y el máximo no excede de  $240\text{m}^3/\text{h}$ , se utiliza un tipo triangular. Si el caudal excede del valor anterior se puede utilizar un vertedero rectangular.

#### **1.2.4.3.3 Sistemas cerrados**

El líquido se mantiene dentro de un tubo y éste se mantiene lleno. En este caso el caudal se mide en función de la velocidad del fluido. Se utiliza este tipo de sistema cuando el agua es impulsada por una bomba.

El sistema cerrado también puede ser en forma de canales cerrados, y la velocidad del líquido se determina por medio del nivel, pero este método no tiene exactitud, ya que con frecuencia no se conoce la sección de paso debido al deterioro que tiene o llega a sufrir. En la medición en tubos cerrados, se puede utilizar el principio de inducción electromagnética de Faraday, y que es cuando un conductor se mueve en un campo magnético genera una tensión en el conductor eléctrico, esta tensión es proporcional al promedio de la velocidad del líquido, en este caso el líquido es el conductor eléctrico. Esta medición es independiente de la temperatura, presión, densidad o viscosidad del líquido.

#### **1.2.4.3.4 Localización del regulador de caudal**

Está en función del tipo de tratamiento, de la red de drenajes y del tipo de agua residual. En algunas ocasiones se sitúa la regulación después del tratamiento primario y antes del biológico, así se reducen los problemas de fango y espuma. Otras veces se sitúa por delante de la sedimentación primaria y del tratamiento biológico.

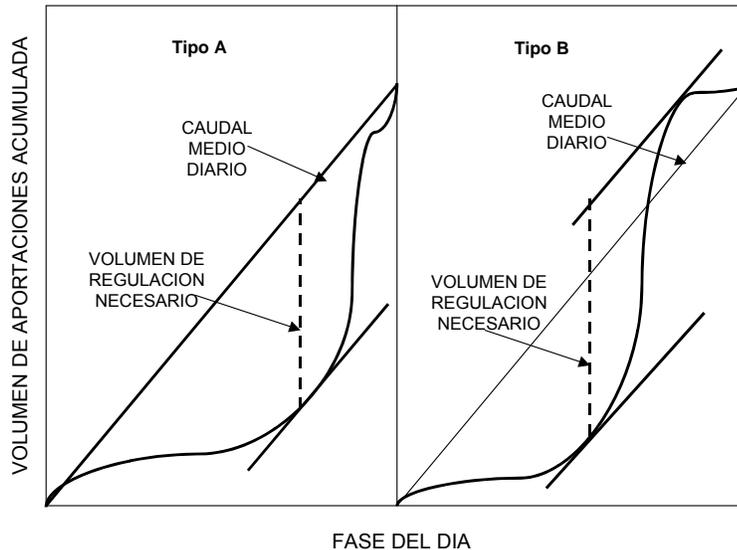
#### **1.2.4.3.5 Volumen del tanque de regulación**

Se determina a partir de un gráfico de caudales a tratar, en el que se grafican las aportaciones acumuladas a lo largo del día, en este mismo gráfico se presenta una curva del caudal medio diario, para determinar el volumen se traza una línea paralela con la que se define el caudal medio diario, el cual es tangente a la curva de los volúmenes de aportaciones diarias. Dicho volumen es la distancia vertical, desde el punto de tangencia a la recta que representa el caudal medio. En la figura 7 se presentan los modelos típicos. En la práctica dicho volumen es mayor, y se basa en los siguientes factores: el funcionamiento continuo de los equipos de aereación y mezclado no permiten un vaciado total, y la recirculación exige un volumen adicional. El valor del volumen puede variar entre un 10 y 20% del valor teórico.

### **1.3 Procesos químicos unitarios**

Es la eliminación o conversión de los contaminantes debido al desarrollo de ciertas reacciones químicas, el tratamiento se logra produciendo un precipitado que se recoge por sedimentación. (Ver tabla XX del anexo).

**Figura 7. Diagramas para la determinación del volumen del regulador de caudal necesario.**



Fuente: METCALF & HEDÍ, Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización .Página 236.

#### **1.4 Procesos biológicos unitarios**

Se logran gracias a la actividad biológica de ciertos microorganismos. Busca la eliminación de las sustancias orgánicas biodegradables presentes en el agua residual, estas sustancias se convierten en gases y agua, en su gran mayoría, a través de ciertas reacciones de oxidación son la fuente de energía y materia para la reproducción de microorganismos (Ver la tabla XXI del anexo). Para todo tratamiento biológico, debemos comprender el papel de los microorganismos en el mismo.

## 1.5 Biodegradabilidad de un efluente

Se determina como la relación de la demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ) y la demanda química de oxígeno (DQO). De este índice se determina si el agua residual a depurar es de origen doméstico o industrial,

a) Para  $DBO_5 / DQO > 0.4$ , es biodegradable, pueden utilizarse sistemas biológicos por lodos activados o lechos bacterianos.

b) Con  $0.2 \leq DBO_5 / DQO < 0.4$ , es biodegradable, se recomienda utilizar un proceso de lechos bacterianos.

c)  $DBO_5 / DQO < 0.2$ , es poco biodegradable, se recomienda utilizar procesos químicos.

## 1.6 Objetivo del tratamiento Biológico

La utilización de los microorganismos para el tratamiento del agua residual se desarrolló a través de estudiar los procesos de auto depuración dentro de los ríos, lagunas y lagos. El ser humano por medio de la utilización de diferentes microorganismos, rotíferos, hongos, protozoos, algas y especialmente bacterias, descompone la materia orgánica y la estabiliza.

Los microorganismos podemos clasificarlos en aquellos que necesitan oxígeno para su crecimiento como: aerobios; el oxígeno debe estar disponible en la forma de oxígeno libre disuelto; y los que no lo necesitan, anaerobios.

A los que crecen sólo en presencia de oxígeno se les llama aerobios obligados, y los que sólo pueden crecer en su ausencia se les llama anaerobios obligados. También existen los que pueden cambiar y su metabolismo, pueden crecer en la presencia y la ausencia de oxígeno se les llama organismos facultativos. Los procesos aerobios son rápidos y eficientes, generan productos secundarios químicamente simples y altamente oxidados, con el anhídrido carbónico y el agua. Los procesos anaeróbicos son bioquímicamente ineficientes y lentos y dan origen a productos secundarios químicamente complejos y con frecuencia malolientes. Un proceso anaerobio es aproximadamente 50 veces más lento que un aerobio.

El oxígeno libre disuelto es el reactivo esencial en los procesos aeróbicos, los microorganismos aeróbicos al utilizar los nutrientes orgánicos consumen al mismo tiempo oxígeno, si este último no se repone se agota el oxígeno y se detienen los procesos aeróbicos y sólo pueden continuar los procesos anaeróbicos lentos y malolientes; ciertas bacterias peligrosas para la salud son anaeróbicas obligadas. Cuando el agua residual contiene sulfatos disueltos, las bacterias anaeróbicas reductoras de sulfatos producen sulfuro de hidrógeno, corrosivo y altamente venenoso. La principal restricción que se presenta en la disponibilidad del oxígeno es su baja solubilidad en el agua. La transferencia de oxígeno es parte esencial para los procesos unitarios biológicos aeróbicos. Al poner el agua residual en contacto con aire, como fuente de oxígeno y una adecuada población microbiana, se obtiene la degradación de la materia orgánica, y convierte dicha materia en compuestos más simples: gases y agua, también dicha materia se convierte en fuente de energía y fuente de carbón para la reproducción de los microorganismos.

Los microorganismos utilizan el oxígeno presente en el aire inyectado, como receptor de electrones en la respiración aeróbica, para oxidar los compuestos de cadena larga, y poder descomponer en moléculas de menor tamaño, éstas últimas son más fáciles de procesar por los microorganismos, con lo cual se logra un doble propósito de aereación y agitación del medio a tratar. En la estabilización de la materia orgánica una porción de la energía es utilizada para la síntesis de células, para satisfacer las necesidades energéticas del mantenimiento celular. La zona de inyección de aire se llama reactor biológico.

## **1.6.1 Factores que afectan a los microorganismos en el tratamiento biológico**

### **1.6.1.1 Fuente de energía y carbono**

Para la síntesis de materia celular, tenemos por un lado la materia orgánica y por otro el dióxido de carbono. Sobre la base de la fuente de carbono, a los microorganismos se les llama heterótrofos y autótrofos. Los segundos necesitan más energía para la síntesis de tejido celular a través del gas, por lo que tienen menores tasas de crecimiento (en la tabla XXII del anexo, encontramos una clasificación de los microorganismos en base a la obtención de energía)

### **1.6.1.2 Fuente de nutrientes**

Su limitación puede bloquear la síntesis celular y el crecimiento bacteriano. Los principales nutrientes inorgánicos son: nitrógeno(N), azufre(S), fósforo (P), magnesio (Mg), calcio (Ca), hierro (Fe), sodio (Na) y cloro (Cl).

Las aguas residuales domésticas se pueden considerar equilibradas, en base a sus nutrientes, pero en los vertidos industriales no siempre ocurre así, por lo que en ocasiones es necesario agregar nutrientes, normalmente nitrógeno y fósforo. Para que un agua residual se pueda depurar, la cantidad de nutrientes debe respetar las siguientes relaciones:

$$\frac{\text{DBO}_5 \text{ (p.p.m.)}}{\text{N}_{\text{total}} \text{ (p.p.m.)}} = \frac{100}{5}$$

$$\frac{\text{DBO}_5 \text{ (p.p.m.)}}{\text{P}_{\text{total}} \text{ (p.p.m.)}} = \frac{100}{1}$$

## **1.6.2 Microorganismos que intervienen en el proceso de degradación biológica**

### **1.6.2.1 Origen animal (multicelular)**

Incluye a: rotíferos, crustáceos e insectos. Los rotíferos son multicelulares aerobios, heterótrofos, consumen materia orgánica, bacterias, protozoos. Su presencia indica buena depuración biológica.

### **1.6.2.2 Origen vegetal (multicelulares)**

Incluye: musgos, helechos, plantas. Las plantas intervienen en el proceso biológico ya que son fuente de alimento para otros seres vivos, son una fuente de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>, por efectos de la fotosíntesis.

### **1.6.2.3 Protistas (unicelulares o multicelulares)**

Incluye: algas, hongos, bacterias, virus y protozoos. Las algas son protistas unicelulares o multicelulares, autótrofos. Los hongos son protistas multicelulares, aerobios y requieren poca humedad. Necesitan para su metabolismo, escasa demanda de nitrógeno, pH entre 2 a 9, con un óptimo en 5.6, por las características anteriores son importantes para el tratamiento de aguas residuales industriales. Los protozoos son microorganismos unicelulares con movilidad, la mayoría son aerobios heterótrofos, se alimenta de las bacterias, actúan como purificadores de los efluentes en los procesos biológicos.

### **1.6.2.4 Bacterias**

Son organismos procariotas unicelulares, el pH en el que sobreviven, se encuentra entre 4 y 9.5, los valores adecuados se encuentra entre 6.5 y 7.5. En cuanto a la temperatura, 10° C, aumenta en el doble la tasa de crecimiento. (Ver la tabla XXIII del anexo, para la clasificación de las bacterias a intervalos de temperatura). Se alimentan de materia orgánica soluble o finamente dividida (Ver figura 17 del anexo, donde se establecen las fases de crecimiento bacteriano).

Los microorganismos son excelentes empleados que sólo necesitan condiciones adecuadas para ejercer su misión. Las condiciones ambientales se obtienen mediante la regulación del pH, temperatura, adición de nutrientes, una cantidad adecuada de oxígeno y una mezcla adecuada del medio.

El tratamiento biológico está compuesto de complejas poblaciones biológicas, (ver figura 18 del anexo, del crecimiento relativo de los microorganismos en el curso de la estabilización de un residuo orgánico en un medio líquido).

## **2. TRATAMIENTO BIOLÓGICO**

Las aplicaciones más comunes son: el proceso de lodos activados, lagunas de aereación, filtros percoladores, biodiscos y estanques de estabilización (ver figura 19 del anexo, diagramas de flujo para los procesos biológicos más utilizados en el tratamiento de agua residual).

### **2.1 Proceso de lodos activados**

Es el proceso biológico de más amplio uso en el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales. A lo largo de los años han surgido una serie de variantes con lo cual se confirma su versatilidad a un amplio rango de requerimientos de tratamiento, los cuales consisten en diferentes combinaciones de operación, regímenes de mezcla, sistema de aereación y niveles de carga.

El principio básico es que el agua residual se ponga en contacto con una población microbiana mixta, en forma de suspensión floculenta en un sistema aireado y agitado. La materia en suspensión y coloidal se elimina rápidamente de las aguas residuales por adsorción y aglomeración en los flóculos microbianos. Está materia y los nutrientes disueltos se descomponen por el metabolismo de la población microbiana, proceso conocido como estabilización. Parte del material nutriente se oxida a sustancias simples como el anhídrido carbónico, un proceso denominado mineralización, parte se convierte en materia celular nueva, o sea proceso de asimilación.

Parte de la masa celular, se descompone, por ser células viejas, a este proceso se le llama respiración endógena. El proceso de oxidación suministra la energía necesaria para la operación de los procesos de adsorción y asimilación. Al alcanzar el agua residual el tratamiento deseado, la masa celular conocida como lodo, se separa del agua residual por sedimentación en un tanque especialmente diseñado. El sobrenadante de esta etapa de sedimentación, constituye el agua residual tratada y debe estar libre de lodos. La mayor parte de los lodos separados en esta etapa, se regresa al reactor biológico, para mantener la concentración de lodos al nivel necesario para un tratamiento efectivo y para que actúe como inóculo microbiano. Parte de los lodos se extrae para su descarga y se conoce como lodo en exceso. En un sistema balanceado, el lodo en exceso representa la cantidad neta de masa microbiana, producida por asimilación en el reactor biológico. El lodo generado en las operaciones unitarias físicas se conoce como lodo primario, y sus características no son iguales al lodo en exceso. La proporción de nutrientes removidos por cada uno de los tres mecanismos: absorción, asimilación y mineralización, se pueden variar por medio de las condiciones de operación, y depende de las características del agua residual a tratar.

### **2.1.1 Elección del reactor**

Esta es una de las etapas principales del diseño, en la que intervienen los siguientes procesos, cinética de las reacciones, las necesidades de transferencia de oxígeno, debido a que no se cubría la demanda de oxígeno en la variante de flujo de pistón se establecieron las variantes del proceso de aereación graduada, aereación con alimentación escalonada, y el proceso de mezcla completa.

De igual forma se debe considerar, la naturaleza del agua residual a tratar, el reactor de mezcla completa puede soportar cargas de choque provocadas por vertidos puntuales con elevado contenido orgánico y compuestos tóxicos, está es la razón por la que se ha adoptado con más frecuencia la variante de lodos activados. Otros factores a considerar, son las condiciones ambientales locales y el costo de construcción, explotación y mantenimiento.

### 2.1.2 Criterios de carga

Los parámetros más utilizados son la relación alimento / microorganismos F/M, el tiempo medio de retención celular  $\theta_c$ . Representa la relación existente entre la cantidad de alimento que entra al reactor biológico y el contenido de microorganismos y se define como,

$$F/M = \frac{S_o}{\theta X} \quad (2.1)$$

donde

F/M	= relación alimento / microorganismos, d <sup>-1</sup>
S <sub>o</sub>	= concentración de DBO o DQO en el afluente, Kg./m <sup>3</sup> .
θ	= tiempo de retención hidráulica del tanque de aereación = V / Q, d.
V	= volumen del tanque de aereación, m <sup>3</sup> .
Q	= Caudal de entrada, m <sup>3</sup> /d
X	= concentración de sólidos suspendidos volátiles en el tanque de aereación, Kg./m <sup>3</sup> ,

La relación alimento microorganismo, se puede considerar como la energía disponible para los microorganismos en los lodos, por lo que influye en la actividad de los mismos, está relacionada con el tiempo de residencia de éstos dentro del reactor biológico.

Sí la actividad de los lodos aumenta debido al incremento de la disponibilidad del nutriente, la cantidad de lodos en exceso se deberá aumentar, lo cual reduce el tiempo de residencia de los lodos en el reactor biológico, por lo que la relación F/M es inversamente proporcional al tiempo de retención. La tasa de utilización específica (U), tiene la misma representación que la relación de alimento / microorganismos, pero referido al sustrato consumido, no respecto al que entra. La relación entre la tasa de utilización específica y la relación alimento / microorganismo es la siguiente,

$$U = \frac{(F/M) E}{100} = \frac{-r_{su}}{X} \quad (2.2)$$

donde E =Eficiencia del proceso en porcentaje  
 $r_{su}$  =Tasa de utilización de sustrato, masa / volumen \* tiempo

También tenemos que

$$U = \frac{S_o - S}{\theta X} = \frac{Q * (S_o - S)}{V_r * X} \quad (2.3)$$

donde S =concentración de DBO o DQO en el efluente, Kg./m<sup>3</sup>,

El tiempo medio de retención celular o tiempo de residencia de los lodos, se interpreta como la relación entre la masa de lodos presentes en el reactor biológico; los cuales deben de tomar en cuenta los sólidos en los lodos de alimentación y la tubería asociada así como en la etapa de aereación; y la masa de los extraídos diariamente del sistema biológico; debe incluir los sólidos en los lodos arrastrados por el efluente tratado, así como los que se encuentran en la corriente de lodos de desecho. Un valor bajo de este parámetro implica una tasa alta de crecimiento de los lodos, lo que implica una actividad alta. La relación del tiempo medio de retención celular a partir del volumen del tanque de aereación es la siguiente,

$$\theta_c = \frac{V_r X}{Q_w X_w + Q_e X_e} \quad (2.4)$$

donde

$\theta_c$	=	tiempo retención celular basado en el volumen del tanque del reactor de aereación, d
$V_r$	=	volumen del tanque de aereación, m <sup>3</sup>
$X$	=	concentración de sólidos suspendidos volátiles en el tanque de aereación, Kg./m <sup>3</sup>
$Q_w$	=	caudal de fango purgado, m <sup>3</sup> /d
$X_w$	=	concentración de sólidos suspendidos volátiles en el fango purgado, Kg./m <sup>3</sup>
$Q_e$	=	caudal del efluente tratado, m <sup>3</sup> /d
$X_e$	=	concentración de sólidos suspendidos volátiles en el efluente tratado, Kg./m <sup>3</sup>

Para seleccionar la edad del fango, lo mejor es hacerlo en base a la experiencia de plantas en funcionamiento.

En la tabla XXIV, se encuentra tabulada la información de más de 160 plantas en funcionamiento en Alemania, dicha tabla tiene la información de la edad del fango en virtud de las exigencias del vertido. La tasa de utilización específica  $U$ , es una medida en la que se utiliza el sustrato (DBO), por unidad de masa de microorganismos y  $\theta_c$  se interpreta como una medida del tiempo de residencia de los microorganismos dentro del sistema. La relación entre las tres variables anteriores es la siguiente:

$$\frac{1}{\theta_c} = \frac{Y F E}{M * 100} - k_d = YU - k_d = \frac{-Y * r_{su}}{X} - k_d \quad (2.5)$$

donde  $Y$  = coeficiente de producción celular, Kg. de células producidas/  
Kg. de materia orgánica eliminada,  
 $E$  = rendimiento del proceso, %  
 $k_d$  = coeficiente de degradación endógena,  $d^{-1}$

La definición de la eficacia del proceso está definida, por la ecuación:

$$E = \frac{S_0 - S}{S} * 100 \quad (2.6)$$

La concentración de microorganismos, se expresa en gramos de lodo/  $m^3$  de tanque, representa la cantidad de sólidos existentes en el reactor por unidad de volumen. Se interpreta como la cantidad de sólidos en suspensión del líquido mezcla (agua bruta + fango + aire). La concentración de microorganismos en el reactor está definida por la siguiente ecuación

$$X = \frac{\theta_c Y (S_o - S)}{\theta (1 + k_d \theta_c)} \quad (2.7)$$

Sabemos que  $\theta = V_r / Q$ , al sustituir en la ecuación 2.7, tenemos:

$$V_r = \frac{\theta_c Q Y (S_o - S)}{X (1 + k_d \theta_c)} \quad (2.8)$$

Por experiencia de diferentes procesos se ha encontrado que valores de  $\theta_c$  entre 3 y 15 días producen un efluente estable en calidad, y un fango con excelentes características de sedimentación. El tiempo de retención hidráulica ( $\theta = V_r / Q$ ) es el tiempo promedio empleado por el agua residual, a tratar en la etapa de aereación, al tiempo de contacto entre los lodos y las aguas residuales a tratar, también se le llama período de aereación y tiempo de retención.

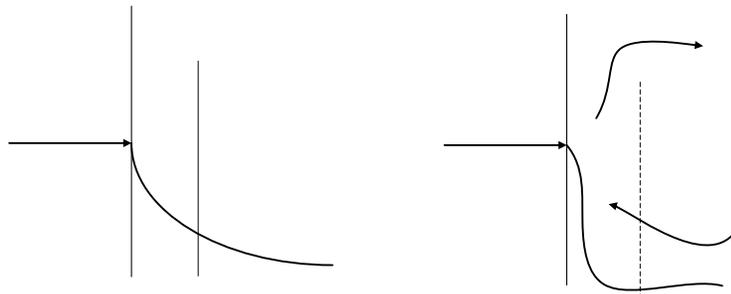
### 2.1.3 Necesidades de transferencia de oxígeno

En el tratamiento de un agua residual tipo industrial, el oxígeno debe estar disponible en una tasa equivalente a la carga de demanda ejercida por las aguas residuales que entran a la planta. Se debe poner en contacto las aguas residuales con el oxígeno, transferir éste a través de la interfase de gas líquido para disolverlo en el mismo y luego transferir el oxígeno disuelto a través del líquido hasta los microorganismos. Al momento de que el oxígeno se disuelve en el líquido, forma una capa relativamente concentrada, muy cercana a la interfase líquido gas, luego se da la difusión del oxígeno al volumen del líquido.

Como la solubilidad del oxígeno dentro del agua es relativamente baja, el proceso está gobernado por la segunda etapa. En la figura 8, se encuentra el mecanismo de transferencia de oxígeno.

Dentro de los factores que afectan la transferencia de oxígeno al agua residual a tratar. Se encuentra: la presencia de sales y otras sustancias en el agua que, afectan el coeficiente de transferencia de masa, y el cual es la fuerza impulsora de la transferencia de oxígeno del medio gaseoso al líquido. La concentración de saturación del oxígeno está relacionada con la temperatura.

**Figura 8. Mecanismos de transferencia de Oxígeno**



**Fuente: Eckenfelder W. W. Water Quality Engineering for Practicing Engineers. Página 135.**

La cantidad teórica de oxígeno se determina a partir de la DBO del agua residual y de la cantidad de microorganismos purgados diariamente del sistema. El suministro de aire debe ser adecuado para satisfacer la DBO del agua residual, satisfacer la respiración endógena de los microorganismos presentes en el fango, proporcionar un mezclado adecuado y mantener una concentración de oxígeno entre 1 y 2 mg/l en el tanque de aereación. La necesidad de oxígeno en un proceso de lodos activados convencional sin nitrificación, se puede calcular a través de la siguiente ecuación,

$$O.N \text{ (kg. /d)} = A * DBO + B * MLSSV \quad (2.9)$$

donde

DBO	=	Kg. DBO <sub>5</sub> eliminados al día
MLSSV	=	Kg. MLSSV en el reactor biológico

Los valores de A y B varían de un autor a otro, en la tabla XXV del anexo, se encuentran los valores de dichos coeficientes. El primer término de la ecuación 2.9 (A \* DBO), representa el oxígeno necesario para la síntesis, proceso por medio del cual la materia orgánica en el agua, se elimina y en parte se transforma, en materia viva. El consumo de oxígeno en la energía de este proceso de síntesis es de 0.62 Kg. O<sub>2</sub> / Kg. DBO<sub>5</sub>, este valor supone que la totalidad de la contaminación, tanto partículas o coloides, absorbidos en la membrana celular más tarde se solubiliza y metaboliza, sin quedar materia orgánica almacenada en la membrana celular. Lo anterior se cumple con edades de lodos del orden de los 12 días o más. El término (B \* MLSSV), se denomina respiración endógena, que representa la oxidación de la masa activa degradable.

En promedio se conoce que 1000 gramos de DBO<sub>5</sub>, produce por síntesis 711 gramos de masa activa, de esta masa el 80% es degradable y el 20% inerte. La endogénesis de 1 gramo de masa activa, se oxida 0.8 gramos que producen gran parte CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, con consumo equivalente de oxígeno. La oxidación completa de 1 gramo de masa activa necesita 1.48 gramos de oxígeno. Las necesidades de oxígeno bajo condiciones punta, para la endogénesis no se considera el factor punta, mientras que para la síntesis se puede utilizar la siguiente ecuación,

$$O_{(\text{punta}, \text{ síntesis})} = 0.45 * P + 55 \quad (2.10)$$

donde  $P$  = factor punta de carga orgánica (%)

### 2.1.3.1 Transferencia de Oxígeno

Las ecuaciones anteriores nos ayudan a determinar las necesidades de oxígeno para la masa bacteriana, las cuales se determinan en condiciones controladas, por lo que resulta necesario determinar la transferencia de oxígeno bajo condiciones reales de funcionamiento. Lo cual se hace aplicando un factor de corrección,

$$\text{Oxígeno real} = \text{Oxígeno teórico} / K_t \quad (2.11)$$

donde  $K_t$  = coeficiente global de transferencia

El valor de  $K_t$ , se determina a través de la siguiente ecuación, y se basa en otros 3 coeficientes

$$K_t = K_{t1} * K_{t2} * K_{t3} \quad (2.12)$$

donde

- $K_{t1}$  = corrección proporcional al déficit de saturación
- $K_{t2}$  = variación de la disolución del oxígeno con la temperatura
- $K_{t3}$  = corrección de la dilución del oxígeno en el agua residual

Para determinar el coeficiente  $K_{t1}$ , se utiliza la siguiente ecuación

$$K_{t1} = (C'_s - C_x) / C_s \quad (2.13)$$

donde

- $C'_s$  = concentración de saturación en el tanque a la temperatura T
- $C_x$  = concentración media de oxígeno en el tanque de aereación  
(se adopta sin nitrificación  $C_x = 2$  mg/l, con nitrificación  $C_x = 3$  mg/l)
- $C_s$  = saturación del agua, a temperatura T y a presión atmosférica normal

En la tabla XXVI del anexo, se encuentran los valores de  $C_s$ , en función de la temperatura. Para determinar el valor de  $C'_s$ , se deben de efectuar 3 correcciones, por medio de la siguiente ecuación,

$$C'_s = C_s * \beta * C_p * C_A \quad (2.14)$$

donde

- $\beta$  = corrección por las materias en suspensión en el líquido mezcla y su salinidad
- $C_p$  = corrección por las variaciones de presión debidas a la altitud
- $C_A$  = corrección por la altura del agua en el tanque de aereación

A los valores de  $\beta$ , en condiciones normales y hasta salinidad de 3 mg/l, se puede adaptar un valor de 0.98. Mientras que  $C_p$ , se puede calcular a través de la siguiente fórmula

$$C_p = 1 - 0.111 * \text{ALTITUD (m)}/1000 \quad (2.15)$$

Para los valores de  $C_A$ , se debe tener en cuenta la concentración media. Para sistemas de aereación superficial la concentración de saturación media es la misma en la superficie, en este caso no hay corrección por lo que el valor de  $C_A$  es 1. Mientras que en sistemas de difusión de aire la concentración es la media entre el fondo y la superficie, podemos utilizar la siguiente ecuación para calcular el valor de  $C_A$ ,

$$C_A = (10.33 + 0.28 * p) / 10.33 \quad (2.16)$$

donde  $p$  = profundidad de inmersión del difusor (m)

El coeficiente  $K_{t2}$ , se calcula a través de la siguiente ecuación

$$K_{t2} = 1.024^{(T-10)} \quad (2.17)$$

donde  $T$  = temperatura del agua residual (°C)

El coeficiente  $K_{t3}$ , depende de la concentración de sólidos en suspensión en el líquido mezcla, concentración de tenso activos sistema de oxigenación. Los valores de dicho coeficiente se encuentran en la tabla XXVII del anexo.

### 2.1.3.2 Técnicas de aereación y potencia a instalar

Se dividen en tres grupos: con aire comprimido, burbujas gruesas, mediante tubos sumergidos, burbujas medias, mediante tubos perforados. burbujas finas. Por medio de difusores porosos finos y placas perforadas, ésta es la técnica más utilizada, y consiste en aplicarse aire comprimido para producir burbujas y efervescencia en el centro del medio a tratar. Para un tratamiento normal de aguas residuales, los valores de flujo de aire se encuentran entre 7 a 10 m<sup>3</sup>/ m<sup>3</sup>. La distribución de los dispositivos de aereación dentro del reactor biológico es importante, ya que afecta los patrones de mezcla, y las velocidades relativas de las burbujas y el líquido. Es importante un patrón de flujo helicoidal del líquido dentro del reactor biológico. Por medios mecánicos, de eje horizontal, como los cepillos rotativos, de eje vertical como las turbinas; de superficie o fondo; con agitadores rotativos. La tercera técnica de aereación es por medio de bombas, entre ellos: chorros, bombas en depresión e inyectores de aire atmosférico. El requisito principal que debe cumplir el sistema de aereación es que debe ser capaz de transferir oxígeno al licor mezclado, equivalente al pico de requerimiento . La medida de eficiencia de oxigenación al sistema se expresa como la masa de oxígeno transferido por unidad de energía consumida (Kg. O<sub>2</sub>/Kwh.). El sistema de aereación, también suministra la agitación necesaria para mantener en suspensión los flóculos de lodo y los lodos mezclados, tan homogéneo como sea posible, si la agitación es insuficiente como para mantener en suspensión en todo el líquido, a los flóculos de lodos, el contacto reducido entre microorganismos y nutrientes retardará la tasa de remoción de los nutrientes. También se requiere una agitación adecuada para mantener constante la concentración de oxígeno en todas las secciones del reactor biológico.

Se utiliza la siguiente ecuación para calcular la potencia requerida en sistemas de difusión:

$$P = (0.227 * Q_{\text{aire}}/1.04) * ((P_2 / P_1)^{0.283} - 1) * C \quad (2.18)$$

donde

- P = Potencia a instalar (HP)
- P<sub>1</sub> = 10.33 m.c.a.
- P<sub>2</sub> = P<sub>1</sub> + profundidad reactor + perdidas difusores + perdidas tuberías (m.c.a.)
- C = coeficiente de seguridad (10% normalmente)
- Q<sub>aire</sub> = caudal de aire necesario

Para determinar el valor de Q<sub>aire</sub>, se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q_{\text{aire}} = \text{oxígeno condiciones punta} / K_{\text{ox}} * \text{EFI} \quad (2.19)$$

donde

- K<sub>ox</sub> = son los Kg. O<sub>2</sub> / m<sup>3</sup> reactor en condiciones normales (se adopta 0.3)
- EFI = eficiencia del difusor

En sistemas que se utilizan medios mecánicos, la potencia se determina a través de la ecuación:

$$P = \frac{\text{oxígeno real condiciones punta (Kg./h)}}{\text{coeficiente de transferencia (Kg. O}_2 \text{ / Kw. h)}} \quad (2.20)$$

#### 2.1.4 Producción de lodo

Los lodos activados se componen de la masa activa residual más los residuos, la materia volátil no degradable preexistente en el agua bruta y la materia mineral preexistente. En forma general los sólidos en suspensión en el agua residual presentan la siguiente composición: 50% volátiles degradables metabolizados en el proceso biológico, 30% de minerales y 20% de volátiles inertes. Los valores anteriores son valores promedio, pero la composición de un sistema en particular, dependerá de la composición de los nutrientes del agua residual a tratar y de las condiciones de operación de la planta, la característica esencial de un lodo es que debe contener una población microbiana capaz de procesar el agua residual a tratar y también debe contar con buenas propiedades para flocular. El crecimiento floculento de los lodos es importante, en primer lugar para la adsorción y aglomeramiento de materias iónicas, coloidales y en suspensión presentes en el agua residual, y en segundo lugar para la rápida, eficiente y económica separación de los lodos procedentes de las aguas residuales tratadas. Cuando se mezclan los lodos con el agua residual a tratar, la aglomeración de las partículas coloidales y en suspensión con los floculos de los lodos, ocurre rápidamente. La descomposición y asimilación del material aglomerado y soluto continúa, a este proceso se le llama estabilización. La siguiente ecuación permite determinar la producción observada de lodo en un sistema con recirculación:

$$P_{(SSV)} = Y * Q * (S_o - S) / (1 + k_d \theta_c) \quad (2.21)$$

donde  $P_{(SSV)}$  = producción de lodos o biomasa (Kg. SSV/día)

De los lodos en exceso, una pequeña parte escapa del proceso del agua decantada, y el resto es retenido en los depósitos para un tratamiento posterior. Las recomendaciones de los parámetros, tales como la carga de sólidos, tiempo de retención, velocidad ascensional y la carga del vertedero de salida, para una decantación secundaria después de un proceso biológico, se encuentran en la tabla XXVIII del anexo.

#### 2.1.4.1 Recirculación de lodos

Para determinar la cantidad de lodos a recircular es muy importante, conocer el índice de Mohalman, el cual es el volumen en mililitros ocupado por los gramos de fango activado, después de decantar durante media hora en una probeta de 1 litro, se expresa en ml/g o l/Kg. Los lodos sedimentados en el decantador secundario se recirculan en parte al reactor biológico, con el fin de mantener una determinada carga, para la determinación del caudal de recirculación de lodos se utiliza la siguiente ecuación

$$Q_r / Q = \frac{X * I}{(1000 - (X * I))} = \frac{X}{(X_r - X)} \quad (2.22)$$

donde

$Q_r$	=	caudal de recirculación de lodos ( $m^3/d$ )
$X_r$	=	concentración de lodos en la recirculación ( $Kg./m^3$ )
$I$	=	índice de Mohalman ( $l/Kg.$ )

#### **2.1.4.2 Espesamiento de lodos por gravedad**

Antes de eliminar o estabilizar los lodos, se realiza un espesamiento de los mismos, purgados de los decantadores, con lo cual se reduce el volumen del fango a transportar o tratar, y aumentar su estabilidad biológica, con el fin de producir un material lo suficientemente concentrado e inofensivo. Aparte del alto contenido de agua, el otro gran problema es su tendencia a la putrefacción. A esta etapa del proceso se conducen los lodos purgados de la decantación primaria y secundaria. Se utilizan normalmente equipos circulares. En este tipo de espesadores, el fango sedimenta y compacta, el fango espesado se extrae por la parte inferior del tanque. Los mecanismos de recogida de lodos son raspadores profundos, que remueven el fango lentamente. El sobrenadante se retorna al decantador primario. El fango espesado que se recoge del fondo del tanque se bombea a los digestores o equipos de deshidratación, según sea el caso. La concentración de sólidos en los lodos se duplica aproximadamente en el proceso de espesamiento. Una buena parte del costo del tratamiento del agua residual está representado por el tratamiento y disposición de los lodos. Se puede mejorar la capacidad de asentamiento de los lodos por la adición de tierra, iones inorgánicos polivalentes, como el Fe III o el Al III.

Los parámetros de diseño son: carga de sólidos expresada en peso de sólidos por unidad de tiempo y superficie útil del espesador, carga hidráulica, influye sobre la curva de sedimentación, en la capacidad de formación y eliminación de sobrenadantes, y altura del espesador que influye directamente en la capacidad de espesamiento, los valores recomendados se encuentran entre los 2.5 a 3 metros.

Los tiempos de retención utilizados son normalmente mayores a las 24 horas, se recomienda tomar medidas por los malos olores causados por las reacciones anaerobias en los lodos. Los valores de diseño de los parámetros anteriores se encuentran en la tabla XXIX del anexo.

#### **2.1.4.3 Tratamiento de lodos**

Por lo general la estabilización de los lodos se realiza biológicamente, por medio de digestión, que reduce ésta el contenido de materia orgánica y elimina los olores desagradables, puede ser aeróbica o anaeróbica. A través de la digestión anaeróbica se logra reducir casi a la mitad el contenido orgánico, y se fermenta para producir metano y anhídrido carbónico. Durante la digestión anaeróbica gran parte del contenido de nitrógeno y de fósforo se libera en forma soluble. Normalmente son procesos cerrados para evitar el ingreso de oxígeno. Los compuestos de alto peso molecular se convierten en sustancias solubles de bajo peso molecular, los nutrientes orgánicos se convierten en ácidos grasos, que baja el pH del sistema, los ácidos grasos son convertidos en metano, anhídrido carbónico y una pequeña porción de hidrógeno.

Los organismos productores de metano son muy sensibles a los valores de pH bajo, el cual tiene como límite 6.2. Por lo que se debe asegurar un adecuado tiempo de residencia del lodo a tratar. Las tasas de reacción biológica aumentan con la temperatura. Para mantener temperaturas de digestión más elevadas con frecuencia se quema el metano producido, para mantener la temperatura del medio. La adición de lodos crudos y la extracción de lodos estabilizados normalmente es intermitente.

### **2.1.5 Necesidades de nutrientes**

Los principales son el nitrógeno, del cual se necesita un 12.4% en peso, y fósforo, una quinta parte del valor del anterior. Las necesidades de nutrientes son más reducidas cuando los tiempos medios de retención celular aumentan.

### **2.1.6 Control de organismos filamentosos**

Es el problema más frecuente, conocido como fango voluminoso (*bulking*). Proliferan organismos filamentosos en el líquido mezcla, produce lodos con características pobres de sedimentación. Actualmente se ha incorporado al sistema una zona de contacto inicial en el reactor biológico, en este apartado se mezcla el efluente primario y el fango activado recirculado, a esta sección se le ha llamado selector. El tiempo de contacto en el selector es entre 10 y 30 minutos.

## **2.2 Tipos de procesos y sus modificaciones**

Ver la tabla XXX del anexo, para una descripción de las diferentes modificaciones al proceso de lodos activados. En la tabla XXXI del anexo, se encuentran las características que definen el funcionamiento de las diferentes variantes del proceso de lodos activados. En la tabla XXXII del anexo, se encuentran los parámetros de diseño del proceso de lodos activados.

## **2.3 Control del proceso**

Los parámetros, que se utilizan con más frecuencia son: la relación alimento / microorganismo y el tiempo medio de retención celular,  $\theta_c$ . La concentración de sólidos suspendidos en el líquido mezcla; SSLM; la recirculación de fango activado; para mantener a la anterior; la purga de fango activado ayuda a regular el tiempo medio de retención celular. Los principales factores que intervienen son:

### **2.3.1 Control del oxígeno disuelto**

En la práctica se debe mantener una concentración entre 1.5 y 4 mg/l de oxígeno disuelto, lo más uniforme en todos los puntos del tanque. Esta cantidad de oxígeno debe ser suficiente para cubrir la demanda de la población de microorganismos y mantener un residual. Si el oxígeno disuelto es pobre, hay una tendencia al crecimiento de los microorganismos filamentosos. Valores arriba de 4 mg/l de oxígeno disuelto no mejoran las condiciones y lo encarecen.

### **2.3.2 Control de la recirculación del lodo activado**

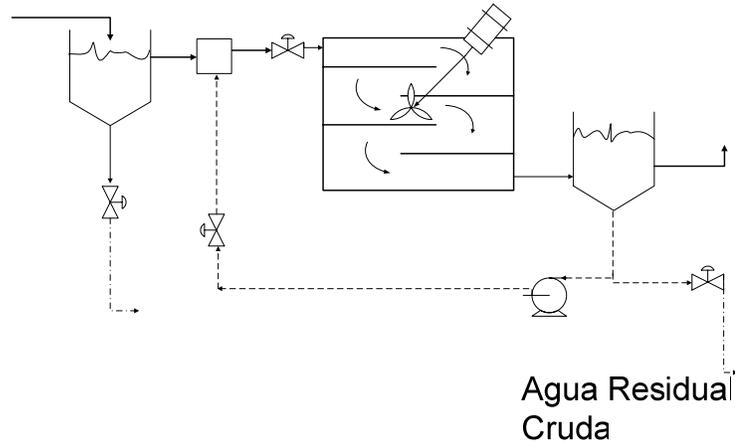
Su función es mantener la concentración de fango activado en el tanque de aereación. Es un elemento fundamental del proceso. Se debe tener una capacidad adecuada de bombeo para la recirculación del fango, incluso mayor del 100% de la recirculación, cuando existen períodos donde el caudal del agua residual a tratar se reduce considerablemente.

El caudal a recircular de fango se determina por sedimentación, control de la altura de la capa del fango, balance de masa de los decantadores secundarios, balance de masa en los tanques de aereación y calidad del fango. La práctica más común, es purgar el fango desde la línea de recirculación, se trata de fango más concentrado, se debe purgar fango para mantener la relación alimento / microorganismos o un tiempo medio de retención celular determinado. El líquido purgado se descarga a decantadores primarios, o a espesadores u otras instalaciones de espesamiento de lodos. En la figura 9 y la figura 10 se presenta un diagrama típico de un proceso de lodos activados de flujo en pistón y de mezcla completa, respectivamente, en el cual se observa la recirculación del fango activado.

### **2.3.3 Tasa de utilización de oxígeno**

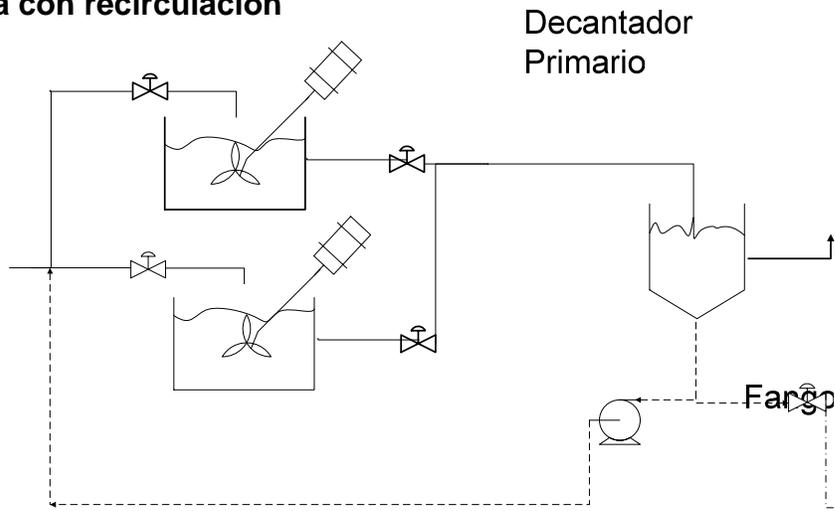
En el proceso de lodos activados, los microorganismos consumen oxígeno, la velocidad a la que se realiza, es una medida de la actividad biológica: mayor velocidad de consumo de oxígeno, mayor actividad biológica.

**Figura 9. Diagrama típico del proceso de lodos activados de flujo en pistón**



Fuente: METCALF & HEDÍ, Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización .Página 618.

**Figura 10. Diagrama típico de un proceso de lodos activados de mezcla completa con recirculación**



Fuente: METCALF & HEDÍ, Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización .Página 619.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Dimensiones del tratamiento primario

##### 3.1.1 Cribado

- Rejas de platinas de acero al carbón
- Ancho entre barrotes 6.35 mm ( $\frac{1}{4}$ " )
- Separación libre entre barrotes 12.7 mm ( $\frac{1}{2}$ " )
- Pendiente del canal 5%.
- Ancho del canal en el área de las rejas: 0.2m
- Pérdida de carga por el peso a través de las rejas: 8 cm.

##### 3.1.2 Desarenador

- Sección transversal 0.40 m<sup>2</sup>
- Longitud 19.5 m
- En la figura 11 se encuentran representadas las relaciones dimensionales para el desarenador tales como  $h = 1.5\text{m}$ ,  $a = 1.5\text{m}$ ,  $h_1 = 0.4\text{m}$ ,  $h_2 = 0.3\text{m}$ ,  $f = 0.3\text{m}$

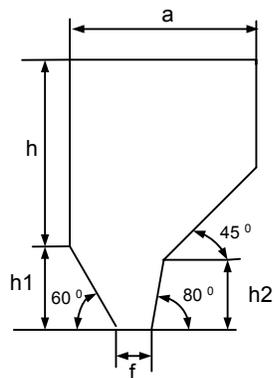
##### 3.1.3 Decantación primaria

- Volumen 152.55 m<sup>3</sup>,
- Altura 3 m,
- Radio 8.04 m
- Inclinación de fondo 3%,

### 3.1.4 Regulación de caudal

- Volumen del tanque regulador  $157.47 \text{ m}^3$
- Caudal regulado  $12.15 \text{ m}^3 / \text{h}$
- Caudal promedio durante las horas de descarga  $25.42 \text{ m}^3 / \text{h}$ .
- Potencia necesaria para aereación mecánica del regulador de caudal  $6.30 \text{ Kw}$ . ( $10 \text{ Hp}$ ).

**Figura 11. Relaciones dimensionales de un desarenador**



Fuente: HERNÁNDEZ LEHMANN, AURELIO. Manual de diseño de estaciones depuradoras de aguas residuales. Página 31.

3.2. Volumen del reactor biológico  $41.42 \text{ m}^3$ .

3.3 La cantidad de oxígeno que se debe transferir es de  $108.06 \text{ Kg. O}_2 / \text{día}$ .  
Se necesita una potencia de  $1.59 \text{ Kw}$ . ( $3 \text{ Hp}$ ).

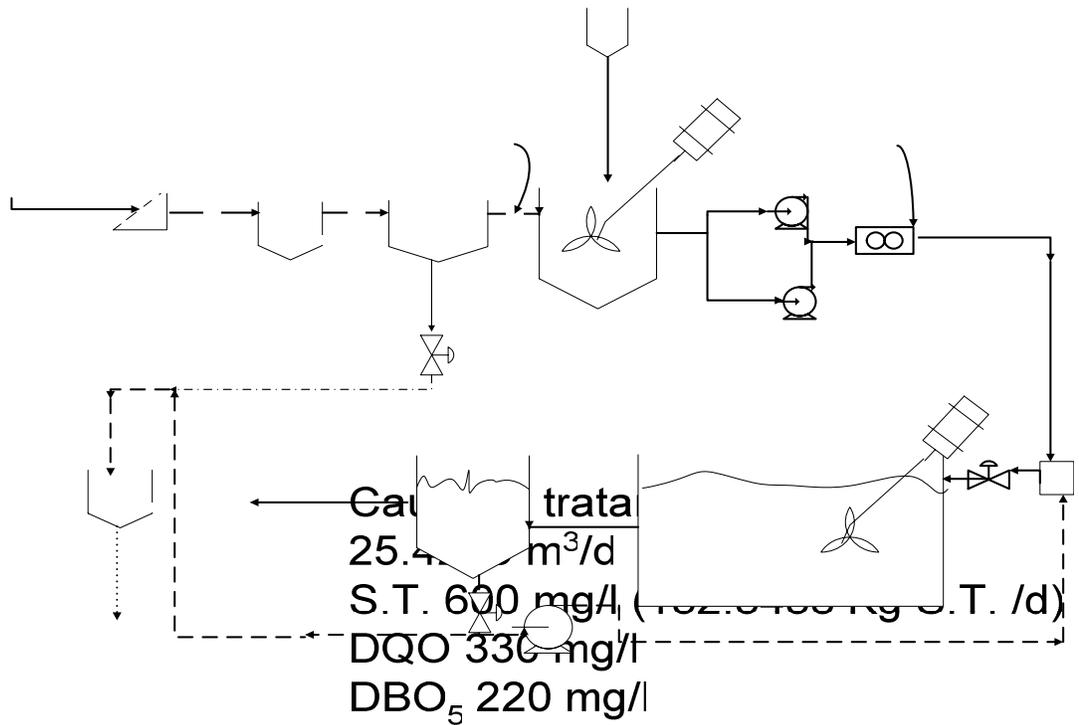
### 3.4 Dimensiones del decantador secundario circular

- Diámetro 4.40 m.
- Altura 3 m.
- Volumen del tanque decantador 45.58 m<sup>3</sup>.

La cantidad de lodos en exceso en un proceso con recirculación será de 19.4101 Kg. / día.

En el apéndice 1, se encuentra un detalle del cálculo realizado para determinar los valores anteriores. Así como los valores de la medición de caudal y los resultados de la caracterización del agua residual a tratar. En la figura 12, se encuentra un diagrama de flujo de la planta de tratamiento propuesta.

Figura 12. Diagrama de flujo planta de tratamiento.



**Agua Residual Cruda**

P-172

**Desarenador**

P-168

**Decantador Primario**

P-18

E-8c

**Rejas o tamiz**

E-8e

**Fango**

45.7637 Kg S.S.T./d

52

E-9e

**Espesamiento por gravedad**

**Efluente Tratado**

$DBO_5 = 20 \text{ mg/l}$

**Decan Secun**

## CONCLUSIONES

1. Los valores de diseño de las operaciones físicas unitarias para la etapa de cribado: son rejas de platinas de acero al carbón; ancho entre barrotes 6.35 mm ( $\frac{1}{4}$ " ), separación libre entre barrotes 12.7 mm ( $\frac{1}{2}$ " ). En la etapa de decantación primaria el volumen del tanque es de 152.55 m<sup>3</sup>, con una altura 3 m. El volumen del tanque regulador de caudal es de 157.47 m<sup>3</sup>.
2. El volumen del reactor biológico debe ser de 41.42 m<sup>3</sup>. La cantidad de oxígeno que se debe transferir es de 108.06 Kg. O<sub>2</sub> / día, para lo cual se requiere de una potencia de 1.59 Kw. (3 Hp).
3. Las dimensiones del decantador secundario son: altura de 3 m, y volumen del tanque decantador 45.58 m<sup>3</sup>. La cantidad de lodos en exceso en un proceso con recirculación será de 19.41 Kg. / día.
4. Si el caudal no se regula, se obtiene los siguientes valores de diseño:
  - La cantidad de oxígeno que se debe transferir sería de 226.03 Kg. O<sub>2</sub> / día. Se necesita una potencia de 3.34 Kw. (5 Hp).
  - Volumen del reactor biológico 86.61 m<sup>3</sup>
  - Dimensiones del decantador secundario
    - Diámetro 6.36 m.
    - Altura 3 m.
    - Volumen del tanque decantador 95.34 m<sup>3</sup>.

- La cantidad de lodos en exceso en un proceso con recirculación sería de 40.60 Kg. / día.

Se debe realizar un análisis económico para evaluar el aumento del tamaño de las etapas anteriores, versus la construcción del regulador de caudal y el equipo necesario para la aereación de está etapa.

5. Durante los fines de semana, por no existir descargas de agua residual por parte del proceso productivo, se debe recircular el total del efluente tratado.
6. Para mantener un pH adecuado para el tratamiento biológico se debe regular el mismo, ésto se debe realizar en el tanque regulador de caudal.
7. Para realizar un diseño más exacto, se debe determinar experimentalmente las constantes cinéticas, el coeficiente de producción celular ( $Y$ ), y el coeficiente de degradación endógena ( $k_d$ ).

## RECOMENDACIONES

1. La red actual de drenajes es unitaria, se debe separar el agua pluvial del agua residual a tratar.
2. Si no se regula el caudal del agua residual a tratar, el régimen de mezcla del reactor biológico debe ser de mezcla completa, por las variaciones de caudal, de hasta 2.5 veces del caudal promedio.
3. Para regular el pH, se puede utilizar una mezcla de ácido fosfórico y nítrico, para mantener un balance adecuado de nutrientes para la población microbiana, que respeta una relación de 12.4:2.5 % en peso de nitrógeno y fósforo, respectivamente.
4. Si no se regula el caudal, se dispone de un reactor biológico con mayor volumen, el cual permitiría una mayor posibilidad de crecimiento de la cantidad del agua residual a tratar.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Chinchilla Fonseca, Martín E. Análisis de la biodegradabilidad de un agua de desecho domestico-industrial por medio de un biosimulador AL-91. Tesis de la escuela regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 1988. Páginas: 22-38.
2. Eckenfelder W. W. Water Quality Engineering for Practicing Engineers. Barnes and Noble. Estados Unidos, 1970. 328 pp.
3. Hernández Lehmann, Aurelio. Manual de diseño de estaciones depuradoras de aguas residuales. España, 1997. 225pp.
4. Hernández Muñoz, Aurelio. Depuración de aguas residuales. 4a ed. Servicio de publicaciones de la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid. España, 1998. 1005 pp.
5. ISCO, Inc. Manual De Instrucciones Medidor de flujo modelo 4230. Revisión L, 10-2000. E mail: [service@isco.com](mailto:service@isco.com).
6. Metcalf & Hedí. Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización. Tr. de la 3a ed. en Ingles, México, 1997. Tomo I, 750 pp. T. II, 704pp.
7. Osorio Ugarte, Haydeé Isabel. Evaluación de la planta de tratamiento de aguas residuales de origen domestico por el proceso de lodos activados de la colonia Colinas de Monte María. Tesis de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería Octubre 2000. Páginas: 8-58.

8. Reglamento De Aguas Residuales. Versión preliminar para aprobación final Organismos Ejecutivo. Última Revisión: Junio de 1999.
9. Winker, Michael. Ingeniera sanitaria de aguas residuales. 1a ed. Editorial Limusa S.A. de C.V., México 1986, 338 pp.
10. [www. dininstrumentos. com](http://www.dininstrumentos.com). Consultada en Julio del 2002.
11. [www. cec.uchile.cl/leherrer/Apunte/fisicoqapu01.htm](http://www.cec.uchile.cl/leherrer/Apunte/fisicoqapu01.htm). Consultada en Julio2002.

## APÉNDICE

A continuación se detallan los cálculos realizados para cada una de las etapas del tratamiento del agua residual,

### 1. Cribado

Los siguientes son valores de las diferentes variables,

- Tipos de barrotes rectangulares tipo platina.
- Ancho de barrotes 6.35 mm ( $\frac{1}{4}$  “).
- Separación libre entre barrotes 12.7 mm ( $\frac{1}{2}$  “).
- Pendiente del canal 5%.
- Porcentaje sección de paso atascamiento máximo tolerado 70%.
- $K_2$ , se determina de la figura 1, valor igual a 1.
- $K_3$ , se determina de la tabla III en el anexo, valor 0.77.
- $V_{\text{paso}} (Q_{\text{max}}) < 1.0$  m/s ( con limpieza a favor de la corriente).

**Tabla I. Secuencia de cálculo, diseño etapa de cribado.**

No. Ecuación	Ecuación	Resultado
1.2	$D = 0.15 + 0.74\sqrt{Q_{\text{max}}}$	$D = 0.2475$ m
1.1	$W = \frac{Q_{\text{max}} * ((a+s)/s) + C_{\text{rej}}}{v * D}$	$W = 0.2032$ m
1.4	$K_1 = (100/C)^2$	$K_1 = 2.0408$
1.3	$\Delta h = K_1 * K_2 * K_3 * (v^2/2g)$	$\Delta h = 0.0800$ m

## 2. Desarenador

Los siguientes son valores de las diferentes variables,

- Velocidad de caída ( $v_s$ ), 1.35 cm. / s, tabla XV en el anexo anexo.
- Velocidad horizontal ( $V_H$ ), 7 cm. / s. tabla XIV en el anexo.
- Diámetro de la partícula de arena a eliminar <0.15 mm.
- Temperatura del agua 30 °C, valor de la tabla X en el apéndice.
- Caudal promedio de 7:00 a 17:00 horas 25.4243 m<sup>3</sup> / h.
- Caudal máximo 101.6972 m<sup>3</sup> /h, (4 veces caudal promedio).
- % de sedimentación 85.
- Tasa de tratamiento ( $t/t_0$ ) 2.5, valor obtenido de la figura 2.
- Relaciones dimensionales de la figura 11,  $1 < h/a < 5$ ,  $0.3 \leq h_1 \leq 0.8$ ,  $0.3 \leq f \leq 0.5$ ,  $h_2 = 0.75 h_1$ ,

**Tabla II. Secuencia de cálculo, diseño etapa desarenado**

No.	Ecuación	Resultado
<b>Ecuación</b>		
Relaciones dimensionales	$h = 1.5, a = 1.5, h_1 = 0.4, h_2 = 0.3, f = 0.3$	
1.6	$t_0 = h/V_s$	111 s ( 1 min. 51 s)
1.7	$L = t * V_H$	19.5 m

Para determinar el tiempo que transcurre al atravesar el desarenador se utiliza la relación de la tasa de tratamiento ( $t / t_0$ ), determinada

$$t = 2.5 * t_0 = 2.5 * 111 \text{ s} = 277.5 \text{ s} (4 \text{ min. } 37 \text{ s}).$$

Comprobación de la velocidad ascensional (velocidad = caudal / área), la cual debe ser menor de 20 m/s, en base a la tabla XVI en el anexo, con un 85% de sedimentación, diámetro de partícula de 0.15 mm,

$$V_{asc} = Q_{max} / L * a = 101.6972 \text{ m}^3 / (19.5 \text{ m} * 1.5 \text{ m}) = 0.0579 \text{ m/s}$$

### 3. Decantación primaria

Los siguientes son los valores de las diferentes variables,

- Tipo de decantador circular.
- % de eliminación de S.S. 30.
- % de eliminación de DBO<sub>5</sub> 30
- $V_{asc}(Q_{med}) = 1.5 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{ h}$ , obtenido de la tabla XVII en el anexo.
- $V_{asc}(Q_{max}) = 2.5 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{ h}$ , obtenido de la tabla XVII en el anexo
- $t_R(Q_{med}) = 2 \text{ h}$ , obtenido de la tabla XVII en el anexo,
- $t_R(Q_{max}) = 1.5 \text{ h}$ , obtenido de la tabla XVII en el anexo,
- $\emptyset_1/\emptyset = 0.15$ , obtenido de la tabla XVII en el anexo
- $h_1/h = 0.5$ , obtenido de la tabla XVII en el anexo,
- $V_v(Q_{med}) = 9.5 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{ h}$ , obtenido de la tabla XVII en el anexo
- $V_v(Q_{max}) = 18 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{ h}$ , obtenido de la tabla XVII en el anexo
- Velocidad e la barredora de lodos 1 cm. / s,
- Inclinación del fondo 3%,
- Tiempo máximo de retención en poceta 5 horas.
- Altura recomendada decantadores circulares no mayores de 3 m (h).
- Sólidos totales 600 mg/l, valor de la tabla X en el apéndice.

- Fracción de sólidos volátiles del 65%

**Tabla III. Secuencia de cálculo, diseño etapa decantación primaria.**

No. Ecuación	Ecuación	Resultado
1.9	$V = Q * t_R$	50.8486 m <sup>3</sup> ( Q <sub>med</sub> ) 152.5458 m <sup>3</sup> ( Q <sub>max</sub> )
1.8	$V_{asc} = Q/S$	0.5 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h ( Q <sub>med</sub> ) 1.25 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h ( Q <sub>max</sub> )
1.10	$V_{vert} = Q/L$	0.5029 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h ( Q <sub>med</sub> ) 2.0163 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h ( Q <sub>max</sub> )
1.11	$F1 = K * Kg. SST/d_{agua\ bruta}$	83.9002 kg/ d

Se toma el valor del volumen del decantador en base al caudal máximo, para determinar la superficie horizontal

$$\text{Superficie horizontal} = V/h = 152.5458 \text{ m}^3 / 3 \text{ m} = 50.8486 \text{ m}^2$$

Para determinar el radio del decantador, utilizamos  $A = \pi * r^2 / 4$ ,  $r = 8.0462 \text{ m}$ , para determinar las dimensiones de la zona de entrada sabemos que: la altura del decantador  $h = 3 \text{ m}$ , y el radio  $r = 8.0462 \text{ m}$ . La chapa deflectora se encuentra sumergida  $h1$ , y el diámetro de la misma  $\varnothing_1$ , la longitud del vertedero es el perímetro del radio del decantador

$$h1 = h * 0.5 = 1.5 \text{ m}$$

$$\varnothing_1 = 0.15 * \varnothing = 0.15 * 8.0462 \text{ m} * 2 = 2.4139 \text{ m}$$

$$\text{Longitud del vertedero} = 2 * \pi * r = 50.555$$

Se debe comprobar que la carga del vertedero de salida del decantador primario, cumpla con los parámetros de diseño.

La producción de lodos del decantador primario es un 30% de eliminación de los sólidos totales, y los sólidos volátiles sabemos que representan el 65% de los sólidos totales

$$\begin{aligned} \text{Producción de lodos} &= 0.3 * 0.6 \text{ Kg./m}^3 * 25.4243 \text{ m}^3/\text{h} * 10 \text{ h/d} \\ &= 45.7637 \text{ Kg. SST/d} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Producción de sólidos volátiles} &= 0.65 * 45.7637 \text{ Kg. SST/d} \\ &= 29.7464 \text{ Kg./ d} \end{aligned}$$

## **2. Regulador de caudal**

En las tablas IV a VII, se encuentran tabuladas las mediciones de caudal. En las figuras 13 a 16 se encuentran representadas las curvas del volumen acumulado medido, el volumen acumulado basado en el caudal medio y la curva tangente al volumen acumulado, según figura 7.

En la tabla VIII se encuentran los valores de caudal máximo, mínimo, caudal promedio durante las horas de descarga y el volumen del tanque regulador por día.

**Tabla IV. Caudales medidos a través del medidor de caudal por burbujeo marca ISCO modelo 4230, lunes 22/04/2002.**

<b>HORA</b>	<b>CAUDAL PROMEDIO(L/s)</b>	<b>CAUDAL MÁXIMO (L/s)</b>	<b>CAUDAL MÍNIMO (L/s)</b>	<b>VOLUMEN (m3)</b>	<b>VOLUMEN ACUMULADO (m3)</b>
7:00-8:00	5,8940	8,3210	0,0000	21,1600	21,1600
8:00-9:00	8,1360	10,4500	5,8360	29,2700	50,4300
9:00-10:00	8,6850	9,6980	7,1480	31,2600	81,6900
10:00-11:00	9,3470	10,5600	8,4630	33,6700	115,3600
11:00-12:00	9,2650	9,8530	8,6980	33,3500	148,7100
12:00-1:00	8,7070	9,8220	6,9770	31,3300	180,0400
1:00-2:00	8,7140	9,7260	6,9860	31,3900	211,4300
2:00-3:00	9,4650	10,0500	8,9390	34,0600	245,4900
3:00-4:00	9,3870	14,3000	8,6930	33,7800	279,2700
4:00-5:00	9,1440	17,3600	1,5240	32,8600	312,1300
5:00-6:00	0,7062	1,5140	0,3685	2,5400	314,6700
6:00-7:00	0,4714	0,5527	0,3603	1,6900	316,3600
7:00-8:00	0,3379	0,4153	0,2949	1,2100	317,5700
8:00-9:00	3,9360	13,6900	0,2401	14,2100	331,7800
9:00-10:00	0,9247	2,9880	0,3329	3,3400	335,1200
10:00-11:00	0,2257	0,3291	0,1624	0,8100	335,9300
11:00-12:00	0,1392	0,1620	0,1211	0,5000	336,4300
12:00-1:00	0,1066	0,1267	0,0928	0,3800	336,8100
1:00-2:00	0,0852	0,0976	0,0745	0,3000	337,1100
2:00-3:00	0,0685	0,0787	0,0588	0,2400	337,3500
3:00-4:00	0,0541	0,0633	0,0482	0,1900	337,5400
4:00-5:00	0,0443	0,0521	0,0395	0,1500	337,6900
5:00-6:00	0,4048	3,8680	0,0368	1,4400	339,1300
6:00-7:00	4,3150	4,5800	3,4430	15,5300	354,6600

**Tabla V. Caudales medidos a través del medidor de caudal por burbujeo marca ISCO modelo 4230, martes 23/04/2002.**

<b>HORA</b>	<b>CAUDAL PROMEDIO(L/s)</b>	<b>CAUDAL MÁXIMO (L/s)</b>	<b>CAUDAL MÍNIMO (L/s)</b>	<b>VOLUMEN (m3)</b>	<b>VOLUMEN ACUMULADO(m3)</b>
7:00-8:00	5,7960	7,7910	3,4250	20,8500	20,8500
8:00-9:00	6,2610	6,8570	5,4880	22,5300	43,3800
9:00-10:00	6,1610	7,3820	5,0330	22,1600	65,5400
10:00-11:00	7,1670	13,3100	4,8910	25,8800	91,4200
11:00-12:00	5,7030	6,5770	4,7450	20,5500	111,9700
12:00-1:00	5,6350	5,3950	4,6770	20,2800	132,2500
1:00-2:00	5,2970	6,0410	4,1140	19,1000	151,3500
2:00-3:00	5,2390	5,5330	4,7810	18,8100	170,1600
3:00-4:00	8,2740	8,9700	5,2900	29,7200	199,8800
4:00-5:00	10,2300	14,6700	3,6390	36,7900	236,6700
5:00-6:00	2,8680	3,7100	2,5170	10,3200	246,9900
6:00-7:00	2,2420	2,5380	2,0190	8,1000	255,0900
7:00-8:00	1,8050	2,0270	1,6050	6,4900	261,5800
8:00-9:00	1,4510	1,8430	1,2110	5,2200	266,8000
9:00-10:00	0,6346	1,2130	0,3166	2,2800	269,0800
10:00-11:00	0,2100	0,3198	0,1422	0,7500	269,8300
11:00-12:00	0,1208	0,1454	0,1013	0,4300	270,2600
12:00-1:00	0,0940	0,1069	0,0857	0,3300	270,5900
1:00-2:00	0,0764	0,0862	0,0656	0,2700	270,8600
2:00-3:00	0,0648	0,0706	0,0577	0,2300	271,0900
3:00-4:00	0,0615	0,0836	0,0525	0,2200	271,3100
4:00-5:00	0,0976	0,1229	0,0836	0,3500	271,6600
5:00-6:00	0,1402	0,1589	0,1181	0,5000	272,1600
6:00-7:00	4,1610	7,6470	0,1620	14,9500	287,1100

**Tabla VI. Caudales medidos a través del medidor de caudal por burbujeo marca ISCO modelo 4230, miércoles 24/04/2002.**

<b>HORA</b>	<b>CAUDAL PROMEDIO(L/s)</b>	<b>CAUDAL MÁXIMO (L/s)</b>	<b>CAUDAL MÍNIMO (L/s)</b>	<b>VOLUMEN (m3)</b>	<b>VOLUMEN ACUMULADO(m3)</b>
7:00-8:00	5,6420	7,6530	3,0500	20,3200	20,3200
8:00-9:00	6,3800	7,5410	5,5260	22,9700	43,2900
9:00-10:00	6,1500	6,4780	5,6470	22,1200	65,4100
10:00-11:00	6,0450	6,6270	5,1140	21,7500	87,1600
11:00-12:00	6,0350	6,2620	5,5260	21,7200	108,8800
12:00-1:00	6,3720	6,9850	5,4800	22,9400	131,8200
1:00-2:00	5,9050	6,8360	4,7350	21,2500	153,0700
2:00-3:00	5,5590	6,6370	4,6640	20,0200	173,0900
3:00-4:00	6,4420	7,3860	5,4550	23,1900	196,2800
4:00-5:00	8,7590	14,0600	3,2750	31,4700	227,7500
5:00-6:00	1,7700	3,1430	1,4620	6,3800	234,1300
6:00-7:00	0,9349	1,4810	0,4841	3,3600	237,4900
7:00-8:00	0,4814	0,5048	0,4525	1,7300	239,2200
8:00-9:00	0,4536	0,4676	0,4344	1,6300	240,8500
9:00-10:00	0,4319	0,4506	0,4137	1,5500	242,4000
10:00-11:00	0,4138	0,4238	0,4039	1,4800	243,8800
11:00-12:00	0,3583	0,4114	0,3032	1,2800	245,1600
12:00-1:00	0,2669	0,3053	0,2355	0,9600	246,1200
1:00-2:00	0,2201	0,2440	0,1982	0,7900	246,9100
2:00-3:00	0,1892	0,2038	0,1746	0,7000	247,6100
3:00-4:00	0,1671	0,1795	0,1557	0,6000	248,2100
4:00-5:00	0,1494	0,1609	0,1405	0,5300	248,7400
5:00-6:00	0,1332	0,1433	0,1267	0,4700	249,2100
6:00-7:00	3,4990	7,3670	0,1383	12,6000	261,8100

**Tabla VII. Caudales medidos a través del medidor de caudal por burbujeo marca ISCO modelo 4230, jueves 25/04/2002.**

<b>HORA</b>	<b>CAUDAL PROMEDIO(L/s)</b>	<b>CAUDAL MÁXIMO (L/s)</b>	<b>CAUDAL MÍNIMO (L/s)</b>	<b>VOLUMEN (m3)</b>	<b>VOLUMEN ACUMULADO(m3)</b>
7:00-8:00	6,8410	7,6770	6,0950	24,6200	24,6200
8:00-9:00	6,5150	7,4260	5,8770	23,4800	48,1000
9:00-10:00	6,8090	13,0100	6,0110	24,5000	72,6000
10:00-11:00	6,9830	12,7900	5,4940	25,1600	97,7600
11:00-12:00	6,9760	7,9320	6,4890	25,1100	122,8700
12:00-1:00	6,4070	7,6480	5,0880	23,0900	145,9600
1:00-2:00	6,1700	7,2390	4,7970	22,2100	168,1700
2:00-3:00	5,7560	6,3100	4,8370	20,7000	188,8700
3:00-4:00	5,6450	7,0770	3,6500	20,3200	209,1900
4:00-5:00	8,5940	13,3100	4,3920	30,9200	240,1100
5:00-6:00	1,6300	7,6890	0,5015	5,9400	246,0500
6:00-7:00	0,7088	0,9457	0,4454	2,5500	248,6000
7:00-8:00	0,4303	0,6614	0,2704	1,5500	250,1500
8:00-9:00	0,2006	0,2710	0,1533	0,7200	250,8700
9:00-10:00	0,1268	0,1557	0,1032	0,4500	251,3200
10:00-11:00	0,0942	0,1080	0,0837	0,3300	251,6500
11:00-12:00	0,0806	0,0914	0,0743	0,2900	251,9400
12:00-1:00	0,0726	0,0810	0,0681	0,2600	252,2000
1:00-2:00	0,0676	0,0727	0,0625	0,2400	252,4400
2:00-3:00	0,0626	0,0670	0,0569	0,2200	252,6600
3:00-4:00	0,0656	0,0697	0,0598	0,2300	252,8900
4:00-5:00	0,0663	0,0785	0,0598	0,2300	253,1200
5:00-6:00	0,1034	0,2050	0,0787	0,3700	253,4900
6:00-7:00	2,7470	6,6880	0,2430	9,8900	263,3800

Figura 13. Gráfica de volumen acumulado lunes 22/04/2002

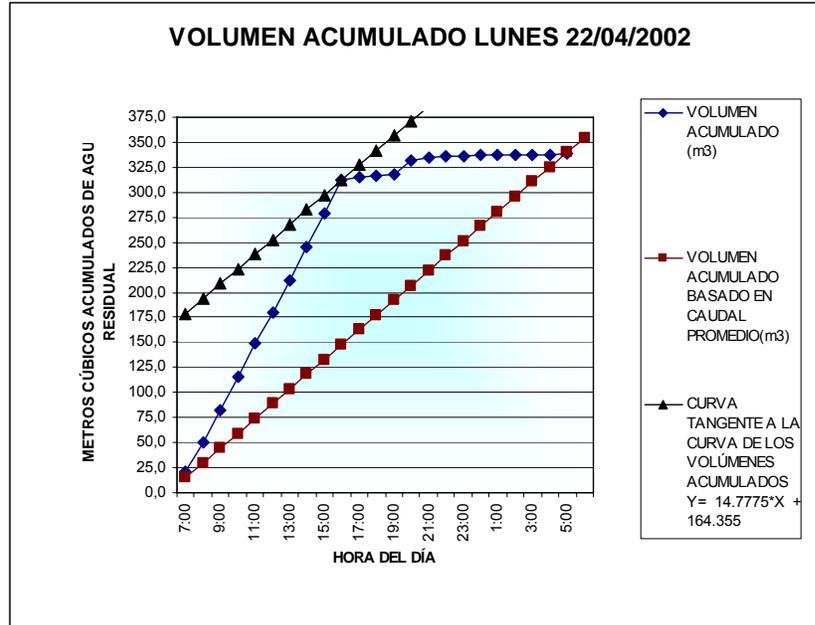


Figura 14. Gráfica de volumen acumulado martes 23/04/2002

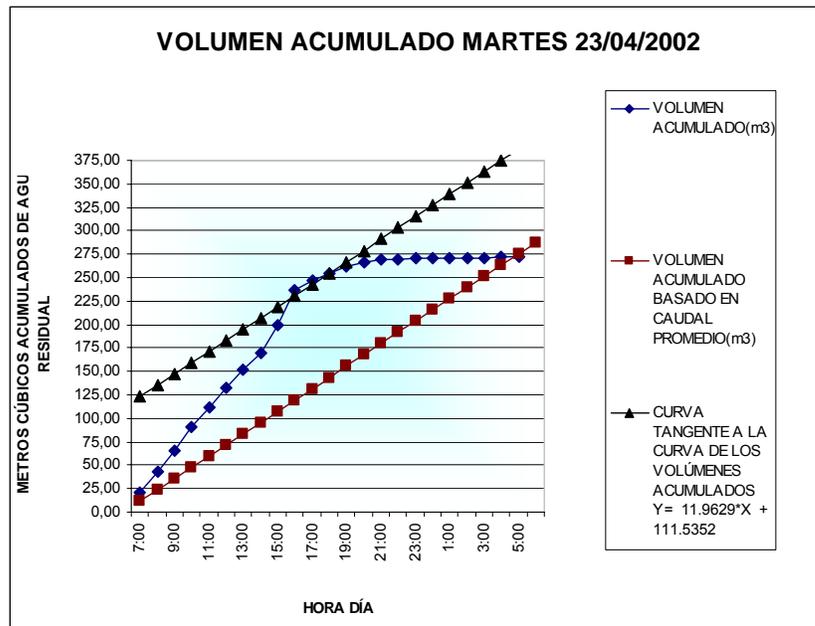


Figura 15. Gráfica de volumen acumulado miércoles 24/04/2002

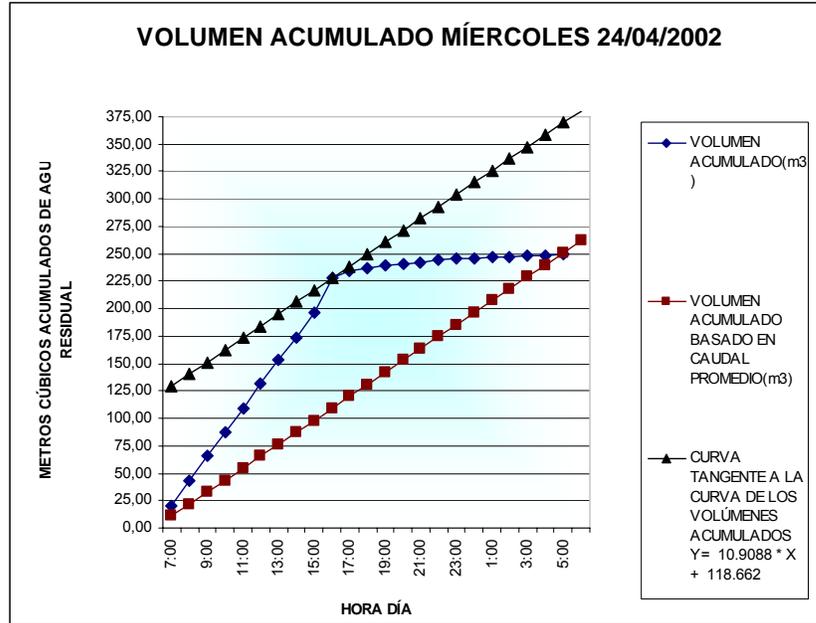
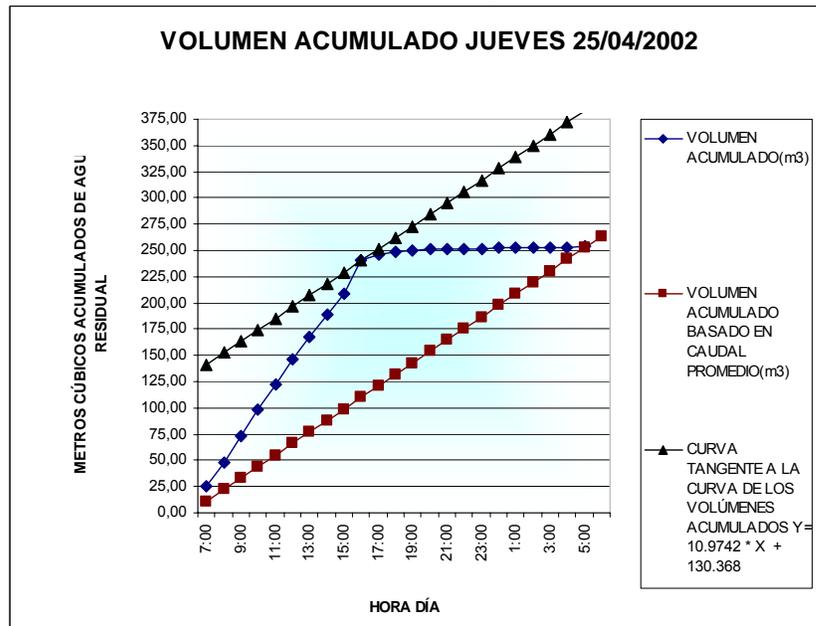


Figura 16. Gráfica de volumen acumulado jueves 25/04/2002



**Tabla VIII. Valores de caudal máximo, mínimo, caudal promedio, durante las horas de descarga 7: 00 a 17:00 horas y volumen del tanque regulador de caudal por día.**

día	Q <sub>max</sub> (l / s)	Q <sub>min</sub> (l/s)	Caudal promedio medido 7:00 a 17:00 horas ( l / s)	Volumen del tanque regulador de caudal (m <sup>3</sup> )	Caudal promedio regulado (m <sup>3</sup> / h)
Lunes 22/04/02	17.3600	0.0368	8.6744	164.355	14.7775
Martes 23/04/02	14.6700	0.0525	6.5763	111.5352	11.9629
Miércoles 24/04/02	14.0600	0.1267	6.3289	118.6620	10.9088
Jueves 25/04/02	13.3100	0.0569	6.6696	130.3680	10.9742
Promedio			7.0623	131.2300	12.1558

El volumen del tanque regulador de caudal se sobredimensiona entre un 10 a 20%, por lo que el valor recomendado con un 20% es de 157.4761 m<sup>3</sup>. Sabemos que la aereación mecánica para el agua residual con una carga de DBO<sub>5</sub> de aproximadamente 220 mg /l, se encuentra entre 0.04 y 0.08 Kw. /m<sup>3</sup>, por lo que se necesita 6.298 Kw. (8.39 Hp).

## 5. Lodos activados

Los siguientes son los valores de las diferentes variables:

- Temperatura 30 °C, valor tabla X en el apéndice.
- pH 10.94, valor tabla X en el apéndice.

- DQO 330 mg/l, valor tabla X en el apéndice.
- DBO<sub>5</sub> 220 mg / l, valor tabla X en el apéndice.
- Sólidos suspendidos en el líquido mezcla (MLSS) 3000 mg /l.
- Edad del lodo ( $\theta_c$ ) 8 días, tabla XXIV en el anexo.
- Coeficiente de producción celular 0.5 g/g (Y )
- Coeficiente de degradación endógena 0.06/d ( $k_d$  )
- MLSSV 2400 mg / l.
- DBO<sub>5</sub> salida 20 mg/l
- Coeficientes cinéticos para la transferencia de oxígeno con  $c_m = 0.4$ ,  $A = 0.053$  y  $B = 0.08$ , según tabla XV en el anexo.
- Concentración media de oxígeno en el reactor biológico,  $C_x = 2$  mg/l
- Concentración de saturación  $C_s = 7.63$  mg/l, en la tabla XXVI en el anexo.
- Altura sobre el nivel del mar de la instalación 400m.
- $K_{t3} = 0.55$ , aereación con burbujas finas, carga media sin nitrificación, según tabla XVII en el anexo.
- $K_{ox} = 0.3$  (son los Kg. O<sub>2</sub> / m<sup>3</sup> reactor)
- Eficiencia del difusor 0.25, (EFI).
- Índice de Mohalman 200 ( I ).
- Sistema de aereación con difusores a una altura de 4m.
- Factor de seguridad para la potencia requerida para el sistema de aereación 15%.
- Fracción de sólidos sedimentables volátiles es del 80%

De la tabla XI, límites máximos permisibles de contaminación para la descarga de aguas residuales industriales, sabemos que para la tercera etapa debe existir un efluente tratado con DBO<sub>5</sub> de 60 mg/l.

Se tomó un valor menor para cumplir con los requisitos de ley por cualquier fluctuación de caudal en épocas pico de producción.

**Tabla IX. Secuencia de cálculo, diseño etapa lodos activados.**

No. Ecuación	Ecuación	Resultado
2.8	$V_r = \theta_c Q Y (S_o - S) / (1 + k_d \theta_c)$	41.4160 m <sup>3</sup>
2.1	$F/M = S_o / \theta X$	0.3875 Kg DBO <sub>5</sub> /MLSS
2.9	O.N (kg./d) = A * DBO + B * MLSSV	56.2815 Kg O <sub>2</sub> / d
2.15	$C_p = 1 - 0.111 * \text{ALTITUD (m)} / 1000$	0.9556
2.16	$C_A = (10.33 + 0.28 * p) / 10.33$	1.1084
2.14	$C'_s = C_s * \beta * C_p * C_A$	10.5359 mg / l
2.13	$K_{t1} = (C'_s - C_x) / C_s$	0.84098
2.17	$K_{t2} = 1.024^{(T-10)}$	1.126
2.12	$K_t = K_{t1} * K_{t2} * K_{t3}$	0.5208
2.11	Oxígeno real = Oxígeno teórico / K <sub>t</sub>	108.0634 Kg. / d
2.19	$Q_{\text{aire}} = \text{oxígeno condiciones punta} / K_{\text{ox}} * \text{EFI}$	60.035 m <sup>3</sup> / h
2.18	$P = (0.227 * Q_{\text{aire}} / 1.04) * ((P_2 / P_1)^{0.283} - 1) * C$	2.167 CV (3 Hp)
2.22	$Q_r / Q = X * l / (1000 - (X * l)) = X / (X_r - X)$ $Q_r = 0.9231 * Q$	0.9231 11.2199 m <sup>3</sup> / h
2.21	$P_{(\text{ssv})} = Y * Q * (S_o - S) / (1 + k_d \theta_c)$	15.5281 Kg SST/d

La concentración que entra al reactor biológico es:

$$\begin{aligned} \text{DBO}_{5, \text{ENTRA}} &= \text{DBO}_{5, \text{O}} (1 - \text{rendimiento dec. primaria}) \\ &= 220 \text{ mg/l} (1 - 0.30) = 165 \text{ mg / l} \end{aligned}$$

Para determinar el  $DBO_5$ , que sale en el efluente hay una parte que es soluble y otra que son sólidos suspendidos. Se estima que el 80% son volátiles y 65% son biodegradables,

$$\begin{aligned} DBO_5, \text{ sólidos suspendidos} &= 20 \text{ mg/l} \times 0.65 \times 0.68 \times 1.42 \text{ mg O}_2 / \text{ mg cel} \\ &= 12.55 \text{ mg / l} \end{aligned}$$

$$DBO_5, \text{ soluble} = 20 \text{ mg/l} - DBO_5, \text{ sólidos suspendidos} = 7.44 \text{ mg/l}$$

Para determinar el valor de DBO, para la ecuación 2.9, que representa los Kg.  $DBO_5$  eliminados/ día

$$\begin{aligned} DBO &= Q (S_o - S) = 291.7392 \text{ m}^3/\text{d} (220 - 7.44 \text{ mg/l}) / 1000 \\ &= 91.1882 \text{ Kg. } DBO_5 \text{ eliminados/ día} \end{aligned}$$

Para determinar la cantidad de lodos en exceso sabemos que la fracción de sólidos sedimentables volátiles es del 80%

$$\begin{aligned} P_{(ssv)} &= 15.5281 \text{ Kg SST/d} / 0.8 \\ &= 19.4101 \text{ Kg SST / d} \end{aligned}$$

La cantidad de masa a purgar la determinamos:

$$\begin{aligned} \text{Masa a purgar} &= \text{Incremento de la biomasa (MLSS)} - \text{SS perdidos efluente} \\ &= 19.4101 \text{ Kg SST / d} - (0.02 \text{ Kg/m}^3 * 12.1551 \text{ m}^3 / \text{h} * 24 \text{ h/d}) \\ &= 13.5757 \text{ Kg SST / d} \end{aligned}$$

## 6. Decantación secundaria

Los siguientes son los valores de las diferentes variables:

- $V_{asc} (Q_{med}) = 0.8 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ , valor tomado de la tabla XVIII en el anexo.
- Carga de sólidos ( $Q_{med}$ )  $2.5 \text{ Kg. / m}^2 \text{ d}$ , tabla XVIII en el anexo.
- Tiempo de retención ( $Q_{med}$ )  $3 \text{ h}$ , tabla XVIII en el anexo.
- Carga de salida del vertedero  $5.7 \text{ m}^3 / \text{h m}$
- Altura recomendada  $3 \text{ m}$ .

Para determinar la superficie del decantador secundario circular, a continuación se determina la superficie:

$$\text{Superficie ( } Q_{med} ) = Q_{med} / V_{asc} (Q_{med}) = 15.1937 \text{ m}^2$$

$$\varnothing = 4.3983 \text{ m}^2$$

Para comprobar la carga de sólidos en el decantador secundario, la cual debe ser menor al valor determinado de la tabla XVIII,  $2.5 \text{ Kg. / m}^2 \text{ d}$ ,

$$\text{Carga de sólidos ( } Q_{med} ) = X Q_{med} / \text{Superficie}$$

$$= ( 2.4 \text{ Kg. / l} * 12.1558 \text{ m}^3 / \text{h} ) / 15.1937 \text{ m}^2$$

$$= 1.92 \text{ Kg. / m}^2 \text{ h}$$

Para determinar el volumen,

$$V(Q_{med}) = t_R (Q_{med}) * Q_{med} = 36.4674 \text{ m}^3$$

$$\text{Altura del decantador} = \text{Volumen} / \text{superficie} = 2.4 \text{ m}$$

Por ser la altura menor al valor recomendado, se calcula el nuevo volumen del decantador con una altura de 3m,

$$\text{Volumen} = 3\text{m} * 15.1937 \text{ m}^2$$

$$\text{Diámetro} = 4.3983 \text{ m}$$

## 7. Espesamiento por gravedad

Los siguientes son los valores de las diferentes variables:

- Concentración de entrada = 3% = 30 Kg. / m<sup>3</sup>
- Concentración de salida = 8% = 80 Kg. / m<sup>3</sup>
- Carga hidráulica 0.45 m<sup>3</sup> / m<sup>2</sup> h, valor tomado de la tabla XXIX
- Carga de sólidos 35 Kg. / m<sup>2</sup> d, valor tomado de la tabla XXIX,
- Tiempo mínimo de retención 24 h, valor tomado de la tabla XXIX,
- Tiempo de operación del bombeo de lodos 8h/día, tabla XXIX

La carga total de lodos a espesar es la suma de la decantación primaria y la cantidad purgada del decantador secundario, 59.3394 Kg. / d,

$$\begin{aligned}\text{Volumen necesario} &= (\text{Kg. SST/ h}) / (\text{concentración entrada} * t_R) \\ &= ( 59.3394 \text{ Kg./d} * 24 \text{ h/d} ) / ( 30 \text{ Kg./m}^3 * 24\text{h} ) \\ &= 1.97798 \text{ m}^3\end{aligned}$$

Si se bombean 8 h / día, se tiene un caudal de  $0.2473 \text{ m}^3 / \text{h}$ . Al relacionar el caudal anterior con la carga hidráulica obtenemos:

$$\text{Área} = ( 0.2473 \text{ m}^3 / \text{h} ) / ( 0.45 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{ h} ) = 0.5494 \text{ m}^2$$

Al comprobar la cantidad de sólidos a espesar con la carga de sólidos, se obtiene la siguiente área y altura

$$\text{Área} = ( 59.3394 \text{ Kg/d} ) / ( 35 \text{ Kg} / \text{m}^2 \text{ d} ) = 1.6954 \text{ m}^2$$

$$\text{Altura} = 1.97798 \text{ m}^3 / 1.6954 \text{ m}^2 = 1.1667 \text{ m}$$

$$D = 0.8364 \text{ m}$$

Para determinar las dimensiones de la etapa de lodos activados sin caudal regulado, se utilizan las ecuaciones anteriores, así como los valores de diseño anteriores, sólo que se utiliza como valor de caudal el promedio de 7:00 a 17:00 horas de la tabla VIII,  $25.4243 \text{ m}^3 / \text{h}$ .

**Tabla X. Análisis de agua residual muestra compuesta, promedio de los análisis realizados del lunes 22/04/2002 al jueves 25/04/2003.**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Dimensionales</b>
Temperatura	34	°C
pH	10.94	
DQO	330	mg O <sub>2</sub> / l
DBO <sub>5</sub>	220	mg O <sub>2</sub> / l
Sólidos en suspensión	39	mg/l
Sólidos sedimentables	0.2	mg / l
Nitrógeno total	16	mg N / l
Fósforo total	5.1	mg PO <sub>4</sub> / l
Sulfatos	109	mg SO <sub>4</sub> / l
Cloruros	10.8	mg Cl <sup>-</sup> / l
Cloro total	0.1	mg Cl <sub>2</sub> / l
Cloro libre	0.1	mg Cl <sub>2</sub> / l
Oxígeno disuelto	0.6	mg O <sub>2</sub> / l
Sólidos totales	600	mg / l

## ANEXO

**Tabla XI. Límites máximos permisibles de contaminación para la descarga de aguas residuales industriales.**

Parámetro	Propuesta de norma			Dimensionales
	3 años	6 años	9 años	
Temperatura	CR +/- 7	CR +/-7	CR +/-7	°C
pH	6-9	6.5-8.5	6.5-8.5	
DQO	590	470	120	mg O <sub>2</sub> /L
DBO	330	260	60	mg O <sub>2</sub> /L
Sulfitos	2.0	1.0	0.5	mg SO <sub>3</sub> /L
Sólidos en suspensión	70	60	20	mg /L
Sólidos sedimentables	1	0.5	0.3	mg /L
Materia flotante	ausente	ausente	ausente	
Nitrógeno total	xxx	xxx	xxx	mg N/l
Fósforo total	xxx	xxx	xxx	mg PO <sub>4</sub> /L
Sulfatos	xxx	xxx	xxx	mg SO <sub>4</sub> /L
Cloruros	xxx	xxx	xxx	mg Cl <sup>-</sup> /L
Cloro total	xxx	xxx	xxx	mg Cl <sub>2</sub> /L
Cloro libre	xxx	xxx	xxx	mg Cl <sub>2</sub> /L
Oxígeno disuelto	xxx	xxx	xxx	mg O <sub>2</sub> /L
Sólidos totales	xxx	xxx	xxx	mg /L

XXX: Parámetro no considerado en la propuesta de norma

CR: Cuerpo receptor

Fuente: Reglamento De Aguas Residuales. Versión preliminar para aprobación final Organismos Ejecutivo. Última Revisión: Junio de 1999.

**Tabla XII. Aplicaciones de las operaciones físicas unitarias en el tratamiento de aguas residuales.**

<b>OPERACIÓN</b>	<b>APLICACIÓN</b>
<b>MEDICIÓN DE CAUDAL</b>	Control y seguimiento de procesos, informes de descargas
<b>CRIBADO</b>	Eliminación de sólidos gruesos y sedimentables por intercepción (retención en superficie)
<b>TRITURACIÓN</b>	Trituración de sólidos gruesos hasta conseguir un tamaño más o menos uniforme.
<b>REGULACIÓN DE CAUDAL</b>	Homogenización de caudal y de las cargas de DBO y sólidos en suspensión.
<b>MEZCLADO</b>	Mezclado de productos químicos y gases con el agua residual, mantenimiento de los sólidos en suspensión.
<b>FLOCULACIÓN</b>	Provoca la agregación de pequeñas partículas que aumenta el tamaño de la misma, para mejorar la eliminación por sedimentación debido a la gravedad.
<b>SEDIMENTACIÓN</b>	Eliminación de sólidos sedimentables y espesado de lodos.
<b>FLOTACIÓN</b>	Eliminación de sólidos en suspensión finamente divididos y de partículas con densidad cercana a la del agua. También espesa los lodos biológicos.
<b>MICROTAMIZADO</b>	Mismas funciones que la filtración. También la eliminación de las algas de los efluentes de las lagunas de estabilización.
<b>TRANSFERENCIA DE GASES</b>	Adición y eliminación de gases.
<b>VOLATILIZACIÓN Y ARRASTRES DE GASES</b>	Emisión de compuestos orgánicos volátiles y semi volátiles del agua residual
<b>FILTRACIÓN</b>	Eliminación de sólidos en suspensión es residuales presentes después del tratamiento químico o biológico.

Fuente: Metcalf & Hedí, Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización.

Página 223.

**Tabla XIII. Valores del coeficiente  $K_3$**

$(z/4)^*$ $(2/s+ 1/h)$	$s / (s+a)$									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0	245	51.5	18.2	8.25	4.0	2.0	0.97	0.42	0.13	0
0.2	230	48	17.4	7.70	3.75	1.87	0.91	0.40	0.13	0.01
0.4	221	46	16.6	7.40	3.60	1.80	0.88	0.39	0.13	0.01
0.6	199	42	15	6.60	3.20	1.60	0.8	0.36	0.13	0.01
0.8	164	34	12.2	5.50	2.70	1.34	0.66	0.31	0.12	0.02
1	149	31	11.1	5.00	2.40	1.20	0.61	0.29	0.11	0.02
1.4	137	28.4	10.3	4.60	2.25	1.15	0.58	0.28	0.11	0.03
2	134	27.4	9.90	4.40	2.20	1.13	0.58	0.28	0.12	0.04
3	132	27.5	10.0	4.50	2.24	1.17	0.61	0.31	0.15	0.05

Fuente: Hernández Lehmann, Aurelio. Manual de diseño de estaciones depuradoras de aguas residuales. Página 14.

**Tabla XIV. Datos de sedimentación de partículas.**

$d(\text{mm})$	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	1.00	2.00	3.00	5.00	10.0
$V_s(\text{cm/s})$	0.2	0.7	2.3	4.0	5.6	7.2	15	27	35	47	74
$V'_s(\text{cm/s})$	0	0.5	1.7	3.0	4.0	5.0	11	21	26	33	
$V_H(\text{cm/s})$	15	20	27	32	38	42	60	83	100	130	190

- $d$  = diámetro de partícula de arena  
 $v_s$  = velocidad de sedimentación, para un fluido de velocidad horizontal nula  
 $V'_s$  = velocidad de sedimentación, para un fluido de velocidad horizontal  $V_H$ .  
 $V_H$  = velocidad horizontal crítica de arrastre de la particular depositada

Fuente: Hernández Lehmann, Aurelio. Manual de diseño de estaciones depuradoras de aguas residuales. Página 23.

**Tabla XV. Velocidad de caída de una partícula esférica en agua residual.**

<b>Granulometría (d, mm)</b>	<b>Velocidad de caída (<math>v_{s.}</math> cm./s)</b>
0.125	0.86
0.160	1.35
0.200	1.90
0.250	2.55
0.315	3.5

Fuente: Hernández Lehmann, Aurelio. Manual de diseño de estaciones depuradoras de aguas residuales. Página 23.

**Tabla XVI. Velocidad ascensional según Imhoff.**

<b>Velocidad ascensional (m/h)</b>			
	<b>Rendimiento sedimentación (%)</b>		
<b>Diámetro (d,mm)</b>	<b>100</b>	<b>90</b>	<b>85</b>
0.16	12	16	20
0.20	17	28	36
0.25	27	45	58

Fuente: Hernández Lehmann, Aurelio. Manual de diseño de estaciones depuradoras de aguas residuales. Página 26.

**Tabla XVII. Valores de diseño en la decantación primaria.**

<b>Velocidades ascensionales a caudal medio (m/h)</b>			
	<b>Valor mínimo</b>	<b>Valor típico</b>	<b>Valor máximo</b>
<b>Decantadores circulares</b>	<b>1.00</b>	<b>1.50</b>	<b>2.00</b>
<b>Decantadores rectangulares</b>	<b>0.80</b>	<b>1.30</b>	<b>1.80</b>
<b>Velocidades ascensionales a caudal máximo (m/h)</b>			
	<b>Valor mínimo</b>	<b>Valor típico</b>	<b>Valor máximo</b>
<b>Decantadores circulares</b>	<b>2.00</b>	<b>2.50</b>	<b>3.00</b>
<b>Decantadores rectangulares</b>	<b>1.80</b>	<b>2.20</b>	<b>2.60</b>
<b>Tiempo de retención (h)</b>			
	<b>Valor mínimo</b>	<b>Valor típico</b>	<b>Valor máximo</b>
<b>Tiempo de retención p/caudal medio</b>	<b>1.50</b>	<b>2.00</b>	<b>3.00</b>
<b>Tiempo de retención p/caudal máximo</b>	<b>1.00</b>	<b>1.50</b>	<b>2.00</b>
<b>Dimensiones de decantadores rectangulares</b>			
<b>Decantación primaria</b>	<b>Valor mínimo</b>	<b>Valor típico</b>	<b>Valor máximo</b>
<b>L</b>	<b>5</b>	<b>-</b>	<b>90</b>
<b>L/h</b>	<b>5</b>	<b>15</b>	<b>40</b>
<b>L/b</b>	<b>1.5</b>	<b>4.5</b>	<b>7.5</b>
<b>h</b>	<b>1.5</b>	<b>3</b>	<b>3</b>
<b>Dimensiones de decantadores circulares</b>			
	<b>Valor mínimo</b>	<b>Valor típico</b>	<b>Valor máximo</b>
<b><math>\varnothing_1/\varnothing</math></b>	<b>0.05</b>	<b>0.1</b>	<b>0.2</b>
<b>h1/h</b>	<b>0.25</b>	<b>0.40</b>	<b>0.65</b>
<b>Carga sobre vertedero (m<sup>3</sup>/h.m)</b>			
	<b>Valor mínimo</b>	<b>Valor típico</b>	<b>Valor máximo</b>
<b>Decantadores circulares</b>	<b>5</b>	<b>9.5</b>	<b>18</b>
<b>Decantadores rectangulares</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>26</b>

**Tabla XVII. Continuación.**

<b>Concentración de lodos primarios (%)</b>			
	<b>Valor mínimo</b>	<b>Valor típico</b>	<b>Valor máximo</b>
<b>Decantadores de succión</b>	<b>1</b>	<b>1.5</b>	<b>2</b>
<b>Decantadores de posetas</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>6</b>

L = longitud del decantador

h = Altura útil del decantador

b = ancho del decantador

$\varnothing_1$  = diámetro del cilindro central de entrada

$\varnothing$  = diámetro del decantador

h1 = altura del cilindro central desde el borde superior del decantador

Fuente: Hernández Lehmann, Aurelio. Manual de diseño de estaciones depuradoras de aguas residuales. Página 35-38.

**Tabla XVIII. Caudales y factores de carga típicos empleados para el proyecto y explotación de plantas de tratamiento de aguas residuales**

<b>FACTOR</b>	<b>APLICACIÓN</b>
<b>BASADO EN EL CAUDAL</b>	
<b>HORA PUNTA</b>	<b>Dimensionamiento de las instalaciones de bombeo y de las conducciones, dimensionamiento de rejillas.</b> Dimensionamiento de las operaciones físicas unitarias. Desarenadores, tanques de sedimentación, y filtros; tanques de cloración.
<b>MÁXIMO DIARIO</b>	Dimensionamiento del bombeo de lodos.
<b>MAYOR QUE EL MÁXIMO DIARIO</b>	Almacenamiento de arenas y residuos eliminados en el proceso de tamizado.
<b>MÁXIMO SEMANAL</b>	Elaboración de registros de datos e informes.
<b>MÁXIMO MENSUAL</b>	Elaboración de registros de datos e informes, dimensionamiento de los depósitos de almacenamiento de los productos químicos.
<b>MÍNIMO HORARIO</b>	Paro de los grupos de motobombas y valor inferior del intervalo de medida del caudalímetro de la planta.
<b>MÍNIMO DIARIO</b>	Dimensionamiento de los canales de interconexión, para evitar la deposición de sólidos, dimensionamiento de los sistemas de recirculación para filtros percoladores.
<b>MÍNIMO MENSUAL</b>	Elección del número mínimo de unidades de proceso necesarias durante los períodos de caudales reducidos.

**Tabla XVIII. Continuación.**

<b>BASADO EN LA CARGA CONTAMINANTE</b>	
<b>MÁXIMO DIARIO</b>	Dimensionamiento de las unidades de tratamiento biológico.
<b>MAYOR QUE EL MÁXIMO DIARIO</b>	Dimensionamiento de las unidades de espesamiento y deshidratación de lodos.
<b>BASADO EN EL CAUDAL</b>	Dimensionamiento en las unidades de tratamiento de fango.
<b>MÍNIMO MENSUAL</b>	Dimensionamiento de las unidades de almacenamiento de fango; dimensionamiento de las unidades de compostaje.
<b>MÍNIMO HORARIO</b>	Necesidades de paro del proceso.
<b>MÍNIMO DIARIO</b>	Dimensionamiento del sistema de recirculación en filtros percoladores.

Fuente: Metcalf & Hedí, Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización. Página 171.

**Tabla XIX. Efecto de los caudales y las cargas contaminantes sobre la selección y dimensionamiento de las instalaciones de plantas de tratamiento secundario**

<b>PROCESO U OPERACIÓN UNITARIA</b>	<b>FACTORES DE DISEÑO CRITICOS</b>	<b>CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO</b>	<b>EFECTO DE LOS CRITERIOS DE DISEÑO SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA</b>
<b>Bombeo de agua residual y conducciones</b>	Caudal máximo horario	Caudal	Posibilidad de inundación del pozo de bombeo, sobrecarga de la red de alcantarillado, o desbordamiento de las unidades de tratamiento si se supera el caudal punta
<b>Desbaste</b>	Caudal máximo horario	Caudal	Las pérdidas de carga en la circulación a través de rejillas y tamices aumentan para caudales elevados.
	Caudal mínimo	Velocidad de aproximación en el caudal	A caudales bajos, puede producirse la deposición de sólidos en el canal.
<b>Desarenado</b>	Caudal máximo horario	Carga de superficie	A caudales elevados, el rendimiento de los Desarenadores disminuye, provocando problemas en el resto de las instalaciones.
<b>Sedimentación primaria</b>	Caudal máximo horario	Carga de superficie	La eficacia de la eliminación de sólidos se reduce para cargas de superficie altas; se incrementa la carga en los procesos de tratamiento secundario.
	Caudal mínimo horario	Tiempo de detención	A caudales bajos, el aumento del tiempo de detención puede hacer que el agua devenga séptica.
<b>Lodos Activados</b>	Caudal máximo horario	Tiempo de residencia hidráulica	Arrastre de sólidos a caudales elevados, puede hacer necesaria la recirculación del fango efluente a caudales bajos.
	Carga Orgánica máxima diaria	Relación alimento /microorganismos (F/M)	Una demanda de oxígeno alta puede exceder la capacidad de aereación y provocar bajos rendimientos del proceso de tratamiento.

**Tabla XIX. Continuación,**

<b>Filtros percoladores</b>	Caudal máximo horario	Carga Hidráulica	El arrastre de sólidos a caudales elevados, puede provocar bajos rendimientos en el proceso de tratamiento.
	Caudal mínimo horario	Carga hidráulica y carga orgánica.	A caudales bajos, puede ser necesario aumentar la recirculación para mantener el proceso.
	Carga orgánica máxima diaria	Carga contaminante / volumen del medio	La presencia de cantidades inadecuadas de oxígeno en las fases de carga punta puede reducir la eficacia del proceso y generar olores.
<b>Sedimentación secundaria</b>	Caudal máximo horario	Carga de superficie o tiempo de detención	Menor eficacia en la eliminación de sólidos para caudales elevados o tiempos de detención cortos.
	Caudal mínimo horario	Tiempo de detención	Posibilidad de fango ascendente para tiempo de detención dilatados
	Carga orgánica máxima diaria	Carga de sólidos	La carga de sólidos aplicada a un tanque de sedimentación puede ser un factor limitante.
<b>Tanques de cloración</b>	Caudal máximo horario	Tiempo de detención	Para tiempos de detención cortos, la eliminación de bacterias pueden ser cortos.

Fuente: Metcalf & Hedí, Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización. Página 204,205.

**Tabla XX. Principales aplicaciones de los procesos químicos unitarios, en el tratamiento del agua residual.**

<b>PROCESO</b>	<b>APLICACIÓN</b>
PRECIPITACIÓN QUÍMICA	Eliminación de fósforo y mejora de la eliminación de sólidos en suspensión en las instalaciones de sedimentación primaria empleadas en tratamientos físico-químicos.
ADSORCIÓN	Eliminación de materia orgánica no eliminada con métodos convencionales de tratamiento químico y biológico. También se emplea para declorar el agua residual antes de su vertido final.
DESINFECCIÓN	Destrucción selectiva de organismos causantes de enfermedades (puede realizarse de diversas maneras).
DESINFECCIÓN CON CLORO	Destrucción selectiva de organismos causantes de enfermedades. El cloro es el producto químico más utilizado.
DECLORACIÓN	Eliminación del cloro combinado residual total remanente después de la cloración (puede realizarse de diversas maneras).
DESINFECCIÓN CON DIÓXIDO DE CLORO	Destrucción selectiva de organismos causantes de enfermedades.

**Tabla XX. Continuación.**

DESINFECCIÓN CON CLORURO DE BROMO	Destrucción selectiva de organismos causantes de enfermedades.
DESINFECCIÓN CON OZONO.	Destrucción selectiva de organismos causantes de enfermedades.
DESINFECCIÓN CON LUZ ULTRAVIOLETA	Destrucción selectiva de organismos causantes de enfermedades.
OTROS	Para alcanzar objetivos específicos en el tratamiento del agua residual, se pueden emplear otros compuestos químicos.

Fuente: Metcalf & Hedí, Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización .Página 344.

**Tabla XXI. Principales procesos biológicos en el tratamiento de agua residual.**

TIPO	NOMBRE COMÚN	APLICACIÓN
<b>PROCESOS AEROBIOS</b>		
<b>CULTIVO EN SUSPENSIÓN</b>	PROCESO DE LODOS ACTIVADOS Convencional (flujo en pistón) Mezcla completa aereación graduada Oxígeno Puro Reactor intermitente secuencial Contacto y estabilización aereación prolongada Canales de oxidación Tanques profundos(30.0) Deep Shaft	Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación)
	nitrificación de cultivos en suspensión	nitrificación
	Lagunas aireadas	Eliminación de la DBO carbonosa(nitrificación)
	Digestión aerobia aereación convencional Oxígeno puro	Estabilización, eliminación de la DBO carbonosa
<b>CULTIVO FIJO</b>	Filtros percoladores Baja carga Alta carga	Eliminación de la DBO carbonosa, nitrificación
	Filtros de desbaste	Eliminación de la DBO carbonosa
	Sistemas biológicos rotativos de contacto (RBC)	Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación)
	Reactores de lecho compacto	Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación)
<b>PROCESOS COMBINADOS</b>	Biofiltros activados Filtros percoladores con contacto de sólidos, procesos de lodos activados con Biofiltros, proceso de filtros percoladores y lodos activados en serie	Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación)

**Tabla XXI. Continuación.**

<b>PROCESOS ANÓXICOS</b>		
<b>CULTIVO EN SUSPENSIÓN</b>	Desnitrificación con cultivo suspensión	Desnitrificación
<b>CULTIVO FIJO</b>	Desnitrificación de película fija	Desnitrificación
<b>PROCESOS ANAEROBIOS</b>		
<b>CULTIVO EN SUSPENSIÓN</b>	Digestión anaerobia Baja carga, una etapa Alta carga, una etapa Doble etapa	Estabilización, eliminación de la DBO carbonosa
	Proceso anaerobio de contacto	Eliminación de la DBO carbonosa
	Manto de fango anaerobio de flujo ascendente	Eliminación de la DBO carbonosa
<b>CULTIVO FIJO</b>	Filtro anaerobio	Eliminación de la DBO carbonosa, estabilización de residuos (desnitrificación)
	Lecho expandido	Eliminación de la DBO carbonosa, estabilización de residuos.
<b>PROCESOS ANAEROBIOS, ANÓXICOS O AEROBIOS COMBINADOS</b>		
<b>CULTIVO DE SUSPENSIÓN</b>	Proceso de una o varias etapas, múltiples procesos patentados	Eliminación de la DBO carbonosa, nitrificación, desnitrificación y eliminación de fósforo.
<b>PROCESOS COMBINADOS: CULTIVO FIJO Y EN SUSPENSIÓN</b>	Proceso de una o varias etapas	Eliminación de la DBO carbonosa, nitrificación, desnitrificación y eliminación de fósforo.
<b>PROCESOS EN ESTÁNCQUES</b>	Lagunas aerobias Estánques de maduración (terciarios) Estánques facultativos Estánques anaerobios	Eliminación de la DBO carbonosa, nitrificación

Fuente: Metcalf & Hedí, Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización .Página 432,433.

**Tabla XXII. Clasificación de los microorganismos en base a la obtención de energía**

<b>MECANISMO DE OBTENCIÓN DE LA ENERGIA</b>	<b>CLASIFICACIÓN</b>	
Toman energía luminosa	Fotótrofos	Fotolitótrofos, ligados a la existencia de donantes de electrones no orgánicos
		Fotoorganotrofos, ligados a la existencia de donantes de electrones orgánicos
Toman energía de proceso de oxidación y fermentación	Quimiotrofos	Quimiolitótrofos, captan energía en los procesos de oxidación de materia mineral.
		Quimioorganotrofos, captan energía en la oxidación o hidrólisis de compuestos orgánicos.

Fuente: Hernández Muñoz, Aurelio. Depuración de aguas residuales. Página 455.

**Tabla XXIII. Clasificación de las bacterias en base a intervalos de temperatura.**

CLASIFICACIÓN	RANGO DE TEMPERATURA(°C)
Criófilas	-2°C y 12°C
Mesófilas	14°C y 35°C
Termófilas	40°C y 65°C

Fuente: Hernández Muñoz, Aurelio. Depuración de aguas residuales. Página 461.

**Tabla XXIV. Relación entre la edad del fango ( $\theta_c$ ) y las concentraciones de DBO<sub>5</sub> y S.S. en el agua depurada**

Edad del fango ( $\theta_c$ , d)	Concentraciones en el agua depurada					
	S.S. Variable			S.S. Constante		
	S.S. (mg/l)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	DBO <sub>5</sub> soluble (mg/l)	S.S. (mg/l)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	DBO <sub>5</sub> soluble (mg/l)
1	40	47	23	30	41	23
2	40	40	16	30	34	16
3	30	31	13	30	31	13
4	25	26	11	30	29	11
5	25	24	9	30	27	9
6	25	24	9	30	27	9
7	25	23	8	30	26	8
8	20	20	8	30	26	8
9	20	19	7	30	25	7
10	20	19	7	30	25	7
12	20	19	7	30	25	7
14	20	19	7	30	25	7
16	20	18	6	30	24	6
18	20	18	6	30	24	6

**Tabla XXIV. Continuación**

Edad del fango ( $\theta_c$ , d)	Concentraciones en el agua depurada					
	S.S. Variable			S.S. Constante		
	S.S. (mg/l)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	DBO <sub>5</sub> soluble (mg/l)	S.S. (mg/l)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	DBO <sub>5</sub> soluble (mg/l)
20	15	15	6	30	24	6
25	15	15	6	30	24	6
30.	15	14	5	30	23	5

Fuente: Hernández Lehmann, Aurelio. Manual de diseño de estaciones depuradoras de aguas residuales. Página 49.

**Tabla XXV. Coeficiente A y B para el cálculo de las necesidades de oxígeno.**

Autor		Coeficientes	
		A	B
Eckenfelder y O'Conor		0.48	0.08
Logan y Budd		0.052	0.09
Quirk		0.53	0.15
Manstantuono	Carga másica		
	0.1	0.66	0.065
	0.2	0.59	0.065
	0.3	0.56	0.08
	0.4	0.53	0.08
	0.5	0.50	0.08
W.R.C.		0.75	0.048

Fuente: Hernández Lehmann, Aurelio. Manual de diseño de estaciones depuradoras de aguas residuales. Página 57.

**Tabla XXVI. Valores de  $C_s$  en función de la temperatura.**

<b>T(°C)</b>	<b><math>C_s</math>(mg/l)</b>	<b>T(°C)</b>	<b><math>C_s</math>(mg/l)</b>	<b>T(°C)</b>	<b><math>C_s</math>(mg/l)</b>
1	14.23	11	11.08	21	8.99
2	13.84	12	10.83	22	8.83
3	13.48	13	10.60	23	8.68
4	13.13	14	10.37	24	8.53
5	12.80	15	10.15	25	8.38
6	12.48	16	9.95	26	8.22
7	12.17	17	9.74	27	8.07
8	11.87	18	9.54	28	7.92
9	11.59	19	9.35	29	7.77
10	11.33	20	9.17	30	7.63

Fuente: Hernández Lehmann, Aurelio. Manual de diseño de estaciones depuradoras de aguas residuales. Página 59.

**Tabla XXVII. Valores del coeficiente  $K_{t3}$ .**

<b>Sistemas de aereación</b>	<b><math>K_{t3}</math></b>
<b>Aire con burbujas finas</b>	
• Carga media sin nitrificación	0.55
• Carga baja sin nitrificación	0.65
<b>Aire con difusores estáticos</b>	0.80
<b>Turbinas de aereación</b>	0.90
<b>Aire con burbujas gruesas</b>	0.90

Fuente: Hernández Lehmann, Aurelio. Manual de diseño de estaciones depuradoras de aguas residuales. Página 61.

**Tabla XXVIII. Parámetros decantación secundaria de lodos activados**

Proceso	Carga salida vertedero (m <sup>3</sup> /h.ml)		Carga de sólidos (Kg./m <sup>2</sup> d)		Tiempo de retención (h)		Velocidad ascensional (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h)	
	Q <sub>med</sub>	Q <sub>max</sub>	Q <sub>med</sub>	Q <sub>max</sub>	Q <sub>med</sub>	Q <sub>max</sub>	Q <sub>med</sub>	Q <sub>max</sub>
<b>Convencional</b>	≤5.7	≤10.5	≤2.5	≤6.0	≥3	≥2	≤0.8	≤1.5
<b>Alta carga</b>	≤6.5	≤11.5	≤5.6	≤9.5	≥2.5	≥1.5	≤1.18	≤2
<b>Aereación escalonada</b>	≤6.5	≤11.5	≤2.8	≤6.2	≥2.0	≥1.5	≤1.35	≤2
<b>Contacto</b>	≤6.5	≤11.5	≤2.2	≤5.5	≥3.2	≥1.6	≤1.02	≤2
<b>estabilización</b>								
<b>Aereación estabilización</b>	≤4.0	≤9.0	≤4.2	≤7.0	≥3.6	≥1.7	≤0.7	≤1.5

Fuente: Hernández Lehmann, Aurelio. Manual de diseño de estaciones depuradoras de aguas residuales. Página 64.

**Tabla XXIX. Parámetros para espesamiento por gravedad.**

	F. primario	F. Activados	F. mixtos	F. aereación prolongada	F. estabilización aerobia
<b>Carga de sólidos (Kg./ m<sup>2</sup>d)</b>	90-130	20-35	40-70	25-35	30-40
<b>Carga hidráulica (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h)</b>	≤1.40	≤0.45	≤0.90	≤0.45	≤0.45
<b>Tiempo de retención (h)</b>	≥24	≥24	≥24	≥24	≥24
<b>Concentración (%)</b>	8-10	2-3	4-7	2-3	2.5-3.5

Fuente: Hernández Lehmann, Aurelio. Manual de diseño de estaciones depuradoras de aguas residuales. Página 155.

**Tabla XXX. Descripción de las diferentes modificaciones al proceso de lodos activados.**

PROCESO O MODIFICACIÓN DEL PROCESO	DESCRIPCIÓN
<b>FLUJO EN PISTÓN</b>	El agua decantada y el fango activado recirculado entran en el tanque de aereación y se mezclan con aire disuelto o con agitadores mecánicos. El suministro de aire suele ser uniforme a lo largo de todo el canal. Durante el período de aereación, se produce la absorción, floculación y oxidación de la materia orgánica. Los sólidos del fango activado se separan en un decantador secundario.
<b>REACTOR DE MEZCLA COMPLETA</b>	Es una aplicación del régimen de flujo de un reactor de flujo continuo agitado. El agua residual y el fango activado recirculado se introducen, normalmente, en varios puntos del tanque de aereación. La carga orgánica y la demanda de oxígeno son uniformes en toda la longitud del tanque.
<b>AEREACIÓN GRADUADA</b>	Es una modificación del proceso convencional, de flujo en pistón. A lo largo de la longitud del canal, en función de la demanda de oxígeno, se aplican caudales de aereación diferentes. La mayor cantidad de oxígeno se suministra a la entrada del tanque, y las cantidades aportadas disminuyen conforme el líquido mezcla se aproxima al extremo de salida. Esta configuración se suele conseguir disponiendo diferentes separaciones entre difusores a lo largo del tanque.
<b>AEREACIÓN CON ALIMENTACIÓN ESCALONADA</b>	Es una modificación del proceso de flujo en pistón convencional, en el que el agua residual decantada se introduce en diferentes puntos del canal para conseguir un valor de la relación F/M uniforme, lo cual permite reducir la demanda de oxígeno punta. Normalmente se suelen emplear tres o más canales paralelos. Una de las ventajas importantes en este proceso es la flexibilidad de operación.
<b>AEREACIÓN MODIFICADA</b>	Es similar al proceso de flujo en pistón, con la diferencia que se emplean menores tiempos de detención y valores de la relación F/M más elevados. El rendimiento de la eliminación de la DBO, es inferior al de otros procesos de lodos activados.
<b>CONTACTO Y ESTABILIZACIÓN</b>	Este proceso utiliza dos tanques o compartimientos separados para el tratamiento del agua residual y la estabilización del fango activado. El fango activado estabilizado se mezcla con el agua residual afluyente (bruta o decantada), en un tanque de contacto. El líquido mezcla se decanta en un decantador secundario y el fango de retorno se airea por separado en un tanque de re-aereación para estabilizar la materia orgánica. Los volúmenes necesarios suelen ser un 50% inferiores a lo necesario en el proceso convencional de flujo en pistón.
<b>AEREACIÓN PROLONGADA</b>	Es similar al proceso de lodos activados convencional excepto en que funcionan en la fase de respiración endógena de la curva de crecimiento, lo cual precisa una carga orgánica reducida y un largo período de aereación. Este proceso se utiliza para plantas prefabricadas para pequeñas comunidades.
<b>AEREACIÓN DE ALTA CARGA</b>	Es una modificación del proceso en el que se combinan altas concentraciones de SSVLM con elevadas cargas volumétricas. Esta combinación permite una elevada relación F/M y largos tiempos de retención celular con tiempos de detención hidráulica cortos. El mezclado debe ser adecuado.

**Tabla XXX. Continuación.**

<b>PROCESO O MODIFICACIÓN DEL PROCESO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>SISTEMAS DE OXÍGENO PURO</b>	En lugar de aire se utiliza oxígeno de gran pureza. El oxígeno se distribuye uniformemente en tanques de aereación cubiertos y se recircula. Parte del gas se purga para reducir la concentración de dióxido de carbono. También puede ser necesario realizar ajustes del pH, La cantidad de oxígeno que se añade es 4 veces superior a la cantidad que se puede añadir con los sistemas de aereación convencional.
<b>CANAL DE OXIDACIÓN</b>	Es un canal circular u ovalado equipado con dispositivos de aereación mecánica. El agua residual tamizada entra al canal, entre 0.24 y 0.35 m/s. Funcionan en base a un esquema de aereación prolongada con largos tiempos de detención y de retención de sólidos. En la mayoría de las aplicaciones se emplean tanques de sedimentación secundaria.
<b>REACTOS DE FLUJO DISCONTINUO SECUENCIAL</b>	Es proceso secuencial que sigue un esquema de llenado-vaciado alternado, en el que todas las etapas de lodos activados se llevan a cabo en un reactor de mezcla completa. El líquido mezcla permanece en el interior del reactor durante todos los ciclos, lo cual permite la necesidad de disponer de tanques de sedimentación secundaria.
<b>REACTOR DEEP SHAFT(POZO PROFUNDO)</b>	Los decantadores primarios y el tanque de aereación se sustituyen por un pozo vertical de 100 a 150 metros de longitud. El pozo se recubre con un revestimiento de chapa de acero y se equipa con una tubería concéntrica para formar un reactor de geometría anular. El líquido mezcla y el aire se ven forzados a circular en trayectoria descendente por el centro del pozo y ascienden por la parte exterior.
<b>NITRIFICACIÓN DE ETAPA ÚNICA</b>	La eliminación de la DBO como del amoniac, se lleva acabo en la misma etapa biológica. Los reactores pueden consistir en una serie de reactores de mezcla completa o en un reactor de flujo en pistón.
<b>NITRIFICACION EN ETAPAS SEPARADAS</b>	La nitrificación se lleva a cabo en un reactor independiente, que funciona alimentado por el efluente de una variedad previa de tratamiento biológico. La ventaja de este proceso es que se puede optimizar la explotación adecuándola a las necesidades de eliminación de nitrógeno.
<b>PROCESO KRAUS</b>	Es una modificación del proceso de aereación escalonada que se emplea para tratar aguas residuales con bajo contenido de nitrógeno. Es un tanque independiente diseñado para nitrificar, se añade sobrenadante del digestor a una parte del fango de retorno como fuente de nutrientes. El líquido mezcla resultante se añade, al sistema de aereación de flujo en pistón principal.

Fuente: Metcalf & Hedí, Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización.

Página 616, 617,618.

**Tabla XXXI. Características que definen el funcionamiento de las diferentes variantes del proceso de lodos activados.**

MODIFICACIÓN DEL PROCESO	MODELO DE FLUJO	SISTEMA AEREACIÓN	EFICIENCIA ELIMINACIÓN DBO %	OBSERVACIONES
<b>Convencional</b>	Flujo en pistón	Difusores de aire, aereadores mecánicos	85-95	Utilizado en aguas residuales domésticas de baja concentración. El proceso es susceptible a cargas de choque
<b>Reactor de Mezcla Completa</b>	Reactor de mezcla completa agitado	Difusores de aire, aereadores mecánicos	85-95	Utilizado en aplicaciones generales. El proceso es resistente a cargas de choque, pero es susceptible a desarrollo de organismos filamentosos.
<b>Aereación con alimentación escalonada</b>	Flujo en pistón	Difusores de aire	85-95	Utilizado en aplicaciones generales en un amplio campo de tipos de aguas residuales.
<b>Aereación Modificada</b>	Flujo en pistón	Difusores de aire	60-75	Utilizado para conseguir grados intermedios de tratamiento cuando la presencia de tejido celular en el efluente es aceptable.
<b>Contacto y estabilización</b>	Flujo en pistón	Difusores de aire, aereadores mecánicos	80-90	Utilizado para la ampliación de sistemas existentes, plantas prefabricadas.
<b>Aereación prolongada</b>	Flujo en pistón	Difusores de aire, aereadores mecánicos	75-95	Utilizado en pequeñas comunidades, utilizado en diseño de plantas prefabricadas, el proceso es flexible.
<b>Aereación de alta carga</b>	Reactor de mezcla completa agitado	Aereadores mecánicos	75-90	Utilizado para aplicaciones generales con aereadores de turbina para transferir oxígeno y controlar el tamaño de los floculó.
<b>Proceso de Kraus</b>	Flujo en pistón	Difusores de aire	85-95	Utilizado en aguas residuales de alta concentración y bajo contenido de nitrógeno.
<b>Sistema de oxígeno puro</b>	Reactores de mezcla completa en serie	Aereadores mecánicos (turbinas sumergidas)	85-95	Utilizado en aplicaciones generales cuando se dispone de un espacio limitado. El proceso es resistente frente a cargas másicas.
<b>Canal de oxidación</b>	Flujo en pistón	Aereadores mecánicos (eje horizontal)	75-95	Utilizado en pequeñas comunidades donde no exista limitación de espacio. Proceso Flexible
<b>Reactor de flujo discontinuo secuencial</b>	Reactor de flujo intermitente agitado	Difusores de aire	85-95	Utilizado en pequeñas comunidades donde no se cuenta con espacio. El proceso es flexible y permite la eliminación del nitrógeno y el fósforo.
<b>Deep Shaft</b>	Flujo en pistón	Difusores de aire	85-95	Se utiliza en aguas residuales muy concentradas, proceso resistente a cargas másicas.

**Tabla XXXI. Continuación**

MODIFICACIÓN DEL PROCESO	MODELO DE FLUJO	SISTEMA AEREACION	EFICIENCIA ELIMINACIÓN DBO %	OBSERVACIONES
<b>Nitrificación de etapa única</b>	Flujo en pistón o reactores de flujo continuo agitados	Difusores de aire, arreadores mecánicos	85-95	Aplicación para la presencia de nitrógeno en los casos en los que no se presentan residuos industriales inhibidores del proceso.
<b>Nitrificación de etapas separadas</b>	Flujo en pistón o reactores de flujo continuo agitados	Difusores de aire, arreadores mecánicos	85-95	Utilizado para mejorar el grado de tratamiento de sistemas existentes en los que las limitaciones sobre la presencia de nitrógeno son estrictas o en casos en los que se presentan residuos industriales inhibidores susceptibles de ser eliminados en etapas previas.

Fuente: Metcalf & Hedí, Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización. Página 624,625.

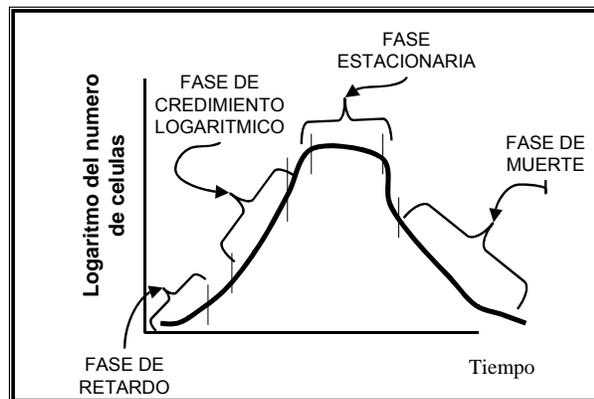
**Tabla XXXII. Parámetros de diseño del proceso de lodos activados.**

MODIFICACIÓN DE PROCESO	$\theta_c$ , (d)	F/M Kg. DBO <sub>5</sub> aplica / Kg. SSVLM*d	Carga Volúmica, Kg. DBO <sub>5</sub> aplicada/m <sup>3</sup> *d	SSLM, mg/l	V/Q, (h)	Q <sub>r</sub> /Q
<b>Convencional</b>	5-15	0.2-0.4	0.32-0.64	1500-300	4-8	0.25-0.75
<b>Reactor de mezcla completa</b>	5-15	0.2-0.6	0.80-1.92	2500-4000	3-5	0.25-1.0
<b>Alimentación escalonada</b>	5-15	0.2-0.4	0.64-0.96	2000-3500	3-5	0.25-0.75
<b>Aereación modificada</b>	0.2-0.5	1.5-5.0	1.2-2.4	200-1000	1.5-3	0.05-0.25
<b>Contacto y estabilización</b>	5-15	0.2-0.6	0.96-1.2	(1000-3000) <sup>a</sup> (4000-10000) <sup>b</sup>	(0.5-1.0) <sup>a</sup> (3-6) <sup>b</sup>	0.5-1.5
<b>Aereación prolongada</b>	20-30	0.05-0.15	0.16-0.40	3000-6000	18-36	0.5-1.5
<b>Aereación de alta carga</b>	5-10	0.4-1.5	1.6-1.6	4000-10000	2-4	1.0-5.0
<b>Proceso de Kraus</b>	5-15	0.3-0.8	0.64-1.6	2000-3000	4-8	0.5-1.0
<b>Sistema de oxígeno puro</b>	3-10	0.25-1.0	1.6-3.2	2000-5000	1-3	0.25-0.5
<b>Canal de oxidación</b>	10-30	0.05-0.3	0.08-0.48	3000-6000	8-36	0.75-1.5
<b>Reactor de flujo discontinuo secuencial</b>	NA	0.05-0.3	0.08-0.24	1500-5000 <sup>d</sup>	12-50	NA
<b>Deep Shaft</b>	SI	0.5-5.0	SI	SI	0.5-5	SI
<b>Nitrificación de etapa única</b>	8-20	0.10-0.25 (0.02-0.15) <sup>c</sup>	0.08-0.32	2000-3500	6-15	0.5-1.5
<b>Nitrificación de etapas separadas</b>	15-100	0.05-0.2 (0.04-0.15) <sup>c</sup>	0.05-0.14	2000-3500	3-6	0.5-2.00

- a Unidad de contacto
  - b Unidad de estabilización de sólidos
  - c NKT/SSVLM
  - d Los SSLM varían en función de la fase del ciclo de operación
- NA No aplica
- SI Sin información

Fuente: Metcalf & Hedí, Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización. Página 626.

**Figura 17. Fases del crecimiento bacteriano.**



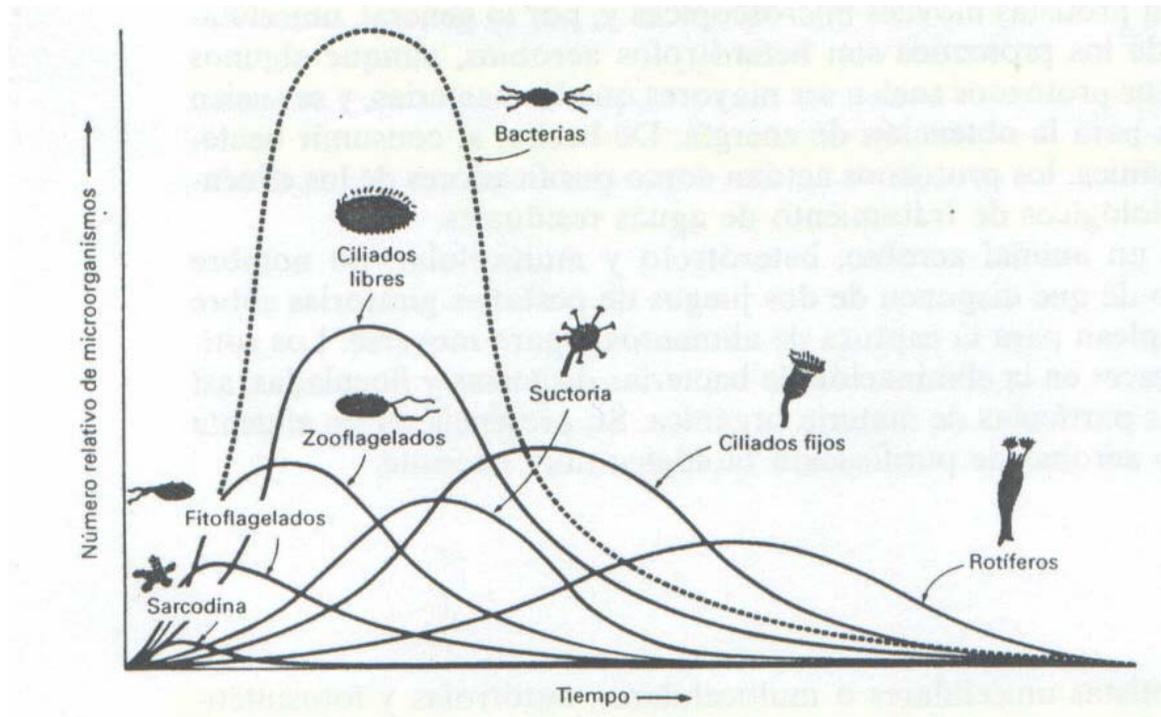
El presente modelo puede ser estudiado en función de la masa bacteriana,

1. Fase de retardo: las bacterias necesitan de un tiempo para aclimatarse al nuevo medio. La masa de bacterias empieza a aumentar antes de que se produzca la división celular, que es el medio común de reproducción

2. Fase de crecimiento exponencial: en esta etapa existe una cantidad en exceso de alimento alrededor de los microorganismos, la tasa de metabolismo y crecimiento es función de la capacidad de los microorganismos para procesar el sustrato
3. Fase de crecimiento decreciente: la tasa de crecimiento y en consecuencia la masa de bacterias, disminuye en función de la limitada disponibilidad de alimento
4. Fase endógena: los microorganismos se ven forzados a metabolizar su propio protoplasma sin reposición del mismo, ya que la concentración de alimento se encuentra al mínimo. Durante esta fase se puede presentar el fenómeno conocido como lisis, los nutrientes que quedan en las células muertas, se difunden en el medio proporcionando alimento a las células vivas existentes.

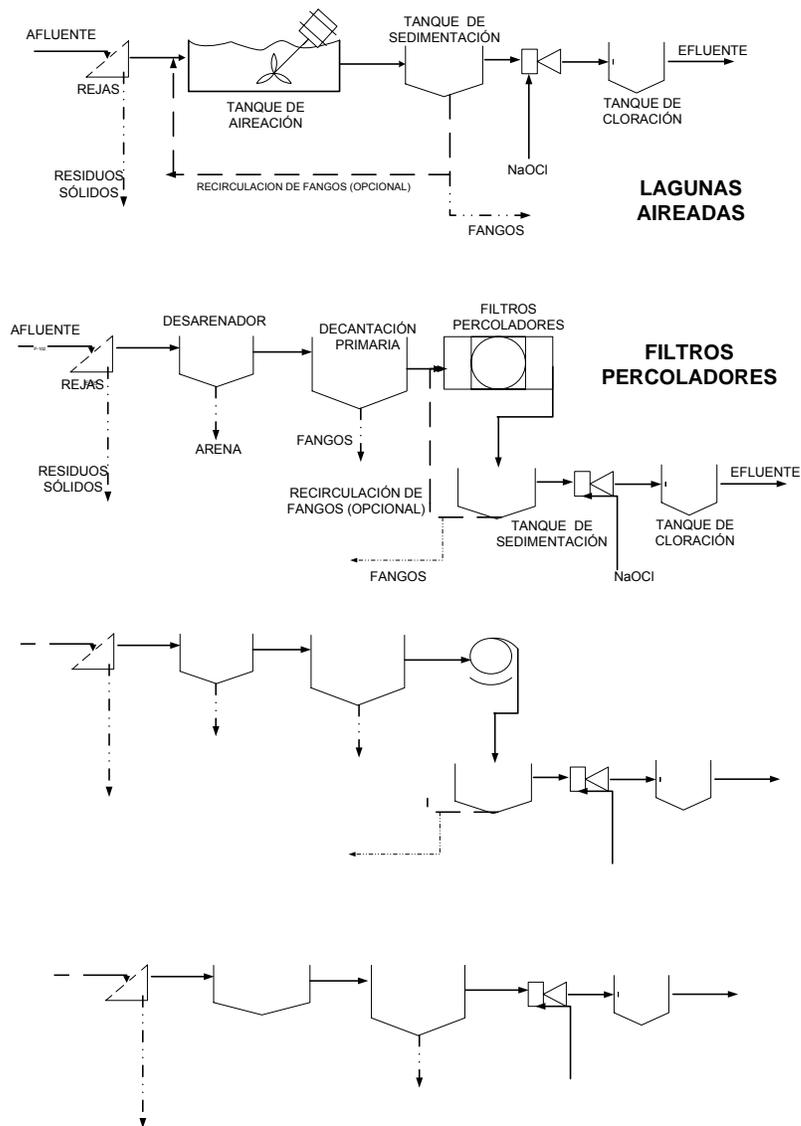
Fuente: Osorio Ugarte, Haydeé Isabel. Evaluación de la planta de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico por el proceso de lodos activados de la colonia Colinas de Monte María. Página 71.

**Figura 18. Crecimiento relativo de los microorganismos en el curso de la estabilización de un residuo orgánico en un medio líquido**



Fuente: Metcalf & Hedí, Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización .Página 421.

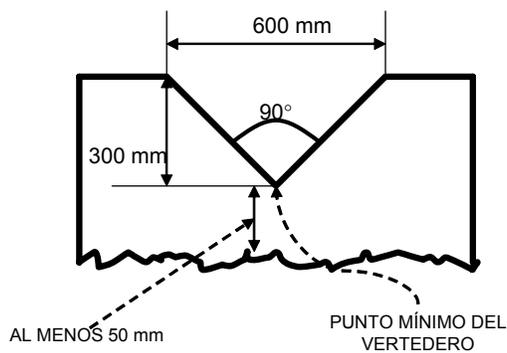
**Figura 19. Diagramas de flujo para los procesos biológicos más utilizados en el tratamiento de agua residual.**



Fuente: Metcalf & Hedí, Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización. Página 604.

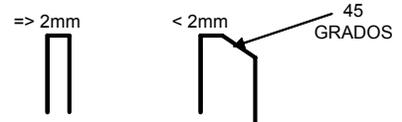
**Figura 20. Dimensiones fundamentales para la fabricación de un vertedero de 90°, con capacidad de medir hasta 64 l/s.**

**DATOS TÉCNICOS DE  
MEDIDOR DE CAUDAL TIPO  
VERTEDERO A 90°C**



**DATOS:**

1. GROSOR DE LA LÁMINA DEBE SER MENOR O IGUAL A 2mm, SI ES MAYOR REALIZAR LA SIGUIENTE MODIFICACIÓN AL GROSOR DE LA LÁMINA



2. LOS LATERALES Y EL FONDO DEBEN ESTAR COMPLETAMENTE SELLADOS EN LA CÁMARA DE MEDICIÓN

3. EL ÁNGULO DEBE SER EXACTO, SI NO SON 90 GRADOS SE DEBERÁ INCLUIR UN FACTOR DE CORRECCIÓN,

4. ECUACIÓN QUE DEFIENE EL VERTEDERO

$$Q[m^3/hr] = K \cdot H^{2.5}$$

H= altura(m)

ÁNGULO VERTEDERO	VALOR CONSTANTE
30	1344
45	2057
60	2868
90	4969
120	8606