

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **Diseño y Simulación de Plantas de Tratamiento de Aguas Bajo Ambiente Windows**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela para optar al Título  
de Ingeniero Químico  
Por el Br. Sánchez U, Fernando

Caracas, Marzo de 2002.

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **Diseño y Simulación de Plantas de Tratamiento de Aguas Bajo Ambiente Windows**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Rosalba Sciamanna  
TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Joaquín Henríquez

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela para optar al Título  
de Ingeniero Químico  
Por el Br. Sánchez U, Fernando

Caracas, Marzo de 2002.

## **APROBACIÓN DEL JURADO**

Trabajo Especial de Grado aprobado  
en nombre de la Universidad  
por el siguiente Jurado:

---

Prof. Sciamanna Rosalba (Tutor)

---

Ing. Henríquez Joaquín (Tutor)

---

Prof. López Eudoro (Jurado)

---

Prof. Valentino Salvatore (Jurado)

---

Fecha

## SUMARIO

En la actualidad, la computación se ha perfilado como una herramienta obligatoria en todas las áreas en las que el ser humano se desenvuelve en su diario vivir. Para la ciencia, la tecnología ha jugado un papel primordial en el progreso de esta y actualmente las dos van unidas en los nuevos desafíos que el humano se propone.

En particular, en el campo de la ingeniería ya se hace común y cotidiano el uso de la computación en sus distintas ramas. Existe un sin fin de paquetes computarizados que ayudan a obtener respuestas a los problemas que se nos plantean.

Mediante la codificación de un lenguaje poderoso de computación, se puede lograr un sin fin de programas que puedan ser útiles a la ingeniería. Una rama muy importante es el cuidado del medio ambiente y el aprovechamiento de los recursos naturales que este ofrece para un sin fin de usos que le pueda dar el ser humano a su vida cotidiana. El agua, sin duda alguna, representa un recurso natural de suma importancia para el ser vivo y también se convirtió en uso imprescindible para muchas industrias por no decir todas. Combinando la impresionante tecnología que existe hoy en día con el uso de este recurso natural tan importante, se puede lograr un mejor aprovechamiento del mismo.

Es por esta razón que se plantea el objetivo primordial de poder crear un software que pueda facilitar el uso del agua destinado tanto al consumo humano como al industrial.

El sistema computarizado de simulación *AquaBox TA* fue un software desarrollado en Visual Basic 6.0<sup>®</sup> que le permite al usuario obtener soluciones rápidas y efectivas acerca del diseño y simulación de plantas de tratamiento de aguas.

Este paquete fue orientado a personas interesadas en el área de tratamiento de aguas, tanto a nivel profesional como a nivel académico ya que tiene la ventaja de ser un software amigable e interactivo en el cual se le brinda al

usuario, la posibilidad de adentrarse de una manera fácil al funcionamiento de este paquete computarizado.

En el programa se implementaron las operaciones unitarias más básicas que existen en el proceso de purificación de las aguas. Estas operaciones son: Desbaste, Desarenador, Aireación, Mezcla Rápida Mecánica, Mezcla Rápida Hidráulica, Floculador Hidráulico Horizontal, Floculador Hidráulico Vertical, Floculador Mecánico, Sedimentador Rectangular, Filtración Lenta, Filtración Rápida, Ablandamiento y Cloración. Estas operaciones son las mas comúnmente utilizadas a escala mundial con variaciones en la forma de configurar una planta y esto va a depender del tipo de agua que se va a someter a tratamiento.

El programa posee una excelente interfaz con el usuario que le permite desarrollar de manera fácil y cómoda sistemas de plantas de purificación de aguas. Con el software *AquaBox TA* no sólo se puede desarrollar trabajos, sino que se puede aprender un poco más sobre el mundo de la potabilización del agua.

El programa es capaz de simular configuraciones básicas de plantas de tratamiento de aguas definidas por el usuario. En ellas, se deben definir parámetros de entrada del agua a tratar así como también de algún dato necesario que el programa requiera para el dimensionamiento de los equipos incluidos en la simulación. Por otro lado, el software devuelve caracterizaciones de los equipos, propiedades del agua tratada y otros parámetros importantes de diseño que hay que tomar en cuenta al momento de desarrollar un buen proyecto de tratamiento de aguas.

Para poder lograr el desarrollo de este software, fue necesario adentrarse profundamente en el área, visitar plantas reales, conocer el lenguaje de programación utilizado, conocer los requerimientos de un usuario que desee implantar de manera ficticia o real una planta de tratamiento de aguas y por último fue necesario la validación del mismo tomando como valores de comparación, los rangos típicos de diseño que generalmente son utilizados por plantas existentes en la realidad.

Existen parámetros típicos que caracterizan al agua tales como el color y la turbiedad, los cuales deben ser caracterizados para el agua que va a ser tratada, de lo contrario no existe ecuación alguna definida que relacione alguna de estas características. Es necesario realizar un estudio cuidadoso del agua cruda, para así poder obtener curvas y ecuaciones que puedan proporcionar una idea bastante aproximada de cual será el comportamiento de estos parámetros.

Igualmente es necesario conocer mediante pruebas de laboratorio o de plantas a escala piloto, cual es el comportamiento de algunas características que presenta el agua, en distintas operaciones unitarias que puedan existir en el tratamiento de aguas.

Por otro lado el programa *AquaBox TA* reportó los valores de forma confiable para los parámetros del agua estudiados, ya que se encontraron, en su mayoría, en los rangos típicos recomendados por la bibliografía.

Por último, se recomendó, entre otros, como factor importante para el mejoramiento del programa desarrollado, un módulo que permita la inclusión de datos que puedan caracterizar el agua a tratar y así obtener curvas y ecuaciones que sean un reflejo, sino fiel, parecido a lo que ocurre en la realidad.

# INDICE

INDICE DE TABLAS.....	VIII
INDICE DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XII
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
III. OBJETIVOS Y ALCANCES.....	5
IV. FUNDAMENTOS BÁSICOS.....	6
IV.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS.....	6
IV.1.1 Características Físicas.....	7
IV.1.2 Características Químicas.....	10
IV.1.3 Características Bacteriológicas.....	16
IV.1.4 Características Radiológicas.....	17
IV.2 PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS.....	18
IV.3 DIFERENTES TIPOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO.....	21
IV.4 DISEÑO DE EQUIPOS.....	23
IV.4.1Desbaste.....	23
IV.4.2Desarenado.....	27
IV.4.3Aireación.....	34
IV.4.4Mezcla rápida.....	36
IV.4.5Floculación.....	43
IV.4.6Sedimentación.....	51
IV.4.7Filtración lenta.....	58
IV.4.8Filtración rápida.....	62
IV.4.9Desinfección.....	66
IV.4.10Coagulación.....	73
IV.4.11Ablandamiento.....	75
V. NORMAS SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA.....	78
VI. METODOLOGÍA.....	82
VII. DISCUSIÓN Y RESULTADOS.....	84
VIII. CONCLUSIONES.....	140
IX. RECOMENDACIONES.....	144
X. BIBLIOGRAFÍA.....	145
ANEXO A.....	146

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b>	<i>Valores límite recomendados para <math>\text{CaCO}_3</math> como carbonatos y bicarbonatos en distintas industrias</i>	12
<b>Tabla 2.</b>	<i>Factor de forma de las barras</i>	25
<b>Tabla 3.</b>	<i>Parámetros de Diseño para el diseño de Rejillas</i>	27
<b>Tabla 4.</b>	<i>Valores de la constante K</i>	42
<b>Tabla 5.</b>	<i>Tiempo de contacto recomendado para mezcladores mecánicos</i>	42
<b>Tabla 6.</b>	<i>Valores límite recomendados para el uso de la filtración lenta</i>	60
<b>Tabla 7.</b>	<i>Valores Máximos Aceptables para el Agua Potable – OMS</i>	79
<b>Tabla 8.</b>	<i>Componentes relativos a la calidad organolépticos del agua potable</i>	80
<b>Tabla 9.</b>	<i>Equipos incluidos en AquaBox TA</i>	85
<b>Tabla 10.</b>	<i>Resultados obtenidos para el ejemplo Desbaste</i>	91
<b>Tabla 11.</b>	<i>Resultados obtenidos para el ejemplo Desarenador</i>	94
<b>Tabla 12.</b>	<i>Resultados obtenidos para distintos tipos de partículas</i>	95
<b>Tabla 13.</b>	<i>Resultados obtenidos para el Sedimentador Rectangular</i>	97
<b>Tabla 14.</b>	<i>Resultados obtenidos para la Filtración Lenta</i>	99
<b>Tabla 15.</b>	<i>Variación de la Pérdida de Carga en el Lecho</i>	100
<b>Tabla 16.</b>	<i>Resultados obtenidos para la Aireación</i>	103
<b>Tabla 17.</b>	<i>Resultados obtenidos para la Mezcla Rápida Hidráulica</i>	105
<b>Tabla 18.</b>	<i>Resultados obtenidos para la Mezcla Rápida Mecánica</i>	108
<b>Tabla 19.</b>	<i>Resultados obtenidos para la Floculación Hidráulica Horizontal</i>	110
<b>Tabla 20.</b>	<i>Resultados obtenidos para la Floculación Hidráulica Vertical</i>	115
<b>Tabla 21.</b>	<i>Resultados obtenidos para la Floculación Mecánica</i>	117
<b>Tabla 22.</b>	<i>Contenido de la Dureza Total en el agua en distintas plantas en Venezuela</i>	118
<b>Tabla 23.</b>	<i>Resultados obtenidos para la Filtración Rápida</i>	124
<b>Tabla 24.</b>	<i>Resultados obtenidos para la simulación de una PFL</i>	129
<b>Tabla 25.</b>	<i>Resultados obtenidos para la simulación de una PFR</i>	134



## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	<i>Ciclo del Nitrógeno</i>	14
<b>Figura 2.</b>	<i>Vista de planta y elevación de un desarenador</i>	33
<b>Figura 3.</b>	<i>Aireador típico de múltiples bandejas</i>	35
<b>Figura 4.</b>	<i>Mezcladores mecánicos (A) y tipos de paletas utilizadas (B)</i>	37
<b>Figura 5.</b>	<i>Floculador de pantallas de flujo horizontal</i>	44
<b>Figura 6.</b>	<i>Sedimentador</i>	53
<b>Figura 7.</b>	<i>Filtro típico por gravedad</i>	63
<b>Figura 8.</b>	<i>Filtro a presión</i>	64
<b>Figura 9.</b>	<i>Sustancias contenidas en la Base de Datos</i>	85
<b>Figura 10.</b>	<i>Ficha de Equipos</i>	87
<b>Figura 11.</b>	<i>Módulos de Cálculo</i>	87
<b>Figura 12.</b>	<i>Posible diagrama en AquaBox</i>	88
<b>Figura 13.</b>	<i>Ventana de errores</i>	89
<b>Figura 14.</b>	<i>Diagrama de flujo del ejemplo Desbaste</i>	90
<b>Figura 15.</b>	<i>Diagrama de flujo de ejemplo Desarenador</i>	93
<b>Figura 16.</b>	<i>Diagrama de flujo del ejemplo Sedimentador</i>	96
<b>Figura 17.</b>	<i>Sedimentador convencional de forma rectangular y flujo horizontal</i>	97
<b>Figura 18.</b>	<i>Diagrama de flujo del ejemplo Filtración Lenta</i>	98
<b>Figura 19.</b>	<i>Diagrama de flujo del ejemplo Cloración</i>	101
<b>Figura 20.</b>	<i>Diagrama de flujo del ejemplo aireación</i>	102
<b>Figura 21.</b>	<i>Variación del oxígeno a través del tiempo</i>	104
<b>Figura 22.</b>	<i>Diagrama de flujo del ejemplo Mezcla Rápida Hidráulica</i>	105
<b>Figura 23.</b>	<i>Mezclador Hidráulico del tipo vertedero rectangular</i>	106
<b>Figura 24.</b>	<i>Diagrama de flujo del ejemplo Mezcla Rápida Mecánica</i>	107
<b>Figura 25.</b>	<i>Tiempo de Contacto vs. Gradiente de Velocidad</i>	109
<b>Figura 26.</b>	<i>Diagrama de flujo del ejemplo Floculador Hidráulico Horizontal</i>	110
<b>Figura 27.</b>	<i>Floculador de pantallas de flujo horizontal</i>	111
<b>Figura 28.</b>	<i>Gradientes de velocidad y tiempos de retención que optimizan el proceso</i>	112
<b>Figura 29.</b>	<i>Diagrama de flujo del ejemplo Floculador Hidráulico Vertical</i>	113
<b>Figura 30.</b>	<i>Floculador de pantallas de flujo vertical</i>	114

## Indice de figuras

<b>Figura 31.</b> <i>Comparación de los gradientes de velocidad para el Floculador Hidráulico Vertical</i>	115
<b>Figura 32.</b> <i>Diagrama de flujo del ejemplo Floculador Mecánico</i>	116
<b>Figura 33.</b> <i>Diagrama de flujo del ejemplo Floculador Mecánico</i>	119
<b>Figura 34.</b> <i>Diagrama de flujo de ejemplo Filtración Rápida</i>	123
<b>Figura 35.</b> <i>Batería de filtros de tasa declinante y lavado mutuo</i>	124
<b>Figura 36.</b> <i>Esquema de una planta tipo PFL en AquaBox TA</i>	126
<b>Figura 37.</b> <i>Modelo de un planta del tipo PFR simulada en AquaBox TA</i>	130
<b>Figura 38.</b> <i>Histograma de Turbiedad del Agua Cruda</i>	135
<b>Figura 39.</b> <i>Calidad Microbiológica de la Fuente</i>	135
<b>Figura 40.</b> <i>Curva de Sedimentación Natural</i>	136

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Unidad	Descripción
$a$	m	Espaciamiento entre pantallas
$\alpha, \beta$	adim.	Factor de forma de las barras
$a_1$	m	Ancho de canales del 1 <sup>er</sup> tramo
$A_1$	m <sup>2</sup>	Sección de canales del 1 <sup>er</sup> tramo
$\alpha_1, \beta_1$	adim.	Factores de forma de la arena
$A_2$	m <sup>2</sup>	Sección del canal de limpieza
$aeo$	m	Espaciamiento entre orificios
$a_L$	m	Espaciamiento lateral
$Am$	m <sup>2</sup>	Área del medio filtrante
$ao$	m <sup>2</sup>	Área de cada orificio
$Ao$	m <sup>2</sup>	Área total de orificios
$As$	m <sup>2</sup>	Área superficial de la zona de decantación
$AT$	m <sup>2</sup>	Sección transversal del desarenado
$A_u$	m <sup>2</sup>	Área de la tubería
$B$	m	Ancho de la zona de decantación
$b$	m	Ancho útil de una lámina
$b_1$	m	Ancho del primer canal del floculador vertical
$B_F$	m	Ancho del floculador
$B_{fV}$	m	Ancho total del floculador vertical
$Bl$	m	Borde libre
$Bs$	m	Ancho del sedimentador
$Bu$	m	Ancho de la unidad
$Ca$	m	Capa de agua
$C_D$	adim.	Coefficiente de arrastre
$C_f$	m	Caja filtrante
$Cl_2 - Req$	[Kg Cl <sub>2</sub> /d]	Cantidad de cloro requerido

## Lista de Símbolos

<b>Símbolo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Descripción</b>
$Cl_2 - Res$	[mg $Cl_2$ /L]	Cantidad de cloro residual
$C_n$	mg/L	Cantidad de $CO_2$ final
$C_o$	mg/L	Cantidad de $CO_2$ inicial
$C_s$	m	Capa soporte
$CU$	m	Coeficiente de uniformidad
$d$	m	Diámetro de las partículas
$D$	m	Diámetro de los orificios
$d_l$	m	Ancho de las vueltas del tramo 1 del floculador
$d_c$	m	Diámetro característico de los granos
$d_M$	m	Diámetro del impulsor
$D_M$	mg/l	Dosis máxima
$d_{tu}$	m	Diámetro de la tubería
$e$	m	Espesor de una lámina
$e_p$	adim.	Porosidad del lecho
$Fc$	m	Fondo colector
$g$	$m^2/s$	Aceleración de gravedad
$G$	$s^{-1}$	Gradiente de velocidad
$G_1$	$s^{-1}$	Gradiente de velocidad del 1 <sup>er</sup> tramo del floculador
$G_2$	$s^{-1}$	Gradiente de velocidad del canal vertical
$G_{cl}$	$s^{-1}$	Gradiente de velocidad total del primer canal
$H$	m	Profundidad de la zona de decantación
$H_1$	m	Altura del agua en el floculador
$h_1$	m	Pérdida de carga en el primer tramo del floculador
$H_2$	m	Altura del agua en el vertedero de salida
$h_2$	m	Pérdida de carga en los canales del 1 <sup>er</sup> tramo del floculador
$h_{50}$	m	Pérdida de energía a través de las barras con un 50% de taponamiento

Lista de Símbolos

Símbolo	Unidad	Descripción
$H_a$	m	Altura del agua sobre el vertedero de salida del sedimentador
$h_B$	m	Pérdida de energía a través de las barras
$h_c$	m	Pérdida de carga en los canales del floculador vertical
$H_f$	m	Pérdida de energía por fricción
$h_{f1}$	m	Pérdida de carga total en el primer tramo del floculador
$h_{fT}$	m	Pérdida de carga total en el primer tramo del floculador vertical
$h_i$	m	Pendiente del fondo de la zona de decantación
$H_i$	m	Profundidad de la zona de decantación
$h_L$	m	Pérdida de carga en el lecho
$h_o$	m	Altura de la cortina cubierta con orificios
$H_s$	m	Altura de la zona de sedimentación
$H_t$	m	Altura máxima de la tolva de lodos del sedimentador
$h_v$	m	Pérdida de carga en las vueltas del floculador vertical
$K_c$	adim.	Coefficiente de costo mínimo
$K_p$	m/s	Coefficiente de permeabilidad
$L$	m	Longitud de la zona de decantación
$L_1$	m	Longitud de canales del 1 <sup>er</sup> tramo del floculador
$L_e$	m	Longitud de la zona de entrada del sedimentador
$L_F$	m	Longitud final de la zona de decantación
$L_i$	m	Longitud de la estructura de ingreso
$L_L$	m	Profundidad del lecho
$L_s$	m	Longitud de la zona de sedimentación
$L_T$	m	Extensión total del primer canal
$L_T$	m	Longitud total
$L_{Ts}$	m	Longitud total del sedimentador

Lista de Símbolos

Símbolo	Unidad	Descripción
$Lu$	m	Largo de la unidad
$m$	adim.	Número de compartimientos entre pantallas
$\mu$	Kg/m.s	Viscosidad dinámica del agua
$n$	adim.	Coefficiente de la fórmula de Manning
$n$	adim.	Número de bandejas
$N$	rps	Velocidad del impulsor
$\nu$	m <sup>2</sup> /s	Viscosidad cinemática del agua
$N_1$	adim.	Número de canales en el tramo 1 del floculador
$N_1, N_2$	adim.	Número de orificios repartidos a lo ancho y alto
$N_B$	adim.	Número de espaciamientos
$NMP$	adim.	Número más probable
$no$	adim.	Número de orificios
$N_u$	adim.	Número de unidades
$P$	Watts	Potencia introducida al agua
$P_1$	m	Perímetro mojado del tramo 1 del floculador
$P_c$	m	Profundidad del canal
$\theta$	grados	Angulo
$Q$	m <sup>3</sup> /s	Caudal de diseño
$q$	m <sup>3</sup> /s	Caudal de diseño de la tubería de desagüe
$q_e$	m <sup>3</sup> /s	Caudal del eyector
$QM$	m <sup>3</sup> /s	Caudal de material removido
$\rho$	Kg/m <sup>3</sup>	Densidad del agua
$r_1$	m	Radio hidráulico en el tramo 1
$Re$	adim.	Número de Reynolds
$R_H$	m	Radio hidráulico del compartimiento entre pantallas
$\rho_s$	Kg/m <sup>3</sup>	Densidad de partícula
$T$	s	Tiempo de retención
$t$	s	Tiempo de retención del primer canal

## Lista de Símbolos

<b>Símbolo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Descripción</b>
$t_l$	s	Tiempo de retención del 1 <sup>er</sup> tramo
$T_l$	s	Tiempo de vaciado en la unidad
$t_c$	s	Tiempo de contacto
$tf$	s	Tiempo de retención del floculador vertical
$To$	s	Tiempo de retención del sedimentador
$V$	m/s	Velocidad de flujo a través de las barras
$v$	m/s	Velocidad superficial en un filtro rápido
$V$	m <sup>3</sup>	Volumen del tanque de mezcla rápida
$V_l$	m/s	Velocidad del fluido del 1 <sup>er</sup> tramo
$v_{50}$	m/s	Velocidad de flujo con un 50% de taponamiento
$Va$	m/s	Velocidad de arrastre
$Vc$	m/s	Velocidad en los canales
$V_e$	m/s	Velocidad de alimentación del agua
$V_F$	m/s	Velocidad de filtración
$VH$	m/s	Velocidad horizontal
$Vo$	m/s	Velocidad de paso a través de los orificios
$Vp$	m/s	Velocidad de paso
$Vp$	m/s	Velocidad en los pasajes
$Vs$	m/s	Velocidad de sedimentación de las partículas
$V_T$	m <sup>3</sup>	Volumen total de la unidad del floculador vertical
$V_{TCl}$	m <sup>3</sup>	Volumen del tanque de cloración
$V_{Tr}$	m <sup>3</sup>	Volumen del tramo
$W$	m <sup>3</sup>	Capacidad del equipo de desinfección
$W_B$	m	Ancho del espaciamiento
$Wc$	m	Ancho del canal
$Wce$	m	Ancho del canal efectivo

## I. INTRODUCCIÓN

El abastecimiento de agua para el consumo diario, ha sido una de las principales preocupaciones de la humanidad. Desde sus comienzos, las primeras comunidades buscaron establecerse alrededor de ríos y lagos para formar posteriormente las grandes ciudades y de esta manera, con el crecimiento de estas nuevas metrópolis, ha surgido hasta la actualidad uno de los principales objetivos del ser humano: conseguir un adecuado suministro de agua potable.

El agua químicamente pura, como  $H_2O$ , no es posible encontrarla en la naturaleza, ya que en el ciclo hidrológico que esta cumple, absorbe, arrastra y disuelve una infinidad de partículas de distintos orígenes, como pueden ser minerales, vegetales y microorganismos, los cuales podrían contribuir a realizar grandes cambios en las características de las aguas, hasta incluso convertirlas en sustancias peligrosas para la salud debido a la presencia de organismos patógenos.

La calidad de las aguas naturales, dependerá de la mayor o menor concentración de todas las variedades de sustancias antes mencionadas, lo cual pueden llegar hacerla no apta como fuente de abastecimiento, al menos que se le aplique tratamientos correctivos para que de esta manera cumpla con los requerimientos necesarios de potabilidad o de composición química para otros usos, principalmente industriales.

Es considerada agua potable, o más precisamente agua apta para el consumo humano, toda agua (natural o producida por un tratamiento de potabilización) que cumpla con las normas de calidad establecidas para tal fin. Estas normas se basan en estudios toxicológicos y epidemiológicos, así como en consideraciones estéticas.

Por consiguiente, surge la necesidad de implantar plantas de tratamientos de aguas que no son más que grandes fábricas que reciben una materia prima, siempre cambiante, con la finalidad de producir en ella los cambios físicos, químicos y biológicos que se encuentren enmarcados dentro de las normas



aprobadas para de esta manera entregar un producto manufacturado y acondicionado en cantidad suficiente a fin de satisfacer las necesidades del consumo humano o industrial.

Esta misma necesidad requiere investigaciones previas que de una u otra forma puedan garantizar el buen desarrollo del proyecto a realizar, mejorar o simplemente estudiar. Entre las áreas que se cubren, como parte de la investigación necesaria , se encuentra la simulación computarizada de plantas , que no es más que la recreación virtual de un sistema (en este caso, tratamiento de aguas), con el fin de obtener resultados que permitan tener una idea sobre el comportamiento de lo que va a ser o es éste en la realidad.

Estas simulaciones computarizadas se realizan con la ayuda de un software específico para la aplicación que se requiera, el cual debe estar preferiblemente en un lenguaje de programación que brinde las posibilidades de obtener un producto final flexible y de fácil manejo.

Desde sus comienzos, el lenguaje de programación Visual Basic de Microsoft® ha representado una gran innovación en lo que a facilidad y desarrollo de programas de alto nivel se refiere; además por supuesto de poder crearlos de una forma que sean totalmente compatibles con Microsoft Windows®, convirtiéndose de esta manera en una gran herramienta en lo que a desarrollo de sistemas computarizados respecta.

Con la carencia de software venezolano, que pueda adaptarse a las necesidades y condiciones en lo que a tratamiento de aguas en el país se refiere, se plantea la posibilidad de crear un programa que pueda ser utilizado por las diversas industrias y entes encargados del suministro de agua potable en Venezuela, para de esta forma contribuir al desarrollo y mejoramiento de los distintos sistemas de tratamientos de aguas existentes en el país.

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las grandes civilizaciones humanas nacieron a orillas de los grandes cursos de agua, necesaria para la vida y la agricultura que fue su base primaria. Las milenarias culturas de China, la India, Mesopotamia, Egipto y Roma son ejemplos clásicos. Los pueblos de las culturas americanas también cumplieron con esta regla.

Por el agua se luchó en el pasado y se lucha en el presente. Con el tiempo, la calidad del agua disponible, afectada por el crecimiento de los mismos núcleos urbanos y por otros factores externos, fue un factor decisivo para la búsqueda de fuentes adecuadas. En otros casos la necesidad de establecer núcleos urbanos en zonas estratégicas obligó también a la búsqueda de nuevas fuentes.

Con el descubrimiento de virus, bacterias y otros organismos patógenos (los cuales tienen como medio de vida el agua) y con el desarrollo de la ciencia y tecnología, se fueron descubriendo otros agentes que le proporcionaban al agua la característica de “no consumible”, por lo que se hizo necesaria la implementación de algún tipo de tratamiento que garantizara el bienestar del ser humano al consumir estas fuentes.

Es de esta forma que se fueron desarrollando diferentes procesos dentro de las plantas de tratamiento de aguas, las cuales crecían e innovaban siempre buscando el objetivo primordial: el de hacer que el agua tratada fuera totalmente apta tanto para el consumo humano como para el industrial.

En general, las plantas de tratamiento de aguas, que existen en América Latina, han sido copias ligeramente modificadas de las que se usan en los países más industrializados del mundo, e inclusive se diseñan y simulan estas plantas con ayuda de software extranjero, lo que trae complicaciones en lo que respecta al idioma, equipos y tecnología utilizada.

Venezuela no escapa a este problema, tiene una gran necesidad en lo que a software sobre tratamiento de aguas se refiere. El agua es utilizada de una u otra forma por casi todas las empresas del país; sin embargo, los procesos

correspondientes a cada una de éstas no precisamente requieren que ellas tengan las mismas características.

Es importante pues, conocer cada proceso y las características del agua a tratar y para esto nada más conveniente que realizar previamente una simulación del sistema en estudio, para así poder obtener una visión más clara de lo que se quiere lograr.

La simulación se ha convertido en una poderosa herramienta de trabajo y más aún con el avance y la ayuda de la computación de hoy en día, lo que hace que se profile como uso indispensable en el desarrollo, mejoramiento o simplemente estudio de todo proceso.

Al simular, se puede recrear cualquier sistema de manera ideal y de esta forma conseguir una amplia visión de los resultados a obtener. Adicionalmente representa una gran ventaja, ya que se puede “predecir” ciertos eventos del proceso como también cualidades del producto que se está tratando. Por otro lado, también permite manipular de forma virtual el proceso y así poder observar como reacciona éste ante cambios realizados, sin arriesgar el sistema, sin perder tiempo y sin tener que realizar gastos que puedan resultar innecesarios.

Es así como la simulación, además de ayudar a conseguir el diseño adecuado para un sistema, nos puede guiar hacia resultados que realmente ayuden a conseguir un óptimo desenvolvimiento de éste.

Es por ello que se plantea la necesidad de un programa que pueda diseñar y simular plantas de potabilización de agua y que lo haga de una manera amigable, flexible y de fácil manejo y que por supuesto esté adaptado a las necesidades del país.

### **III. OBJETIVOS Y ALCANCES**

*General:*

Elaborar un software, bajo ambiente Windows, que permita de manera interactiva y flexible, diseñar , simular y evaluar las operaciones unitarias básicas requeridas para la potabilización y/o tratamiento de aguas de proceso.

*Específicos:*

- ✚ Realizar los balances de masas generales y por componentes, en estado estacionario con y sin reacción química, involucrados en las operaciones básicas de tratamiento de aguas de proceso y plantear los modelos matemáticos pertinentes que son requeridos para el diseño y simulación de dichas operaciones básicas y/o equipos involucrados.
- ✚ Desarrollar los diferentes módulos del programa que se realizarán en el lenguaje Visual Basic 6.0 de Microsoft®, para entrelazarlos y así crear la estructura completa del sistema computarizado.
- ✚ Elaborar la base de datos pertinentes a los parámetros de entrada y salida requeridos en cada equipo u operación unitaria.
- ✚ Implementar módulos de cálculo que permitan diseñar y simular tanto operaciones unitarias como los equipos requeridos en las plantas de tratamiento de aguas de proceso.
- ✚ Permitir el diseño de plantas de tratamiento de aguas con diferentes combinaciones de operaciones unitarias y unidades múltiples.
- ✚ Evaluación y validación del programa con parámetros establecidos en la actividad del tratamiento de aguas y mediante regulaciones internacionales y nacionales.
- ✚ Elaborar el manual del usuario, requerido para la mejor comprensión y manejo del programa finalmente obtenido.

## **IV. FUNDAMENTOS BÁSICOS**

Se puede considerar a las plantas de tratamiento de agua (residuales o de proceso) como grandes fábricas que reciben una materia prima siempre cambiante (agua cruda) y que debe entregar un producto manufacturado (agua tratada), que esté en concordancia con las normas del medio ambiente y de salud pública. Ahora bien, antes de adentrarse en el diseño de estas plantas de tratamiento deben tenerse muy en cuenta las características de la fuente que se va a tratar y las características que debe tener el agua tratada para de esta manera diseñar el complejo estructural de tratamiento más adecuado.

En resumen, las características tanto del “agua cruda” como del “agua tratada” deseada tiene una gran influencia en la selección del tratamiento de agua a aplicar.

Por otra parte, el acondicionamiento del agua, tanto para consumo humano como para consumo industrial, se ve determinado por un número limitado de indicadores como lo son los componentes físicos, químicos y biológicos de ésta.

### *IV.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS*

El agua químicamente pura, es decir como  $H_2O$ , es imposible encontrarla en la naturaleza y es muy difícil de obtener en el laboratorio. No obstante, siendo ésta un solvente universal, es muy fácil encontrar una cantidad (en mayor o menor grado) de sustancias disueltas en ella, además de las que se pueden hallar en forma de suspensión o emulsionadas.

De esta manera, se deben tener presente las impurezas que contenga el agua por muy pequeña que sea, ya que la misma podría ser suficiente como para considerarla inapropiada para el consumo humano o para ser empleada en un determinado proceso.

El agua se caracteriza, principalmente, por las propiedades físicas, químicas y biológicas que esta contenga las cuales serán expuestas detalladamente a continuación.

#### **IV.1.1 Características Físicas**

El aspecto físico del agua es un factor de significativa importancia en lo referente a su calidad, entre otros aspectos, por las reacciones que provoca en los consumidores. Incluso a veces esas condiciones físicas pueden ser contraproducentes al sistema en lo que respecta al funcionamiento y mantenimiento, obligando a aplicar tratamientos correctivos que eliminen esas condiciones.<sup>[RIVAS (1963)]</sup>

Los aspectos que caracterizan físicamente al agua son:

##### ♦ *Sólidos*

En la práctica se puede definir sólidos a todos aquellos compuestos que están disueltos en el agua, suspendidos o flotando.

Generalmente estos sólidos los conforman carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, nitratos, sodio, potasio, hierro y manganeso.

Por regla general, los sólidos disueltos provienen de las sales inorgánicas; su tamaño es extremadamente pequeño, entre  $10^{-5}$  y  $10^{-3}$  mμ, no son visibles a simple vista, y no pueden ser removidos del agua por los procesos físicos utilizados actualmente en plantas de tratamiento.<sup>[CEPIS (1992)]</sup>

Los sólidos suspendidos en vías a sedimentar conforman un problema en el tratamiento de aguas, ya que pueden causar depósitos en las conexiones, tuberías, calderas, equipos, etc.

##### ♦ *Turbiedad*

La turbiedad es producida por coloides en suspensión y se manifiesta por la reducción de transparencia o brillantez del agua.<sup>[RIVAS (1963)]</sup> Esta característica

se debe a que los rayos luminosos son dispersados y absorbidos en lugar de transmitirse en línea recta.

Las partículas que producen la turbiedad son muy variadas y dependen básicamente de la procedencia de las aguas, como puede ser la erosión ejercida por los ríos, crecimiento de microorganismos, etc; por lo tanto, el grado de turbiedad va a estar dado por la concentración de partículas que se encuentren suspendidas, así como su diámetro, dispersión, textura, capacidad de absorción de la luz que contenga la suspensión, y de la longitud de onda de la luz incidente.

La turbiedad constituye el parámetro más usual de calidad del agua, por su facilidad de determinación, por razones estéticas y por constituir un parámetro indicativo del grado de contaminación. <sup>[CEPIS (1992)]</sup>

Se distinguen dos tipos de turbiedad en las aguas: la mineral y la orgánica. Cuando la mineral es baja la orgánica es alta, debido a que el libre paso de los rayos solares estimula el crecimiento de las algas. <sup>[RIVAS (1963)]</sup>

La unidad de turbiedad está dada por 1 mg. de  $\text{SiO}_2$ /L de agua. Este sílice debe llenar ciertos requisitos respecto a su tamaño. <sup>[ARBOLEDA (1969)]</sup>

Esta característica del agua puede ser eliminada por coagulación, decantación o filtración; sin embargo, cada proceso se verá afectado por el tamaño y densidad de las partículas suspendidas que la producen.

#### ♦ *Color*

El origen del color que presentan las aguas puede ser mineral, producido por compuestos inorgánicos de hierro o manganeso, o de origen vegetal, que está dado por materia orgánica descompuesta, en estado coloidal muy fina y en suspensión.

En el color deben distinguirse:

a) Color real o verdadero, que es el producido por las sustancias en solución solamente; y

b) Color aparente o total, que es el que incluye, además del color real, aquel producido por sustancias en suspensión. <sup>[RIVAS (1963)]</sup>

De igual manera que la turbiedad, no existe una correlación directa entre el color del agua y su grado de contaminación, pero sin duda alguna representa un parámetro visual muy importante para cualquier consumidor del líquido.

El color es expresado en *unidades de color*. Estas unidades se obtienen cuando se produce 1 mg. de platino, como cloroplatinato de potasio, en un litro de agua o 0,5 mg. de cobalto, como cloruro cobaltoso. <sup>[RIVAS (1963)]</sup>

El color puede ser removido por distintos procesos como sedimentación, filtración, carbón activado, supercloración, etc.

#### ◆ *Olor y sabor*

Básicamente, el olor y sabor característico de las aguas se debe a materias orgánicas en descomposición, gases disueltos, sales y compuestos inorgánicos, los cuales pueden tener distintas procedencias.

Obviamente, aguas con olores y sabores son rechazadas inmediatamente por el consumidor.

La dificultad de diferenciar entre el olor y el sabor del agua, por estar estos dos sentidos íntimamente ligados en el organismo humano y porque casi siempre las sustancias que causan estos problemas están combinadas, ha hecho que sea impráctico, para fines de análisis rutinarios, el separar estas dos características, siendo el olor lo que se determina comúnmente. <sup>[ARBOLEDA (1969)]</sup>

En aguas almacenadas, tal como son los embalses, el problema del olor puede empeorarse debido a que la materia orgánica sedimentable presente en el agua puede desplazarse al fondo y sufrir una descomposición anaeróbica.

La remoción de olores puede hacerse a través de la aireación, carbón activado, supercloración, aplicación de sales de cobre, etc.

#### ◆ *Temperatura*

Esta característica, no menos importante, puede tener un gran efecto sobre el agua, ya que los organismos aeróbicos que necesitan una cantidad de oxígeno se ven afectados por ésta. A mayor temperatura menor solubilidad de los gases y



mayor actividad biológica, lo que trae como consecuencia disminución del oxígeno y aumento del movimiento bacterial, con los consiguientes problemas de olores y sabores.

Por otro lado, el problema de la temperatura también se ve reflejado en el comportamiento y eficiencia de los procesos y operaciones unitarias utilizadas en el tratamiento.

#### **IV.1.2 Características Químicas**

Las características químicas se manifiestan en el agua debido a la presencia de materias orgánicas e inorgánicas, y gracias a éstas pueden sucederse reacciones o comportamientos con otros elementos que coexistan en ella. Entre las más importantes tenemos:

##### ♦ *pH*

La basicidad y acidez de un agua se expresa frecuentemente en términos de pH, el cual indica la intensidad de esa alcalinidad o acidez.<sup>[RIVAS (1963)]</sup>

El agua está compuesta, esencialmente, por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno; sin embargo, tiene la capacidad de disociarse en iones de hidrógeno ( $H^+$ ), que son los causantes de producir la acidez, y en ( $OH^-$ ), responsables de la basicidad.

Por definición, el pH es el logaritmo negativo de la concentración de iones  $H^+$ , es decir:<sup>[CEPIS (1992)]</sup>

$$pH = -\log (H^+)$$

El pH de un agua natural debe oscilar entre 6.5 – 8.0, sin embargo, debido a las impurezas que contiene ésta, el valor se escapa del “valor ideal”.

El pH juega un papel muy importante en el campo del tratamiento de agua, ya que tiene una gran influencia en procesos, tales como: coagulación, desinfección, corrosión, etc.

◆ *Cloruros y sulfatos*

Suelen provenir de la disolución de suelos o rocas que los contienen y le imparten al agua características indeseables, tales como sabores desagradables o ejercen la acción laxativa o purgante.

Los sulfatos son indeseables cuando se crean condiciones anaeróbicas, ya que fácilmente pueden pasar a sulfuros, especialmente sulfuros de hidrógeno ( $H_2S$ ), que es un gas de olor nauseabundo,<sup>[CEPIS (1992)]</sup> y además produce grandes problemas de corrosión en las tuberías.

Es posible determinar la cantidad de sulfatos contenida en un agua haciéndole una prueba analítica por el método de gravimetría y se pueden eliminar por intercambio iónico.

◆ *Alcalinidad*

Esencialmente, la alcalinidad en las aguas naturales se debe a la presencia de iones carbonato ( $CO_3^{=}$ ) y bicarbonato ( $HCO_3^-$ ). En algunos casos puede contener hidróxidos ( $OH^-$ ); sin embargo, existen otras sales como borato, fosfato, silicatos, etc, que aunque bien pueden estar presentes en el agua sólo se encuentran en cantidades reducidas y no se les da importancia.

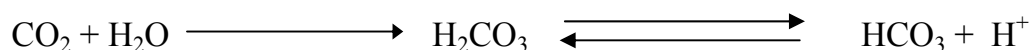
Esta característica es de una u otra forma función del pH y por regla general las aguas naturales superficiales contienen alcalinidad debido a la presencia de bicarbonatos y su pH está por debajo de 8.3.<sup>[CEPIS (1992)]</sup>

La alcalinidad es medida generalmente por medio de ciertas sustancias que se denominan indicadores, los cuales tienen la particularidad de hacer cambiar el color de la muestra que se está analizando de acuerdo a su acidez o alcalinidad y es expresada en ppm. de  $CaCO_3$ .

La alcalinidad no tiene gran importancia sanitaria a no ser por el sabor que se le confiere a las aguas debido a alcalinidades altas; sin embargo es objetable desde el punto de vista de ciertas industrias como puede observarse en la tabla 1.<sup>[ARBOLEDA (1969)]</sup>

♦ *Acidez*

Esta peculiaridad de la aguas naturales es generalmente debida a la presencia de CO<sub>2</sub>, producto final de la descomposición aerobia y anaerobia de la materia orgánica, la cual al combinarse con el agua produce el ión H<sup>+</sup> de la siguiente manera:



**Tabla 1.** *Valores límite recomendados para CaCO<sub>3</sub> como carbonatos y bicarbonatos en distintas industrias[ARBOLEDA (1969)]*

Industria y Proceso	Valor recomendado mg/L como CaCO <sub>3</sub>
Cerveza Blanca	75 - 80
Cerveza Negra	80 - 150
Bebidas Carbonatadas	30 - 125
Productos Alimenticios	30 - 250
Jugos de Frutas	100
Manufacturas de pulpa y papel	75 - 150
Rayón	50 - 75

Principalmente, el CO<sub>2</sub> no tiene ningún daño perjudicial en el organismo humano, de hecho, se consume en mayor proporción en las bebidas gaseosas; sin embargo, puede constituir un grave problema en el ámbito industrial, ya que le confieren al agua un alto poder corrosivo, además de interferir con el ablandamiento del agua cuando se emplea el método de cal y soda.

La acidez, al contrario de la alcalinidad, se determina por titulación con soluciones de hidróxido de sodio y se expresa en base al contenido de CO<sub>2</sub>.<sup>[RIVAS (1963)]</sup>

◆ *Dureza*

Esta particularidad es confinada al agua, debido a la presencia de cualquier catión polivalente ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ , etc.); sin embargo, se le atribuye casi siempre a los iones de calcio y magnesio ésta peculiaridad, ya que son los más abundantes en las aguas naturales debido a la disolución de rocas que contienen minerales cálcicos y magnésicos.

Cuando las aguas presentan ésta característica, impiden la creación de espuma por parte de los jabones, además de formarse un precipitado en las tuberías y accesorios, lo cual reduce su capacidad, daños a calderas, bebidas embotelladas, etc; sin embargo, no se ha demostrado alguna correlación entre aguas con alto contenido de dureza y daños al organismo.

La dureza se determina generalmente bajo la forma de *dureza total* que incluye a las sales de calcio y el magnesio, la *dureza cálcica* provocada por la presencia del ión calcio, la *dureza magnésica* que corresponde a la presencia del ión magnesio y las *durezas carbonáticas*, que se encuentran presentes bajo la forma de carbonatos y/o bicarbonatos y *durezas permanentes* o *no-carbonáticas* presentes bajo la forma de cloruros, sulfatos y nitratos. La dureza por conveniencia comparativa se expresa, en general, como carbonato de calcio. [RIVAS (1963)]

La dureza puede ser determinada, entre otros, por gravimetría.

◆ *Nitrógeno*

El nitrógeno representa un elemento básico en muchos procesos vitales, constituyendo uno de los llamados nutrientes.

En forma simplificada, se puede decir que al morir los organismos vivos y descomponerse las proteínas el nitrito ( $\text{NO}_2$ ), presente en ellas, se convierte en nitrógeno amoniacal y amoníaco, que a su vez se transforma por la actividad de las bacterias autotróficas en nitritos y luego en nitratos, los que son absorbidos de nuevo por las plantas y organismos vivos, completando el ciclo respectivo [ARBOLEDA (1969)] (ver fig. 1).

♦ *Fósforo*

El fósforo representa un elemento estimulante para el crecimiento de algas y otros microorganismos, ya que necesitan para su metabolismo biológico ortofosfatos como pueden ser:  $\text{PO}_4^{-3}$ ,  $\text{HPO}_4^{-2}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^{-1}$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ .

Por ésta razón, el fósforo presenta un gran problema, sobre todo en aguas de reposo, ya que ayuda al crecimiento de las algas.

Una manera de determinar la cantidad de fósforo presente en las aguas es agregándole a la muestra molibdato amónico, el cual forma un compuesto coloreado en presencia de fosfatos.

El fosfato puede reducirse a niveles muy bajos mediante tratamiento con alumbre, aluminato de sodio o cloruro férrico, formando fosfato de aluminio y fosfato de hierro insolubles. Puede precipitarse con cal, a un pH por encima de 10, produciendo residuos de menos de 2-3 mg/L en la forma de hidroxapatita; en un sistema de procesos en caliente los residuos serán de menos de 0,5mg/L. [NALCO (1999)]



**Figura 1.** *Ciclo del Nitrógeno*[ARBOLEDA (1969)]

♦ *Gases*

El agua puede contener ciertos gases disueltos en ella, los cuales pudieran provenir de la atmósfera o de los estratos geológicos. Entre estos gases se tiene el nitrógeno, oxígeno, metano, anhídrido sulfuroso y anhídrido carbónico.

Existen algunos gases que le pueden conferir al agua condiciones críticas, como es el caso del  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$ , los cuales en caso de estar presente alguno de ellos pueden ser condición determinante a la hora de evaluar su calidad.

En el caso del oxígeno ( $O_2$ ), éste se puede encontrar en el agua en distintas concentraciones, ya que depende de varios factores, tales como lo son la temperatura, materia orgánica oxidable o contacto con el aire. Cuando este elemento se encuentra presente en una alta concentración empieza a realizar una acción oxidante sobre tuberías metálicas y demás accesorios, sobre todo cuando coexiste con el  $CO_2$ , convirtiéndose de esta manera en un agente de corrosión.

El anhídrido carbónico ( $CO_2$ ) proviene de la materia orgánica en estado de descomposición como también de la atmósfera. Cuando el  $CO_2$  se combina con el agua forma  $H_2CO_3$ , el cual puede desdoblarse fácilmente, produciendo de inmediato el gas carbónico.<sup>[RIVAS (1963)]</sup> El  $CO_2$ , le puede conferir al agua propiedades solventes, haciendo de esta forma que carbonatos cálcicos se disuelvan en ella y se transformen en bicarbonatos solubles. Este inconveniente puede ser solucionado mediante la aireación o por adición de cal; siendo el primero de éstos el más comúnmente usado.

El anhídrido sulfuroso ( $H_2S$ ) puede estar presente debido a la reducción que sufren los sulfatos, las piritas o materia orgánica en descomposición que contiene azufre. Este es uno de los gases que más inconvenientes le trae al agua, ya que, aún en cantidades pequeñas, le suministra diversas características desagradables y perjudiciales al organismo, tal es el caso del fuerte olor que este produce, cuya magnitud dependerá del pH. Por otro lado también contribuye a la corrosión de las tuberías y accesorios metálicos. Otro gran problema que trae consigo es su venenosidad y cuando se le quiere eliminar del agua mediante

aireación se debe tener cuidado por las concentraciones que se van a emanar a la atmósfera.

#### **IV.1.3 Características Bacteriológicas**

En las aguas naturales se encuentran normalmente organismos vivos que mantienen una relación íntima con el medio que los rodea. Existe un profundo vínculo entre estos seres vivos y las características del medio, de tal manera que la concentración de la población varía sensiblemente con las características del agua.

Los organismos presentes en el agua pueden ser muy variados y depende de la procedencia de dichas aguas y de las condiciones del medio donde se cumple el ciclo hidrológico.

Las algas y protozoarios figuran, junto con las bacterias, entre los organismos mayormente presentes en las aguas naturales. <sup>[RIVAS (1963)]</sup>

En lo referente a purificación de aguas, el punto de vista bacteriológico juega un papel vital en relación a este tema, ya que la presencia de organismos, como es el caso de bacterias y protozoarios patógenos como virus, larvas, etc, podría desencadenar, además de malos olores, sabores y turbiedad, severas enfermedades de origen hídrico.

Por otro lado, existen también bacterias que no son patógenas y por el contrario, sirven para producir el proceso de autopurificación de la corriente y estabilización de la materia orgánica, representando un gran beneficio sanitario. Estos microorganismos son utilizados mayormente en plantas de aguas residuales.

Entre la infinidad de microorganismos, se le da una gran importancia al *Escherichia Coli* por ser el más común y, en consecuencia, representa un indicativo directo de la contaminación de las aguas.

Para determinar la presencia de estos organismos se recurre a un procedimiento que consiste en poner porciones del agua en tubos de ensayo que

contienen caldo lactosado y posteriormente son incubados a 37° C durante 48 horas. El colibacilo posee la propiedad de fermentar la lactosa, desprendiéndose en esta reacción CO<sub>2</sub>, hecho que indica que se ha producido la fermentación.<sup>[RIVAS (1963)]</sup>

Para expresar los resultados del ensayo anterior, se utiliza el método estadístico denominado *número más probable* (N.M.P), el cual se encuentra definido por la siguiente ecuación.<sup>[RIVAS (1963)]</sup>

$$N.M.P = \frac{\text{número de tubos}}{\sqrt{\text{número de ml. en tubos} \times \text{número de ml. de todos los tubos ensayados}}} \quad \text{Ec. 1}$$

Las aguas que poseen un N.M.P. inferior a 1, se pueden considerar satisfactoriamente potables.

#### **IV.1.4 Características Radiológicas**

Sin duda alguna, el agua no es radioactiva, pero pudiera contener elementos que le transfieran esta propiedad. Pueden entrar en el ciclo del agua desperdicios de plantas nucleares entre otros.

En casos muy singulares, las aguas de pozos pueden contener radionúclidos, elementos radioactivos comunes y sus isótopos, como contaminantes naturales.<sup>[NALCO (1998)]</sup>

Para determinar la presencia de algún elemento radioactivo se necesita un análisis de radiación alfa, producida por el radio (<sup>226</sup>Ra) y la radiación beta, producida por el estroncio (<sup>90</sup>Sr) las cuales se miden mediante contadores de centelleo.

Los radionúclidos más pesados son generalmente insolubles y pueden eliminarse por coagulación y filtración; los componentes solubles pueden eliminarse por intercambio iónico.<sup>[NALCO (1998)]</sup>



## *IV.2 PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS*

El objetivo básico del diseño de una planta de tratamiento de aguas es el de integrar de la manera más económica, los procesos y operaciones de tratamiento físico, químico o biológico. Esto para que, cuando sea operada adecuadamente, pueda proveer sin interrupción el caudal de diseño y satisfacer los requerimientos de calidad del agua para el consumo humano o para la utilización de esta en un determinado proceso. Por lo tanto, la planta de tratamiento debe tener máxima confiabilidad y flexibilidad con mínima operación y mantenimiento, y solamente poseer los controles e instrumentación indispensables.<sup>[ROMERO (1994)]</sup>

Las condiciones locales predominantes determinan la importancia de los factores previamente mencionados y su incidencia en cada diseño particular. En general, se recomienda tener en cuenta los siguientes aspectos:<sup>[ROMERO (1994)]</sup>

- ✦ No existe un problema típico de diseño de una planta de purificación. En la práctica los proyectos varían desde una pequeña adición a un sistema existente hasta el diseño de un sistema complejo.
- ✦ Aunque, en muchos casos, la planta de tratamiento juega el papel primordial en el mejoramiento de la calidad del agua, en el diseño deben considerarse también la fuente y el sistema de distribución, si se quiere lograr la producción económica de un agua de buena calidad.
- ✦ El Ingeniero diseñador debe familiarizarse con todas las normas, leyes y requerimientos oficiales aplicables al proyecto.
- ✦ El tipo de tratamiento depende de la calidad de la fuente de suministro y de la calidad deseada en el agua producida. Por lo tanto, una información adecuada sobre la fuente es indispensable en el diseño. Esto supone un análisis completo del agua cruda y cuando la fuente no es de características uniformes, se requiere el conocimiento de las variaciones

en sus características y una evaluación de los cambios posibles de calidad de la fuente, durante la vida útil de la planta.

- ✚ Cuando no existe información suficiente sobre la calidad de la fuente, además de un programa de muestras y análisis, debe recogerse información proveniente de plantas en operación de fuentes semejantes en el área.
- ✚ En fuentes superficiales la bocatoma o captación debe localizarse de tal forma que provea una adecuada protección contra cualquier fuente de polución. En embalses profundos, las captaciones con tomas múltiples, a varias profundidades, ofrecen flexibilidad en la selección del agua y en la calidad de la misma en diferentes condiciones. En fuentes subterráneas, la profundidad y la localización de los pozos son condicionadas por la adecuada protección de los mismos contra fuentes de polución y por la obtención de agua de calidad favorable.
- ✚ La capacidad nominal de diseño de una planta es generalmente mayor que la demanda máxima diaria proyectada al período del diseño.
- ✚ En el período de diseño, para la selección de los componentes de la planta, se debe tener en cuenta la vida útil de la estructura o equipo, facilidad de expansión, tasa de crecimiento del área de servicio, tasa de interés sobre los préstamos, cambios en el poder adquisitivo de la moneda durante el período de deuda y la operación de las estructuras y equipos durante los años iniciales. En general, se proveen desde el principio aquellas estructuras que no pueden construirse económicamente por etapas, ejemplo: edificios y estaciones de bombeo.
- ✚ Es necesario que la planta de tratamiento pueda operar continuamente con uno o más equipos fuera de servicio para mantenimiento. Esto supone un mínimo de dos unidades de tratamiento, por ejemplo: tanques de sedimentación, floculadores o filtros, dosificadores de coagulantes, cloradores; si existe bombeo debe haber una unidad de reserva. Solamente debe usarse la instrumentación esencial, y la utilización del

equipo automático debe restringirse para prevenir que una falla del mismo pueda dejar sin suministro de agua tratada requerida.

- ✦ En la localización de la planta se debe tener en cuenta lo siguiente: área futura de servicio, bajo costo del terreno, ubicación con respecto a la fuente de distribución, topografía, disponibilidad de energía eléctrica, facilidades de acceso, facilidad de disposición de residuos, actitud de la comunidad, defensa civil y protección contra atentados, belleza natural y paisajística.
- ✦ Las especificaciones de construcción deben garantizar una construcción económica, pero durable, teniendo en cuenta que las plantas de tratamiento son usadas por muchos más años que los señalados por su período de diseño.

Una planta de tratamiento de agua, en general, se puede diseñar para fines tales como la desinfección, la clarificación, para remover determinadas sustancias químicas o aumentar el contenido de otras, o una combinación de las alternativas anteriores.

Cuando un agua cumple todos los requisitos físicos-químicos pero no los bacteriológicos bastará con hacerle un proceso de desinfección antes de distribuirla, como es el caso de ciertas fuentes de montaña de baja turbiedad y escasa contaminación bacterial.<sup>[ARBOLEDA (1969)]</sup>

En otros casos es definitivamente turbia y contaminada. Por lo común, para clarificarla se procede primero a agregarles coagulantes, los cuales se mezclan en una cámara especial con paletas giratorias. Luego, el flujo pasa a un tanque de mezcla lenta, para darle oportunidad a las partículas que se aglutinen y se asienten en el sedimentador, de donde se toma el sobrenadante para pasarlo al filtro (generalmente de arena). Este último es lavado invirtiendo el flujo por medio del agua almacenada en un lugar adecuado. El efluente filtrado recibe una inyección de cloro (u otro desinfectante) y es almacenado para distribuirlo a la población o para su posterior uso. Para mejor control de las dosis de coagulantes

o desinfectantes, se suele poner aforadores de flujo tanto a la entrada como a la salida de la planta. [ARBOLEDA (1969)]

En otras circunstancias se necesita remover sustancias químicas tales como hierro o manganeso o la dureza extrema, o simplemente se quiere mantener el pH dentro de un determinado rango, o anular sustancias que causan olor. Para todos los casos, anteriormente expuestos, se necesita diseñar un tratamiento especial; sin embargo, lo más común en el tratamiento de aguas es que se requiera tanto clarificar como remover sustancias químicas, que no se encuentren dentro de los límites permitidos, y como consecuencia se utilice una combinación de procesos.

#### IV.3 DIFERENTES TIPOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO [RIVAS (1963)]

Las plantas de acondicionamiento de agua, para el uso doméstico e industrial, presentan una gran variedad de tipos en base a los tratamientos correctivos específicos que se le apliquen.

Dos grandes tipos son conocidos en base a la aplicación de tratamientos: *plantas convencionales* y *plantas especiales*, según que en ellas se utilicen unidades de tratamiento convencional, como son las unidades aisladas de coagulación y sedimentación, o el uso de unidades compactas en donde se puede aplicar simultáneamente esos procesos de mezcla, floculación y sedimentación. En este último caso, por ejemplo, los estanques sedimentadores funcionan con flujo vertical a través de lodos suspendidos estabilizados y contienen a la vez las cámaras de mezcla y floculación.

En base a los tratamientos correctivos propiamente dichos, pueden presentarse, en general, los siguientes casos:

1. Aguas relativamente claras, con bajo color y acusando contenidos minerales normales y estabilidad química. En estos casos podría ser suficiente la aplicación de una filtración en unidades lentas y un tratamiento de desinfección.

2. Aguas con turbiedad y color relativamente altos, con un contenido mineral normal y estabilidad química. En estos casos ya se requieren unidades de decantación precedidas por los procesos de mezcla y floculación necesarios para el acondicionamiento de los flóculos precipitantes, los cuales, se formaron una vez aplicados los agentes coagulantes y otros compuestos químicos complementarios. Naturalmente que dicho tratamiento deberá ser complementado con la filtración y la desinfección, a objeto de asegurar un efluente que llene los requisitos mínimos de potabilidad establecidos.

3. Aguas que, además de presentar turbiedad y color, presentan olores y sabores desagradables y contenidos minerales en exceso de los aceptados para aguas destinadas a los usos citados. En estos casos, adicionalmente a las unidades necesarias para la sedimentación con coagulación, la filtración y desinfección, se requiere la aplicación de procesos físicos o de adición de sustancias químicas que puedan reducir o eliminar los excesos acusados en su composición química. Este sería el caso de:

a) Aireación para remoción de olores y sabores, oxidación de sales ferrosas y manganosas o para la eliminación de gases indeseables tales como  $\text{CO}_2$  y el  $\text{H}_2\text{S}$ .

b) Procesos de ablandamiento para la reducción de la dureza provocada principalmente por los iones  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$ .

4. Aguas que por no estar químicamente balanceadas requieren de un tratamiento de *estabilización*.

5. Por último, aguas que pueden presentar problemas específicos en cuanto a cualquiera de sus propiedades físico-químicas o bacteriológicas y que constituyan realmente casos especiales. Tales son los casos de la presencia de fluoruros en exceso de los límites tolerables; de cloruros o sulfatos. En este último caso es conveniente estudiar primordialmente la utilización económica de

las aguas, ya que en la mayoría de los casos resultan tratamientos prohibitivos desde el punto de vista de los costos de aplicación.

#### *IV.4 DISEÑO DE EQUIPOS*

En esta sección serán expuestos los parámetros, ecuaciones y criterios de diseño necesarios de los equipos utilizados comúnmente en las plantas de tratamiento de aguas.

##### **IV.4.1 Desbaste**

Básicamente, el objetivo del desbaste es el de proteger a la instalación de la posible llegada de grandes objetos capaces de provocar obstrucciones en distintas unidades de la planta y de esta manera disminuir la eficacia de las mismas o en el peor de los casos el daño de una de estas.

Generalmente se utilizan rejas o barrotes dispuestos en forma vertical y con cierta separación entre ellos y de esto dependerá su eficacia. De esta manera se puede distinguir.<sup>[DEGRÉMONT (1973)]</sup>

- desbaste fino, con una separación de 3 a 10 mm,
- desbaste medio, con una separación de 10 a 25 mm,
- predesbaste, con una separación de 50 a 100 mm.

Las rejas que se utilizan en este proceso pueden ser de limpieza manual o de tipo mecánico, es decir, de limpieza automática (normalmente utilizadas en plantas de cierta magnitud). Sin embargo, la mecanización del desbaste no depende solamente de la importancia de la estación, también es posible adoptar este tipo de rejas si se quiere reducir las intervenciones manuales de limpieza. En todo caso, la mecanización es inevitable si existe el riesgo de una llegada brusca de materias vegetales con tendencia a formar un “fieltro” sobre la reja, que puede provocar un atascamiento total en poco tiempo.

Por otro lado, la velocidad de paso del agua a través de la reja debe ser suficiente como para que las materias en suspensión se apliquen sobre ella, sin

que esto provoque una pérdida de carga demasiado fuerte, ni produzca atascamiento.

Generalmente, se adopta una velocidad media de paso entre barrotes comprendida entre 0,60 y 1,00 m/s, pudiendo llegarse hasta un intervalo entre 1,20 y 1,40 m/s a caudal máximo. Si la velocidad mínima prevista puede provocar depósitos en el canal de la reja deberá preverse un barrido en este último, o cualquier otro medio para evitar su formación. [DEGRÉMONT (1973)]

Las rejas crean pérdidas de carga comprendidas entre 0,05 y 0,15 m en aguas potables. [DEGRÉMONT (1973)]

### **Parámetros de Diseño**

*Velocidad de flujo*

*Profundidad del canal*

*Número de barras*

*Factor de forma de las Barras*

*Ancho de las barras*

*Ángulo de inclinación*

### **Ecuaciones de Diseño** [SUNDSTROM (1979)]

*Cálculo del ancho del canal:*

$$W_C = \frac{Q}{v \cdot P_C}$$

Ec. 2

Donde:

W<sub>C</sub>: Ancho del canal (m)

Q: Caudal de diseño (m<sup>3</sup>/s)

v: Velocidad de flujo a través de las barras (m/s)

P<sub>C</sub>: Profundidad del canal (m)

*Cálculo del ancho del canal efectivo:*

$$W_{Ce} = W_C - N_B \cdot W_B$$

Ec. 3

Donde:

W<sub>ce</sub>: Ancho del canal efectivo (m)

N<sub>B</sub>: Número de espaciamientos (adim.)

W<sub>B</sub>: Ancho del espaciamiento (m)

*Cálculo del ancho del espaciamiento:*

$$W_E = \frac{W_{Ce}}{N_B + 1} \quad \text{Ec. 4}$$

*Cálculo del número de espaciamiento:*

$$N_E = N_B + 1 \quad \text{Ec. 5}$$

*Velocidad de flujo a través de las barras:*

$$\bar{V} = \frac{Q}{W_{Ce} \cdot P_C} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

V: Velocidad de flujo a través de las barras (m/s)

*Pérdida de energía a través de las barras:*

$$h_B = \beta \cdot \left( \frac{N_B \cdot W_B}{N_E \cdot W_E} \right)^{4/3} \cdot \frac{\bar{V}^2}{2 \cdot g} \cdot \text{Sen} \theta \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

$h_B$ : Pérdida de energía a través de las barras (m)

$\beta$ : Factor de forma de la barra (adim.) que se presentan en la tabla 2.

$\theta$ : Angulo de inclinación de las barras (grados)

$g$ : Aceleración de gravedad ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

**Tabla 2.** Factor de forma de las barras [SUNDSTROM (1979)]

Tipo de Barras	$\beta$
Rectangulares con el borde agudo	2.42
Rectangulares con una cara semicircular	1.83
Circular	1.79
Rectangular con dos caras semicirculares	1.67
Forma de Lágrima	0.76



*Velocidad de flujo a través de las barras con un 50 % de taponamiento:*

$$\bar{V}_{50} = \frac{Q}{0.5 \cdot W_{ce} \cdot P_C} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

$V_{50}$ : Velocidad de flujo a través de las barras con un 50% de taponamiento (m/s)

*Pérdida de energía a través de las barras con un 50% de taponamiento:*

$$h_B^{50} = \left( \frac{1}{0.7} \right) \cdot \frac{\bar{V}^2 - v^2}{2 \cdot g} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

$h_B^{50}$ : Pérdida de energía a través de las barras con un 50% de taponamiento (m)

*Cálculo de la cantidad de materia removida:*

$$Q_M = \left( 0.3713 \cdot \left( \frac{W_E}{100} \right)^4 - 6.203 \cdot \left( \frac{W_E}{100} \right)^3 + 38.928 \cdot \left( \frac{W_E}{100} \right)^2 - 113.18 \cdot \left( \frac{W_E}{100} \right) + 141.49 \right) \cdot \left( \frac{Q}{10^6} \right) \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

$Q_M$ : Cantidad de materia removida (m<sup>3</sup>/s)

### **Criterios de Diseño**<sup>[SUNDSTROM (1979)]</sup>

- ✓ El espaciamiento entre las barras no debe ser menor a 1 pulgada (2.54 cm) para las rejillas que son limpiadas manualmente y menor de 5/8 de pulgada (1.59 cm) para las rejillas de limpieza mecánica.
- ✓ Las rejillas de limpieza manual deben tener un ángulo de inclinación de 30 a 45 grados con respecto a la horizontal.
- ✓ La velocidad de flujo normal es de 1.25 ft/s (38 cm/s), para prevenir sedimentación; y la velocidad de flujo máximo es de 3 ft/s (91 cm/s), para prevenir el forzamiento del material a través de las aberturas.

- ✓ Este equipo debe estar provisto de 2 canales para facilitar la limpieza del mismo y de un canal de emergencia libre para el exceso de flujo.
- ✓ Se supone que las pérdidas de cabezal en la descarga son despreciables.
- ✓ En la tabla 3 se muestran algunos valores típicos para el diseño de rejillas

**Tabla 3.** *Parámetros de Diseño para el diseño de Rejillas [SUNDSTROM (1979)]*

Factores de Diseño	Limpieza					
	Manual			Mecánica		
Velocidad a través de la rejilla (m/s)	0.3	-	0.6	0.6	-	1.0
Ancho de las barras(mm)	4	-	8	8	-	10
Profundidad de las barras (mm)	25	-	50	50	-	75
Espaciamiento entre las barras (mm)	25	-	75	10	-	50
Inclinación con respecto a la horizontal	30	-	60	75	-	85
Máxima pérdida de carga (mm)	800			800		

#### IV.4.2 Desarenado

El desarenado tiene por objetivo extraer del agua bruta la grava, arena y partículas minerales más o menos finas, con el fin de evitar que se produzcan sedimentos en los canales y conducciones, para proteger las bombas y otros aparatos contra la abrasión y para evitar sobrecargas en las fases de tratamiento siguientes.<sup>[DEGRÉMONT (1973)]</sup>

Los desarenadores son colocados generalmente cercanos al sitio de la toma o captación; normalmente el tamaño de las partículas que están involucradas en este proceso son superiores a 200 micras. Partículas inferiores corresponden a los procesos de pre-decantación o decantación.

Esta unidad puede ser dividida en cuatro partes o zonas con fines descriptivos.<sup>[CEPIS (1992)]</sup>

##### a. Zona de entrada

Consiste en la transición que une al canal o tubería de llegada de la captación con la zona de desarenación. Con esta zona se quiere lograr una

distribución más uniforme de las líneas de flujo dentro de la unidad, uniformizando a su vez la velocidad.

**b. Zona de desarenación**

Esta parte principal de la unidad consiste en un canal en el cual se realiza el proceso de depósito de partículas.

**c. Zona de salida**

Se encuentra conformada por un vertedero de rebose, diseñado para mantener una velocidad que no altere el reposo de la arena sedimentada.

**d. Zona de depósito y eliminación de la arena sedimentada**

Está constituida por una tolva de cierta pendiente que guía a la arena sedimentada hacia un canal, que facilita su salida hacia la caja de desagüe a través de la compuerta de igual sección.

El estudio teórico del desarenado se encuentra relacionado con el de los fenómenos de sedimentación en caída libre, y en él intervienen las fórmulas de Stokes (en régimen laminar), de Newton (en régimen turbulento) y de Allen (aplicable a un régimen transitorio).<sup>[DEGRÉMONT (1973)]</sup>

**Parámetros de diseño**

*Velocidad de flujo*

*Velocidad de sedimentación*

*Profundidad del canal*

**Ecuaciones de Diseño**<sup>[CEPIS (1992)]</sup>

*Cálculo de la velocidad de sedimentación (fórmula de Allen para partículas de arena con tamaños comprendidos entre 0,01 y 0,1 cm):*

$$V_s = 0,22 \cdot \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot g \right)^{2/3} \cdot \left( \frac{d_s}{(\mu/\rho)^{1/3}} \right) \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

Vs: Velocidad de sedimentación (m/s)

ρs: Densidad de la partícula (Kg/m<sup>3</sup>)

### Fundamentos Basicos

$\rho$ : Densidad del agua ( $\text{Kg/m}^3$ )

$g$ : Aceleración de gravedad ( $\text{m/s}^2$ )

$d_s$ : Diámetro de las partículas (m)

$\mu$ : Viscosidad dinámica del agua ( $\text{Kg/m.s}$ )

*Cálculo de la velocidad de sedimentación (fórmula de Newton para partículas de arena con tamaños superiores a 1 cm):*

$$V_s = 1,82 \cdot \sqrt{d_s \cdot g \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho}} \quad \text{Ec. 12}$$

*Cálculo de la velocidad de sedimentación (fórmula de Stokes para partículas de arena menor a 0,01 cm):*

$$V_s = \frac{1}{18} \cdot g \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\mu} \cdot d_s^2 \quad \text{Ec. 13}$$

*Número de Reynolds:*

$$\text{Re} = \frac{V_s \cdot d_s}{\mu} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

Re: Reynolds (adim.)

*Velocidad límite de arrastre de la partícula:*

$$V_a = 161 \cdot \sqrt{d_s} \quad \text{Ec. 15}$$

Donde:

Va: Velocidad de arrastre (m/s)

*Velocidad horizontal de la unidad:*

$$V_H = 0,5 \cdot V_a \quad \text{Ec. 16}$$

Donde:

VH: Velocidad horizontal (m/s)

*Sección transversal de la unidad:*

$$AT = \frac{Q}{VH}$$

Ec. 17

Donde:

AT: Sección Transversal (m<sup>2</sup>)

Q: Caudal de diseño (m<sup>3</sup>/s)

*Profundidad de la zona de decantación:*

$$H = \sqrt{\frac{AT}{2}}$$

Ec. 18

Donde:

H: Profundidad de la zona de decantación (m)

*Ancho de la zona de decantación:*

$$B = 2 \cdot H$$

Ec. 19

Donde:

B: Ancho de la zona de decantación (m)

*Área superficial de la zona de decantación:*

$$As = \frac{VH \cdot AT}{Vs}$$

Ec. 20

Donde:

As: Área superficial de la zona de decantación (m<sup>2</sup>)

*Longitud de la zona de decantación:*

$$L = \frac{As}{B}$$

Ec. 21

Donde:

L: Longitud de la zona de decantación (m)

*Longitud final de la zona de decantación:*

$$L_F = 1,25 \cdot L$$

Ec. 22

Donde:

$L_F$ : Longitud final de la zona de decantación (m)

*Longitud de la transición de la estructura de ingreso:*

$$L_i = \frac{B - b}{2 \cdot \operatorname{tg} \theta}$$

Ec. 23

Donde:

$L_i$ : Longitud de la transición de la estructura de ingreso

$\theta$  : Ángulo que forma la transición (recomendado  $\theta = 12,5$ )

*Altura del agua en el vertedero de salida:*

$$H_2 = \left( \frac{Q}{1,84 \cdot B} \right)^{2/3}$$

Ec. 24

Donde:

$H_2$ : Altura del agua en el vertedero de salida (m).

*Velocidad de paso en el vertedero de salida:*

$$V_p = mx \cdot \sqrt{H_2}$$

Ec. 25

Donde:

$V_p$ : Velocidad de paso en el vertedero de salida (m/s)

$mx$ : Coeficiente situado entre 1,8 – 2,0 (adim.)

*Longitud total de la unidad:*

$$L_T = L_i + L_F + b$$

Ec. 26

Donde:

$L_T$ : Longitud total de la unidad (m)

$b$ : Ancho del canal de salida (recomendado  $b = 0,20$ ) (m)

*Pendiente del fondo de la zona de decantación:*

$$hi = 0,05 \cdot (L_F - 0,30) \quad \text{Ec. 27}$$

Donde:

hi: Pendiente del fondo de la zona de decantación (m)

*Profundidad en el extremo de la zona de decantación:*

$$Hi = hi + H \quad \text{Ec. 28}$$

Donde:

Hi: Profundidad en el extremo de la zona de decantación (m)

*Cálculo de la cantidad de material removido:*

$$Q_M = 0.03 \cdot \frac{Q}{10^3} \quad \text{Ec. 29}$$

Donde:

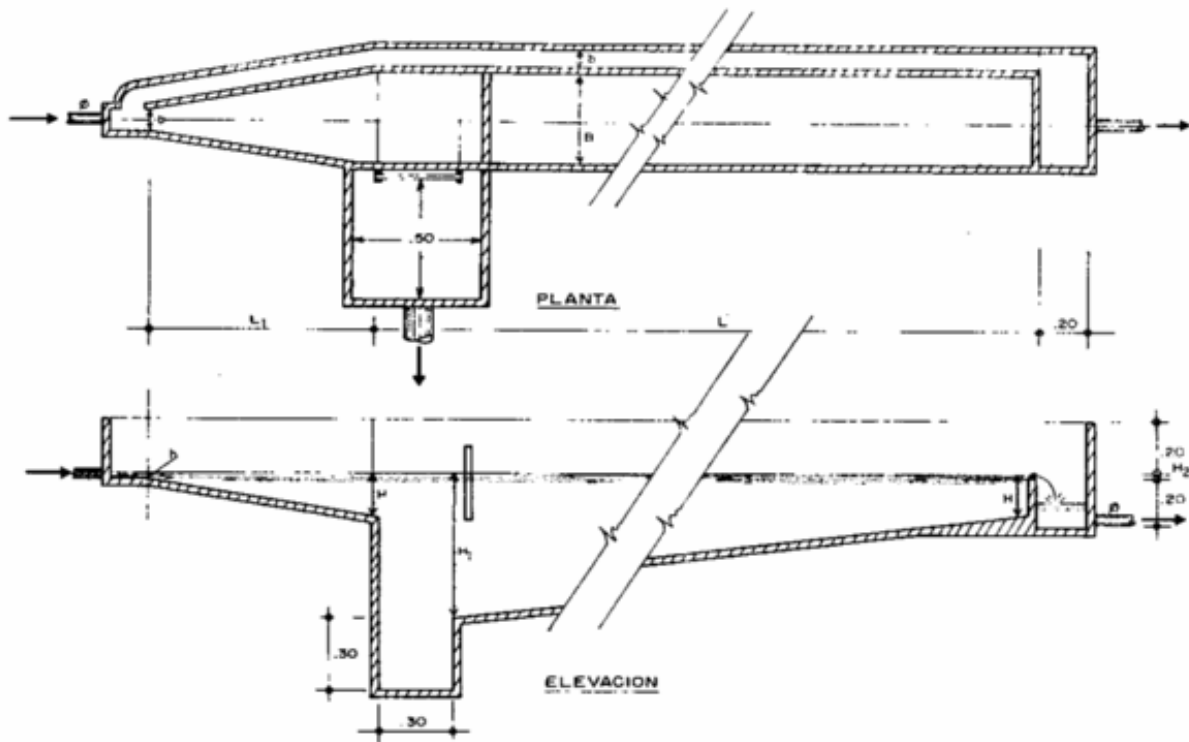
QM: Cantidad de material removido (m<sup>3</sup>/s)

### **Criterios de Diseño**<sup>[CEPIS (1992)]</sup>

- ✓ Se recomienda que la unión del canal o tubería de llegada al desarenado se efectúe mediante una transición, para asegurar la uniformidad de la velocidad en la sección transversal de la unidad, la cual influye enormemente en la eficiencia del proceso.
- ✓ Esta transición debe tener un ángulo de divergencia suave, no mayor de 12° 30' y, de ser posible, sus paredes deben hacerse curvas siguiendo el flujo del agua.
- ✓ La llegada del flujo del agua a la transición no debe proyectarse en curva porque la corriente tiende a desviarse hacia uno de los lados de la cámara produciéndose velocidades altas en estos puntos que disminuyen la eficiencia de la unidad.

- ✓ La velocidad de paso por el vertedero de salida debe ser muy pequeña para causar menor turbulencia y arrastre de material. Como máximo se puede admitir  $V = 1\text{m/s}$ .
- ✓ Se aconseja considerar un canal de by-pass para desviar el flujo mientras se efectúa el mantenimiento del desarenado.

A continuación, se presenta en la figura 2 la vista de planta de un desarenador:



**Figura 2.** Vista de planta y elevación de un desarenador [CEPIS (1992)]



#### **IV.4.3 Aireación**

La aireación es el tratamiento mediante el cual el agua es puesta en contacto íntimo con el aire con el fin de modificar las concentraciones de las sustancias volátiles contenidas en ella.

De esta forma, las funciones más importantes de la aireación son: <sup>[ROMERO (1994)]</sup>

- Transferir oxígeno al agua para aumentar la OD.
- Disminuir la concentración de CO<sub>2</sub>.
- Remover gases como metano, cloro y amoníaco.
- Oxidar hierro y manganeso.
- Remover compuestos orgánicos volátiles.
- Remover sustancias volátiles productoras de olores y sabores.

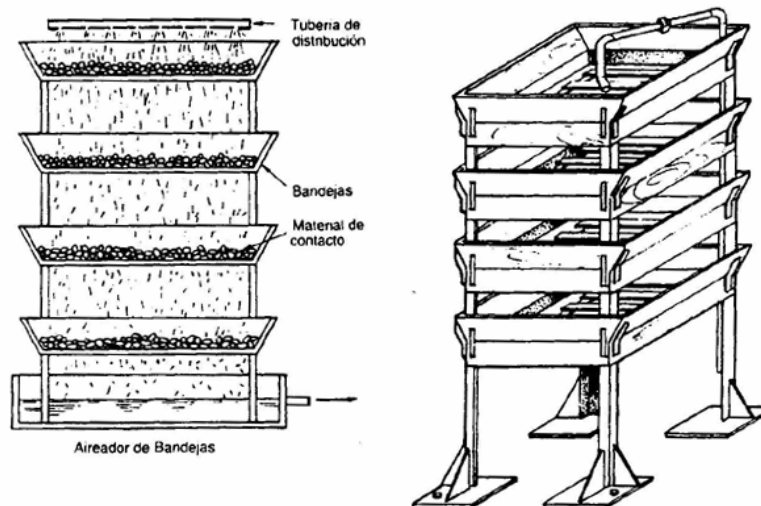
La aireación cumple su objetivo mediante el arrastre o barrido de las sustancias volátiles causado por la mezcla turbulenta del agua con el aire y por el proceso de oxidación de los metales y los gases.

El agua aireada es más agradable al paladar; la aireación reduce el nivel de CO<sub>2</sub> hasta unos 4,5 mg/L, pero la corrosión sólo se previene si la alcalinidad del agua excede de 100 mg/L. <sup>[ROMERO (1994)]</sup>

En el tratamiento de agua dulce, los aireadores comúnmente más utilizados son los de toberas, cascadas, canales inclinados y aireadores de bandejas. Este último es uno de los tipos de aireadores que se han venido utilizando desde la antigüedad, y que hoy en nuestros días sigue teniendo muy buena aceptación en el tratamiento de aguas, por su costo, efectividad y fácil mantenimiento. Estos tipos de aireadores consisten en una serie de bandejas equipadas con ranuras, fondos perforados o mallas de alambre, sobre las cuales se distribuye el agua y se deja caer a un tanque receptor en la base. En la figura 3 se puede observar este tipo de aireadores.

La ventilación es un factor importante en el diseño de estos aireadores y debe estudiarse cuidadosamente para la selección del sitio de la localización. La

corrosión, la formación de camas biológicas y crecimientos de algas son factores de importancia en el diseño de aireadores; por ello, se construyen con materiales durables como acero inoxidable, aluminio, concreto o maderas resistentes.<sup>[ROMERO, 1994]</sup>



**Figura 3.** *Aireador típico de múltiples bandejas*[ROMERO, 1994]

Por todas las ventajas que tiene el aireador de bandejas múltiples y por su amplio uso hasta hoy en día, fue el que se consideró para el presente trabajo.

### **Parámetros de Diseño**

Para un aireador de bandejas múltiples:

*Número de bandejas*

### **Ecuaciones de Diseño**<sup>[ROMERO, 1994]</sup>

*Cálculo de la remoción de CO<sub>2</sub> en aireadores de bandejas múltiples:*

$$C_n = C_o \cdot 10^{-k \cdot n}$$

Ec. 30

Donde:

Cn: Cantidad de CO<sub>2</sub> final (mg/L)

Co: Cantidad de CO<sub>2</sub> inicial (mg/L)

k: Constante (adim.)

n: Número de bandejas (adim.)

La constante  $k$ , depende de la ventilación, temperatura, turbulencia y características de la instalación y varía entre 0,12 y 0,16.

### **Criterios de Diseño**<sup>[ROMERO, 1994]</sup>

*Para un aireador de bandejas múltiples:*

- ✓ Generalmente se usan de 3 a 9 bandejas, comúnmente 3 a 5.
- ✓ El espaciamiento entre bandejas es de 30 a 75 cms.
- ✓ El área requerida para las bandejas varía entre 0.05 a 0.15 m<sup>2</sup> por L/s de agua tratada.
- ✓ La altura del aireador de bandejas suele ser de 2 a 3 m.

#### **IV.4.4 Mezcla rápida**

La mezcla rápida es una operación cuyo objetivo básico es el de dispersar y homogeneizar rápidamente, a través de toda la masa de agua, las diferentes sustancias químicas que han sido agregadas como coagulantes. Este proceso puede efectuarse mediante turbulencia, provocada por medios hidráulicos o mecánicos.

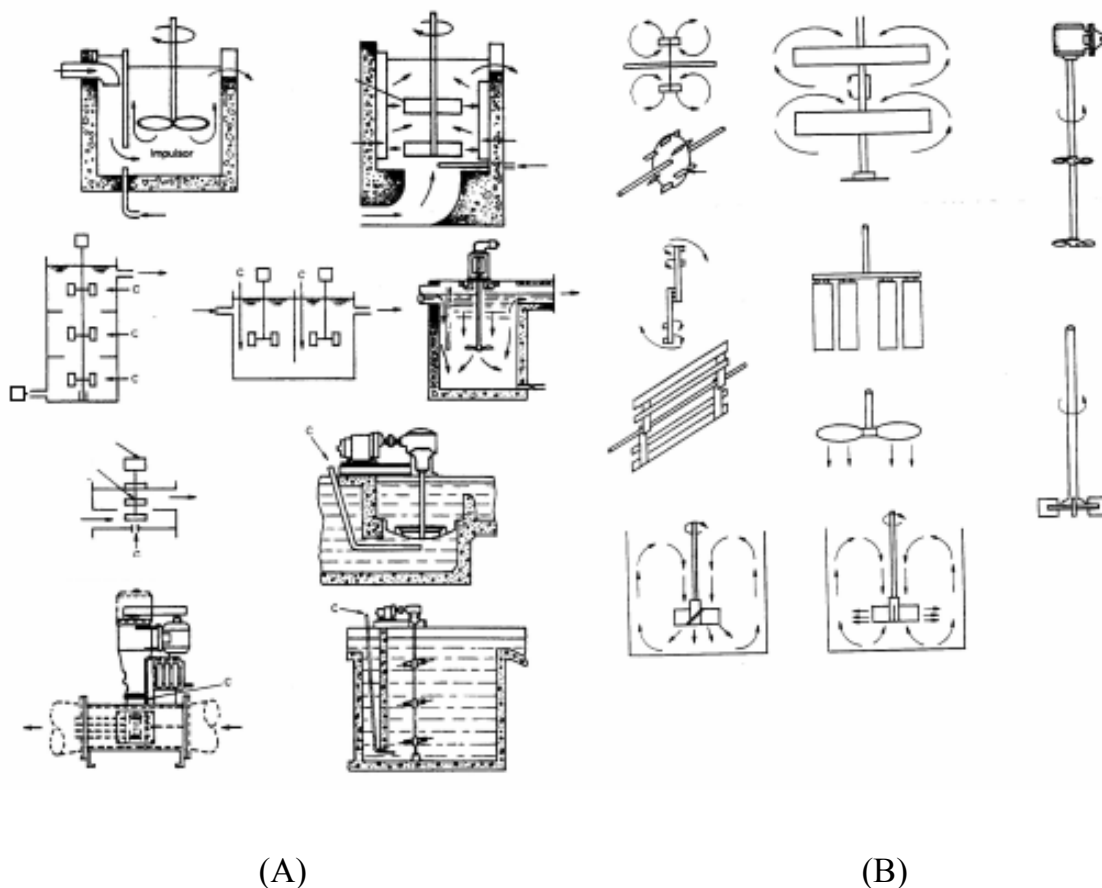
En el caso de los mezcladores hidráulicos la mezcla se realiza como resultado de la turbulencia que existe en el régimen de flujo. Este tipo de mezcladores se utiliza cuando se dispone de suficiente energía en el flujo de entrada. En general se hace uso de resaltos hidráulicos, canaletas Parshall, tubos Vénturi, dispersores de tubos perforados y tanques con baffles, para disipar energía en turbulencia y aprovecharla para la mezcla del coagulante.<sup>[ROMERO (1994)]</sup>

La ventaja del mezclador hidráulico es la de no requerir de algún equipo

mecánico para provocar la turbulencia necesaria, por lo que es recomendable su uso en plantas donde la operación y mantenimiento para los equipos es mínimo.

Por otro lado, los mezcladores mecánicos producen la mezcla a través de impulsores rotatorios del tipo de hélice o turbina. Los de tipo hélice, generan corrientes axiales fuertes que crean una gran intensidad de mezcla y se han usado para mezclas de alta velocidad con rotaciones de hasta 2000 rpm. Los impulsores de paletas son más usados en la floculación, debido a que trabajan con velocidades mucho más bajas que van desde 2 hasta 150 rpm, ya que el área expuesta al agua es mucho mayor en estos casos.

En la figura 4 se pueden apreciar los distintos tipos de mezcladores mecánicos y tipos de aletas mayormente utilizadas en el proceso de mezcla rápida. El término turbina se aplica, indistintamente, a una gran variedad de



**Figura 4.** Mezcladores mecánicos (A) y tipos de paletas utilizadas (B) [ROMERO (1994)]

formas de impulsores; generalmente consisten en varias aletas rectas o curvas montadas verticalmente sobre una placa plana.

En el presente trabajo se consideró al mezclador hidráulico en vertederos rectangulares por su simplicidad y economía además de poseer una buena efectividad al momento de realizar la mezcla rápida. De igual manera también fue considerado los mezcladores mecánicos como alternativa de mezcla rápida para cualquier tipo de planta de tratamiento de aguas.

### **Parámetros de Diseño**

*Tiempo de retención*

### **Ecuaciones de Diseño** [ROMERO (1994)]

– ***Para mezcladores hidráulicos en vertederos rectangulares:***

*Cálculo del caudal por unidad de ancho de vertedero:*

$$q = Q / B \quad \text{Ec. 31}$$

Q: Caudal (m<sup>3</sup>/s)

B: Ancho del vertedero (m)

*Cálculo de la profundidad crítica de flujo:*

$$hc = (q^2 / g)^{1/3} \quad \text{Ec. 32}$$

Donde:

hc: Profundidad crítica de flujo (m)

*Cálculo de la longitud del salto:*

$$Lm = 4.3 \cdot P^{0.1} \cdot hc^{0.9} \quad \text{Ec. 33}$$

Donde:

Lm: Longitud del salto (m)

P: Altura de la pared del verterdero (m)

*Cálculo de la altura del agua después del salto:*

$$h1 = \frac{\sqrt{2}}{1.06 + \sqrt{\frac{P}{hc} + 1.5}} \cdot hc$$

Ec. 34

Donde:

h1: Altura del agua después del salto (m)

*Cálculo de la velocidad del agua en el salto:*

$$V1 = q / h1$$

Ec. 35

Donde:

V1: Velocidad del agua en el salto (m/s)

*Cálculo del número de Froude:*

$$F = \frac{V1}{\sqrt{g \cdot h1}}$$

Ec. 36

Donde:

F: Número de Froude (adim.)

*Cálculo de la altura del agua después del resalto:*

$$h2 = \frac{1}{2} \cdot \left[ \left( 1 + 8 \cdot F^2 \right)^{1/2} - 1 \right] \cdot h1$$

Ec. 37

Donde:

h2: Altura del agua después del resalto(m)

*Cálculo de la velocidad del agua en el resalto:*

$$V2 = q / h2$$

Ec. 38

Donde:

V2: Velocidad del agua en el resalto (m/s)

*Valor de la pérdida de energía en el resalto:*

$$H_f = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4 \cdot h_1 \cdot h_2} \quad \text{Ec. 39}$$

Donde:

$H_f$ : Pérdida de energía en el resalto (m)

*Cálculo de la longitud del resalto (para resalto estable):*

$$L_j = 6 \cdot (h_2 - h_1) \quad \text{Ec. 40}$$

Donde:

$L_j$ : Longitud del resalto (m)

*Cálculo de la velocidad media en el resalto:*

$$V_m = \frac{(V_1 + V_2)}{2} \quad \text{Ec. 41}$$

Donde:

$V_m$ : Velocidad media en el resalto (m/s)

*Cálculo del tiempo de mezcla:*

$$T = L_j / V_m \quad \text{Ec. 42}$$

Donde:

$T$ : Tiempo de mezcla o retención (seg)

*Cálculo del gradiente de velocidad:*

$$G = \sqrt{\frac{g \cdot H_f}{\nu \cdot T}} = \sqrt{\frac{\rho \cdot g \cdot H_f}{\mu \cdot T}} = \sqrt{\frac{\gamma \cdot H_f}{\mu \cdot T}} \quad \text{Ec. 43}$$

Donde:

$G$ : Gradiente de velocidad (1/s)

$H_f$ : Pérdida de energía por fricción (m)

$T$ : Tiempo de retención (s)

$\mu$ : Viscosidad dinámica del agua (Kg/m.s)

$\rho$ : densidad del agua (Kg/m<sup>3</sup>)

- ***Para mezcladores mecánicos:***

*Cálculo del gradiente de velocidad:*

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}} \quad \text{Ec. 44}$$

Donde:

P: Potencia requerida para establecer condiciones de turbulencia (Watt)

V: Volumen del tanque de mezcla rápida (m<sup>3</sup>)

*Cálculo para la potencia requerida para establecer condiciones de turbulencia:*

$$P = K \cdot \rho \cdot N^3 \cdot d_M^5 \quad \text{Ec. 45}$$

Donde:

$d_M$ : Diámetro del impulsor (m)

N: Velocidad del impulsor (1/s)

K: Constante dependiente del tipo de impulsor (adim.)

El valor de la constante  $K$  depende del tipo, forma y tamaño del impulsor, del número de baffles y demás variables no incluidas en la ecuación de potencia; se debe determinar experimentalmente. En la tabla 4 se incluye los valores de  $K$ , en régimen turbulento, para diferentes tipos de impulsores, con eje de rotación en el centro de tanques cilíndricos de fondo plano, profundidad del líquido igual al diámetro del tanque, elevación del impulsor sobre el fondo del tanque igual al diámetro del impulsor; tanque con 4 baffles sobre sus paredes, cada uno de ancho igual a 1/10 del diámetro del tanque y diámetro del impulsor igual a 1/3 del diámetro del tanque. [ROMERO (1994)]



**Tabla 4.** *Valores de la constante K [ROMERO (1994)]*

IMPULSOR	K
Hélice, pitch cuadrado, 3 aletas	0,32
Hélice pitch = 2,3 aletas	1,00
Turbina, 6 aletas planas	6,30
Turbina, 6 aletas curvas	4,80
Turbina ventilador, 6 aletas	1,65
Turbina 6 aletas punta de flecha	4,00
Turbina paletas planas, 2 paletas	1,70
Turbina de impulsor encerrado, 6 aletas curvas	1,08
Turbina de impulsor encerrado con estator (sin baffles)	1,12

**Criterios de Diseño** [ROMERO (1994)]

✓ Para mezcladores mecánicos se recomienda los siguientes tiempos de contacto y velocidad reportados en la tabla 5:

**Tabla 5.** *Tiempo de contacto recomendado para mezcladores mecánicos [ROMERO (1994)]*

TIEMPO DE CONTACTO, s	G, s <sup>-1</sup>
20	1000
30	900
40	790
>40	700

- ✓ Longitud de las paletas = 1/3 del ancho o diámetro del tanque.
- ✓ El mezclador debe tener desagües de limpieza.
- ✓ Para mezcladores hidráulicos son más aconsejables gradientes de velocidad entre 1000 y 2000 s<sup>-1</sup>.

#### **IV.4.5 Floculación**

Se define floculación como la aglomeración de pequeñas partículas o coloides con el fin de formar partículas sedimentables (*flocs*). La floculación comienza inmediatamente después de la desestabilización, en la zona en que la energía de mezclado decae, previo a un mezclado, o como resultado de una turbulencia creada en el fluido y por la cual las partículas ya desestabilizadas chocan unas con otras para formar coágulos mayores. De esta forma se tiene que la energía que produce la agitación en el agua puede ser de origen hidráulico o mecánico.

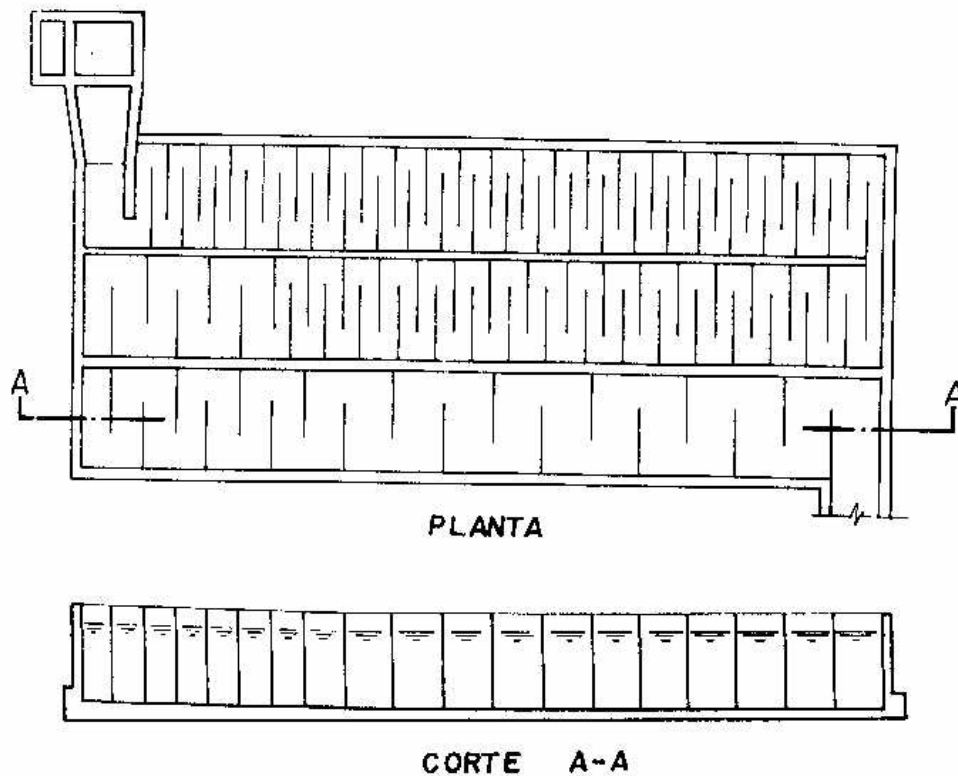
##### ***Floculación hidráulica y mecánica.***

La mezcla lenta con agitadores mecánicos (floculación mecánica) se utiliza universalmente y en general consiste en paletas, hélices u otros elementos similares acoplados en un eje de rotación que es impulsado por una fuerza motriz cualquiera, la cual según el sentido del movimiento, se clasifican en reciprocantes y rotatorios.

Por otro lado, la agitación hidráulica (floculación hidráulica) se puede lograr mediante la implementación de cámaras o canales con tabiques que provoquen la turbulencia. También existen los denominados estanques de flujo tangencial o espiral, en donde la formación de remolinos, resaltos, etc., aseguran la mezcla íntima de las sustancias químicas agregadas al agua sometida al proceso de tratamiento.<sup>[RIVAS (1963)]</sup>

Los tipos más frecuentemente usados en la floculación hidráulica son los estanques o cámaras de circulación horizontal (figura 5) o vertical.

Estos últimos mezcladores, requieren de períodos de retención mayores, ya que en ellos es necesario promover el crecimiento y densificación de los flóculos y por consiguiente la velocidad media del flujo debe ser menor que la correspondiente de mezcla rápida, para así evitar la rotura de los flóculos y para que no permita la decantación de los núcleos coagulados.



**Figura 5.** *Floculador de pantallas de flujo horizontal*[CEPIS (1992)].

Por otro lado, se tiene que las pérdidas de carga a través de las unidades de floculación hidráulica son apreciables en comparación con las correspondientes de los floculadores mecánicos.

En el presente trabajo fueron incluidos los floculadores de pantalla tanto de flujo horizontal como de flujo vertical. Estos dos tipos de equipos son los más comúnmente utilizados por su gran efectividad al momento de producir los flóculos necesarios para su posterior sedimentación en el equipo correspondiente a este proceso.

### **Parámetros de Diseño**

*Tiempo de retención*

*Velocidad del fluido*

*Gradiente de velocidad*

**Ecuaciones de Diseño**<sup>[CEPIS (1992)]</sup>

- ***Floculador hidráulico de flujo horizontal***

*Longitud de canales del primer tramo:*

$$L_1 = V_1 \cdot t_1 \cdot 60 \quad \text{Ec. 46}$$

Donde:

$L_1$ : Longitud de canales del primer tramo (m)

$V_1$ : Velocidad del fluido del primer tramo (m/s)

$t_1$ : tiempo de retención del primer tramo (s)

*Sección de canales del primer tramo:*

$$A_1 = \frac{Q}{V_1} \quad \text{Ec. 47}$$

Donde:

$A_1$ : Sección de canales del primer tramo (m<sup>2</sup>)

$Q$ : Caudal de diseño (m<sup>3</sup>/s)

*Ancho de los canales del primer tramo:*

$$a_1 = \frac{A_1}{H_1} \quad \text{Ec. 48}$$

Donde:

$a_1$ : Ancho de los canales del primer tramo (m)

$H_1$ : Altura del agua en la unidad (generalmente  $H_1 = 1,1$ ) (m)

*Ancho de vueltas del tramo 1:*

$$d_1 = 1,5 \cdot a_1 \quad \text{Ec. 49}$$

Donde:

$d_1$ : Ancho de vueltas del tramo 1 (m)

*Ancho del floculador:*

$$B_F = 3 \cdot b + d_1 \quad \text{Ec. 50}$$

Donde:

$B_F$ : Ancho del floculador (m)

B: Ancho útil de la lámina (para acero al carbón  $b = 0,825$ ) (m)

*Cálculo del número de canales en el tramo 1:*

$$N_1 = \frac{L_1}{B_F}$$

Ec. 51

Donde:

$N_1$ : Número de canales en el tramo 1 (adim.)

*Longitud del primer tramo:*

$$L_1 = N_1 \cdot (a_1 + e)$$

Ec. 52

Donde:

e: Espesor de láminas (para acero al carbón  $e = 0,006$ ) (m)

*Cálculo de las pérdidas de carga en las vueltas del primer tramo:*

$$h_1 = \frac{K \cdot V_1^2 \cdot (N_1 - 1)}{2 \cdot g}$$

Ec. 53

Donde:

$h_1$ : Pérdidas de carga en las vueltas del primer tramo (m)

K: Coeficiente de pérdida de carga en las vueltas (generalmente  $K = 3$ ) (adim.)

*Perímetro mojado de las secciones del tramo 1:*

$$P_1 = 2 \cdot H_1 + a_1$$

Ec. 54

Donde:

$P_1$ : Perímetro mojado de las secciones del tramo 1 (m)

*Radio hidráulico de canales del tramo 1:*

$$r_1 = \frac{A_1}{P_1}$$

Ec. 55

Donde:

$r_1$ : Radio hidráulico de canales del tramo 1 (m)

*Pérdida de carga en los canales del tramo 1:*

$$h_2 = \left( \frac{n \cdot V_1}{r_1^{2/3}} \right)^2 \cdot L_1$$

Ec. 56

Donde:

$h_2$ : Pérdida de carga en los canales del tramo 1 (m)

$n$ : Coeficiente de la fórmula de Manning (adim.)

*Pérdida de carga total en el primer tramo:*

$$hf_1 = h_1 + h_2$$

Ec. 57

Donde:

$hf_1$ : Pérdida de carga total en el primer tramo (m)

*Gradiente de velocidad en el tramo 1:*

$$G_1 = \sqrt{\frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{hf_1}{t_1}}$$

Ec. 58

Donde:

$G_1$ : Gradiente de velocidad en el tramo 1 (1/s)

para una temperatura  $T = 20^\circ \text{C}$ ,  $\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} = 3115$

**- Floculador hidráulico de flujo vertical**

*Volumen total de la unidad:*

$$V_T = 60 \cdot Q \cdot tf$$

Ec. 59

Donde:

$V_T$ : Volumen total de la unidad ( $m^3$ )

*Ancho total de la unidad:*

$$B_{fv} = \frac{V_T}{L_1 \cdot H_1}$$

Ec. 60

Donde:

$B_{fv}$ : Ancho total de la unidad (m)

$L_1$ : Longitud de canales del primer tramo (m)

$H_1$ : la altura del agua en la unidad (m)

*Tiempo de retención del primer canal:*

$$t = \frac{H_1 \cdot b_1 \cdot L_1}{Q \cdot 60}$$

Ec. 61

Donde:

$b_1$  : Ancho del primer canal (m)

*Número de compartimientos entre pantallas:*

$$m = (0,045)^3 \cdot \sqrt{\left(\frac{b_1 \cdot L_1 \cdot G}{Q}\right)^2 \cdot t}$$

Ec. 62

Donde:

$m$ : Número de compartimientos entre pantallas (adim.)

$G$ : Gradiente de velocidad (1/s)

*Espaciamiento entre pantallas:*

$$a = \frac{L_1 - e \cdot (m - 1)}{m}$$

Ec. 63

Donde:

$a$ : Espaciamiento entre pantallas (m)

$e$ : Espesor de las pantallas. (m)

*Velocidad en los canales:*

$$V_c = \frac{Q}{a \cdot b_1}$$

Ec. 64

Donde:

$V_c$ : Velocidad en los canales (m/s)

*Velocidad en los pasajes:*

$$V_p = \frac{2}{3} \cdot V_c$$

Ec. 65

Donde:

$V_p$ : Velocidad en los pasajes (m/s)

*Extensión total del primer canal:*

$$L_T = 60 \cdot V_c \cdot t$$

Ec. 66

Donde:

$L_T$ : Extensión total del primer canal (m)

*Radio hidráulico del compartimiento entre pantallas:*

$$R_H = \frac{a \cdot b_1}{2 \cdot (a + b_1)}$$

Ec. 67

Donde:

$R_H$ : Radio hidráulico del compartimiento entre pantallas (m)

*Pérdida de carga continua en los canales:*

$$h_c = \left( \frac{n \cdot V_c}{R_H^{2/3}} \right)^2 \cdot L_T$$

Ec. 68

Donde:

$h_c$ : Pérdida de carga continua en los canales (m)

$n$ : Coeficiente de la fórmula de Manning ( $n = 0,013$ ) (adim.)



*Pérdida de carga en las vueltas:*

$$h_v = \frac{(m+1) \cdot V_c^2 + m \cdot V_p^2}{2 \cdot g} \quad \text{Ec. 69}$$

Donde:

$h_v$ : Pérdida de carga en las vueltas (m)

*Pérdida de carga total en el primer tramo:*

$$hf_T = h_c + h_v \quad \text{Ec. 70}$$

Donde:

$hf_T$ : Pérdida de carga total en el primer tramo (m)

*Volumen del tramo:*

$$V_{Tr} = H_1 \cdot b_1 \cdot L_T - e \cdot (m-1) \quad \text{Ec. 71}$$

Donde:

$V_{Tr}$ : Volumen del tramo ( $m^3$ )

*Comprobación del gradiente de velocidad total en el primer canal:*

$$G_{c1} = \sqrt{\frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{Q \cdot hf_T}{V_{Tr}}} \quad \text{Ec. 72}$$

Donde:

$G_{c1}$ : Gradiente de velocidad total en el primer canal (1/s)

*Comprobación del gradiente de velocidad en el canal vertical:*

$$G_2 = n \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} \cdot R_H^{-0,7} \cdot V_{Tr}^{1,5} \quad \text{Ec. 73}$$

Donde:

$G_2$ : Gradiente de velocidad en el canal vertical (1/s)

### **Criterios de Diseño**<sup>[CEPIS (1992)]</sup>

- ✓ Los gradientes de velocidad que optimizan el proceso normalmente varían entre 70 y 20 s<sup>-1</sup>.
- ✓ El tiempo de retención puede variar de 10 a 60 minutos, dependiendo del tipo de unidad.
- ✓ Para que el período de retención real de la unidad coincida con el de diseño, la unidad debe tener el mayor número posible de compartimientos o divisiones.
- ✓ El tiempo de retención y el gradiente de velocidad varían con la calidad del agua.

#### **IV.4.6Sedimentación**

Una vez floculada el agua, el problema radica en separar los sólidos del líquido, es decir, las partículas coaguladas del medio en el cual están suspendidas. Se puede conseguir tal fin mediante la sedimentación, que no es más que el proceso en el cual se asientan los sólidos suspendidos en un fluido, bajo la acción de la gravedad.

Cuando una partícula cualquiera, con densidad diferente a la del fluido en la cual se coloca, se le permite mover sin interferencias, ella se desplazará verticalmente ascendiendo o descendiendo según su peso específico sea menor o mayor al del fluido en el cual se desplaza. La velocidad de desplazamiento de la partícula respecto al fluido se vuelve constante. La resistencia que opone el medio al fluido es igual al peso de la partícula en ese fluido.<sup>[RIVAS (1963)]</sup>

Este proceso permite una gran eliminación de la turbiedad presente en las aguas, sobre todo cuando se trata de aguas provenientes de fuentes superficiales, cargadas de lodo y otras impurezas precipitables.

La sedimentación puede ser simple cuando no se pretende alterar las características de las partículas por asentar. Se le denomina inducida cuando se modifica el diámetro o el peso específico de las partículas mediante fenómenos

de aglomeración o aglutinación. Se dá por sabido que la sedimentación obra sobre partículas dispersas mayores de las correspondientes a dispersiones iónicas, moleculares y coloidales finas. En estas últimas su remoción está caracterizada por fenómenos adicionales de precipitación química, adsorción y coagulación.<sup>[ARBOLEDA (1969)]</sup>

Existen varios tipos de sedimentadores, como lo son los sedimentadores laminares de flujo horizontal o los sedimentadores laminares de flujo ascendente, sin embargo, el más comúnmente utilizado por su simplicidad y por su economía, es el sedimentador rectangular de flujo horizontal, el cual consta de varias zonas a saber:<sup>[CEPIS (1992)]</sup>

**a. Zona de entrada**

Constituida por una estructura hidráulica de transición, que permite una distribución uniforme del flujo dentro del sedimentador. Esta estructura está compuesta por un vertedero y una pantalla con perforaciones (cortina de distribución).

**b. Zona de sedimentación**

Consta de un canal rectangular con volumen, longitud y condiciones de flujo adecuados para que sedimenten las partículas.

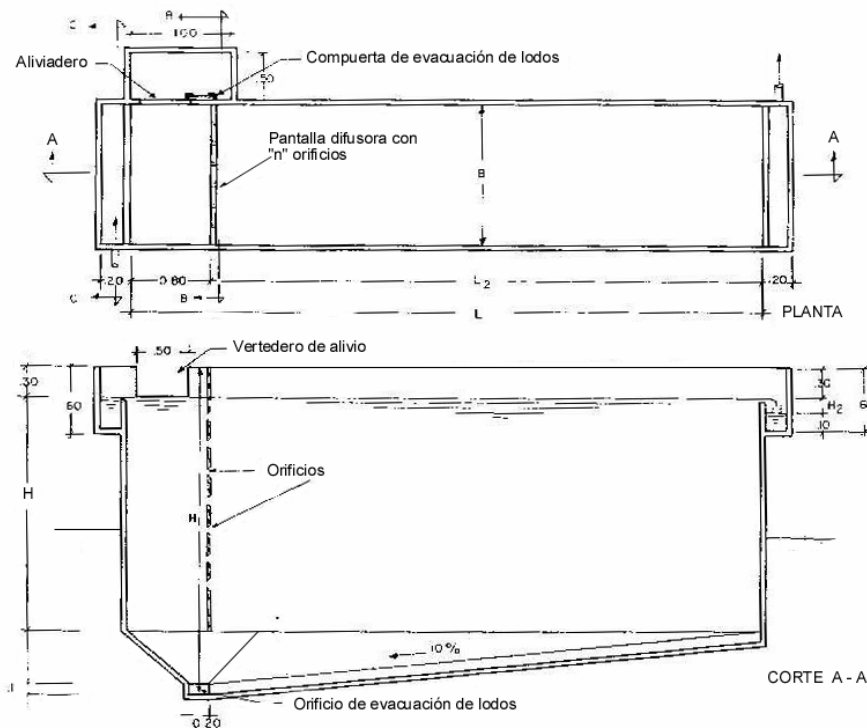
**c. Zona de salida**

Constituida por un vertedero, canaletas o tubos con perforaciones, que tienen la finalidad de recolectar el efluente sin perturbar la sedimentación de las partículas depositadas.

**d. Zona de recolección de lodos**

Constituida por una tolva con capacidad para depositar los lodos sedimentados, y una tubería y válvula para su evacuación periódica.

En la figura 6 se puede observar la vista de planta de un sedimentador :



**Figura 6.** *Sedimentador*[CEPIS (1992)]

El sedimentador rectangular de flujo horizontal, fue el equipo de sedimentación escogido para ser incluido en el presente trabajo y su selección fue realizada básicamente a la gran popularidad que presenta este en las plantas de tratamiento de aguas debido a su sencillez, economía y efectividad.

### **Parámetros de Diseño**

*Profundidad del Sedimentador*

*Relación Longitud / Ancho*

### **Ecuaciones de Diseño**<sup>[CEPIS (1992)]</sup>

- *Para un sedimentador rectangular de flujo horizontal se tiene:*

*Área superficial de la zona de decantación:*

$$A_s = \frac{Q}{V_s}$$

Ec. 74

Donde:

As: Área superficial de la zona de decantación (m<sup>2</sup>)

Q: Caudal de diseño (m<sup>3</sup>/s)

Vs: Velocidad de sedimentación (m/s)

*Longitud de la zona de sedimentación:*

$$L_s = \frac{A_s}{B_s}$$

Ec. 75

Donde:

Ls: Longitud de la zona de sedimentación (m)

Bs: Ancho del sedimentador.(m)

*Longitud total del sedimentador:*

$$L_{TS} = L_e + L_s$$

Ec. 76

Donde:

L<sub>TS</sub>: Longitud total del sedimentador (m)

L<sub>e</sub>: Longitud de la estructura de la entrada. (m)

*Relación largo/ancho de la zona de sedimentación:*

$$2,8 < \frac{L_s}{B_s} < 6$$

*Relación largo/alto de la zona de sedimentación:*

$$6 < \frac{L_s}{H_s} < 20$$

Donde:

H<sub>s</sub> : Altura del sedimentador (m)

*Cálculo de la velocidad horizontal del flujo:*

$$VH = \frac{100 \cdot Q}{B_s \cdot H_s}$$

Ec. 77

Donde:

VH: Velocidad horizontal del flujo (m/s)

*Tiempo de retención de la unidad:*

$$To = \frac{As \cdot H_s}{3600 \cdot Q}$$

Ec. 78

Donde:

To: Tiempo de retención de la unidad (s)

*Altura máxima en la tolva de lodos:*

$$Ht = H_s + 0,10 \cdot L_s$$

Ec. 79

Donde:

Ht: Altura máxima en la tolva de lodos (m)

*Altura del agua sobre el vertedero de salida:*

$$Ha = \left( \frac{Q}{1,84 \cdot L_s} \right)^{2/3}$$

Ec. 80

Donde:

Ha: Altura del agua sobre el vertedero de salida (m)

*Área total de orificios:*

$$Ao = \frac{Q}{Vo}$$

Ec. 81

Donde:

Ao: Área total de orificios (m<sup>2</sup>)

Vo: Velocidad de paso a través de los orificios (m/s)

*Área de cada orificio:*

$$ao = 0,7854 \cdot D^2$$

Ec. 82

Donde:

ao: Área de cada orificio (m<sup>2</sup>)

D: Diámetro de los orificios (m)

*Número de orificios:*

$$no = \frac{Ao}{ao}$$

Ec. 83

Donde:

no: Número de orificios (adim.)

*Altura de la cortina cubierta con orificios:*

$$ho = Ha - \frac{2}{5} \cdot Ha$$

Ec. 84

Donde:

ho: Altura de la cortina cubierta con orificios (m)

*Espaciamiento entre orificios:*

$$aeo = \frac{ho}{N_2}$$

Ec. 85

Donde:

aeo: Espaciamiento entre orificios (m)

*Espaciamiento lateral con respecto a la pared:*

$$a_L = \frac{B_s - aeo \cdot (N_1 - 1)}{2}$$

Ec. 86

Donde:

aL: Espaciamiento lateral con respecto a la pared (m)

Se tiene que  $N_1$  y  $N_2$  es el número de orificios repartidos a lo ancho y alto.

*Tiempo de vaciado de la unidad:*

$$T_1 = \frac{60 \cdot A_s \cdot \sqrt{Ha}}{4,850 \cdot A_2} \quad \text{Ec. 87}$$

Donde:

T1: Tiempo de vaciado de la unidad (s)

A<sub>2</sub>: Sección del canal de limpieza (m<sup>2</sup>)

*Caudal de diseño de la tubería de desagüe para evitar represamiento en la caja de salida:*

$$q = \frac{1000 \cdot L_s \cdot B_s \cdot Ha}{60 \cdot T_1} \quad \text{Ec. 88}$$

Donde:

q: Caudal de diseño de la tubería de desagüe para evitar represamiento en la caja de salida (m<sup>3</sup>/s)

### **Criterios de Diseño**<sup>[CEPIS (1992)]</sup>

- ✓ Las unidades de sedimentación simple (sin coagulación), solamente son eficientes para remover partículas discretas en suspensión de tamaño superior a 0,05 mm.
- ✓ Estas unidades trabajan en forma eficiente con turbiedades hasta 1000 UN; valores mayores crean interferencias en el proceso, disminuyendo su eficiencia. En estos casos se deberá incrementar el período de retención o diseñar un proceso para que remueva el exceso de carga (presedimentador).
- ✓ Se recomienda ubicar una pantalla perforada entre 0,60 a 1,00 m de distancia de la pared de entrada (L<sub>1</sub>).
- ✓ Se sugieren velocidades en los orificios no mayores de 0,10 a 0,15 m/s y el máximo número de perforaciones, con el objeto de minimizar la longitud de los chorros de agua para que no creen perturbaciones dentro de la zona de sedimentación.



- ✓ Se recomiendan velocidades de horizontales ( $VH$ ) menores de 0,55 cm/s para evitar arrastre de partículas.
- ✓ Se recomienda dar a los orificios una sección circular o cuadrada y aboquillarlos incrementando su sección en la dirección del flujo ( $15^\circ$ ), con lo cual mejora el funcionamiento hidráulico.
- ✓ La tasa de velocidad, en el vertedero de salida de la unidad, debe ser preferiblemente menor o igual a la mínima considerada en el caso de sedimentación de flóculos, recomendándose un rango de 0,8 a 2,0 l/s.
- ✓ Se sugiere considerar un diámetro mínimo de 8" para la tubería de evacuación de lodos.
- ✓ Se sugiere dar al fondo de la unidad pendientes de 5 a 10 % para facilitar el deslizamiento del sedimento.
- ✓ Se recomienda diseñar un vertedero de alivio que regule el caudal de agua a ser tratado en la unidad, evitando que éste se vea incrementado durante la operación, lo cual traería como consecuencia la disminución de la eficiencia remocional.

#### **IV.4.7Filtración lenta**

Se entiende por filtración, en tratamiento de aguas, como el proceso que consiste hacer pasar el agua a través de un lecho de arena u otro material poroso para así separar las partículas y microorganismos que no han podido ser removidos en los procesos de coagulación y sedimentación.

En base a las velocidades de filtración adoptadas en la práctica y en función de la granulometría de los lechos filtrantes, se pueden distinguir dos tipos generales de filtro: *filtros rápidos* y *filtros lentos*.

La filtración lenta en arena es el sistema de tratamiento de agua más antiguo utilizado por la humanidad. Es muy sencillo y efectivo porque simula exactamente el proceso de purificación que se da en la naturaleza, al atravesar el agua de lluvia los estratos de la corteza terrestre hasta encontrar los acuíferos o ríos subterráneos. [CEPIS (1992)]

El filtro lento consta de una caja de concreto con un lecho de arena no estratificado de unos 90 –110 cms de profundidad. El lecho va colocado sobre unos 15 ó 30 cms de grava que sirve para impedir que pase el material fino a los drenes. El lavado se hace raspando la superficie del lecho filtrante cuando la pérdida de carga se acerca a valores ya establecidos.

Durante el proceso de filtración lenta, las impurezas entran en contacto con la superficie de las partículas del medio filtrante y son retenidas, desarrollándose adicionalmente procesos de degradación química y biológica que reducen a la materia retenida a formas más simples, las cuales son llevadas en solución o permanecen como material inerte hasta su subsecuente retiro o limpieza. <sup>[CEPIS (1992)]</sup>

En la superficie del medio filtrante se forma una capa, que está compuesta básicamente de material de origen orgánico (“piel de filtro”), y que el agua debe atravesar antes de ingresar al medio filtrante. Esta “piel de filtro”, atrapa, digiere y degrada la materia orgánica contenida en el agua tales como algas muertas y bacterias vivas del agua cruda.

Al aumentar la profundidad del manto filtrante disminuye la cantidad de “alimento”, y se forman otro tipo de bacteria que utilizan el oxígeno disuelto en el agua y los nutrientes que se encuentran en solución

Como el rendimiento del filtro lento depende principalmente del proceso biológico su eficiencia inicial es baja, mejorando ésta a medida que progresa la carrera de filtración, proceso que se conoce con el nombre de “maduración del filtro”.

Estos filtros son capaces de remover una gran cantidad de bacterias, además de una buena cantidad de los sólidos suspendidos y sedimentables. También son efectivos en la remoción de olores y sabores que causan las algas y en menos proporción cuando se trata de la remoción del color especialmente producido por compuestos de hierro y manganeso.

Debido a que las áreas de filtración requeridas para estas unidades son muy grandes, estos filtros se han venido desechando en los últimos tiempos,

sobre todo cuando se requiere aplicar procesos de clarificación con coagulación para aguas mediana o altamente turbias y coloreadas. Estos filtros podrán ser utilizados en el caso muy particular de aguas relativamente claras y bajo color, , pero tomando en cuenta la capacidad de la planta y el costo del terreno donde ha de situarse.<sup>[RIVAS (1963)]</sup> Algunos valores importantes, referidos a la limitación en el uso de la filtración lenta, se expresan en la siguiente tabla 6:

**Tabla 6.** *Valores límite recomendados para el uso de la filtración lenta [RIVAS (1963)].*

Parámetro	Límite recomendado
Turbiedad	5 a 10 ntu
Algas	200000/L†
Color Verdadero	15 a 25 unidades de color platino
Triometanos	50 µg/L
Carbono orgánico disuelto no purgable	2,5 mg/L
Absorbancia UV	0,080 cm <sup>-1</sup>
Oxígeno disuelto	> 6 mg/L
Fósforo (PO <sub>4</sub> )	30 µg/L
Amoníaco	3 mg/L
Hierro	< 1 mg/L
Magnesio	< 1 mg/L

### **Parámetros de Diseño**

*Velocidad de filtración*

*Número de unidades*

### **Ecuaciones de Diseño**<sup>[RIVAS (1963)]</sup>

Área del medio filtrante de cada unidad:

$$Am = \frac{Q}{Nu \cdot V_F}$$

Ec. 89

Donde:

$A_m$ : Área del medio filtrante de cada unidad ( $m^2$ )

$N_u$ : Número de unidades (adim.)

$V_F$ : Velocidad de filtración (m/s)

*Coefficiente de mínimo costo:*

$$K_c = \frac{2 \cdot N_u}{N_u + 1}$$

Ec. 90

Donde:

$K_c$ : Coeficiente de mínimo costo (adim.)

*Largo de cada unidad:*

$$L_u = \sqrt{A_m \cdot K_c}$$

Ec. 91

Donde:

$L_u$ : Largo de cada unidad (m)

*Ancho de cada unidad:*

$$B_u = \sqrt{\frac{A_m}{K_c}}$$

Ec. 92

Donde:

$B_u$ : Ancho de cada unidad (m)

*Coefficiente de uniformidad:*

$$CU = \frac{N^{\circ} \text{ tamiz para } 60\% \text{ que pasa}}{N^{\circ} \text{ tamiz para } 10\% \text{ que pasa}}$$

Ec. 93

Donde:

$CU$ : Coeficiente de uniformidad (Adim.)

Profundidad de la caja filtrante:

$$Cf = Bl + Ca + Lf + Cs + Fc$$

Ec. 94

Donde:

Cf: Profundidad de la caja filtrante (m)

Bl: Altura del Borde libre (m)

Ca: Altura de la Capa de agua (m)

Lf: Altura del Lecho filtrante (m)

Cs: Altura de la capa soporte (m)

Fc: Altura del fondo colector (m)

### **Criterios de Diseño**<sup>[RIVAS (1963)]</sup>

- ✓ La velocidad de filtración se debe ubicar como máximo en 0,35 cm/min.
- ✓ Se recomienda que el área máxima de cada unidad esté entre 10 – 200 m<sup>2</sup>.
- ✓ El número mínimo de unidades debe ser 2.
- ✓ La altura del borde libre debe estar entre 0,20 – 0,30 m.
- ✓ La altura del lecho filtrante es recomendable que esté entre 0,80 – 1,00 m.
- ✓ La granulometría del lecho debe hallarse en un rango de 0,15 – 0,35 mm.
- ✓ Es recomendable que la altura del drenaje se halle entre 0,10 – 0,25 m.

#### **IV.4.8 Filtración rápida**

La similitud entre un filtro rápido de arena y uno lento es grande, ya que en ambos se cumple el mismo proceso de hacer pasar el agua a través de un lecho poroso y también respecto al objetivo que buscan, que es la remoción de la turbiedad, bacterias, colores, etc presentes en el agua. Sin embargo, la efectividad difiere en dichos procesos y es debido, básicamente, a la velocidad de filtración a través de los lechos y a la diferencia de granulometría.

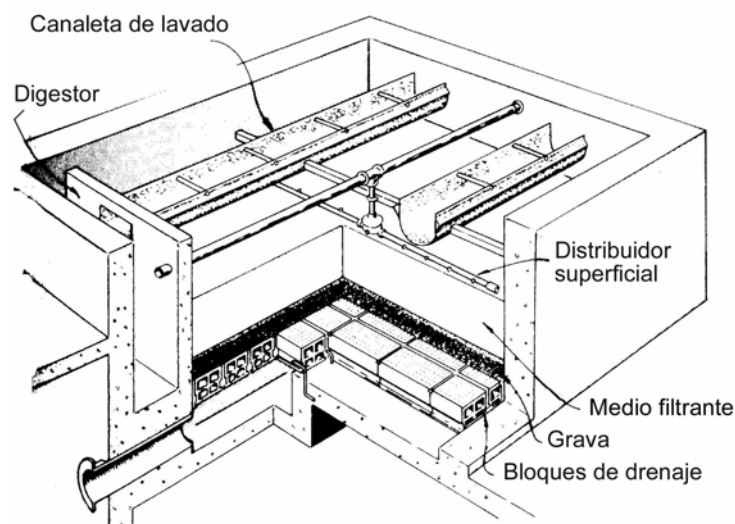
Este tipo de filtros consta de un tanque rectangular de profundidad total, en el cual va un lecho de arena y grava sobre un sistema de drenaje. Para operar, se deja pasar el agua a través del lecho donde posteriormente es recogida en los drenajes. Al cabo de ciertas horas, el filtro se obstruye, por lo que es necesario introducir agua en forma inversa, esto es desde los drenajes hasta las canaletas de

lavado en la parte de arriba para que la arena se expanda y el material que se encuentra acumulado salga (ver figura 7).

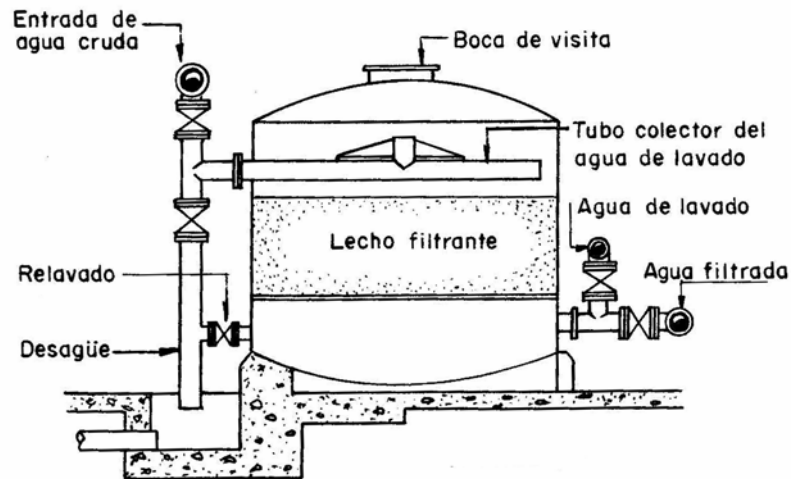
Es importante aclarar que se entiende por velocidad de filtración a través del lecho, la velocidad que resulta de dividir el gasto aplicado al filtro entre el área total de la unidad y no precisamente la velocidad real a través de los poros del lecho, la cual naturalmente es mayor, y cuya magnitud depende del área útil de paso entre los intersticios dejados por los poros.

En el proceso de filtración rápida también se utilizan los llamados filtros de presión, que no son más que simples filtros de arena rápidos encerrados en un tanque metálico (ver figura 8).

La rata de filtración, lavado, drenes y lecho filtrante son en un todo similar a los rápidos por gravedad, sólo que el lecho está sometido a presión. Este tipo de filtro no es aconsejable para acueductos municipales porque su efluente es de calidad inferior. Son aplicables principalmente en instalaciones industriales y piscinas, en las cuales presenta la ventaja de que se puede realizar la floculación dentro del filtro, colocando en el afluente un recipiente con alumbre amoniacal para que al pasar el agua disuelva dicho coagulante. [ARBOLEDA (1969)]



**Figura 7.** Filtro típico por gravedad [AWWA (1998)].



**Figura 8.** *Filtro a presión [ARBOLEDA (1969)].*

Otro tipo de filtro rápido son los llamados filtros de diatomáceas y su uso es más frecuente a nivel industrial y piscinas. Tiene la ventaja de ocupar un menor espacio respecto a los demás tipos de filtros rápidos y de ser muy efectivo en la reducción de los quistes de *Endamoeba Histolítica*, cuya eliminación por cloración resulta muy dificultosa.

El medio filtrante de este tipo de filtros es tierra que contiene fósiles de diatomos, que no son más que algas verdes (filum crisófitas), cuya célula está rodeada por una membrana silíceas que les da un peso mayor en comparación con otros tipos de algas.

### **Parámetros de Diseño**

*Altura del lecho*

*Velocidad superficial*

### **Ecuaciones de Diseño** <sup>[ROMERO (1994)]</sup>

*Para filtros por gravedad:*

*Cálculo de la velocidad superficial:*

$$v = kp \cdot \frac{h_L}{L_L}$$

Ec. 95

Donde:

v: Velocidad superficial (m)

kp: Coeficiente de permeabilidad (adim.)

$h_L$ : Pérdida de carga en el lecho (m)

$L_L$ : Profundidad del lecho (m)

*Número de Reynolds:*

$$Re = \frac{v \cdot d_c}{\nu}$$

Ec. 96

Donde:

Re: Número de Reynolds (adim.)

$d_c$ : diámetro característico de los granos (m)

*Coeficiente de arrastre:*

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0,34$$

Ec. 97

Donde:

$C_D$ : Coeficiente de arrastre (adim.)

*Pérdida de carga por fricción a través del lecho:*

$$h_L = 0,178 \cdot \frac{C_D \cdot L_L \cdot v^2 \cdot A}{g \cdot e_p^4 \cdot V}$$

Ec. 98

Donde:

$$A = \alpha_i \cdot d_c^2 \quad \text{y} \quad V = \beta_i \cdot d_c^3$$

### **Criterios de Diseño** [ROMERO (1994)]

- ✓ Generalmente se fija una velocidad superficial entre 0,7 y 1,3 m/min



#### **IV.4.9 Desinfección**

El hecho de que el agua haya pasado por varios procesos como lo son coagulación, sedimentación y filtración entre otros, no garantiza que este exenta de organismos y de que pueda ser consumida sin peligro alguno. Es necesario realizar un proceso adicional, llamado desinfección, para eliminar toda clase de contaminaciones.

La desinfección se refiere a la destrucción en el agua de los organismos causantes de enfermedades, es decir la eliminación de: <sup>[ARBOLEDA (1969)]</sup>

a. *Bacterias:*

Salmonellas (Tifosas y Paratifosas)

Shigellas (Disenterías)

Vibrio Comma (Cólera)

b. *Protozoarios:*

Amoebas (Endamoebas Histolíticas)

c. *Virus:*

Virus de la Hepatitis Infecciosa

d. *Tremátodos:*

Schistosoma Mansoni (Bilharziasis)

Las condiciones que debe tener un desinfectante para poder ser usado en la planta de purificación son: <sup>[ARBOLEDA (1969)]</sup>

- a) Debe ser capaz de destruir los organismos causantes de enfermedades.
- b) Debe realizar esta labor a la temperatura del lugar y en un tiempo adecuado.
- c) No debe hacer el agua tóxica o de sabor desagradable.
- d) Debe ser de fácil obtención, sencillo manejo y bajo costo.
- e) Su concentración en el agua debe poderse determinar prontamente.
- f) Debe dejar un efecto residual, para que proteja el agua contra posteriores contaminaciones.

La efectividad de un desinfectante se mide por el porcentaje de organismos muertos dentro de un tiempo, una temperatura y un pH prefijados.

La elección de un desinfectante depende de varios criterios que van desde su efectividad hasta su costo. Los desinfectantes más usados son:

- **Cloro:** Se puede agregar en forma gaseosa o en forma de hipocloritos sódico y cálcicos. Es el desinfectante más usado en la purificación de las aguas, ya que es eficiente, de bajo costo y fácil de aplicar y deja un efecto residual que es sencillo de medir. Tiene la desventaja de que es corrosivo y que en algunos casos deja un sabor desagradable en el agua.

La acción del cloro está muy influenciada por el pH; cuanto más elevado es éste, mayor es la dosis de cloro residual que debe mantenerse para obtener la misma eficacia con un mismo tiempo de contacto. Debe tenerse en cuenta este factor cuando se efectúa una neutralización para elevar el pH del agua filtrada. [DEGRÉMONT (1973)]

- **Cloraminas:** Generalmente, reducen o eliminan los sabores que podrían encontrarse en un tratamiento sólo con cloro. Pueden ser eficaces, aunque no siempre, cuando se quiere evitar el sabor a clorofenol. [DEGRÉMONT, (1973)]

- **Dióxido de cloro (ClO<sub>2</sub>) :** Elimina la formación de clorofenol mas no tiene efecto sobre otros sabores, como es el caso de sabor a tierra o lodo.

- **Ozono:** Es el mejor de los desinfectantes, tiene un costo más elevado que el cloro o sus compuestos, pero con un gran eficacia. Tiene una gran importancia cuando a control de olor sobre el agua se refiere, sin embargo, no tiene efecto residual y es muy difícil de determinar su concentración.

- **Rayos ultravioletas:** Se obtiene una buena desinfección del agua a condición de que se aplique sobre una capa de agua de poco espesor, con una potencia suficiente y renovando las lámparas antes de que pierdan la fuerza de su poder emisor. La efectividad del tratamiento depende de una instalación ampliamente dimensionada, bien controlada y por supuesto excelentemente mantenida.

- **Plata ionizada:** Los iones de plata son sistemas ampliamente utilizados en algunos países europeos, especialmente en plantas de purificación para usos industriales. El sistema conocido como *Katadyn* si bien es más caro que la cloración, deja efecto residual y es fácil de medir la activación de los iones de plata en el agua. [ARBOLEDA (1969)]

### **Precloración**

La aplicación del cloro antes del tratamiento de clarificación se justifica en aquellos casos en que se requiera promover una más eficiente coagulación; cuando se desea evitar la descomposición de materias orgánicas presentes en el agua cruda; para eliminar o controlar el crecimiento de algas, protozoarios u otros pequeños organismos que de otra manera pudieran comunicarles olores y sabores desagradables al agua; para eliminar ciertos olores o sabores ya presentes en el agua cruda. Para provocar la oxidación de elementos que, como el hierro y el magnesio, requieran ser removidos mediante la oxidación de sus sales, y, por último, para reducir los crecimientos biológicos que en muchas ocasiones aparecen en los filtros.

Un caso típico de precloración es el de aplicar el cloro antes de la filtración en aguas provenientes de formaciones acuíferas, conteniendo sales ferrosas y/o manganosas.

La precloración, en plantas de tratamiento, se aplica en la tubería o canal que va hacia los mezcladores rápidos o en los propios estanques de mezcla o de coagulación antes de los sedimentadores.

### **Postcloración**

Este procedimiento supone la aplicación del cloro después de la filtración. Sin embargo, cuando existe precloración u otro tratamiento que preceda a los filtros, la postcloración puede ser aplicada antes de éstos.

Las dosis de precloración y de postcloración deben ser determinadas experimentalmente en base a los residuos mínimos requeridos para la protección de todo el sistema de abastecimiento.

Caso de aplicarse ambas, debe ser la segunda la utilizada para provocar un residuo estable del desinfectante.

### **Interferencias en la cloración** [ARBOLEDA (1992)]

La eficiencia de la cloración puede quedar total o parcialmente interferida por una variedad de agentes físicos y químicos tales como: la turbiedad, la temperatura y el contenido de calcio y fenoles en el agua.

#### **a. Turbiedad**

El efecto que la turbiedad, y en general las partículas flotantes en el agua, tiene en la eficiencia de la desinfección, resulta de la tendencia del *Escherichia Coli* y otros microorganismos a crecer en las colonias y encapsularse en los microfragmentos de materias fecales o depositarse dentro de las partículas orgánicas y minerales adecuadas, haciendo más lenta la acción del cloro, el cual tendría que difundirse hasta el interior de la masa de dichas partículas, antes de poder llegar hasta ellos.

Esto haría necesario aumentar el tiempo de contacto o la concentración para obtener resultados satisfactorios.

#### **b. Calcio**

El contenido de calcio en el agua parece que perjudica la eficiencia de la desinfección aún en concentraciones pequeñas del orden de 1 mg/L. La razón para esto no está clara. Se ha sugerido que los iones bivalentes  $\text{Ca}^{++}$  pueden ser absorbidos por las bacterias, cuya carga es negativa, y formar costras protectoras alrededor de ellas.

#### **c. Potencial hidrógeno**

Los altos pH del agua (>9) desaceleran las reacciones químicas entre el cloro y el amoníaco, y también inducen la formación de compuestos clorados de baja efectividad.

d. Fenoles

La interferencia de los fenoles se manifiesta con una sabor desagradable y característico en el agua cuando este reacciona con el cloro, y es detectable en concentraciones muy pequeñas del orden de 0,002 mg/L.

Los siguientes cálculos y análisis serán efectuados para una estación de cloración, que no es más que el módulo de la planta de tratamiento de aguas encargada de remover la mayor cantidad de organismos presentes en ella:

**Parámetros de Diseño**

*Tiempo de Retención Hidráulico*

*Concentración de la solución desinfectante*

*Dosis máxima*

**Ecuaciones de Diseño** <sup>[CEPIS (1992)]</sup>

*Caudal mínimo de agua requerido para la operación del eyector:*

$$q_e = \frac{Q \cdot D_M}{C} \quad \text{Ec. 99}$$

Donde:

$q_e$ : Caudal del eyector ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$D_M$ : Dosis máxima de cloro ( $\text{mg/L}$ )

*Capacidad requerida del equipo:*

$$W = Q \cdot D_M \quad \text{Ec. 100}$$

Donde:

$W$ : Capacidad del equipo de desinfección ( $\text{m}^3$ )

*Área de la tubería de alimentación del agua:*

$$A_{tu} = \frac{q_e}{V_e}$$

Ec. 101

Donde:

$A_{tu}$ : Área de la tubería de alimentación del agua ( $m^2$ )

$V_e$ : Velocidad de alimentación del agua (m/s)

*Diámetro de la tubería de alimentación del agua:*

$$d_{tu} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{tu}}{\pi}}$$

Ec. 102

Donde:

$d_{tu}$ : Diámetro de la tubería de alimentación del agua (m)

*Cálculo de la cantidad de cloro requerido:*

$$Cl_2 - Req = Q \cdot 3600 \cdot \frac{(Cl_2 - Res)}{1000}$$

Ec. 103

Donde:

$Cl_2 - Req$ : Cantidad de cloro requerido (Kg  $Cl_2/L$ )

$Cl_2 - Res$ : Cantidad de cloro residual (Kg  $Cl_2/L$ )

*Cálculo del volumen del tanque de cloración:*

$$V_{TCl} = Q \cdot t_c$$

Ec. 104

Donde:

$V_{TCl}$ : Volumen del tanque de cloración ( $m^3$ )

$t_c$ : Tiempo de contacto (s)

### **Criterios de Diseño**<sup>[CEPIS (1992), ARBOLEDA (1992)]</sup>

✓ Clorar a pH bajo. El pH favorable está entre 7 y 8. Por encima de 8 los olores persisten por más tiempo.

- ✓ Poner previamente amoníaco en el agua, ya que la reacción del cloro es más rápida con este compuesto que con los fenoles. Esto es viable sólo cuando el agua es poco contaminada o se dispone de largos períodos de contacto.
- ✓ La capacidad del clorador debe ser tal que se pueda obtener un residual de cloro libre de por lo menos 2 mg/l en el agua, después de un tiempo de contacto de 30 minutos para el caudal máximo.
- ✓ Se debe proveer una unidad de reserva, por lo menos, que permita garantizar el suministro continuo de la dosis apropiada.
- ✓ La luz solar no debe alcanzar directamente los cilindros de cloro.
- ✓ La tasa máxima de extracción de cloro, de un cilindro de 68 Kg, es aproximadamente de 16 Kg/d a temperatura ambiente y descargada a presión atmosférica.
- ✓ Para control de la dosificación del cloro debe proveerse de una báscula de plataforma apropiada al tipo y cantidad de cilindros requeridos
- ✓ Para minimizar la posibilidad de relicuefacción de cloro gaseoso, la distancia entre el clorador y el cilindro debe ser tan corta como sea posible y el sistema de suministro de cloro debe estar preferiblemente a una temperatura más baja que el clorador.
- ✓ La temperatura mínima recomendable, para el área de almacenamiento de cloro, es de aproximadamente 10 °C. Por debajo de esta temperatura el flujo de cloro es crítico y se recomienda aislamiento apropiado de los cilindros
- ✓ Cuando se requieren más de dos cilindros de cloro de 68 Kg, se debe considerar el uso de cilindros de una tonelada. Para más de un cilindro de 68 Kg se debe usar trenes múltiples de 2,3,5 o 10 cilindros.
- ✓ A temperatura ambiente, la tasa máxima de extracción de cloro gaseoso de un cilindro de una tonelada es aproximadamente de 180 Kg/d. Si la tasa de extracción es mayor de 681 Kg/d se recomienda la extracción de cloro líquido y el uso de evaporadores.

#### **IV.4.10Coagulación**

La coagulación consiste en la desestabilización de los sólidos suspendidos mediante la adición de químicos al agua, para que posteriormente puedan agruparse y formar pequeñas masa de peso específicos mayor que el agua. La coagulación comienza en el mismo instante en el que es añadido los coagulantes al agua y dura solamente fracciones de segundo. En este proceso, donde suceden una serie de reacciones químicas, básicamente participan los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma.

La necesidad de la coagulación surge del hecho de que la velocidad de asentamiento de partículas discretas es tan pequeña que se haría antieconómico pensar en la sedimentación.

Por tanto, la coagulación se usa para: <sup>[ARBOLEDA (1969)]</sup>

- ✓ Remoción de turbiedad orgánica e inorgánica que no puede sedimentar rápidamente.
- ✓ Remoción de color verdadero y aparente.
- ✓ Eliminación de bacterias y organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación.
- ✓ Destrucción de algas y plankton en general.
- ✓ Eliminación de sustancias productoras de sabor y olor en algunos casos y de precipitados químicos suspendidos en otros.

Un factor muy importante, que actúa en conjunto con el tipo de coagulante, es el pH y la alcalinidad, ya que de esto puede depender la obtención de una buena coagulación. El óptimo pH para la coagulación varía según el coagulante, sin embargo, se mantiene en los siguientes rangos: <sup>[AWWA (1998)]</sup>

- Aluminio: pH 5,5 a 7,5; valor típico 7,0
- Sales Férricas: pH 5,0 a 8,5; valor típico 7,5

Existen varios tipos de coagulantes y su selección está basada en razones económicas, de seguridad y almacenamiento. Entre los cuales coagulantes más usados tenemos:.



- Sales de alumbre: Forman un floc ligeramente pesado. Los coagulantes más conocidos de estas sales son el sulfato de aluminio, el sulfato de aluminio amoniacal y el aluminato de sodio.

- Sales de hierro: Forman un floc más pesado que las sales de alumbre y por lo tanto se produce una mayor velocidad de asentamiento por parte de las partículas desestabilizadas. Los más utilizados son el cloruro férrico, sulfato férrico, sulfato ferroso.

Otros tipos de coagulantes utilizados son:

- Coagulación electrónica: Consiste en hacer pasar el agua a través de unas láminas de aluminio cargadas eléctricamente para que liberen iones trivalentes. Tiene un alto costo de operación.

- Coagulación con Aluminato de Sodio: No necesita la adición de ningún álcali y produce una floculación más amplia.

- Coagulación con Alumbre Amoniacal: Se utiliza generalmente en filtros a presión ya que posee una alta solubilidad.

- Alumbre Negro: Es alumbre común que contiene de 2 al 5% de carbón activado. Se usa cuando se quiere combinar con la coagulación la remoción del mal sabor y olor en el agua. <sup>[ARBOLEDA (1969)]</sup>

Otro aspecto importante a tratar es la adición de los coagulantes, ya que de esta depende mucho la efectividad de la coagulación.

Los coagulantes metálicos, Al y Fe, siempre deben aplicarse en solución verdadera. El aplicarlos en suspensión o peor aún en polvo, sin que las partículas del compuesto hayan tenido tiempo de disolverse, disminuye notablemente la efectividad del proceso, lo que se traduce en un desperdicio de dichas sustancias químicas. <sup>[CEPIS (1981)]</sup>

La solución de coagulantes puede prepararse en dos formas: <sup>[CEPIS (1981)]</sup>

1. Dosificando el polvo en forma continua en un tanque de hidratación, desde donde la solución se lleva al punto de aplicación.
2. Preparando la solución previamente y dosificándola por gravedad o por bombeo en el punto de aplicación.

#### **IV.4.11 Ablandamiento**

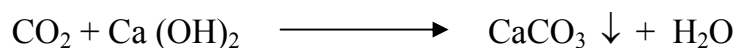
El ablandamiento es un proceso que consiste en reducir o eliminar los iones de calcio y magnesio que se encuentran presentes en el agua y que le da la característica de “dura”.

Existen diferentes métodos utilizados en escala industrial para el ablandamiento total o parcial de las aguas, entre los cuales se tiene:<sup>[RIVAS (1963)]</sup>

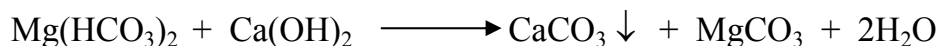
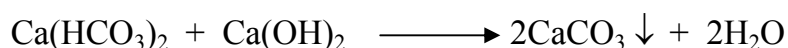
1. Para usos municipales el método más generalizado es el denominado cal – soda. En este caso, la dureza es reducida por el uso de la cal viva o apagada o sosa caústica ( $\text{CaO}$ ,  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{Na(OH)}$ ); y el uso de éstos en combinación con el carbonato sódico ( $\text{NaCO}_3$ ), dependiendo de la dureza presente y de los resultados requeridos.
2. El proceso de ablandamiento para usos industriales que generalmente se aplica es el de intercambio de cationes. En este caso la dureza se remueve con la ayuda de los denominados intercambiadores catiónicos. El agua dura es afectada al hacerla circular a través de estas unidades de ablandamiento.
3. El proceso de ablandamiento con fosfato de sodio, que es utilizado a veces como proceso único o complementario al primero. En este caso se aplican al agua fosfatos mono, di y trisódicos conjuntamente, y a veces en combinación con los correspondientes pirofosfatos.

Las reacciones que se suceden en el método de cal – soda son las siguientes:<sup>[RIVAS (1963)]</sup>

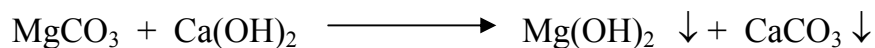
La cal, si es viva, se hidrata al agregarla y luego reacciona, primero con el  $\text{CO}_2$  presente en le agua:



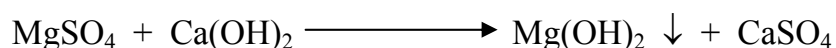
Luego reacciona con los bicarbonatos de calcio y magnesio:



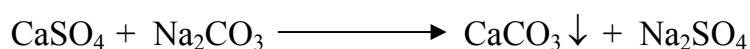
El carbonato de magnesio formado (cuando existe un contenido apreciable de magnesio) reacciona con exceso de cal en la forma que sigue:



A su vez, el sulfato de magnesio con la cal:



Y el sulfato de calcio con el carbonato sódico:



### **Criterios de Diseño**<sup>[RIVAS, 1963]</sup>

A partir de las ecuaciones anteriores, se puede concluir lo siguiente:

- ✓ Es importante tomar en cuenta el contenido de  $\text{CO}_2$  ya que este es uno de los consumidores de cal.
- ✓ La dureza carbonática puede ser removida con cal siempre y cuando las cantidades de magnesio presentes en el agua sean aceptables.
- ✓ La dureza carbonática magnésica debe ser removida con exceso de cal al límite de 10 a 15 ppm. de alcalinidad de hidróxidos.
- ✓ La dureza no carbonática se remueve con cal y carbonato sódico.
- ✓ Con hidróxido de sodio podría obtenerse la remoción de ambas durezas, pero tal proceso no es económico.

Otro aspecto, de gran importancia, es la proporción de cal y carbonato sódico necesaria para remover o reducir la dureza del agua.

Hale, ha propuesto al respecto que para remover la dureza carbonática es necesario:<sup>[RIVAS (1963)]</sup>

121 gr. de cal 100% OCa por cada metro cúbico y  
para la dureza no carbonática:

121 gr. de carbonato sódico 100%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  por cada metro cúbico.

Generalmente, el proceso de cal – soda para el ablandamiento se efectúa en conjunto con el coagulante, antes o en los mezcladores, para pasar posteriormente a las etapas ya conocidas de mezcla rápida y lenta, sedimentación y filtración.

Entre las ventajas y las desventajas del proceso de ablandamiento se tiene: [RIVAS (1963)]

*Ventajas:* Reducción del contenido mineral de las aguas; incremento del pH del agua suficiente para reducir su efecto corrosivo; obtención de una más efectiva coagulación con reducción de la dosis normal (sobre todo cuando el contenido de magnesio es apreciable); reducción del índice colibacilar de las aguas dentro de la etapa misma de sedimentación; y si existen el hierro y el manganeso éstos son removidos en el proceso, eliminando el problema del color que ellos comunican al agua.

*Desventajas:* Operación delicada para obtener una eficiencia real del proceso; volumen de lodos muy grande, entre otras razones, por el alto contenido de humedad del mismo, y la necesidad de aplicar una recarbonatación adecuada que evite la obtención de aguas con propiedades precipitantes.

## V. NORMAS SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA

Para establecer las normas de calidad del agua, debe tomarse en cuenta primordialmente la salud del consumidor.

Para poder llevar a cabo este objetivo, el agua no debe contener ningún organismo patógeno, ni sustancias tóxicas o nocivas para la salud.

Por otro lado, las características del agua deben ser tales, que no produzcan daño, ni a la red de distribución, ni a las industrias, ni a la economía privada.

En la tabla 7 se resume los parámetros límites y deseables de las características físicas, químicas y biológicas del agua para asegurar la salud del consumidor, según la Organización Mundial de la Salud.<sup>[CEPIS (1992)]</sup>

A nivel nacional, las normas que regulan la calidad del agua potable, se encuentran registradas en la Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 36.395, fechada en Caracas, el 13 de febrero de 1998.

En el capítulo I, llamado “Disposiciones preliminares”, se establece el fin que busca insertar las “Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable” y los organismos que están involucrados con dichas leyes. En este capítulo, en el Artículo 3, se hace referencia al *Valor Máximo Aceptable*, que es según dicho Artículo “el establecido para la concentración de un componente que no representa un riesgo significativo para la salud o rechazo del consumidor, teniendo en cuenta el consumo de agua durante toda su vida. (OPS/OMS)”.

Por otro lado, en el Artículo 6, del mismo capítulo, se menciona que el agua potable destinada para el abastecimiento público deberá contener en todo momento una concentración de cloro residual, libre en cualquier punto de la red de distribución, de 0,3 y 0,5 mg/L.

En el capítulo II, titulado “De los aspectos microbiológicos”, se puede resaltar el Artículo 9, en el cual se indica que los análisis bacteriológicos hechos a una muestra de agua potable debe contener lo siguiente:

a. Ninguna muestra de 100 ml., deberá indicar la presencia de organismos coliformes termorresistentes (coliformes fecales).

b. El 95% de las muestras de 100 ml., analizadas en la red de distribución, no deberá indicar la presencia de organismos coliformes totales durante cualquier período de 12 meses consecutivos.

c. En ningún caso deberá detectarse organismos coliformes totales en dos muestra consecutivas de 100 ml., provenientes del mismo sitio.

**Tabla 7. Valores Máximos Aceptables para el Agua Potable – OMS [CEPIS (1992)]**

SUSTANCIA	CONCENTRACIÓN	CONCENTRACIÓN
	MÁXIMA ACEPTABLE	MÍNIMA TOLERABLE
Sólidos totales	500 mg/L	1500 mg/L
Color	5 unidades *	50 unidades
Turbiedad	5 unidades **	25 unidades
Sabor	no rechazable	-
Olor	no rechazable	-
Hierro (Fe)	0,3 mg/L	1,0 mg/L
Manganeso (Mn)	0,1 mg/L	0,5 mg/L
Cobre (Cu)	1,0 mg/L	1,5 mg/L
Zinc (Zn)	5,0 mg/L	15 mg/L
Calcio (Ca)	75 mg/L	200 mg/L
Magnesio (Mg)	50 mg/L	150 mg/L
Sulfato (SO <sub>4</sub> )	200 mg/L	400 mg/L
Cloruros (Cl)	200 mg/L	600 mg/L
pH	7,0 – 8,0	6,5 – 9,2
Mg+Sulfato de sodio	500 mg/L	1000 mg/L
Compuestos fenólicos como fenol	0,001 mg/L	0,002 mg/L
Contaminantes Orgánicos	0,2 mg/L	0,5 mg/L
Sustancias activas al azul de metileno	0,2 mg/L	0,5 mg/L

\* Escala platino cobalto

\*\* Unidades de turbiedad

Enmarcándonos en el capítulo III, denominado “De los aspectos organolépticos, físicos y químicos”, se menciona que el agua potable debe cumplir, entre otros, con los requisitos organolépticos, físicos y químicos que se presenta en la tabla 8:

**Tabla 8.** Componentes relativos a la calidad organolépticos del agua potable  
[GACETA OFICIAL DE LA REPUBLICA DE VENEZUELA (1998)]

<b>Componente o Característica</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor Deseable menor a</b>	<b>Valor Máximo Aceptable (a)</b>
Color	UCV(b)	5	15 (25)
Turbiedad	UNT(c)	1	5 (10)
Olor o Sabor	--	Aceptable para la mayoría de los consumidores	
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	600	1000
Dureza Toral	mg/L CaCO <sub>3</sub>	250	500
pH	--	6,5 – 8,5	9,0
Aluminio	mg/L	0,1	0,2
Cloruro	mg/L	250	300
Cobre	mg/L	1,0	(2,0)
Hierro Total	mg/L	0,1	0,3 (1,0)
Manganeso Total	mg/L	0,1	0,5
Sodio	mg/L	200	200
Sulfato	mg/L	250	500
Cinc	mg/L	3,0	5,0

(a) Los valores entre paréntesis son aceptados provisionalmente en casos excepcionales, plenamente justificados ante la autoridad sanitaria.

(b) UCV: Unidades de Color Verdadero.

(c) UNT: Unidades Nefelométricas de turbiedad.

Respecto a las características radioactivas que pueda contener el agua, esta se encuentra enmarcadas en el capítulo IV, llamado “De los aspectos radioactivos”, en el cual en su único Artículo 15 se indica lo siguiente: “El agua que se suministre como potable no deberá contener ni haber sido contaminada con elementos radioactivos que excedan los valores máximos que se establecen a continuación”:

Radioactividad Alfa Global: 0,1 Bq/L

Radioactividad Beta Global: 1,0 Bq/L

En los siguientes capítulos, V y VI, se tratan temas concernientes al muestreo, análisis de las aguas para suministro como potable y disposiciones finales respectivamente, el cual hace referencia al cumplimiento de dichas leyes, ejecución y entrada en vigencia.

En lo que respecta a las aguas de proceso, estas deben cumplir como mínimo con las normas que velen por la salud del consumidor, sin embargo hay parámetros que pueden variar dependiendo del tipo de industria que vaya a requerir del vital líquido. Tales características podría ser entre otras la alcalinidad o el pH por ejemplo.



## **VI. METODOLOGÍA**

Con el objetivo primordial de desarrollar un programa de simulación de plantas de tratamiento de aguas de consumo o de proceso y lograr los objetivos fijados, se realizó el siguiente esquema de trabajo:

✚ Se realizó una revisión bibliográfica que contuviera los siguientes puntos:

a) Caracterización de los parámetros físicos, químicos, biológicos y radioactivos más importantes de las aguas naturales.

b) Estudio de los parámetros, ecuaciones y criterios de diseño de los equipos más resaltantes en lo que a potabilización de aguas se refiere, tomando en cuenta también datos reportados en la bibliografía y criterios basados en la experiencia.

c) Reglamentación tanto nacional como internacional, de las normas que rigen la calidad del agua potable.

✚ Se visitaron plantas de tratamiento de aguas con el fin de recoger información sobre las características y funcionamiento de los equipos contenidos en el software desarrollado.

✚ Se estudiaron las bases y filosofías de el programa de diseño y simulación de plantas de tratamiento de aguas residuales elaborado por el Ing. Alberto Rodríguez (Rodríguez, 2000) a fin de adoptar la misma filosofía para plantas de tratamiento de aguas, incluyendo la selección del lenguaje utilizado de programación Microsoft Visual Basic 6.0<sup>®</sup>.

✚ Se analizó la necesidad de ajustar los parámetros de entrada y salida requeridos en cada equipo u operación que se desarrollo en el programa de simulación.

## Metodología

- ✚ Se programó los módulos necesarios para poder conformar la estructura del paquete de simulación.
- ✚ Se actualizó la base de datos requerida para la ejecución y validación del programa, con el fin de obtener un espectro más amplio y más real sobre la simulación de aguas de proceso.
- ✚ Se evaluó y validó el programa con distintos tipos de plantas de tratamiento de aguas.
- ✚ Se hizo un análisis y discusión de los resultados obtenidos.
- ✚ Se elaboró un manual del usuario para así familiarizar y facilitar su operación.

## VII. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

En general, el programa realizado tiene una gran versatilidad en lo que a manejo y desarrollo de simulaciones en tratamiento de aguas se refiere. Desde la manipulación del entorno del programa hasta la obtención de los resultados del trabajo realizado con *AquaBox TA*, es de fácil operación para cualquier persona con pocos conocimientos en el área, alcanzando uno de los objetivos primordiales: desarrollar un programa versátil, atractivo, flexible y de fácil manejo por parte del usuario. Para mayores detalles sobre el uso de *AquaBox TA*, refiérase al *Manual del Usuario* ubicado en el anexo A.

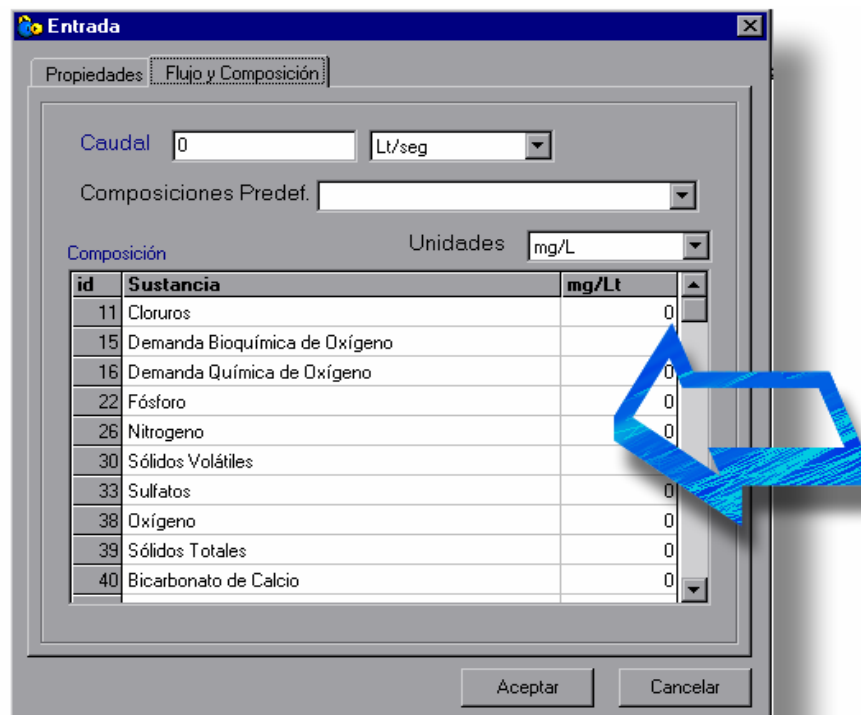
Por otra parte, para el desarrollo de *AquaBox TA* fue necesario realizar los balances de masa pertinentes a los equipos que se involucraron en el programa, sin incluir parámetros tales como color, turbidez y olor, que son características no cuantificables por alguna ecuación predefinida. De igual manera se manipuló las reacciones químicas que podrían sucederse en la operación unitaria llamada ablandamiento para poder cuantificar los parámetros de salida que tendría este equipo. De esta forma se crearon distintos módulos de programación codificados en Visual Basic 6.0<sup>®</sup> y se entrelazaron para poder establecer la comunicación efectiva de cada uno de los elementos que se incluyeron en el programa y así construir la compleja estructura del software.

Igualmente se hizo necesario realizar una base de datos que pudiera recoger y almacenar los datos necesarios para poder llevar a cabo una simulación de plantas de tratamiento de aguas. Para realizar esta acción se estudiaron los parámetros que define a cada operación unitaria involucrada en *AquaBox TA*, sin embargo, hubo características del agua tales como color, turbidez y olor que no fueron incluidas en el programa ya que no existe relación alguna definida entre las operaciones unitarias en el tratamiento de aguas y estos parámetros.

Por otro lado, se incluyeron las sustancias o componentes que en la mayoría de las veces se encuentran presentes en las aguas, como también otras un poco más inusuales. En la figura 9, se puede observar como los elementos

involucrados en el software contienen esta base de datos para poder realizar la simulación.

Se diseñaron los objetos que representan a los equipos y demás elementos que son los que le va a permitir al usuario disponer y realizar la simulación. Las imágenes que definen a los objetos fueron realizados acorde con el esquema del equipo que representaban. En la tabla 9 Se puede observar los objetos que fueron incluidos en *AquaBox TA*:


















**Figura 9.** Sustancias contenidas en la Base de Datos

**Tabla 9.** Equipos incluidos en AquaBox TA.

Objeto	Imagen
Corriente	
Entrada	

Continúa

*Continuación*

Salida	
Separador	
Unión	
Bomba	
Reciclo	
Desbaste	
Desarenador	
Aireación	
Mezclador Rápido Mecánico	
Mezclador Rápido Hidráulico	
Floculador Hidráulico Horizontal	
Floculador Hidráulico Vertical	
Floculador Mecánico	
Sedimentador Rectangular	
Filtración Lenta	
Filtración Rápida	
Ablandamiento	

Todos estos equipos aparecen en el programa en unas “fichas” (figura 10) que se han llamado *General*, *Físico* y *Químico* para proporcionarle al usuario una mayor facilidad al momento de desee utilizar un equipo y pueda reconocerlo rápidamente por medio de la imagen que representa en el software.



Figura 10. Ficha de Equipos

El software *AquaBox TA* contiene los módulos de cálculo de cada equipo y elemento que permiten diseñar y simular plantas de tratamiento de aguas y obtener resultados de manera rápida y efectiva. Cada equipo posee un módulo de cálculo donde se realizan los cómputos pertinentes a este objeto. En la figura 11 puede apreciarse como es parte de la estructura de los cálculos realizados.

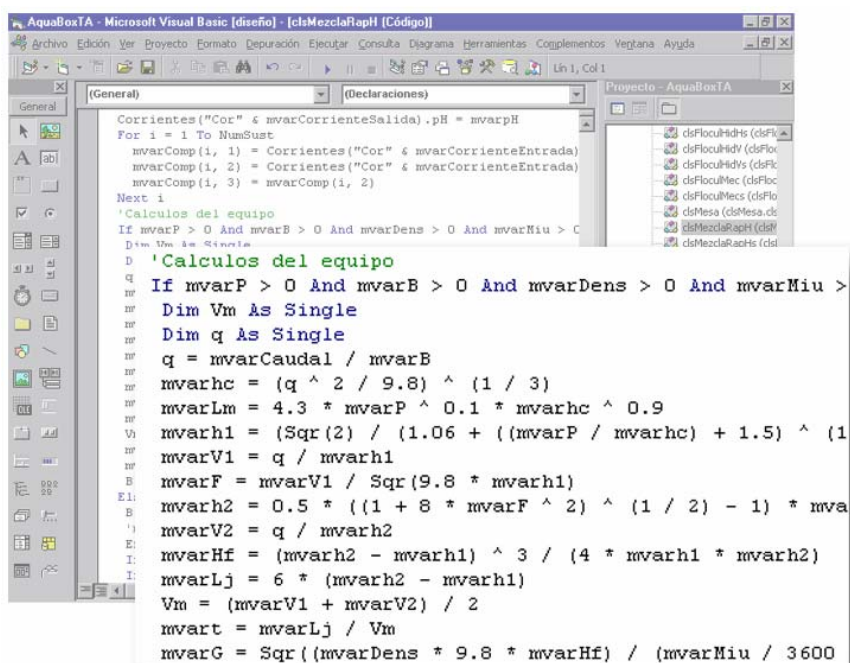
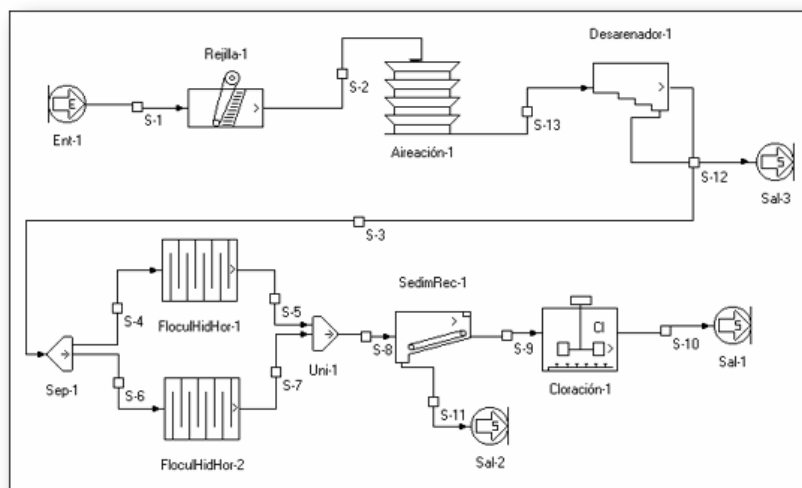


Figura 11. Módulos de Cálculo

Por otro lado, *AquaBox TA* permite diseñar plantas de tratamiento de aguas utilizando diferentes combinaciones de las operaciones unitarias disponibles en él, sin embargo, también es posible estudiar estas operaciones individualmente.

Un ejemplo de alguna de las muchas configuraciones que es factible realizar, se muestra en la figura 12 :



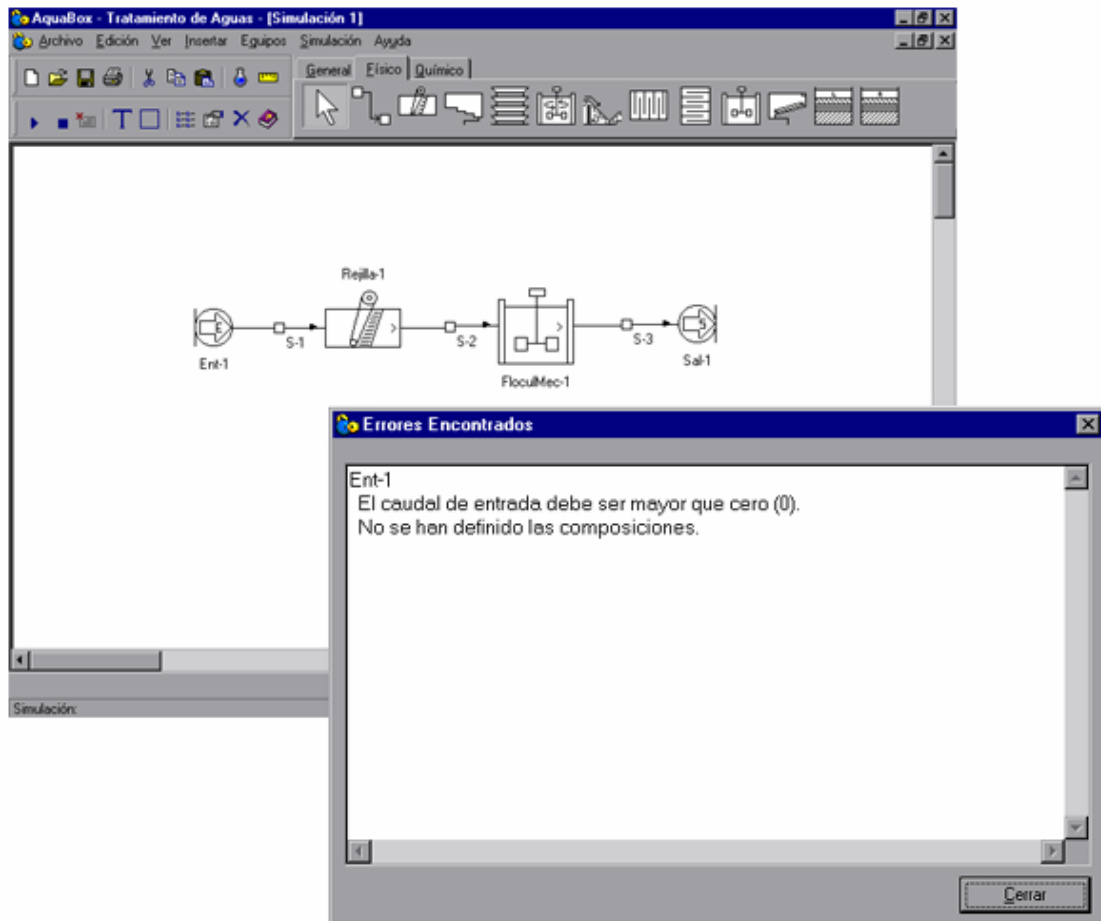
**Figura 12.** Posible diagrama en *AquaBox TA*

Una de las características más importantes del programa, es la capacidad de este de reconocer los errores que puede haber cometido el usuario al tratar de realizar una simulación. Este es una de las virtudes más importantes de *AquaBox TA*, ya que de esta manera se facilita el uso a usuarios que no sean expertos en el tratamiento de aguas, inclusive proporciona la flexibilidad de ser operado por alguien que desee adentrarse al tema y de esta forma contribuir de una forma fácil y agradable con el aprendizaje del mismo. En la figura 13 se muestra la configuración de una pequeña planta donde en la entrada del proceso falta definir el caudal y las composiciones y donde *AquaBox TA*, al tratar de ejecutar la simulación, en su ventana de *Errores* le avisa al usuario el tipo de error y su localización del problema.

Es importante que el usuario sepa un poco sobre el orden lógico que debe tener una planta de tratamiento de aguas ya que, aunque *AquaBox TA* puede

orientar a la elaboración correcta de un diagrama de flujo, no puede presentar recomendaciones acerca de la ubicación que debe tener los equipos en la planta que se desarrolla con el software.

Todo los pasos necesarios que se realizan para llevar a cabo una simulación tiene como objetivo fundamental producir unos resultados. Sin duda alguna, los resultados finales representan los valores esenciales y necesarios para que un software de simulación tenga sentido, además de que deben estar lo más cercano posible a los valores que se obtienen en la realidad. *AquaBox TA* no escapa de esta realidad y muestra resultados que fueron validados con criterios y parámetros de diseño generalmente utilizados en operaciones unitarias de plantas reales de tratamiento de aguas y reflejados en la bibliografía.



**Figura 13.** Ventana de errores

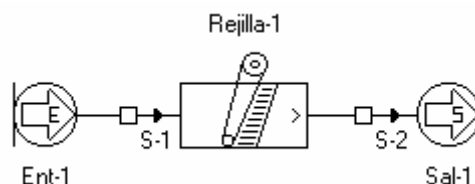


Cada equipo incluido en el programa arroja resultados acerca de sus dimensiones, parámetros de operación y de diseño. A continuación se analizará y discutirá los resultados de cada una de las operaciones unitarias que fueron incluidas en una simulación de una planta tipo en *AquaBox TA* y que posteriormente se comparará con datos de plantas existentes en la realidad.

### Desbaste

Según Degrémont (1973), se recomienda una velocidad de flujo antes de llegar a las rejillas que varía entre los 0.3 y 1 m/s. Por otro lado, para este proceso son utilizados distintos tipos de barras, como pueden ser circulares, rectangulares, formas de lágrimas, etc, y la separación entra ellas también refleja el tipo de desbaste (fino de 3 a 10 mm, medio de 10 a 25 mm o predesbaste de 50 a 100mm) que se quiere realizar. El mismo autor recomienda una velocidad comprendida entra los barrotes que varíe entre 0,3 y 0.6 m/s, pudiendo llegarse hasta un intervalo entre 1,20 y 1,40 m/s para caudales máximos. Finalmente, en tratamiento de aguas potables, las rejas crean un pérdida de energía comprendida en un rango entre 0.05 y 0.15 m hasta 800 mm como máximo.

Con la finalidad de verificar estos rangos, se construyó sobre la mesa de dibujo del programa de diseño y simulación *AquaBox TA* el diagrama de flujo que puede observarse en la figura 14 el cual contiene los elementos entrada, desbaste y salida y fue construido como se explica en el manual del usuario contenido en el anexo A



**Figura 14.** Diagrama de flujo del ejemplo Desbaste

Para el diagrama de flujo anterior se declararon los parámetros de diseño necesarios para ejecutar la simulación. De todos los valores introducidos para cada elemento involucrado, los más relevantes se muestran a continuación:

*Entrada:*

Caudal Afluyente: 100 L/s

*Desbaste:*

Flujo antes de llegar a las rejillas: 0,4 m/s  
 Ancho de las barras: 6 mm  
 Profundidad del canal: 0,5 m  
 Tipo de barra: circular  
 Inclinación de las barras: 30°

El flujo escogido antes de llegar a las rejillas es importante que se mantenga dentro de los rangos recomendados ya que de esta manera se evita la sedimentación de las partículas en los canales.

Los resultados más importantes obtenidos, se encuentran reflejados en la tabla 10, donde son comparados con los rangos típicos de diseño que han sido resultado de la evaluación de distintas plantas reales:

**Tabla 10.** Resultados obtenidos para el ejemplo Desbaste

	Velocidad a través de las barras (m/s)	Espaciamiento entre las barras (mm)	Pérdida de energía a través de las barras (mm) (máximo)
<i>Diseños Típicos</i>	0.3-0.6	25-75	800
<i>AquaBox TA</i>	0.45	40	0.64
<i>Desviación (%)</i>	0	0	0

Básicamente, el valor tan bajo obtenido para la pérdida de energía a través de las barras, se debe a la poca velocidad que lleva el flujo cuando pasa a través de estas.

Adicionalmente, también fue calculado la velocidad del flujo a través de las barras y la pérdida de energía a través de estas cuando existe un 50% de taponamiento en las rejillas. Para esta condición, la velocidad del flujo calculada por *AquaBox TA* aumentó a 0.90 m/s debido a la resistencia al paso del flujo producido por distintos materiales como pueden ser ramas, hojas, piedras, etc, que puedan depositarse en las rejillas. Igualmente, como era de esperarse, la pérdida de energía en las barras debido al 50% de taponamiento también aumentó, obteniéndose un valor de 3.33 mm, sin embargo, este valor es lo suficientemente bajo en comparación con el valor máximo de 800 mm que se recomienda en la operación de desbaste.

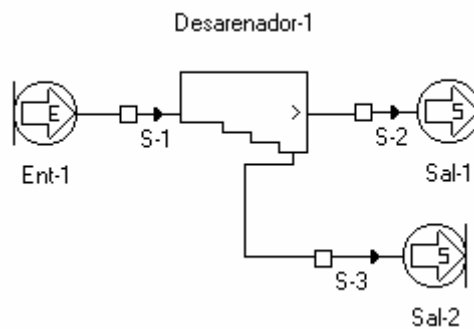
Como podemos observar, los resultados obtenidos por *AquaBox TA* son satisfactorios ya que se encuentran dentro de los rangos típicos de diseño. Estos resultados son comunes para rejillas de limpieza manual y generalmente debe ser colocado otro canal alternativo para cuando se requiera la remoción de los materiales atrapados en este proceso.

### Desarenador

En el desarenador se tiene como parámetro de diseño la velocidad de flujo, la profundidad del canal y la velocidad de sedimentación de la partícula, la cual nos indica que tipo de material (por ejemplo arena) queremos eliminar en mayor grado del agua cruda, este parámetro afecta directamente a la longitud del canal y al tiempo de retención (45 a 90 s). La velocidad de flujo es un parámetro muy importante, ya que esta debe ser fijada de tal manera que permita el paso de la materia orgánica y de los sólidos en suspensión, pero evite el arrastre de arena, este parámetro debe estar en un rango de diseño de 0.2 a 0.4 m/s. La profundidad del canal permite establecer las características finales del desarenador (ancho,

longitud del canal y tiempo de retención), siendo el rango típico de diseño de 1 a 4 m. De igual manera CEPIS (1992) recomienda que la relación L/H debe estar entre 10 y 20.

Con la finalidad de verificar estos rangos, se construyó sobre la mesa de dibujo del programa de diseño y simulación *AquaBox TA* el diagrama de flujo que puede observarse en la figura 15 el cual contiene los elementos entrada, Desarenador y salida:



**Figura 15.** Diagrama de flujo de ejemplo Desarenador

Para el diagrama de flujo anterior se declararon los parámetros de diseño necesarios para ejecutar la simulación. De todos los valores introducidos para cada elemento involucrado, los más relevantes se muestran a continuación:

*Entrada:*

Caudal Afluyente:	100 L/s
Sólidos Suspendidos:	60 mg/L
Sólidos Totales:	200 mg/L

*Desarenador:*

Velocidad de flujo:	0,2 m/s
Profundidad del canal:	1 m
Tipo de partícula:	Arena gruesa
Cantidad de arena a remover	50 ppm

En el caso en estudio se desea la eliminación de partículas denominadas *arena gruesa*, cuya velocidad de sedimentación es de 0.042 m/s. Por otro lado, la profundidad del canal que se escogió fue hecha con la finalidad de facilitar la limpieza del mismo y obtener un canal de dimensiones proporcionales.

A continuación, en la tabla 11, se compara los resultados obtenidos por el simulador con los recomendados por CEPIS (1992):

**Tabla 11.** *Resultados obtenidos para el ejemplo Desarenador*

	Tiempo de Retención (seg)	Relación L/H
<i>Rango Típico</i>	45-90	10-20
<i>AquaBox TA</i>	40.47	12.14
<i>Desviación (%)</i>	10.06	0

Aunque el tiempo de retención se desvíe un poco de el rango típico de diseño, resulta favorable que la sedimentación de las partículas suceda en un tiempo menor al previsto.

Básicamente, el tiempo de retención va a depender del tipo de partícula que se desee remover ya que en la medida de que este tenga un diámetro mayor o menor, tardará menor o mayor tiempo respectivamente en llegar al fondo del desarenador. De igual manera, el tipo de partícula va a incidir directamente en las dimensiones del equipo ya que mientras más tarde esta en tocar fondo, más longitud necesitará la unidad para poder llevar a cabo con éxito la sedimentación de la partícula. Sin embargo, se debe jugar con la velocidad de flujo que debe tener un desarenador para así poder mantener las dimensiones del equipo en función del tamaño de partícula de manera lógica.

A continuación se presenta la tabla 12 donde se estudió la influencia del tamaño de partículas sobre el tiempo de retención y las dimensiones que presenta el equipo. Las condiciones del flujo se mantuvieron, así como también la profundidad del desarenador:

**Tabla 12.** *Resultados obtenidos para distintos tipos de partículas*

Tipo de partícula	Tiempo de Retención (seg)	Largo del Desarenador (m)
Grava	1.7	0.51
Arena Gruesa	40.47	12.14
Arena Fina	809.52	242.85
Limo	68825.91	20647.77

Los valores tan altos encontrados en el largo del desarenador para la arena fina y el limo se debe, como se explicó anteriormente, a los altos tiempos de retención que necesitan estas partículas para llegar al fondo de la unidad.

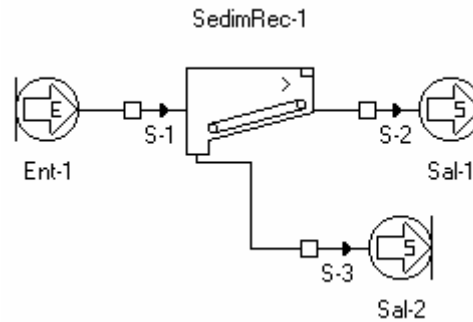
Por otro lado, este tipo de unidad generalmente remueve de 20% a 30% de los sólidos totales, es por ello que el software reportó una disminución de los sólidos totales de un 25%, es decir 50mg/L, con lo cual el afluente saldrá con una concentración en sólidos totales de 150 mg/L. Esta disminución está relacionada directamente con los sólidos suspendidos los cuales tiene una concentración en el afluente de 10 mg/L.

### *Sedimentador Rectangular*

En el sedimentador rectangular los parámetros de diseño son la profundidad del sedimentador y la relación longitud / ancho. Según CEPIS (1992), se recomienda que los sedimentadores rectangulares tengan una profundidad entre 3 a 4.5 m. De igual manera debe existir una relación de longitud con respecto al ancho comprendida entre 2,8 y 6. Para la velocidad horizontal, esta organización mundial recomienda que no es recomendable pasar los 0,55 m/s ya que de esta manera se evita el arrastre de partículas.

Por otro lado, según Romero (1994), en tanques convencionales usados para sedimentación de los sólidos provenientes de la coagulación o ablandamiento de aguas, un tiempo de retención de 2 – 4 horas es generalmente suficiente para preparar al agua para su filtración subsecuente y cuando el agua va a ser usada sin filtración se proveen tiempos de retención de hasta 12 horas.

Con la finalidad de comprobar estos rangos, se construyó sobre la mesa de dibujo del programa de diseño y simulación *AquaBox TA* el diagrama de flujo que puede observarse en la figura 16 el cual contiene los elementos entrada, sedimentador y salida:



**Figura 16.** Diagrama de flujo del ejemplo Sedimentador.

Para el diagrama de flujo anterior se declararon los parámetros de diseño necesarios para ejecutar la simulación. De todos los valores introducidos para cada elemento involucrado, los más relevantes se muestran a continuación:

*Entrada:*

Caudal Afluente:	100 L/s
Sólidos Suspendidos:	60 mg/L
Sólidos Totales:	200 mg/L

*Desarenador:*

Profundidad del sedimentador:	4.5 m
Relación Longitud/Ancho:	3

Para la simulación realizada con *AquaBox TA* se obtuvo como resultado un sedimentador de 9.8 m de ancho, 29.4 m de longitud.

En la tabla 13, se muestra los resultados obtenidos para la simulación realizada con *AquaBox TA*:

**Tabla 13.** Resultados obtenidos para el Sedimentador Rectangular

	Tiempo de Retención (hr)	Relación Longitud/Ancho	Relación Longitud/Alto	Velocidad Horizontal (m/s)
<i>Diseños Típicos</i>	2-4	2.8-6	6-20	0.55 (máximo)
<i>AquaBox TA</i>	3.59	3	6.52	0.22
<i>Desviación (%)</i>	0	0	0	0

Para el ejemplo del sedimentador anterior, es importante tomar en cuenta el área que este va a tener, ya que si encontramos que esta es muy grande, se recomienda colocar otros sedimentadores en paralelo para así facilitar entre otras cosas la remoción de lodos. Un sedimentador típico puede verse en la figura 17, donde se puede apreciar su sencillez y como consecuencia el bajo costo en construcción y mantenimiento que este representa.

Para el sedimentador rectangular con estas dimensiones, el programa de simulación reportó una reducción de 67.27% de los sólidos sedimentables. Ahora bien, si el caudal a tratar es 100 L/s y la cantidad de sólidos sedimentables es de 60 mg/L, tendremos una cantidad total de estos sólidos a la entrada de 6000 mg/s y con el porcentaje de remoción de estos encontrado en el software, se tiene a la salida del equipo 1963 mg/s (1.96 Kg/s) de sólidos sedimentables. De esta manera el programa reporta una cantidad de lodo generado de 4.036 Kg/s.

**Figura 17.** Sedimentador convencional de forma rectangular y flujo horizontal [CEPIS (2000)].

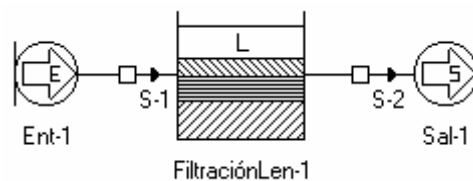


### Filtración Lenta

Arboleda (1969), indica que la velocidad de filtración se encuentra generalmente en un rango que va desde los 0.0081 cm/s hasta 0.0162 cm/s. Igualmente recomienda que la profundidad del lecho filtrante tenga de 90 a 110 cm de arena y aproximadamente 30 cm de grava. Por otro lado, el autor indica que este tipo de filtro utiliza generalmente como drenaje tuberías de gres o cemento perforada y que a pérdida de carga se ubica generalmente entre 0.16 m hasta 1.20 m como máximo para que la unidad pueda tener un buen desempeño.

CEPIS (1992) por su parte, recomienda bordes libres que se encuentren entre 0.20 y 0.30 m, una capa de agua sobre el lecho filtrante que este en un rango de 1.0 a 1.5 m, altura del lecho filtrante en un rango de 0.80 a 1.0 m, una altura de la capa soporte que va de 0.1 a 0.3 m y una altura del drenaje que vaya de 0.1 a 0.25 m. De igual manera recomienda que la granulometría del lecho se encuentre de 0.15 a 0.35 mm y que el coeficiente de uniformidad (CU) se halle en un rango de 1.8 a 2.0 para un buen desempeño del filtro.

Con la finalidad de comprobar estos rangos, se construyó sobre la mesa de dibujo del programa de diseño y simulación *AquaBox TA* el diagrama de flujo que puede observarse en la figura 18 el cual contiene los elementos entrada, filtración lenta y salida:



**Figura18.** Diagrama de flujo del ejemplo Filtración Lenta.

Para el diagrama de flujo anterior se declararon los parámetros de diseño necesarios para ejecutar la simulación. De todos los valores introducidos para cada elemento involucrado, los más relevantes se muestran a continuación:

*Entrada:*

Caudal Afluente:	100 L/s
Sólidos Suspendidos:	60 mg/L
Sólidos Totales:	200 mg/L

*Filtración Lenta:*

Velocidad de filtración:	0.0108 cm/s
Diámetro característico de los granos:	0.35 mm
Tamaño de partícula para 60% que pasa:	0.595 mm
Tamaño de partícula para 10% que pasa:	0.297 mm
Borde libre:	0.25 m
Capa de agua:	1 m
Profundidad del lecho:	1 m
Altura de la capa soporte:	0.3 m
Profundidad del fondo colector:	0.5 m

Para los valores suministrados, se obtuvieron los siguientes resultados expresados en la tabla 13:

**Tabla 14.** Resultados obtenidos para la Filtración Lenta

	Número mínimo de unidades	Area de cada Unidad (m <sup>2</sup> )	Pérdida de carga en el lecho (m)	Coefficiente de uniformidad (CU)
<i>Diseños Típicos</i>	2	10-200	0.16-1.20	1.8-2.0
<i>AquaBox TA</i>	4	231.48	0.15	2.0
<i>Desviación (%)</i>	0	15.74	6.25	0

El área de cada unidad encontrada es alta ya que la velocidad de filtración tan baja en cada una de ellas hace que el caudal a tratar de 100 L/s demore más en salir del equipo

Respecto a la variación producida en la pérdida de carga a través del lecho, esta se debe en su mayoría a la baja velocidad de filtración que ocurre en este proceso y también se relaciona en cierto modo con la profundidad del lecho filtrante, sin embargo, este último factor no influye tan significativamente como el primero. En la tabla 14, se puede observar como varía la pérdida de carga en un filtro lento variando la velocidad de filtración y dejando la altura del lecho filtrante fijo y también la influencia que tiene la altura del lecho al ser variada dejando la velocidad de filtración fija:

**Tabla 15.** *Variación de la Pérdida de Carga en el Lecho*

Velocidad de Filtración (cm/s)	Altura del lecho (m)	Pérdida de carga en el lecho (cm)
0.0081	1	11
0.0108	1	15
0.06	1	87
0.0108	0.8	12
0.0108	0.6	9
0.0108	0.5	7.65

El valor hallado para el coeficiente de uniformidad (CU) es satisfactorio respecto al rango establecido para los diseños típicos en filtros lentos.

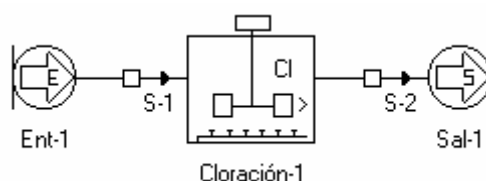
### Cloración

Para la desinfección del agua fue utilizado el proceso de cloración ya que es el más comúnmente utilizado por ser el cloro el desinfectante más económico de todos además de poseer una buena efectividad en la remoción de organismos patógenos.

CEPIS (1992), indica que el hipoclorito de sodio generalmente se consigue a concentraciones cercanas al 13% y el hipoclorito de calcio se consigue en el mercado con concentraciones cercanas al 70%. Por otro lado

indica que el desinfectante requiere de un tiempo de contacto más o menos largo para reaccionar con los distintos organismos presentes en el agua y así ejercer su poder bactericida. De igual manera, es importante tener en cuenta la concentración de cloro residual que se desea permanezca en el agua después de ocurrido el proceso. Esta concentración no debe ser alta pero si suficiente como para protegerla por un tiempo razonable de la posible llegada de nuevos organismos coliformes, sin embargo, debe tenerse cuidado con estas concentraciones finales, ya que si no son respetados los límites, el desinfectante podría impartirle al agua un sabor desagradable. Generalmente se adoptan concentraciones de cloro residual ubicadas de 1 a 2 mg/L.

Se construyó sobre la mesa de dibujo del programa de diseño y simulación *AquaBox TA* el diagrama de flujo que puede observarse en la figura 19 el cual contiene los elementos entrada, cloración y salida:



**Figura19.** Diagrama de flujo del ejemplo Cloración.

Para el diagrama de flujo anterior se declararon los parámetros de diseño necesarios para ejecutar la simulación. De todos los valores introducidos para cada elemento involucrado, los más relevantes se muestran a continuación:

*Entrada:*

Caudal Afluyente: 100 L/s

*Cloración:*

Tiempo de retención: 30 min

Concentración de cloro residual: 1 mg/L

Concentración del hipoclorito de calcio: 70%

Concentración del hipoclorito de sodio: 13%

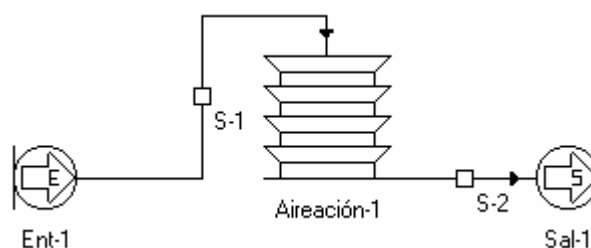
Para los valores anteriormente mencionados se obtienen resultados como la cantidad de cloro requerido para el tratamiento el cual fue de 8.64 Kg/d, la cantidades de hipoclorito de sodio con 6.64 Kg/d y 1.23 Kg/d para el hipoclorito de calcio. Generalmente el uso del hipoclorito de calcio no se hacen en grandes cantidades ya que según CEPIS (1992) tienen un valor mucho más elevado comparado con el cloro común utilizado y comúnmente se les utiliza en plantas con caudales pequeños (menores a 10 L/s).

### Aireación

Para un aireador de bandejas múltiples, Romero (1994) señala que se utilizan de 3 a 9 bandejas por lo general, aunque lo más típico es colocar de 3 a 5.

Según NALCO (1998), la concentración de saturación de oxígeno disuelto (OD) en el agua tiene un valor aproximado de 8,8 mg/L. Generalmente los aireadores pueden bajar la cantidad de CO<sub>2</sub> presente en el agua hasta un mínimo de 4,5 mg/L y va a depender de muchos factores como pueden ser la temperatura, el número de bandeja, la cantidad inicial de CO<sub>2</sub> presente, etc, sin embargo, se pudo apreciar una buena reducción de esta sustancia.

Con la finalidad de comprobar estos rangos, se construyó sobre la mesa de dibujo del programa de diseño y simulación *AquaBox TA* el diagrama de flujo que puede observarse en la figura 20 el cual contiene los elementos entrada, Aireación y salida:



**Figura 20.** Diagrama de flujo del ejemplo aireación.

Para el diagrama de flujo anterior se declararon los parámetros de diseño necesarios para ejecutar la simulación. De todos los valores introducidos para cada elemento involucrado, los más relevantes se muestran a continuación:

*Entrada:*

Caudal Afluente:	100 L/s
Oxígeno:	4 mg/L
Dióxido de carbono:	30 mg/L

*Aireación:*

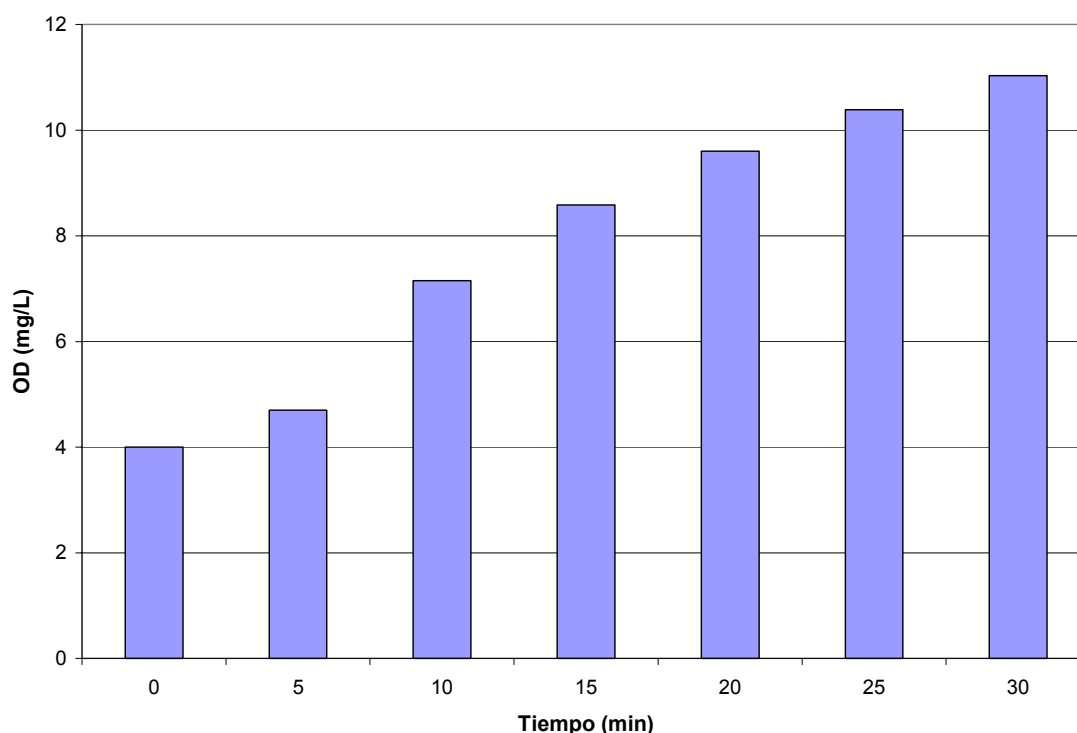
Tiempo de aireación:	30 min
Número de bandejas:	5

En la tabla 15, se muestran los resultados obtenidos para este proceso para los valores mostrados anteriormente:

**Tabla 16.** *Resultados obtenidos para la Aireación*

	Oxígeno Disuelto (mg/L)	Cantidad de CO <sub>2</sub> (mg/L)
<i>Diseños Típicos</i>	8.8 (mínimo)	-
<i>AquaBox TA</i>	11.03	5,98
<i>Desviación (%)</i>	0	0

Es importante al realizar la simulación, tomar en cuenta el tiempo que va a requerir la aireación para que el oxígeno contenido en el agua pueda recobrar sus niveles óptimos en ella y así eliminar el olor desagradable que pueda existir. Por esta razón se utilizó un tiempo de aireación de 30 min para asegurar que el agua no tenga déficit de O<sub>2</sub> que pudieran traer como consecuencia malos olores. En la figura 21 se puede observar como es la ganancia de oxígeno en el agua a medida que se aumenta el tiempo de aireación:



**Figura 21.** Variación del oxígeno a través del tiempo.

### Mezcla Rápida Hidráulica

Arboleda (1992), recomienda para este tipo de mezcladores rápidos un gradiente de velocidad que se encuentre en un rango de 1000 y 2000  $\text{s}^{-1}$  para así obtener una buena efectividad del proceso.

Un valor no menos importante es el número de Froude, ya que según CEPIS (1992), este valor debe hallarse entre 4.5 y 9 para así obtener un resalto estable. En cuanto al tiempo de retención, este debe ser lo suficientemente bajo para así producir efectos instantáneos en el proceso de mezclado, generalmente ocurre en fracciones de segundos.

Con la finalidad de comprobar estos rangos, se construyó sobre la mesa de dibujo del programa de diseño y simulación *AquaBox TA* el diagrama de flujo que puede observarse en la figura 22 el cual contiene los elementos entrada, Mezcla Rápida Hidráulica y salida:



**Figura 22.** Diagrama de flujo del ejemplo Mezcla Rápida Hidráulica

Para el diagrama de flujo anterior se declararon los parámetros de diseño necesarios para ejecutar la simulación. De todos los valores introducidos para cada elemento involucrado, los más relevantes se muestran a continuación:

*Entrada:*

Caudal Afluyente: 100 L/s

*Mezcla Rápida Hidráulica:*

Altura de la pared: 1.2 m

Ancho del canal del vertedero: 0.5 m

Los cálculos realizados en el programa son hechos para el tipo de mezclador rápido en verterderos rectangulares. Este tipo de mezcladores se puede observar en la figura 23, donde se puede apreciar la turbulencia creada cuando el agua cae por gravedad a otro nivel donde deben ser agregados los coagulantes.

Los resultados que se obtuvieron fueron satisfactorios y se muestran en la tabla 16:

**Tabla 17.** Resultados obtenidos para la Mezcla Rápida Hidráulica

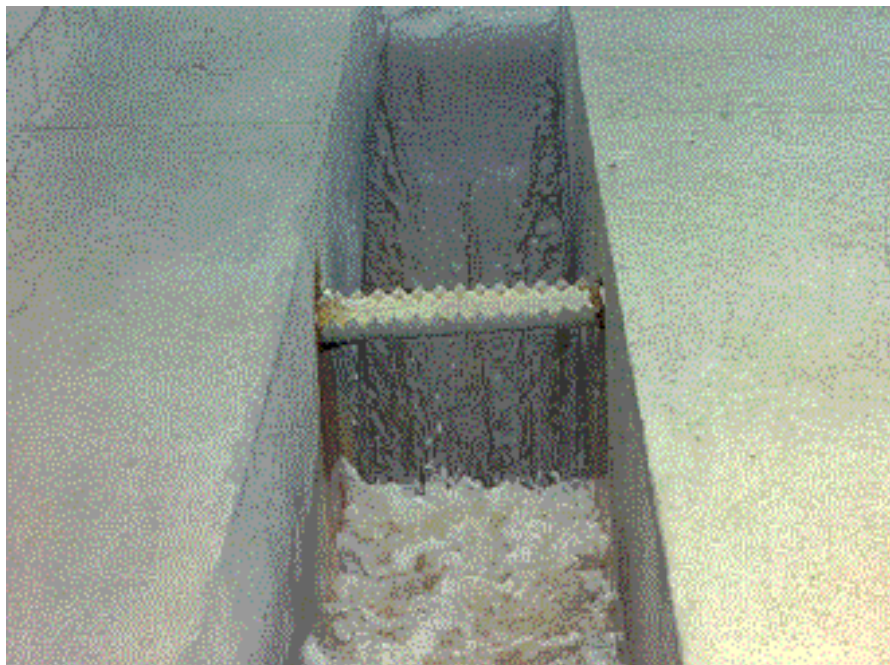
	Gradiente de velocidad ( $s^{-1}$ )	Número de Froude	Tiempo de Retención (seg)	Velocidad en el salto (m/s)
<i>Diseños Típicos</i>	1000-2000	4.5-9	-	-
<i>AquaBox TA</i>	1966.32	4.86	0.86	3.60
<i>Desviación (%)</i>	0	0	-	



Un valor importante de resaltar es la velocidad que debe llevar el agua en la etapa de salto ya que de ella puede depender que exista una buena mezcla entre el agua y los coagulantes agregados. Esta velocidad debe ser alta, ya que cuando el agua llega al final de la etapa del salto, esta debe producir la suficiente turbulencia para que ocurra una mezcla efectiva. La velocidad que arrojó *AquaBox TA* es lo suficientemente alta para producir el efecto deseado ya que la caída del agua al vertedero se produce por caída libre y al chocar a esta velocidad con el piso del vertedero produce una alta turbulencia que permite la mezcla efectiva del agua con los coagulantes que han sido agregados previamente.

Después que el agua llega al final de la etapa del salto, sufre un brusco cambio de dirección y como consecuencia de velocidad, la cual es mucho menor en el tramo inmediato llamado etapa del resalto. La velocidad en esta etapa fue de 0.56 m/s y es natural que haya descendido tanto por las razones anteriormente expuestas.

El tiempo de retención hidráulico hallado mediante la simulación fue menor a 1 seg, lo que nos indica que la unidad cumple el proceso de mezclado de manera muy rápida como debe suceder en cualquier equipo de mezcla rápida.

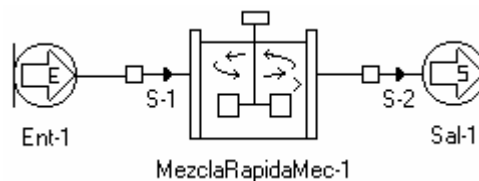


**Figura 23 . Mezclador Hidráulico del tipo vertedero rectangular [CEPIS (2000)].**

### Mezcla Rápida Mecánica

En este equipo, los datos necesarios para la simulación fueron: la relación entre la altura del agua en el tanque y el diámetro del impulsor, la relación entre la altura base-impulsor y el diámetro del impulsor, la cantidad de alambre que se le agregará al agua y el tipo de impulsor a utilizar. Según Romero(1994), la primera relación debe encontrarse entre 2.7 y 3.9 y para la segunda relación se recomienda un rango entre 0.75 y 1.3. Par el tiempo de retención, el mismo autor indica que el tiempo de retención generalmente se halla entre 10 y 90 seg.

Con la finalidad de comprobar estos rangos, se construyó sobre la mesa de dibujo del programa de diseño y simulación *AquaBox TA* el diagrama de flujo que puede observarse en la figura 24 el cual contiene los elementos entrada, Mezcla Rápida Mecánica y salida:



**Figura 24.** Diagrama de flujo del ejemplo Mezcla Rápida Mecánica

Para el diagrama de flujo anterior se declararon los parámetros de diseño necesarios para ejecutar la simulación. De todos los valores introducidos para cada elemento involucrado, los más relevantes se muestran a continuación:

#### *Entrada:*

Caudal Afluyente: 100 L/s

#### *Mezcla Rápida Mecánica:*

Relación altura agua / diámetro del impulsor: 3

Relación altura base-impulsor / diámetro del impulsor: 1

Tipo de impulsor: turbina con 6 aletas planas

Cantidad de alumbre:

50 mg/L

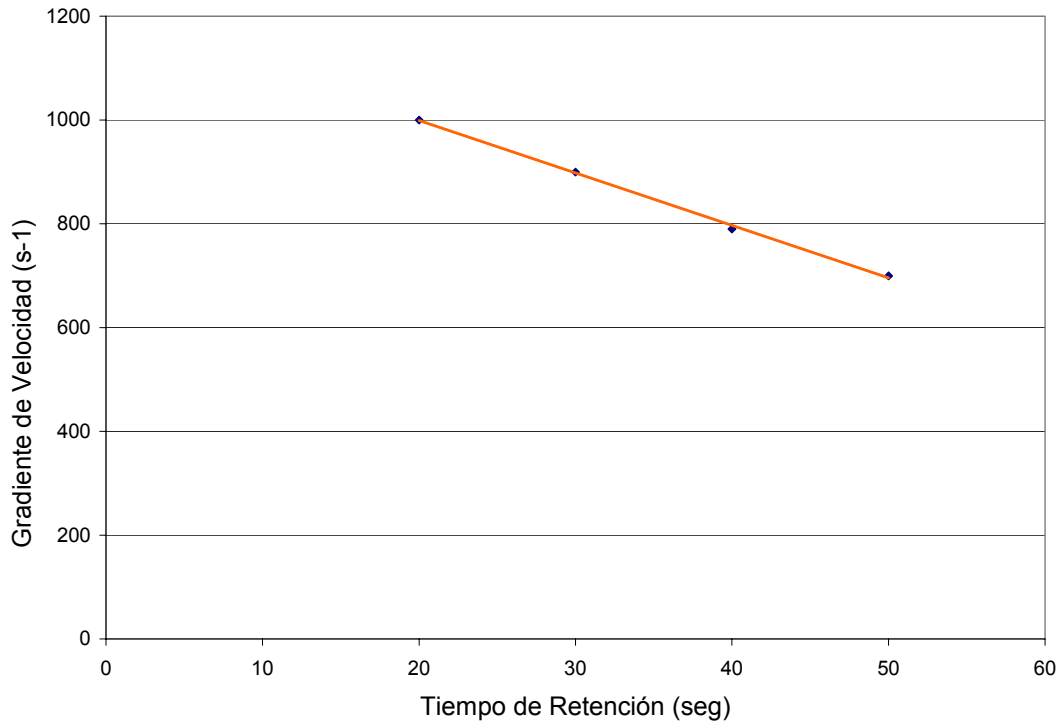
Con los datos anteriormente mencionados, el programa dimensionó totalmente el tanque donde va a ocurrir el proceso de mezcla rápida, incluyendo el espesor de las paredes de este. El software también caracterizó el impulsor que se utilizará en el proceso. Los resultados más importantes pueden apreciarse en la tabla 17:

**Tabla 18.** Resultados obtenidos para la Mezcla Rápida Mecánica

	Tiempo de Retención (seg)	Gradiente de velocidad ( $s^{-1}$ )	Velocidad del impulsor (rpm)
<i>Diseños Típicos</i>	10 - 90	-	-
<i>AquaBox TA</i>	17.49	1115.51	58.01
<i>Desviación (%)</i>	-	-	-

A partir de la tabla 5, se puede obtener una gráfica entre los dos factores que son tiempo de contacto y gradiente de velocidad y de esta manera, como se puede observar en la figura 25, se aprecia que a menor tiempo de contacto, mayor será el gradiente de velocidad necesario para crear una turbulencia efectiva en el tanque. Es por ello que el gradiente de velocidad obtenido por *AquaBox TA* para esta simulación resulta satisfactorio y corresponde aproximadamente con la relación efectuada anteriormente.

También se dimensionaron las paletas usadas por el impulsor, las cuales para el ejemplo estudiado, poseen un largo de 10.88 cm y un alto de 8.70 cm.

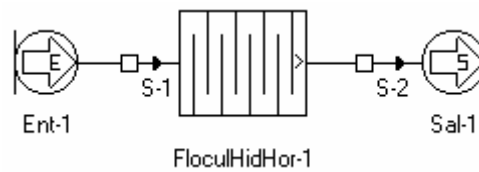


**Figura 25.** *Tiempo de Contacto vs. Gradiente de Velocidad*

### Floculador Hidráulico Horizontal

CEPIS (1992), recomienda velocidades de floculación que oscilan entre los 0.10 y 0.60 m/s. Igualmente recomienda un tiempo de retención ubicado entre 10 y 60 min. Esta organización indica que, para que el tiempo de retención real coincida con el de diseño, la unidad debe tener el mayor número de compartimientos posibles. Por otro lado los gradientes de velocidades pueden variar entre 10 y  $100\text{s}^{-1}$ , sin embargo, el rango que optimiza el proceso varía entre 20 y  $70\text{s}^{-1}$ .

Con la finalidad de comprobar estos rangos, se construyó sobre la mesa de dibujo del programa de diseño y simulación *AquaBox TA* el diagrama de flujo que puede observarse en la figura 26 el cual contiene los elementos entrada, Floculador Hidráulico Horizontal y salida:



**Figura 26.** Diagrama de flujo del ejemplo Floculador Hidráulico Horizontal

Para el diagrama de flujo anterior se declararon los parámetros de diseño necesarios para ejecutar la simulación. De todos los valores introducidos para cada elemento involucrado, los más relevantes se muestran a continuación:

*Entrada:*

Caudal Afluyente: 100 L/s

*Folculador Hidráulico Horizontal:*

Velocidad del fluido: 0.2 m/s

Tiempo de retención: 30 min

Los resultados obtenidos por AquaBox y que son comparados con los rangos típicos de diseño, son mostrados en la tabla 17:

**Tabla 19.** Resultados obtenidos para la Floculación Hidráulica Horizontal

	Tiempo de Retención (min)	Gradiente de velocidad ( $s^{-1}$ )	Número de Compartimientos
<i>Diseños Típicos</i>	10-60	20-70	-
<i>AquaBox TA</i>	30	62	684
<i>Desviación (%)</i>	-	0	-

Uno de los resultados más importantes arrojado por el programa, fue el número de compartimientos, ya que sólo para el primer canal del floculador se obtuvieron 114 canales, Con una longitud total recorrida por el agua de 360 m y

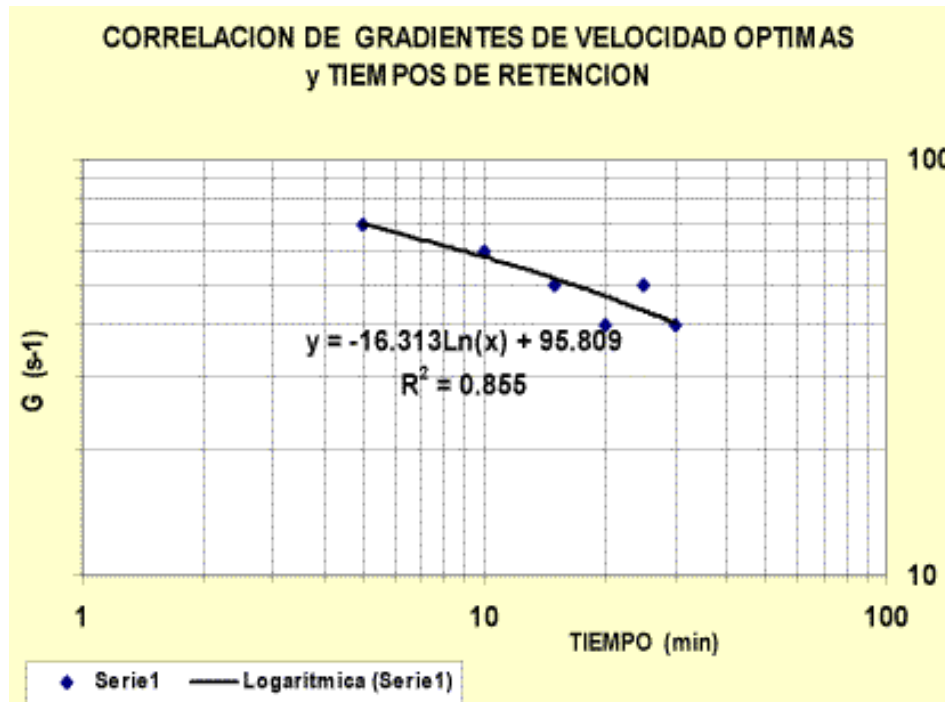
una longitud del primer canal de 57.68 m se obtiene aproximadamente un floculador que consta de 6 tramos aproximadamente. En la figura 27, se puede apreciar los numerosos compartimientos y tramos que puede tener un floculador de pantallas de flujo horizontal.

De igual manera, el resultado obtenido para el gradiente de velocidad, fue satisfactorio, sin embargo, se recomienda determinar a nivel de laboratorio, mediante pruebas de jarras, los parámetros que optimizan el proceso: gradientes de velocidad y tiempos de retención mediante una curva como la que se muestra en la figura 28.



**Figura 27.** *Floculador de pantallas de flujo horizontal [CEPIS (2000)].*





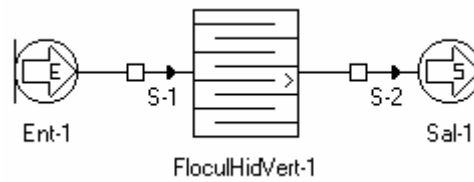
**Figura 28.** Gradientes de velocidad y tiempos de retención que optimizan el proceso[CEPIS (2000)].

Otras dos variaciones contempladas en *AquaBox TA* son los llamados Floculador Hidráulico Vertical y el Floculador del tipo mecánico. A continuación se estudiarán ambos tipos de floculadores .

### Floculador Hidráulico Vertical

Igualmente para este tipo de floculador, CEPIS (1992), recomienda los mismos parámetros señalados para el floculador de tipo horizontal. Tambien recomienda que la profundidad de la unidad se encuentre ubicado entre 3 y 4 m.

Con la finalidad de comprobar estos rangos, se construyó sobre la mesa de dibujo del programa de diseño y simulación *AquaBox TA* el diagrama de flujo que puede observarse en la figura 29 el cual contiene los elementos entrada, Floculador Hidráulico Vertical y salida:



**Figura 29.** Diagrama de flujo del ejemplo Floculador Hidráulico Vertical.

Para el diagrama de flujo anterior se declararon los parámetros de diseño necesarios para ejecutar la simulación. De todos los valores introducidos para cada elemento involucrado, los más relevantes se muestran a continuación:

*Entrada:*

Caudal Afluyente: 100 L/s

*Folculador Hidráulico Vertical:*

Tiempo de floculación: 30 min

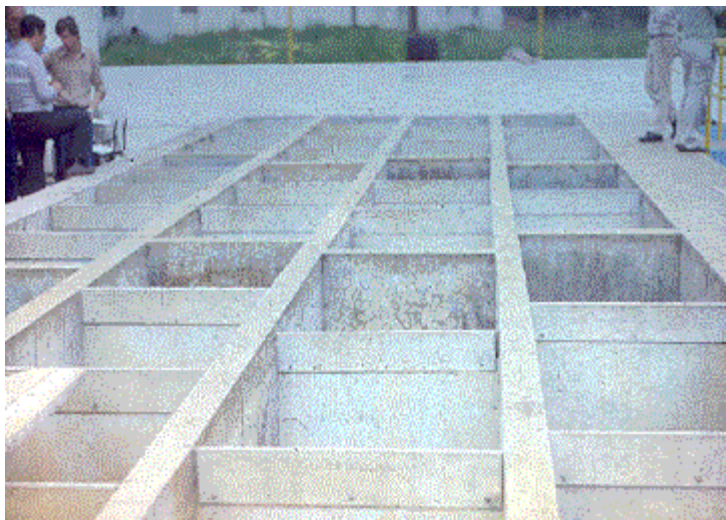
Gradiente de velocidad en el primer tramo:  $20 \text{ s}^{-1}$

Longitud de la unidad: 10 m

Profundidad de la unidad: 4 m

*AquaBox TA* proporciona valores tales como el número de compartimientos entre pantallas la pérdida de carga total en el primer tramo, el ancho de la unidad entre otros. En la figura 30, se aprecia la estructura que posee este tipo de floculadores:





**Figura 30.** *Floculador de pantallas de flujo vertical* [CEPIS (2000)].

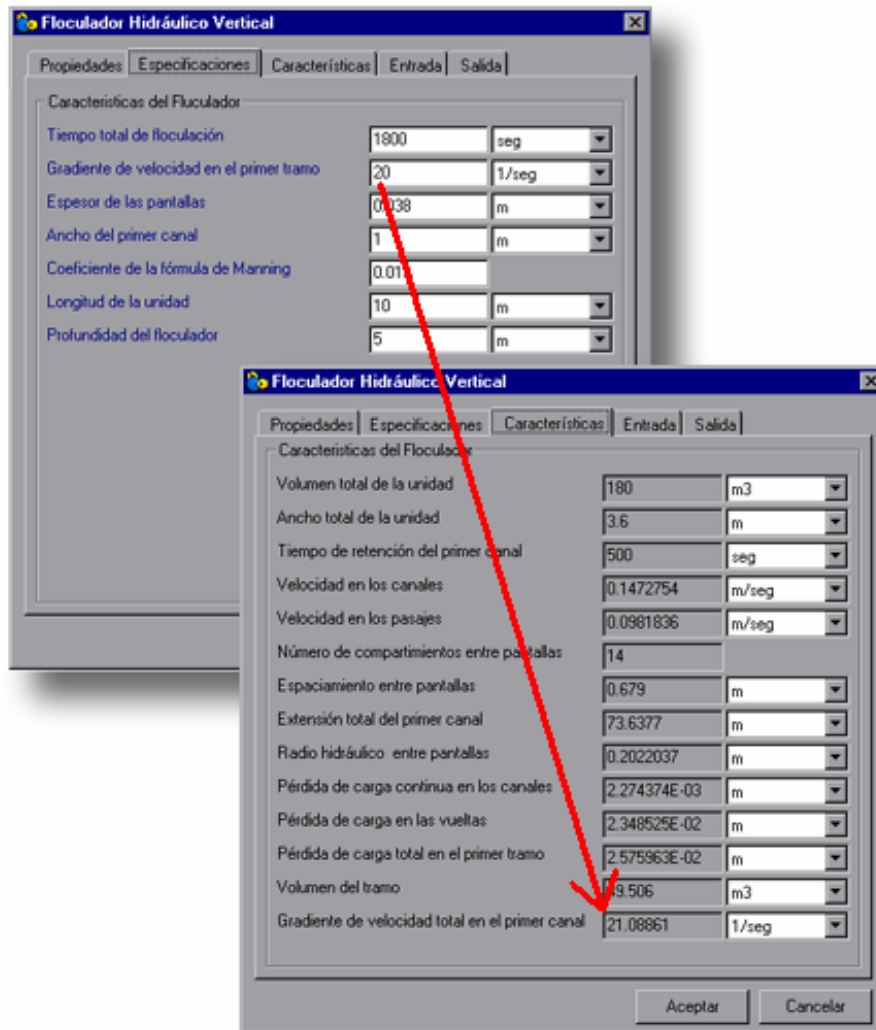
Por otro lado resulta curioso que el usuario deba introducir valores que definen en parte las dimensiones del equipo y el gradiente de velocidad en el primer canal, sin embargo, esto tiene su razón de ser así. El programa con estos datos comienza a hacer los cálculos necesarios y desarrollar valores que se encuentran relacionados entre ellos. El último valor que se reporta es la comprobación del gradiente de velocidad que introdujo el usuario y deben coincidir aproximadamente. Si los valores no coinciden, el usuario deberá introducir un nuevo valor para el gradiente de velocidad hasta que coincida con el gradiente de la comprobación. Es así como al ir variando este gradiente, van cambiando otros valores tales como el número de compartimientos entre pantallas y el espaciamiento entre pantallas entre otros.

Es por ello que el gradiente de velocidad introducido fue de  $20 \text{ s}^{-1}$  (ver figura 31), ya que la diferencia con la comprobación de este arrojado por *AquaBox TA* fue  $20.83 \text{ s}^{-1}$  y obteniéndose con él 13 compartimientos para el primer tramo y un espaciamiento entre ellos de 0.73 m. El ancho total de la unidad es de 4.5 m.

Los resultados obtenidos por AquaBox y que son comparados con los rangos típicos de diseño, son mostrados en la tabla 18:

**Tabla 20.** Resultados obtenidos para la Floculación Hidráulica Vertical

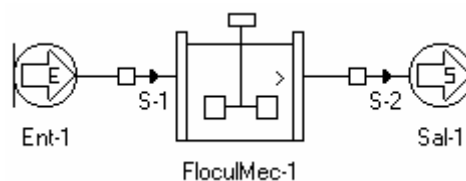
	Tiempo de Retención (min)	Gradiente de velocidad ( $s^{-1}$ )
<i>Diseños Típicos</i>	10-60	20-70
<i>AquaBox TA</i>	30	20
<i>Desviación (%)</i>	-	0

**Figura 31.** Comparación de los gradientes de velocidad para el Floculador Hidráulico Vertical

### Floculador Mecánico

El tiempo de contacto recomendado por AWWA se debe hallar entre 20 y 60 min y de igual manera recomienda valores de gradientes de velocidad ubicados entre 5 y 100s<sup>1</sup>. Como dato importante, esta organización indica que la velocidad tangencial en las paletas debe estar entre 0.03 y 0.9 m/s para un buen desempeño en la floculación.

Con la finalidad de comprobar estos rangos, se construyó sobre la mesa de dibujo del programa de diseño y simulación *AquaBox TA* el diagrama de flujo que puede observarse en la figura 32 el cual contiene los elementos entrada, Floculador Mecánico y salida:



**Figura 32.** Diagrama de flujo del ejemplo Floculador Mecánico

Para el diagrama de flujo anterior se declararon los parámetros de diseño necesarios para ejecutar la simulación. En este equipo es necesario definir el gradiente de velocidad a utilizar en el proceso, el tiempo de contacto para poder llevar a cabo la floculación y ciertas relaciones que se cumplen generalmente entre las características del tanque y el diámetro del impulsor para que el proceso se pueda llevar a cabo efectivamente. De todos los valores introducidos para cada elemento involucrado, los más relevantes se muestran a continuación:

#### *Entrada:*

Caudal Afluyente: 100 L/s

*Folculador Mecánico:*

Tiempo de floculación:	30 min
Gradiente de velocidad:	$10 \text{ s}^{-1}$
Tipo de impulsor:	turbina con 6 aletas planas

Los resultados obtenidos por AquaBox son mostrados en la tabla 19:

**Tabla 21.** *Resultados obtenidos para la Floculación Mecánica*

	Tiempo de Retención (min)	Gradiente de velocidad ( $\text{s}^{-1}$ )	Velocidad tangencial en las paletas (m/s)
<i>Diseños Típicos</i>	20-60	5-100	0.03-0.9
<i>AquaBox TA</i>	30	10	0.72
<i>Desviación (%)</i>	-	-	0

Para los valores dados se obtuvo un completo dimensionamiento del tanque.

La velocidad que debe tener el impulsor para que la floculación se realice satisfactoriamente se debe revisar muy detenidamente a la hora de realizar un diseño y no salirse de los parámetros recomendados, con la finalidad de no causar daños al floc que se ha formado por una alta velocidad en el impulsor ni tampoco una velocidad baja que no permita la compactación suficiente para que suceda una floculación completa.

*Ablandamiento*

En el caso de ablandamiento hay que definir las cantidades de magnesio y calcio presentes en el agua bajo la forma de  $\text{MgSO}_4$  y  $\text{CaSO}_4$  respectivamente. También es necesario llenar los datos acerca de la cantidad de carbonatos y bicarbonatos que se encuentran en el líquido.

En nuestro país las aguas no contienen gran cantidad de dureza total en comparación con la cantidad máxima permisible que es de 500 mg/L de  $\text{CaCO}_3$  e inclusive están por debajo del valor máximo deseable que 250 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ , por lo que la mayoría de las plantas no aplican este proceso. En la tabla 20, se puede observar la dureza total existente para distintas plantas de tratamiento de agua ubicadas en Venezuela:

**Tabla 22.** *Contenido de la Dureza Total en el agua en distintas plantas en Venezuela [Hidrocapital].*

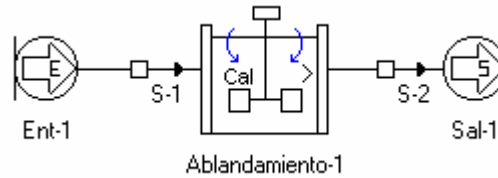
PLANTA	AGUA CRUDA (mg/L $\text{CaCO}_3$ )	AGUA TRATADA (mg/L $\text{CaCO}_3$ )
La Guarita	208	152
Colonia Tovar	132	130
Pie de Cerro (La Victoria-Aragua)	110	100
Camatagua (Aragua)	102	102
La Morena (San Carlos-Cojedes)	158	144
Lucio Baldó Soules (Boquerón)	104	88
Alejo Zuloaga (Valencia)	95	92
Naiguatá	30	30
Picure (Catia La Mar)	90	71

Ninguna de las plantas contempladas en la tabla anterior, utilizan el proceso de ablandamiento en el tratamiento de aguas ya que no se justifica el uso de este tratamiento para aguas tan pobres en contenido de dureza total.

Sin embargo, *AquaBox TA* ha contemplado este proceso y calcula por medio de las reacciones químicas que ocurren en él, las cantidades de cal y carbonato sódico necesario para poder reducir la dureza total.

Con la finalidad estudiar el comportamiento de la operación llamada ablandamiento, se construyó sobre la mesa de dibujo del programa de diseño y

simulación *AquaBox TA* el diagrama de flujo que puede observarse en la figura 33 el cual contiene los elementos entrada, Ablandamiento y salida:



**Figura 33.** Diagrama de flujo del ejemplo Floculador Mecánico.

Para el diagrama de flujo anterior se declararon los parámetros de diseño necesarios para ejecutar la simulación:

*Entrada:*

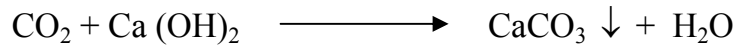
Caudal Afluyente: 100 L/s

*Ablandamiento:*

Bicarbonato de Calcio:	70 mg/L
Bicarbonato de Magnesio::	67 mg/L
Calcio (como $\text{CaSO}_4$ ):	56 mg/L
Magnesio (como $\text{CaSO}_4$ ):	48 mg/L
Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ):	20 mg/L
Dureza Total:	104 mg/L

Par poder tener conocimiento de las cantidades de cal y soda que se requerirían para poder llevar a cabo satisfactoriamente esta operación, se recurrió a las ecuaciones químicas que intervenían en este proceso y que a continuación se estudiarán con detalle cada una de ellas:

1. La cal, si es viva, se hidrata al agregarla y luego reacciona, primero con el CO<sub>2</sub> presente en le agua:



Estas ecuaciones las resolveremos por medio de relaciones estequiométricas, así tenemos que los moles de CO<sub>2</sub> son iguales a los moles de Ca (OH)<sub>2</sub> y conociendo los pesos moleculares de cada compuesto se puede saber la cantidad en peso de cada uno de los compuestos que intervienen en la reacción:

$$n \text{ CO}_2 = n \text{ Ca (OH)}_2 \text{ y sabemos que } n = \frac{g}{PM}$$

Donde:

n: moles

g: gramos

PM: Peso molecular

De esta manera resulta que:

$$\frac{g\text{CO}_2}{PM\text{CO}_2} = \frac{g\text{Ca(OH)}_2}{PM\text{Ca(OH)}_2}$$

Y despejando los gramos de Ca (OH)<sub>2</sub> obtenemos la siguiente expresión:

$$\text{Ca(OH)}_2 = \frac{g\text{CO}_2 * PM\text{Ca(OH)}_2}{PM\text{CO}_2}$$

que en forma numérica está representada de la siguiente forma y de donde se obtiene la cantidad de cal viva necesaria para que reaccione con los 20 mg/L de CO<sub>2</sub> ya existentes en el agua:

$$\text{Ca(OH)}_2 = \frac{20\text{mg} * 74.08\text{g/mol}}{44\text{g/mol}} = 33.67\text{mg}$$

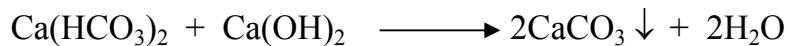
y para hallar la cantidad de CaCO<sub>3</sub> que precipita se procede de la siguiente manera:

$$g\text{CaCO}_3 = \frac{g\text{Ca(OH)}_2 * PM\text{CaCO}_3}{PM\text{Ca(OH)}_2}$$

$$CaCO_3 = \frac{33.67mg * 100g / mol}{74.08g / mol} = 45.45mg$$

De la misma manera se procede para las siguientes reacciones que ocurren en el proceso de ablandamiento de donde se obtienen las siguientes cantidades:

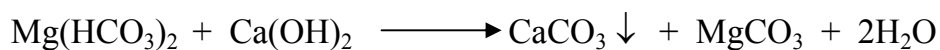
2. Luego reacciona con los bicarbonatos de calcio y magnesio:



$Ca(HCO_3)_2$  = 70 mg (ya existentes en el agua)

$Ca(OH)_2$  = 31.99 mg

$CaCO_3$  = 21.59 mg



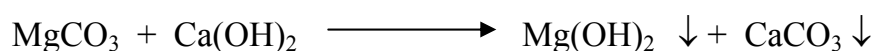
$Mg(HCO_3)_2$  = 67 mg (ya existentes en el agua)

$Ca(OH)_2$  = 33.92 mg

$CaCO_3$  = 45.79 mg

$MgCO_3$  = 38.60 mg

3. El carbonato de magnesio formado (cuando existe un contenido apreciable de magnesio) reacciona con exceso de cal en la forma que sigue:

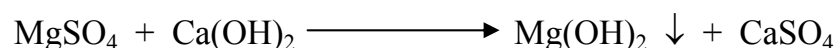


$MgCO_3$  = 38.60 mg

$Ca(OH)_2$  = 33.91 mg

$CaCO_3$  = 45.77 mg

4. A su vez, el sulfato de magnesio con la cal:



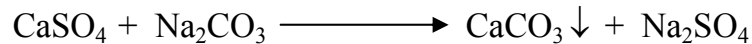
$MgSO_4$  = 56 mg (ya existentes en el agua)

$Ca(OH)_2$  = 34.46 mg

$CaSO_4$  = 63.33 mg



Y el sulfato de calcio con el carbonato sódico:



$\text{CaSO}_4$  = 63.33 mg (formados) + 48 mg (ya existentes en el agua)

$\text{Na}_2\text{CO}_3$  = 86.66 mg

$\text{CaCO}_3$  = 35.24 mg

De la manera que se precedió anteriormente, se puede calcular la cantidad cal y soda que debe ser agregada al proceso para producir el ablandamiento del agua:

Cal necesaria en el proceso =  $\sum$  cal necesaria en cada reacción

así tenemos que:

Cal necesaria en el proceso = 167.95 mg/L

Soda necesaria en el proceso = 86.66 mg/L

Por otro lado también se puede obtener la cantidad de lodo generado como  $\text{CaCO}_3$  de igual manera como se procedió para la cal necesaria:

$\text{CaCO}_3$  generado en el proceso =  $\sum$   $\text{CaCO}_3$  generado en cada reacción

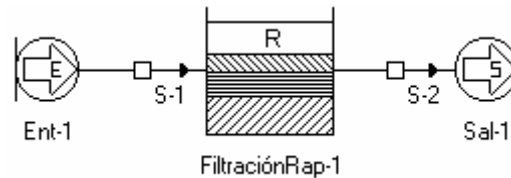
$\text{CaCO}_3$  generado en el proceso = 193.84 mg/L

### Filtración Rápida

AWWA (1998), indica que la mayoría de estas unidades tienen una profundidad entre 0.60 y 0.75 m.

Por otro lado, Arboleda (1969), recomienda que la velocidad de filtración esté entre 0.101 cm/s y 0.203 cm/s y que que en este tipo de filtros, la pérdida de energía se ubica generalmente en un rango que va de 0.30 m hasta 2.70 m como valor máximo para un correcto funcionamiento del equipo.

Con la finalidad de comprobar estos rangos, se construyó sobre la mesa de dibujo del programa de diseño y simulación *AquaBox TA* el diagrama de flujo que puede observarse en la figura 34 el cual contiene los elementos entrada, filtración lenta y salida:



**Figura 34.** Diagrama de flujo de ejemplo Filtración Rápida

Para el diagrama de flujo anterior se declararon los parámetros de diseño necesarios para ejecutar la simulación. De todos los valores introducidos para cada elemento involucrado, los más relevantes se muestran a continuación:

*Entrada:*

Caudal Afluyente:	100 L/s
Sólidos Suspendidos:	60 mg/L
Sólidos Totales:	200 mg/L

*Filtración Rápida:*

Velocidad de filtración:	0.136 cm/s
Diámetro característico de los granos:	0.35 mm
Tamaño de partícula para 60% que pasa:	0.595 mm
Tamaño de partícula para 10% que pasa:	0.297 mm
Borde libre:	0.25 m
Capa de agua:	1 m
Profundidad del lecho:	0.70 m
Altura de la capa soporte:	0.35 m
Profundidad del fondo colector:	0.8 m

Los resultados obtenidos por AquaBox son mostrados en la tabla 21:

**Tabla 23.** *Resultados obtenidos para la Filtración Rápida*

	Profundidad de la unidad (m)	Velocidad de Filtración (cm/s)	Pérdida de energía a través del lecho (m)
<i>Diseños Típicos</i>	0.6-0.75	0.101-0.203	0.3-2.70
<i>AquaBox TA</i>	0.75	0.136	1.41
<i>Desviación (%)</i>	-	-	0

Es importante observar como es la diferencia respecto a la pérdida de energía a través del lecho tanto para filtros rápidos como para filtros lentos. Indudablemente el hecho de que haya una mayor velocidad de filtración, afecta a la pérdida de energía ya que

Generalmente, para esta operación, recomienda CEPIS (2000) que se utilice una batería de filtros, pero la cantidad mínima a utilizar no debe ser menor a cuatro filtros, para que por lo menos tres unidades aporten para el lavado del cuarto filtro. En la figura 35, se puede apreciar como es la estructura de este tipo de filtros y su ordenamiento para su efectivo desempeño:



**Figura 35.** *Batería de filtros de tasa declinante y lavado mutuo [CEPIS (2000)].*

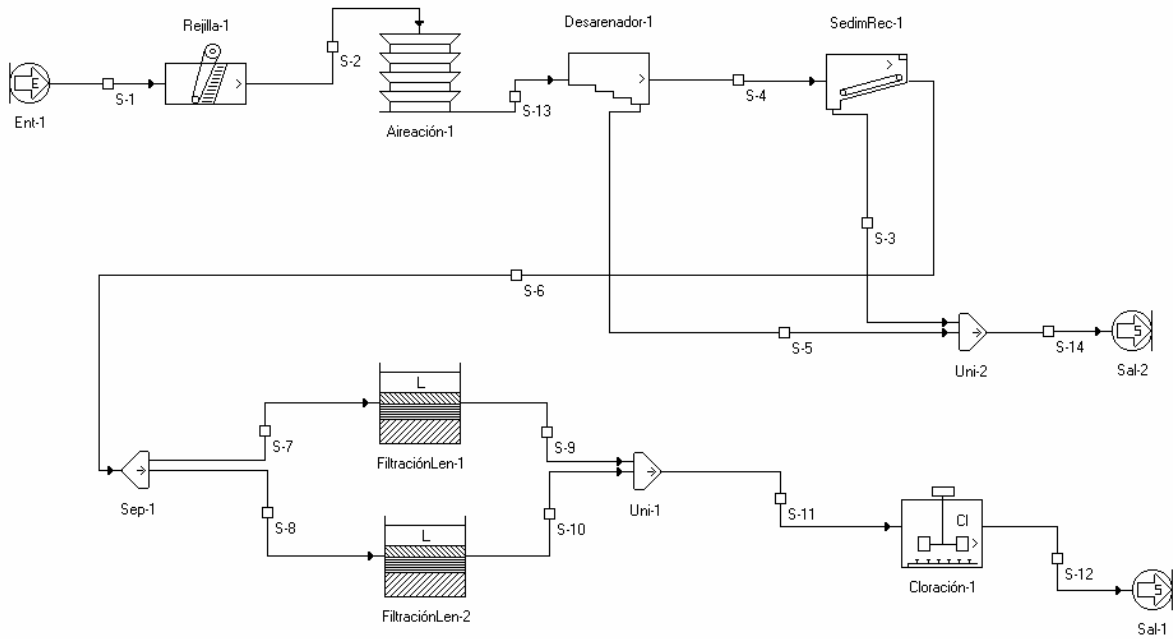
Por otro lado también se produjo una disminución en la cantidad de ólidos suspendidos la cual se ve reflejada también en la cantidad de sólidos totales presentes en el agua. La experiencia indica que en los filtros se puede remover

hasta un 90% de los sólidos suspendidos, es por ello que a la salida de este equipo se obtiene aproximadamente una concentración de 6 mg/L de estos y 146 mg/L de sólidos totales.

### **Simulación de Plantas de Tratamiento de Aguas con *AquaBox TA***

A continuación se estudiará dos tipos distintos de configuraciones de plantas. La primera configuración son las llamadas Plantas de Filtración Lenta (PFL), en ella, dependiendo de la calidad de la fuente de agua que va a abastecer al sistema de tratamiento, la PFL podría estar constituida sólo por un filtro lento o bien por una serie de procesos previos, cuyo propósito es acondicionar la calidad física del agua cruda para que el filtro lento pueda operar adecuadamente. Estos procesos generalmente son: Desbaste, Desarenador, Sedimentador, Prefiltro de Grava, Filtro Lento y Desinfección.

Una configuración del tipo PFL con *AquaBox TA* se muestra en la figura 36. En esta configuración, se utilizaron las operaciones unitarias más básicas que podrían ser dispuestas en una planta de tratamiento de aguas del tipo PLF. El diagrama de flujo comienza con un elemento entrada (Ent-1) que representa el afluente que ingresa a la planta y es donde se define el flujo de entrada y las composiciones del agua cruda que va a ser tratada. Posteriormente le sigue una Rejilla (Rejilla-1), un equipo de Aireación (Aireación-1) y un Desarenador (Desarenador-1) el cual junto a la operación de desbaste son los encargados de evitar cualquier tipo de obstrucción que podría sucederse en equipos subsiguientes.



**Figura 36 .** Esquema de una planta tipo PFL en AquaBox TA.

A la salida del Desarenador se le une un Sedimentador Rectangular (SedimRec-1) y la generación de lodos producidos por estos dos equipos van unidas a un elemento Unión (Uni-2) que a su vez lleva esta corriente a un único elemento Salida (Sal-2).

A la salida del Sedimentador, representada por la corriente S-6, se le une un Separador (Sep-1) el cual dividirá esta corriente en dos nuevas llamadas S-7, la cual llevará el 50% del caudal, y S-8 que tendrá el otro 50%. Estas dos nuevas corrientes serán las entradas para dos Filtros Lentos (FiltraciónLen-1 y FiltraciónLen-2) que fueron agregados al diagrama de AquaBox TA.

La salida de los dos Filtros Lentos son representadas por las corrientes S-9 y S-10 las cuales van a un elemento Unión (Uni-1) que llevará el flujo al tanque de Cloración (Cloración-1).

Finalmente a la salida del Clorador le sigue el elemento Salida (Sal-1) la cual marca el punto final del recorrido por el diagrama y es donde el agua, al haber sido tratada por los distintos equipos incluidos en el esquema, sale apta para su distribución.

Los datos suministrados para el diagrama de flujo tipo PFL fueron especificados siguiendo el mismo criterio utilizado para el cálculo de cada equipo en particular.

La entrada del caudal a la planta se fijó en 50 L/s (4320 m<sup>3</sup>/d) y las composiciones de los compuestos presentes en el agua se presentan a continuación:

<i>Parámetro:</i>	<i>Cantidad (mg/L)</i>
Bicarbonato de Magnesio:	67
Bicarbonato de Calcio:	70
Calcio como CaSO <sub>4</sub> :	48
Cloruros:	50
DBO:	1
CO <sub>2</sub> :	20
Dureza Total:	104
Magnesio como MgSO <sub>4</sub> :	56
Nitrógeno:	20
Nitrógeno Amoniacal:	0
O <sub>2</sub> :	5
Sólidos Suspendidos:	60
Sólidos Totales:	200

Para la Rejilla (Rejilla-1) se definió una velocidad de flujo de 0.3 m/s, una profundidad del canal de 0.5 m, un número de barras igual a 8 y con un espesor de 5 mm por barra, las cuales están colocadas con un ángulo de inclinación de 30°. Los datos anteriores fueron fijados siguiendo los parámetros más comúnmente utilizados en este tipo de equipos para lo que se obtuvo un ancho del canal de 0.33 m y una pérdida de energía de 0.36 mm siendo el máximo aceptable de 800 mm.

Para el Aireador por bandejas (Aireación-1) se estableció un tiempo de aireación de 25 min y un número de bandejas igual a 6, obteniéndose entre otros resultados un aumento de  $O_2$  de 12.38 mg/L.

Para el Desarenador (Desarenador-1) se fijó la velocidad del flujo en 0.2 m/s, una profundidad del canal en 0.6 m, para lo cual la simulación arrojó un desarenador que posee un ancho del canal de 0.41 m, una longitud de 4.85 m.

En el equipo Sedimentador Rectangular (SedimRec-1), se estableció la profundidad del mismo en 3 m y una relación longitud/ancho en 2. Para estos datos se obtuvo, entre otros resultados, que el sedimentador poseía un ancho de 10.38 m y una longitud de 20.77 m y que produjo una remoción del 78.08% de los sólidos sedimentables.

Para los equipos de Filtración Lenta (Filtralen-1 y Filtralen-2) se utilizaron los mismos parámetros y se establecieron los datos según los valores mayormente utilizados para este tipo de equipos. La velocidad de filtración se fijó en 0.0162 cm/s, se utilizó un tipo de arena con un diámetro característico de 0.25 mm, el borde libre se estableció en 0.2 m, la capa de agua que prevalece encima del lecho se le impuso un valor de 1.1 m, la altura de la capa soporte, es decir, la grava se fijó en 0.3 m y la profundidad del fondo colector donde van ubicados los drenajes fue de 0.5 m. Para todos estos valores se encontró que ocurría una pérdida de energía a través del lecho de 0.49 m, un coeficiente de uniformidad (CU) de 2, el largo de la unidad fue de 10.13 m y el ancho de 7.60 m. Igualmente la profundidad de la caja filtrante fue de 3.4, además la simulación determinó el número de unidades necesarias para el proceso la cual fue de 2 unidades.

Por último para la cloración (Cloración-1), se definió el tiempo de retención en 30 min, se fijó una concentración de cloro residual de 2 mg/L y se utilizó una concentración de hipoclorito de sodio e hipoclorito de calcio de 13% y 70% respectivamente. Para estos valores se obtuvo que se requeriría 8.63 Kg/d de cloro, 6.63 Kg/d de hipoclorito de sodio y 1.23 Kg/d de hipoclorito de calcio.

En la tabla 22, se presentan las características del agua cruda y las de la misma después de haber sido tratada bajo el esquema de una planta tipo PLF simulada con *AquaBox TA*:

**Tabla 24.** Resultados obtenidos para la simulación de una PFL.

Parámetro (mg/L)	Agua Cruda	Agua Tratada
<i>Bicarbonato de Magnesio</i>	67	67
<i>Bicarbonato de Calcio</i>	70	70
<i>Calcio como CaSO<sub>4</sub></i>	48	48
<i>Cloruros</i>	50	50
<i>DBO</i>	1	0.9
<i>CO<sub>2</sub></i>	20	2.89
<i>Dureza Total</i>	104	104
<i>Magnesio como MgSO<sub>4</sub></i>	56	56
<i>Nitrógeno</i>	20	20
<i>Nitrógeno Amoniacal</i>	0	0
<i>O<sub>2</sub></i>	5	12.38
<i>Sólidos Suspendidos</i>	60	1.19
<i>Sólidos Totales</i>	200	141.19

En este caso, no hubo necesidad de aplicar el proceso de ablandamiento ya que los compuestos referidos a la dureza total, son bajos. Por consiguiente, las cantidades se mantienen hasta el final del proceso.

Es importante resaltar como hubo un aumento en el contenido de O<sub>2</sub> en el agua, pasando de ser una agua con déficit de oxígeno que podría causar malos olores a un agua rica en este elemento.

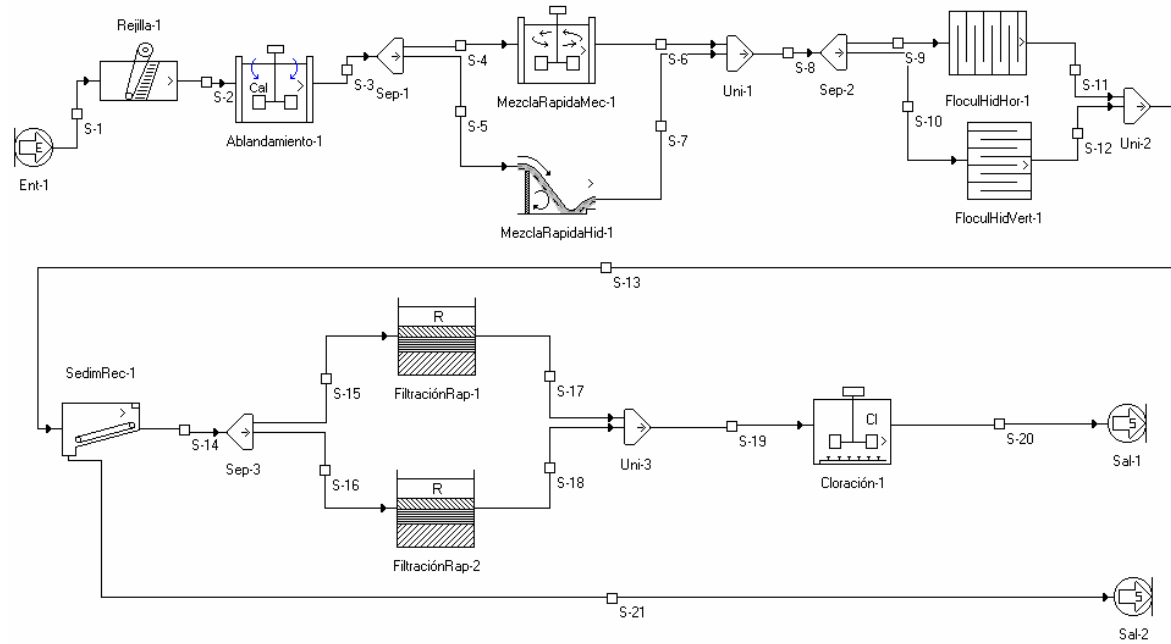
Por otro lado también hubo una reducción considerable de los sólidos suspendidos y como consecuencia una reducción en los sólidos totales. Hay que recordar que los sólidos totales se encuentra conformados por una cantidad de sólidos como son los volátiles, los suspendidos sedimentables y los suspendidos



no sedimentables, es por ello que al concluir el recorrido del agua a través de todos los equipos mencionados anteriormente, todavía podría quedar una cantidad de sólidos totales presentes en ella que no pudieron ser removidos.

La segunda configuración que se presentará a continuación son las llamadas Plantas de Filtración Rápida (PFR). Generalmente se piensa en el diseño de este tipo de plantas cuando la mayor parte de las partículas que se encuentran en el agua son de tipo coloidal o se encuentran en solución. Las plantas de este tipo están básicamente constituidas por las unidades de: mezcla rápida, floculadores, sedimentadores, filtros y desinfección. Dependiendo de las máximas turbiedades que se puedan alcanzar podría ser necesario también un desarenador y de acuerdo a la concentración máxima de coliformes fecales, también precloración. En la medida en que el agua presente mas parámetros problema, se añadirán los procesos necesarios para purificarla.

En la figura 37, se muestra una configuración posible del tipo de planta PFR a ser simulada por *AquaBox TA*:



**Figura 37.** Modelo de una planta del tipo PFR simulada en AquaBox TA.

De igual manera que para la PFL, para este ejemplo, en la PFR también se eligió 50L/h como caudal de diseño.

La configuración presentada en la anterior figura está conformada por un elemento Entrada (Ent-1) al que posteriormente le sigue un equipo de Desbaste del tipo Rejilla (Rejilla-1). Después de la operación de remoción de sólidos de gran tamaño le sigue la operación Ablandamiento (Ablandamiento-1) donde se le va a remover al agua una serie de compuestos como son el calcio y el magnesio entre otros para hacer el agua menos “dura”. A la salida de esta operación unitaria se encuentra una Separación (Sep-1) que divide a la corriente S-3 en dos nuevas corrientes que son S-4 y S-5, las cuales contienen el 50% del caudal cada una.

La corriente S-4 es la entrada al equipo de Mezcla Rápida Mecánica (MezclaRápidaMec-1) el cual tiene a su salida la corriente S-6. Por su parte, la corriente S-5 es la entrada a la Mezcla Rápida Hidráulica (MezclaRápidaHid-1) y posee una corriente de salida llamada S-7. La corriente de salida de ambos equipos convergen al elemento Unión (Uni-1) donde a la salida de este se crea una única corriente llamada S-8.

La corriente S-8 es separada por el elemento Separación (Sep-2), el cual crea dos nuevas corriente S-9 que es dirigida al equipo Floculador Hidráulico Horizontal (FloculHidHor-1) y la corriente S-10 que es la entrada para el Floculador Hidráulico Vertical (FloculHidVer-1). Cada una de las corrientes de salidas de los floculadores llegan a un elemento Unión (Uni-2) donde a la salida de este se crea una nueva corriente S-13 que representa la entrada de caudal para el Sedimentador Rectangular (SedimRec-1).

El Sedimentador Rectangular posee a su salida la corriente S-14 que llevada a una Separación (Sep-3). Por otro lado los lodos generados en el sedimentador son llevado a la Salida (Sal-2).

La Separación se encarga de repartir el caudal en un 50% para la corriente S-15 y el otro 50% para la corriente S-16, las cuales son las corrientes de entrada para las unidades de Filtración Rápida (FiltraciónRap-1 y FiltraciónRap-2). Las salidas de estos dos equipos son llevadas a una Unión (Uni-3) la cual a su salida tiene la corriente S-19 que entra a la operación unitaria de Cloración (Cloración-1).

Finalmente, el agua ya tratada, es levada a través de la corriente S-20 para llegar a su destino final, la Salida (Sal-1).

La Rejilla (Rejilla-1) no se analizará ya que contiene los mismos parámetros que el esquema presentado para la PFL y arroja los mismos resultados señalados anteriormente.

Para la operación unitaria Ablandamiento (Ablandamiento-1) no hay necesidad de incluir ningún parámetro pues básicamente lo que este equipo lo que señala es la cantidad de Cal y Soda que se requiere para reducir la dureza del agua. Para la simulación realizada con *AquaBox TA* se requiere de 151.13 mg/L de Cal y 86.66 mg/L de Carbonato sódico (Soda) para bajar el contenido de dureza presente en el agua. Otro resultado importante de mencionar es la cantidad de lodo generado como  $\text{CaCO}_3$  que precipita debido a las reacciones que se producen mediante este método. El lodo generado fue de 171.15 mg/L

Para la Mezcla Rápida Mecánica (MezclaRapidaMec-1) se definió la relación altura del agua / diámetro del impulsor en 3 ya que esta relación se debe encontrar entre 2.7 y 3.9 para un adecuado y lógico dimensionamiento del mezclador. También se estableció la relación altura base impulsor / diámetro impulsor en 1 ya que se recomienda que se encuentre entre 0.75 y 1.3. Por otro lado el tipo de impulsor que se escogió fue el de turbina de 6 aletas planas. Para los datos establecidos en la simulación se obtuvieron entre otros un gradiente de velocidad de  $643.85 \text{ s}^{-1}$ , una potencia requerida de 754 Watts y un tiempo de contacto de 1 min. De igual manera se obtuvo un tanque que tiene un volumen de 1597 L.

En relación a la Mezcla Rápida Hidráulica (MezclaRapidaHid-1) se estableció la altura de la pared en 1 m y el ancho del canal en 0.6 m. Para estos valores se obtiene una velocidad del agua en la etapa del salto de 2.86 m/s, un número de Froude de 7.57, un gradiente de velocidad de  $2309 \text{ s}^{-1}$  y un tiempo de contacto de 0.51 s lo que nos indica que este proceso ocurre rápidamente como los indica la bibliografía y como debe ser en esta operación unitaria.

Para el Floculador Hidráulico Horizontal (FloculHidHor-1) se fijó la velocidad que llevaría el agua a través de este en 0.2 m/s y el tiempo de retención se estableció en 45 min. Par estos valores se obtuvo un completo dimensionamiento del equipo entre los cuales resaltan en ancho del floculador con 2.66 m y 26.58 para la longitud del primer canal. También se obtiene una pérdida de carga total en el primer tramo de 1.39 m y un gradiente de velocidad de  $70 \text{ s}^{-1}$ , lo que nos indica que son satisfactorios los valores y se encuentran dentro de los rangos establecidos en la bibliografía.

Para el Floculador Hidráulico Vertical (FloculHidVer-1) se fijó el tiempo de floculación en 45 min y un gradiente de velocidad de  $45 \text{ min}^{-1}$ . De igual manera se estableció la longitud de la unidad en 10 m y la profundidad de la misma en 4,5 m. De esta manera se obtuvo en la simulación realizada, datos como el volumen de la unidad, la cual fue de  $67.49 \text{ m}^3$ , el ancho total fue de 1.5 m, la velocidad en los canales fue de  $1.59\text{E}-02 \text{ m/s}$ , el número de

compartimientos entre pantallas fue de 31 y la comprobación del gradiente de velocidad fue de  $48 \text{ min}^{-1}$ . Probablemente los datos encontrados no son los más adecuados para este tipo de unidades y esto se debe principalmente a que se debe hallar una buena relación entre la longitud: profundidad : gradiente de velocidad, para que los resultados que se obtengan sean más reales.

El equipo de Sedimentación Rectangular (SedimRec-1) ya fue discutido en el esquema de PFL, por lo que no se analizará nuevamente.

Tanto para los dos equipos de Filtración Rápida (FiltraciónRap-1 y FiltraciónRap-2), se fijaron las velocidades de filtración en  $0.140 \text{ cm/s}$ , se utilizó una arena que posee un diámetro característico de  $0.25 \text{ mm}$ , se definió un borde libre de  $0.25 \text{ m}$ , una capa de agua sobre el lecho de  $1.2 \text{ m}$ , una profundidad del lecho filtrante de  $0.6 \text{ m}$ , una capa de grava de  $0.4 \text{ m}$  y se utilizó un fondo de tipo Leopold. Para todos los datos introducidos en esta unidad se obtuvo, entre otros, una pérdida de carga a través del lecho de  $2.42 \text{ m}$ , un coeficiente de uniformidad de 2, una longitud y ancho de cada unidad de  $3.44 \text{ m}$  y  $2.58 \text{ m}$  respectivamente y una profundidad de la caja filtrante de  $3.2 \text{ m}$ .

Igualmente el equipo de Cloración (Cloración-1) no se estudió ya que contiene los mismos parámetros que el clorador del esquema de la PFL.

Finalmente, en la tabla 23, se presentan las características del agua cruda y las de la misma después de haber sido tratada bajo el esquema de una planta tipo PFR simulada con *AquaBox TA*:

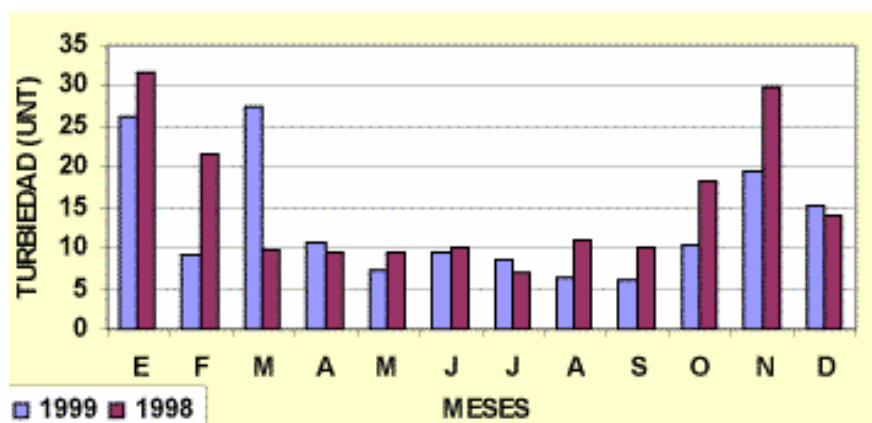
**Tabla 25.** Resultados obtenidos para la simulación de una PFR

Parámetro (mg/L)	Agua Cruda	Agua Tratada
Bicarbonato de Magnesio	67	3.35
Bicarbonato de Calcio	70	3.5
Calcio como $\text{CaSO}_4$	48	5.56
Cloruros	50	50
DBO	0.5	0.5
$\text{CO}_2$	10	0.5
Dureza Total	104	8.36

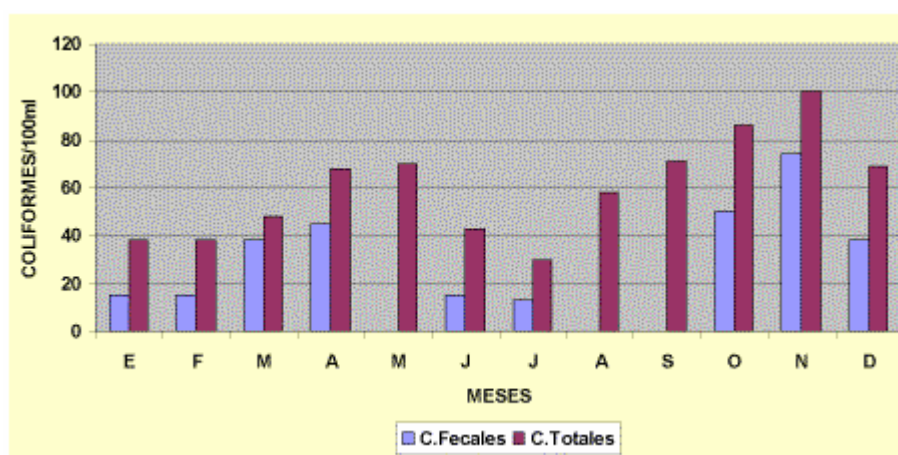
<u>y Resultados</u>		<u>Discusion</u>
<i>Magnesio como MgSO<sub>4</sub></i>	56	2.8
<i>Nitrógeno</i>	5	5
<i>Nitrógeno Amoniacal</i>	0	0
<i>O<sub>2</sub></i>	9	9
<i>Sólidos Suspendidos</i>	150	3.25
<i>Sólidos Totales</i>	500	353.25

En este caso, donde si fue incluido el proceso de ablandamiento, se puede observar como los carbonatos y bicarbonatos son llevados a cantidades muy pequeñas que sin duda alguna están muy por debajo de los límites máximos permitidos por las autoridades. Por otro lado, la cantidad de sólidos totales también se ve reducida a un 30% con el esquema presentado para la simulación donde es importante aclarar que básicamente interviene un solo equipo por proceso, excepto la filtración, pudiendo optimizar los resultados obtenidos agregando más unidades al esquema.

Ahora bien, para ambos tipos de plantas, es decir la PFL y la PFR o cualquier otra configuración distinta a las anteriores, se necesita la caracterización de el agua a tratar, para de esta manera, poder obtener parámetros tan importantes como la turbidez. Este tipo de característica física del agua es muy importante ya que nos ayuda a determinar por que tipo de planta se va a dirigir el proyecto en estudio. CEPIS (2000) recomienda estudiar las variaciones de los principales parámetros de calidad problema, durante por lo menos un año. Para efectuar este análisis, se sugiere elaborar histogramas de turbiedad, color y coliformes fecales o termotolerantes. Ver ejemplo en la figuras 38 y 39 :



**Figura 38 .** Histograma de Turbiedad del Agua Cruda [CEPIS (2000)].

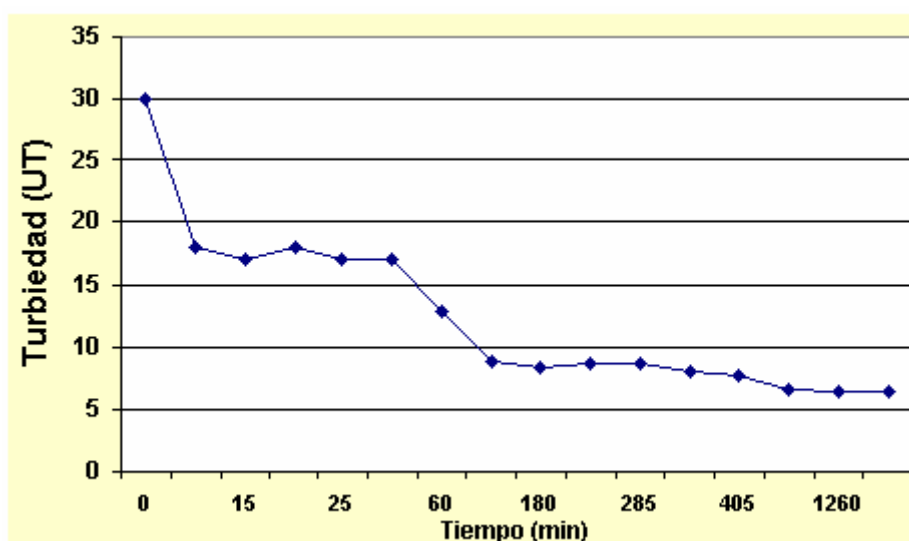


**Figura 39.** Calidad Microbiológica de la Fuente [CEPIS (2000)].

No existe una ecuación general que involucre a estos parámetros, con cualquiera de los equipos existentes para tratamientos de aguas, es decir, no se puede predecir de manera exacta como puede variar la turbidez por ejemplo en un sedimentador mediante el uso de alguna ecuación específica que además involucre el uso de cualquier sedimentador. Es por ello que también se realizan curvas de sedimentación, en el caso de los sedimentadores, para así poder tener una idea de cual será la efectividad de la unidad.

CEPIS (2000) indica que para determinar el diseño de este tipo de unidades, debe efectuarse una prueba de laboratorio que permita determinar la eficiencia que se obtendría al considerar esta unidad. Esta prueba consiste en un ensayo de sedimentación natural. Se coloca una muestra de agua representativa de la turbiedad mas alta de la época de lluvia en un recipiente y se toman

muestras cada 15 minutos, durante la primera hora y luego cada hora. Esta toma de muestras la podemos apreciar en la figura 40:



**Figura 40.** *Curva de Sedimentación Natural [CEPIS (2000)].*

De esta forma se puede observar que existen parámetros que sólo pueden ser caracterizados por estudios previos de laboratorio y que de otra forma no podría ser registrados por alguna unidad o equipo existente en el tratamiento de aguas, sin embargo, existen equipos de monitoreo, como por ejemplo de turbiedad, que pueden ser anexados a estos.

En el software desarrollado se utilizó criterios de diseño y estudios hechos sobre algunos equipos para poder dar respuesta a valores tales como la concentración de sólidos totales entre otros a la salida de un equipo, ya que como se expresó anteriormente, el área del tratamiento de aguas necesita un estudio previo y detallado de la materia que se quiere someter al proceso.

Sin embargo, para conocer las dimensiones y características de los equipos que se utilizaron en *AquaBox TA*, si fueron empleadas ecuaciones bien definidas y que han venido siendo aplicadas por mucho tiempo. De igual manera se emplearon muchos criterios de diseño que han sido comprobados en numerosas plantas y que representan a la final valores reales y concretos en el área de la purificación de las aguas. Es importante recalcar que desde tiempos remotos se



ha venido tratando las aguas para convertirlas en un producto apto para el consumo tanto a nivel personal como industrial, es por ello que las ecuaciones y criterios de diseños que rigen a cada uno de los procesos del tratamiento de agua son tan convincentes.

Gran parte de los resultados obtenidos con *AquaBox TA* fueron comparados con estos criterios de diseño, ya que la mayoría de la data encontrada en la bibliografía o entrevistas hechas a especialistas en el tema sobre plantas existentes en la realidad, reportan valores característicos del agua como turbiedad, color o microorganismos presentes, sin embargo, se puede llevar un registro aproximado de otros parámetros que puede contener el agua tales como la cantidad de sólidos totales o dureza total, entre otras. Estos valores reportados se mantuvieron dentro de los rangos recomendados por los diferentes autores consultados.

Un punto importante que se debe tener en cuenta a la hora de evaluar un proyecto, es el aspecto económico, ya que este puede definir de forma decisiva si un estudio para una planta de tratamiento de aguas es viable o no, o si la incorporación de los equipos involucrados en el, justifican el gasto que en ella se produce. Sin embargo, cuando a tratamientos de aguas se refiere, no se puede poner en juego tanto la salud del consumidor como el apto uso del vital líquido para la industria y es por ello que hay procesos que si son requeridos para ofrecer un producto óptimo, es inevitable obviarlos. Lo que si es viable, es sustituir equipos costosos por unos más sencillos, como por ejemplo podría ser el caso de un difusor de oxígeno a un aireador de bandejas múltiples.

Por otro lado, *AquaBox TA* representa una gran ventaja y ayuda cuando se quiere dimensionar algún equipo y su fácil manejo contribuye a que cualquier persona que no esté muy adentrada al tema pueda llevar a cabo algún tipo de proyecto sin ninguna complicación.

Con *AquaBox TA*, se le puede dar al usuario aprendiz en el tema, una visión diferente sobre el tratamiento de aguas y la gran importancia de esta en la

vida del hombre ya que expresa la relevancia que tiene este tópico en la salud del ser humano y en la economía de muchas industrias.

## VIII. CONCLUSIONES

- ✦ Al finalizar este trabajo especial de grado, se puede concluir que los sistemas de simulación, representan una poderosa herramienta de trabajo tanto para los profesionales que hacen uso de estas, como para aquellas personas que no poseen un amplio conocimiento en el área de tratamiento de aguas.
- ✦ El programa de simulación *AquaBox TA* constituye una herramienta muy versátil de trabajo que puede ser utilizada por todas aquellas empresas privadas y públicas que necesiten aplicar, desarrollar o estudiar algún proyecto de tratamiento de aguas. De igual manera el sistema de simulación desarrollado puede ser utilizado por instituciones educativas con el fin de contribuir al conocimiento sobre tema relacionado con la potabilización del agua y acercar un poco al usuario, al mundo de los paquetes de simulación.
- ✦ La construcción de un diagrama de flujo en *AquaBox TA* se puede realizar de manera sencilla y no se necesita de amplios conocimientos previos para poder llevar a cabo un proyecto de simulación.
- ✦ *AquaBox TA* ayuda al usuario a desarrollar más práctica y fácilmente los cálculos de ingeniería básica que deben hacerse para evaluar y simular una planta de tratamiento de aguas.
- ✦ Con *AquaBox TA* se puede estudiar por separado las operaciones unitarias más básicas incluidas en el tratamiento de aguas o si es el caso, simular una planta completa.

## Conclusiones

- ✦ *AquaBox TA* posee los comandos estándares que puede tener cualquier otro software de aplicación existente en el mercado.
- ✦ Es imprescindible para poder desarrollar un diseño en *AquaBox TA*, conocer las características que definen a las aguas, así como también los valores límites tolerables para su consumo y/o uso por parte de alguna industria.
- ✦ Las plantas de tratamiento de aguas juegan un papel vital en la vida del hombre ya que sin estas podría estar en peligro la salud del mismo.
- ✦ El diseño de una planta de tratamiento de aguas se hace por medio de las ecuaciones de diseño de las operaciones unitarias que en él intervengan y de los balances de masa pertinentes de la misma, sin embargo, mucho de los parámetros y criterios de diseño son dictados por la experiencia de profesionales en el área.
- ✦ Existen características en el agua, como la turbiedad y el color, que no están contempladas en ninguna ecuación existente para el tratamiento de aguas, las existentes han sido resultados de la caracterización de ciertas tomas de aguas.
- ✦ La pérdida de energía tanto en filtros lentos como en filtros rápidos depende mucho de la velocidad de filtración y de las diversas capas filtrantes que posee cada uno de estos.
- ✦ Es importante realizar un estudio previo de la calidad microbiológica del agua para así tener una idea de el poder de desinfección que puede tener el cloro, como agente desinfectante, sobre los distintos organismos patógenos que pueda contener el agua.

## Conclusiones

- ✦ Las características bacteriológicas del agua son un parámetro muy difícil de cuantificar mediante un programa de simulación ya que en tanto en los procesos de filtración y desinfección no existe una correlación exacta que pueda indicar la cantidad de organismos bacteriológicos destruidos por estos dos procesos.
- ✦ La utilización de 2 o más filtros ayudará a que las áreas del medio filtrante de cada una de ellas no sea tan grande, permitiendo un mantenimiento más fácil y una mejor efectividad de los mismos.
- ✦ Las agua claras, es decir, provenientes de ríos, lagos , pozos, etc, contienen una cantidad muy baja de DBO y en otros casos carecen de este parámetro.
- ✦ El cloro, utilizado como agente desinfectante en el proceso de desinfección, representa la alternativa más económica y efectiva utilizada por muchas plantas de tratamiento de aguas.
- ✦ El método de aireación por bandejas, resulta práctico para plantas pequeñas. Para plantas de tratamiento de mayor tamaño es necesario suministrar el oxígeno al agua mediante difusores.
- ✦ La mezcla rápida hidráulica en vertederos rectangulares representa una alternativa muy económica y eficaz al momento de incluir los coagulantes al agua.
- ✦ Es necesario hacer estudios previos sobre el tiempo de retención y gradientes de velocidad en floculadores de tipo horizontal y vertical que puedan optimizar el proceso.

## Conclusiones

- ✦ El proceso de ablandamiento no es utilizado en las plantas existentes en Venezuela ya que el contenido de dureza total presente en el agua, está por debajo de los límites máximo establecido por las autoridades.
- ✦ El estudio de las operaciones unitarias simuladas por *AquaBox TA* arrojaron resultados satisfactorios y se adecuan a los rangos típicos de diseño recomendados por los distintos autores consultados.
- ✦ Las plantas de filtración lenta (PFL) y las plantas de filtración rápida (PFR) son los dos tipos de plantas mayormente utilizados y recomendados, pudiendo existir ciertas variaciones que dependen del tipo de agua a tratar, la localidad y la disposición económica que se encuentre involucrada en el proyecto.
- ✦ Los resultados obtenidos por el simulador *AquaBox TA* son satisfactorios y en general se encuentran dentro de los criterios de diseño y rangos determinados por la bibliografía consultada.

## **IX. RECOMENDACIONES**

- ✚ Debido a la falta de información acerca de la remoción en cada operación unitaria de las características más sobresalientes del aguas (color, turbiedad), se recomienda la caracterización de algunos tipos de aguas existentes en el país, para de esta forma tener una relación que permita determinar la cantidad de algunos parámetros en el agua tratada.
- ✚ Agregar módulos que permitan graficar curvas que puedan caracterizar el agua en estudio para que el programa haga uso de estas y así obtener resultados más reales.
- ✚ Tomar en cuenta las distintas capas filtrantes, así como también estudiar el caso de los lechos estratificados, que pueda contener un filtro para así obtener una pérdida de energía más real en este tipo de equipos.
- ✚ Estudiar e incluir el uso de distintos tipos de coagulantes en el proceo de coagulación y floculación.
- ✚ Incluir otros tipos de desinfectantes en el software así como también hacer un estudio previo sobre el poder que tiene cada uno de ellos de erradicar los organismos patógenos del agua.
- ✚ Agregar módulos que permitan calcular la hidráulica de proyecto que se desee simular.
- ✚ Agregar módulos que permitan tener una completa evaluación económica del proyecto que se esté desarrollando.

## **X. BIBLIOGRAFÍA**

1. ARBOLEDA, Valencia. Manual de Tratamiento de Aguas Potables. Gobierno de Venezuela. Caracas. 1969.
2. ARBOLEDA, Valencia. Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. Editorial Acodal. España. 1992.
3. AWWA. Water Treatment Plant Desing. Editorial McGraw-Hill, Tercera Edición. 1998.
4. CEPIS. Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua. CEPIS, 2da. Reimpresión. 1981.
5. CEPIS. Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. 1992.
6. DEGRÉMONT. Manual Técnico del Agua. Editorial Grafo, S.A. Bilbao, España. 1973.
7. GACETA OFICIAL DE LA REPÚBLICA DE VENEZUELA. N° 36.395. Caracas. 1998.
8. NALCO. Manual del Agua. Tomo II. 1998.
9. RIVAS, Mijares. Tratamientos de Potabilización de las Aguas. Editorial Nuevas Gráficas, S.A. Madrid (España). 1963.
10. ROMERO R., Jairo A. Acuipurificación. Escuela de Colombia de Ingeniería. Colombia. 190 páginas. 1994.



#### Bibliografía

11. SUNDSTROM, Donald W. Wastewater Treatment. Editorial Prentice – Hall. Estados Unidos. 1979.
12. WWW.CEPIS.ORG. 2000.
13. RODRÍGUEZ, Alberto. Diseño Computarizado de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. Tesis Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. 2000