

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA
POTABLE A ESCALA PARA EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA DE LA
UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

CÁRDENAS GUZMÁN ANDRÉS CAMILO
MEDINA RINCÓN JULIÁN ARTURO

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
INGENIERÍA CIVIL
HIDRÁULICA
BOGOTÁ
2017

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	5
LISTA DE ILUSTRACIONES	6
RESUMEN.....	7
OBJETIVOS	10
General	10
Específicos.....	10
1. MARCO TEORICO	11
1.1. IMPORTANCIA DEL AGUA POTABLE.....	11
1.2. TEORÍA DE FLUJO LIBRE (CANALES)	12
1.2.1. Tipos de flujo.....	13
1.2.1.1. Según la velocidad del flujo	13
1.2.1.2. Según la variación de velocidad con respecto al tiempo	14
1.2.1.3. Según magnitud y dirección de la velocidad del flujo	14
1.2.1.4. Flujo subcrítico y supercrítico	15
1.2.2. Pérdida de energía.....	15
1.2.3. Coeficiente de Manning.....	16
1.3. POTABILIZACIÓN DEL AGUA	17
1.4. Características del agua potable	19
1.4.1 Físicas	19
1.4.1.1 Turbidez	19
1.4.1.2 Temperatura	20
1.4.1.3 Color	20
1.4.1.4 Olor y Sabor	21
1.4.2 Químicas	21
1.4.2.1 Potencial de Hidrógeno pH	21
1.4.2.2 Dureza	22
1.4.2.3 Oxígeno Disuelto	23
1.4.2.4 Bacteriológicas o Microbiológicas	23
1.5. PROCESOS UNITARIOS Y OPERACIONES UNITARIAS	23

1.5.1.	Operaciones Unitarias.....	24
1.5.1.1.	Floculación	24
1.5.1.2.	Sedimentación.....	26
1.5.1.3.	Filtración.....	28
1.5.2.	Procesos Unitarios	31
1.5.2.1.	Aireación	31
1.5.2.2.	Coagulación	33
1.5.2.3.	Desinfección.....	34
1.6.	TIPOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE	35
1.6.1.	Planta Convencional	35
1.6.2.	Planta de filtración rápida.....	36
1.6.3.	Planta de filtración en línea	37
1.7.	Plantas Piloto	38
2.	LABORATORIO DE HIDRÁULICA	39
3.	DETERMINACIÓN DEL CAUDAL	40
4.	DISEÑOS	41
4.1.	Aireación	41
4.1.1.	Aireador de bandeja múltiple.....	41
4.2.	Mezcla rápida	44
4.2.1.	Vertedero rectangular	45
4.2.2.	Determinación de la dosificación de coagulante óptimo.	48
4.3.	Mezcla lenta	49
4.3.1.	Prediseño Floculador hidráulico de flujo horizontal.....	49
4.3.2.	Diseño Floculador Mecánico de Eje Horizontal	54
4.4.	Sedimentador.....	59
4.5.	Filtración.....	63
5.	CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO.	69
5.1.	Aireación	69
5.2.	Mezcla Rápida.....	69
5.3.	Mezcla Lenta o Floculador y Sedimentador de Alta Tasa	70
5.4.	Filtros	72
6.	RESULTADOS	73

7.	CONCLUSIONES.....	76
8.	RECOMENDACIONES.....	78
9.	REFERENCIAS	79
10.	ANEXOS.....	80

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Valores para el Coeficiente n en la fórmula de Manning según Chow	17
Tabla 2 Calidad de la fuente	18
Tabla 3 Mecanismos de remoción de un filtro.....	29
Tabla 4 Directrices de escala para plantas piloto	40
Tabla 5. Parámetros de Diseño: Aireador de Bandejas.....	41
Tabla 6 Determinación del ancho W de la Parshall en función del caudal	45
Tabla 7 Resultados de ensayo de Jarras.....	49
Tabla 8 Parámetros de Diseño Para el Diseño de Floculadores Hidráulicos de Flujo Horizontal	50
Tabla 9 Parámetros de Diseño Floculador Mecánico de eje horizontal.	54
Tabla 10 Coeficientes de arrastre en floculadores mecánicos	57
Tabla 11 Comparación de la velocidad promedio del fluido	60
Tabla 12 Características de filtros de alta tasa	63
Tabla 13 Granulometría de Antracita	65
Tabla 14 Granulometría Arena Sílice	67
Tabla 15 Peso de Antracita para filtros con base en el ensayo de granulometría	72
Tabla 16 Peso de Arena para filtros con base en el ensayo de granulometría.....	72

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Floculador mecánico con paletas de eje horizontal (Romero, 2000).	25
Ilustración 2 Floculador mecánico con paletas de eje vertical (Romero, 2000).	25
Ilustración 3 Floculador hidráulico de flujo vertical (Romero, 2000).	26
Ilustración 4 Floculador hidráulico de flujo horizontal (Romero, 2000).	26
Ilustración 5 Diagrama paragenético (Romero, 2000).	27
Ilustración 6 Sedimentador de tasa alta (Romero, 2000).	28
Ilustración 7 Tipos de filtro, según dirección de flujo (Romero, 2000).	30
Ilustración 8 Tipos de filtro, según lecho filtrante (Romero, 2000).	31
Ilustración 9 Aireador de fuente o surtidores (Romero, 2000).	32
Ilustración 10 Aireador de bandejas múltiple (Romero, 2000).	33
Ilustración 11 Aireador de cascada y vertedero (Romero, 2000).	33
Ilustración 12 Mezclador rápido mecánico (Romero, 2000).	34
Ilustración 13 Planta convencional (Romero, 2000).	36
Ilustración 14 Planta de filtración directa (Romero, 2000).	37
Ilustración 15 Planta de filtración en línea (Romero, 2000).	37
Ilustración 16 Plano laboratorio de hidráulica.	39
Ilustración 17 Fotografía Laboratorio Hidráulica.	40
Ilustración 18 Esquema de torre de aireación.	44
Ilustración 19 Sección del canal hacia el vertedero [cm].	46
Ilustración 20 Resalto hidráulico [cm].	48
Ilustración 21. Nomenclatura del Floculador Hidráulico.	52
Ilustración 22 Esquema Floculador Hidráulico.	54
Ilustración 23 Floculador Mecánico de Eje Horizontal.	58
Ilustración 24 Vista en planta del sedimentador.	62
Ilustración 25 Perfil longitudinal del sedimentador.	63
Ilustración 26 Filtro de uso domestico.	65
Ilustración 27 Muestra de antracita.	66
Ilustración 28 Muestra de arena sílice.	67
Ilustración 29 Esquema Filtros.	68
Ilustración 30 Bandeja de aireación.	69
Ilustración 31 Canal de mezcla rápida.	70
Ilustración 32 Floculador y sedimentador.	70
Ilustración 33 Paletas del floculador.	71
Ilustración 34 Sedimentado de placas inclinadas.	71
Ilustración 35 Filtro de antracita y arena sílice.	73
Ilustración 36 Muestra de agua a la salida y entrada de la planta.	74
Ilustración 37 Datos de la muestra de entrada.	74
Ilustración 38 Datos de la muestra de salida.	74

RESUMEN

En el proyecto se presenta el procedimiento que se llevó a cabo para el diseño y la construcción de una planta de tratamiento a escala, que simula las condiciones de una planta de tratamiento real, para tal fin se consideraron pérdidas de energía, velocidades, diámetros, coeficientes de arrastre, tiempos de retención, energía mecánica e hidráulica, alturas, áreas, volúmenes, flujos supercríticos, número de Reynolds, gradientes de velocidad, áreas transversales, pesos, densidades entre muchos otros aspectos que rigen el tratamiento de aguas.

Los diseños se realizaron con base en los conceptos y consideraciones de diseño de Autores como Jairo Alberto Romero, del American Water Works Association (AWWA), el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2000) entre muchos otras autoridades mundiales en el tratamiento de agua. En el diseño de las estructuras se tuvieron en cuenta las limitantes del proyecto como lo fueron el espacio disponible en el laboratorio y la optimización de recursos para el proyecto.

Los resultados obtenidos permitieron medir la eficiencia de la planta así como proponer ideas que complementen el proyecto, por otra parte se pudieron analizar con detalle los fenómenos que ocurren en cada una de las etapas del tratamiento.

Palabras Claves: Tratamiento de Aguas, Hidráulica, Aireador, Mezcla Rápida, Mezcla Lenta, Sedimentador, Filtros, Energía Mecánica, Energía Hidráulica.

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas es una de las temáticas más importantes dentro del área de hidráulica de la Ingeniería Civil, no solo porque de esta depende mejorar la calidad de vida de millones de personas con agua que les garantice su salud y subsistencia, sino también porque allí se aplican conceptos tanto de mecánica de fluidos como de tuberías y canales de manera complementaria, y es ahí, donde a partir de la unión de conceptos se logra poner al servicio de la humanidad los fenómenos hidráulicos.

El Gobierno Nacional es el encargado de garantizar que la calidad del agua que los colombianos consumen sea segura, para tal fin implantó el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000, así mismo existen diversos Autores y Entidades que a partir de sus investigaciones han establecido criterios de diseño para optimizar el tratamiento de agua. Este trabajo reunió esos criterios y estableció los que más se ajustaban a las necesidades del proyecto para diseñar y construir la planta.

El proyecto permite mostrar a los estudiantes que no es necesario llegar a la vida profesional para aplicar los conceptos aprendidos a lo largo de la vida académica, sino que por el contrario, desde esa etapa se puede comenzar. El presente, permitió fortalecer y aplicar conceptos aprendidos, adquirir experiencia para futuras oportunidades de diseño y ejecución y por otra parte se contribuye a facilitar el proceso de aprendizaje de los estudiantes de la Facultad por medio de la experimentación. Por otra parte, se presentan los diseños de manera que todas las etapas trabajen en conjunto, de modo que se optimice el uso de materiales reduciendo costos y el área ocupada por la planta, la cual fue una de las limitantes del proyecto por el espacio disponible en el laboratorio.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Con el programa de Tratamiento de Aguas de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás se procura formar Ingenieros Civiles que dominen y apliquen conceptos hidráulicos, asimismo, con la capacidad de diseñar cada una de las estructuras necesarias para la potabilización de agua y que garanticen a los usuarios finales consumir un producto seguro, que cumpla con los requisitos de calidad estipulados por el Gobierno Nacional. Existe una hipótesis en la cual se plantea que para los estudiantes de la asignatura, será más provechoso si el concepto teórico se complementa con el práctico, lo cual se logra por medio de la experimentación.

Los conceptos teóricos de Tratamiento de Aguas se complementan con laboratorios y una salida a una Planta de Tratamiento al final del semestre, esta última muy provechosa dado que aproxima al estudiante con el campo laboral. A partir de la ventaja de familiarizar al estudiante con la vida profesional se considera conveniente la utilización de una planta de tratamiento a escala laboratorio para la sala de hidráulica, donde el estudiante pueda realizar experimentaciones que le permitan comprender, mejorar y diferenciar los efectos que producen sobre el agua cada uno de los procesos y operaciones contempladas en este proyecto.

Así mismo este trabajo considera que al dotar al laboratorio con una nueva herramienta, no solo mejorará las características y equipamiento del mismo, sino que al ser este, un proyecto con pocos antecedentes en el país, la Universidad Santo Tomás será pionera en la investigación del tratamiento de aguas.

OBJETIVOS

General

Diseñar y Construir una planta de tratamiento de agua potable a escala para el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Santo Tomás.

Específicos

- Identificar los procesos y operaciones necesarios para la potabilización.
- Diseñar los distintos componentes de la planta de tratamiento de agua potable.
- Construir la planta de tratamiento a escala laboratorio de acuerdo con los diseños elaborados.
- Poner en marcha la planta de tratamiento a escala laboratorio.
- Determinar la eficiencia de la Planta de tratamiento construida.

1. MARCO TEORICO

1.1. IMPORTANCIA DEL AGUA POTABLE

El agua es uno de los compuestos que se encuentra en mayor cantidad en el planeta, además, esta brinda la posibilidad de desarrollar distintas formas de vida.

Iglesias¹ dice que, el agua es el principal componente del cuerpo humano. Es esencial para los procesos fisiológicos de la digestión, absorción y eliminación de desechos metabólicos no digeribles, y también para la estructura y función del aparato circulatorio. Actúa como medio de transporte de nutrientes y todas las sustancias corporales, y tiene acción directa en el mantenimiento de la temperatura corporal.

En el planeta tierra la distribución del agua, no presenta un panorama favorable para los seres humanos, pues de toda el agua disponible, el 97,5% del agua se encuentra en los océanos y es salada, el 2,5% restante es agua dulce², que se distribuye de la siguiente forma 68,7% está en glaciares, 30,1% es agua subterránea, 0,8% permafrost y el 0,4% restante lagos y ríos, esta última es la cantidad disponible para el consumo del hombre.

Sin embargo el agua disponible para el consumo humano, debe ser sometida a un tratamiento que la haga potable. Mediante el agua puede se puede transmitir diversas enfermedades ya que esta no cumple con los requerimientos mínimos para ser consumida por el hombre.

En el tratamiento al que se somete el agua se debe realizar la remoción o disminución de algunas de las características bacteriológicas, físicas, orgánicas, químicas y radioactivas que la hagan segura y apta para el consumo humano.

Es de vital importancia desarrollar conocimiento nuevo o divulgación del que ya existe, ya que se hace necesario llevar el agua como recurso vital a cada uno de los individuos del planeta, según Pedro Arrojo³ en el 2006 se estimaba que más de 1.100 millones de personas en el mundo no tenían acceso al agua potable y por tanto 10.000 personas fallecían diariamente por carencia de este recurso vital.

¹ Iglesias Rosado, C., et al. Importancia del agua en la hidratación de la población española. Madrid, 2011, p. 28.

² OKI, Taikan; KANAE, Shinjiro. Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, 2006, p. 1068.

³ Arrojo, Pedro. Los retos éticos de la nueva cultura del agua, Zaragoza, 2006, p. 2.

Actualmente la población mundial supera los 7.300 millones de habitantes⁴, esto representa una alta demanda del recurso hídrico, para lograr la cobertura total del servicio de agua potable y evitar de esta manera las muertes por deshidratación en el mundo.

Para explotar el recurso del agua han surgido distintas maneras, es evidente que la distribución del agua dulce alrededor del mundo no es equitativa, por tanto hay sitios geográficos donde la demanda es tan alta y el agua disponible tan poca que se ha hecho necesario explotar otras fuentes de agua a las convencionales (Lagos y ríos), como el agua de mar o el agua subterránea.

Para poder explotar el agua de los océanos es necesario realizar un proceso de desalinización del agua para hacerla apta para el consumo humano. El agua salada en gran cantidad en el cuerpo humano es maligna ya que satura el cuerpo, daña los riñones, deshidrata el cuerpo por el exceso de cloruro de sodio.

Las plantas de desalinización son las encargadas de quitar la sal al agua mediante la osmosis inversa, el objetivo de esto es someter al fluido a presiones muy altas para que pase a través de una membrana, mientras que los sólidos disueltos quedan atrás⁵.

El agua es un recurso básico para la vida humana, por tanto es un derecho el acceso a esta, por tanto la importancia de realizar y entender los procesos de potabilización del recurso, con el fin de garantizar las propiedades físicas, químicas y biológicas aptas para el consumo humano.

1.2. TEORÍA DE FLUJO LIBRE (CANALES)

Primero que todo se debe especificar que la teoría de flujo libre en canales es aplicable solo para los fluidos en su fase líquida, como lo es el agua.

El flujo en un canal se caracteriza porque su circulación está dada por la acción de la fuerza de la gravedad, ya que no se le debe aplicar una presión externa para que se dé su movimiento, como el caso de las tuberías. Su presión es la presión atmosférica lo cual permite su flujo libre.

Gilberto Sotelo⁶ comenta que el flujo del agua dentro de un canal se ve afectado por las siguientes fuerzas:

- La fuerza de la gravedad, como la más importante del movimiento.
- La fuerza de resistencia, ocasionada en las fronteras rígidas por la fricción del fluido y las paredes que lo contienen.

⁴ Country Meters, Población mundial [en línea]. < <http://countrysmeters.info/es/World> > [citado en 14 de marzo de 2016]

⁵ Lenntech, ¿Qué es ósmosis inversa? [en línea] <<http://www.lenntech.es/biblioteca/osmosis-inversa/que-es-osmosis-inversa.htm>> [citado en 14 de marzo de 2016]

⁶ Sotelo A., Gilberto. Hidráulica de Canales: Flujo en un canal. Ciudad de México,

- La fuerza producida por la presión que se ejerce sobre las fronteras del canal, particularmente en las zonas donde cambia su geometría.
- La fuerza debida a la viscosidad del líquido.

Los canales pueden ser naturales o artificiales. Los canales naturales son aquellos drenajes naturales que existen sobre la tierra como ríos, arroyos, quebradas, etc.

Los artificiales son los hechos por el hombre con fines de riego, drenajes, generación de energía, navegación, etc.

En cuanto a la geometría de los canales es importante definir un concepto muy utilizado y necesario para la teoría de los canales, la pendiente S , es el cociente del desnivel entre dos puntos a una distancia horizontal que los separa. Esta se determina como la $\tan \theta$, donde θ es el ángulo de inclinación del fondo del canal con respecto a la horizontal.

La sección transversal de un canal se refiere a la sección perpendicular a la dirección del flujo de agua y de esta forma se puede determinar el área que abarca la corriente de agua. Generalmente los canales artificiales se diseñan con secciones geométricas regulares como rectangular, trapezoidal, triangular o semicircular. Además de esto existen formas compuestas, que se forman de la combinación de dos o más secciones geométricas, utilizadas cuando el caudal es variable y es necesario dar mayor capacidad en determinado tiempo.

Es importante el conocimiento acerca de la teoría de la hidráulica de canales, ya que se prevé que la planta trabaje mediante esta conducción hidráulica, de escurrimiento libre, ya que esta presenta una facilidad y viabilidad económica para el proyecto.

1.2.1. Tipos de flujo

Los tipos de flujo se pueden clasificar de distintas formas, según la característica que se quiera analizar

1.2.1.1. Según la velocidad del flujo

El movimiento de agua en un canal se rige por la importancia de las fuerzas de viscosidad y de gravedad, respecto a la de inercia. La tensión superficial afecta el comportamiento en el caso de la velocidad.

En relación con el efecto de la viscosidad el flujo se puede clasificar como laminar, de transición o turbulento. Esto se determina con el número de Reynolds, que se define con la siguiente ecuación.

$$Re = \frac{V R_h}{\nu}$$

Donde,

$Re = \text{Numero de Reynolds}$

$V = \text{Velocidad media en la seccion m/s}$

$R_h = \frac{D}{4} = \text{Radio hidraulico m}$

$\nu = \text{viscosidad cinematica del agua en m/s}^2$

a. Flujo Laminar:

El movimiento en este tipo de flujo es uniforme, sigue trayectorias regulares, separadas y perfectamente definidas, dando la impresión de que se trata de láminas paralelas.

$$Re \leq 500$$

b. Flujo de transición:

Régimen de flujo multifásico, que se encuentra en el punto medio entre el flujo laminar y el flujo turbulento.

$$500 \leq Re \leq 12.500$$

c. Flujo turbulento:

En este tipo de flujo las partículas del fluido se mueven en trayectorias erráticas, es decir en trayectorias irregulares que no siguen un orden establecido.

$$Re \geq 12.500$$

1.2.1.2. Según la variación de velocidad con respecto al tiempo

Esta clase obedece a la utilización del tiempo como criterio.

a. Flujo Permanente:

Las condiciones de velocidad de escurrimiento de un flujo permanente en cualquier punto no cambian con el tiempo, es decir permanecen constantes.

b. Flujo no permanente:

Las características mecánicas y las propiedades del fluido serán diferentes de un punto a otro. El caso más común del flujo no permanente se presenta en los canales donde transita una onda de avenida, como en los ríos, en las cunetas o bordillos de carretera.

1.2.1.3. Según magnitud y dirección de la velocidad del flujo

Esta clasificación obedece a la utilización del espacio como criterio.

- a. Flujo uniforme:
Ocurre cuando el vector velocidad en todos los puntos del escurrimiento es idéntico tanto en magnitud, como en dirección.
- b. Flujo Variado:
Es el caso contrario al flujo uniforme, ya que este se encuentra cerca de fronteras solidas que varían la magnitud por efecto de la viscosidad.

1.2.1.4. Flujo subcrítico y supercrítico

La importancia de la fuerza de inercia respecto de la de gravedad, ambas por unidad de masa. Se mide a través del número de Froude.

$$F = \frac{V}{\sqrt{\left(g \frac{\cos \theta}{\alpha}\right) \left(\frac{A}{T}\right)}}$$

Donde,

F = Numero de Froude

V = Velocidad media de la seccion m/s

g = aceleracion de la gravedad m/s²

θ = Angulo de inclinacion del lecho con respecto a la horizontal

α = Coeficiente de correccion de la energia cinetica

A = Area hidraulica de la seccion m²

T = Ancho de superficie libre de la seccion m

1.2.2. Pérdida de energía

Se asocia el concepto de perdida de energía a flujos que trabajan bajo presión al interior de una tubería, sin embargo en los canales también se presenta perdida de energía ya que en las fronteras solidas existen perdidas por fricción y locales.

Dentro de un canal que tenga sección y rugosidad constantes, el flujo será variado, lo que obliga a cambiar la pendiente hidráulica continuamente, para que la velocidad del agua cumpla con las condiciones necesarias según sea el tipo de canal, como fuerza tractiva, velocidades, etc.

En el libro de Sotelo⁷, encontramos que la fórmula de Darcy-Weisbach como básica para calcular la pérdida por fricción en cualquier conducción y para conductos a presión de sección circular se expresa así.

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g}$$

Donde,

h_f = Pérdida de energía

f = Factor de fricción dependiente del número de Reynolds

L = Longitud del conducto m

D = Diámetro del conducto m

V = Velocidad media del flujo m/s

Como se busca encontrar la pendiente que satisfaga una condición de velocidad, se modifica la ecuación, adaptándola para flujo por escurrimiento libre.

Donde, D será $4 R_h$ y h_f será igual a SL , por tanto.

$$V = C \sqrt{R_h S}$$

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}}$$

1.2.3. Coeficiente de Manning

La ecuación de Manning es una ecuación empírica, donde evalúa el coeficiente de Chezy.

$$C = \frac{R_h^{1/6}}{n}$$

Donde n , es un nuevo factor de fricción, llamado coeficiente de Manning. Este depende solo de la rugosidad de la frontera y es independiente al número de Reynolds.

Al sustituir el coeficiente de Manning en la fórmula de Darcy-Weisbach y obtenemos que la ecuación de Manning es.

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2}$$

Los valores del coeficiente n en la ecuación de Manning, se encuentran a continuación.

⁷ Sotelo A., Gilberto. Hidráulica de Canales: Pérdida de energía. Ciudad de México, p. 38.

Tabla 1 Valores para el Coeficiente n en la fórmula de Manning según Chow

Valores Coeficiente n			
Material del Canal	Mínimo	Normal	Máximo
Acrílico	0,008	0,009	0,010
Vidrio	0,009	0,010	0,013
Concreto	0,011	0,013	0,014
Madera laminada	0,015	0,017	0,020
Mampostería de piedra pequeña cementada	0,018	0,025	0,030
Fuente Sotelo A., Gilberto. Hidráulica de Canales.			

1.3. POTABILIZACIÓN DEL AGUA

El agua apta para el consumo humano es uno de los temas más importantes en la ingeniería civil, tanto su suministro, como su el tratamiento al cual debe someterse para su purificación.

El agua cruda a tratar no siempre es la misma ya que provienen de distintas fuentes y necesita distintos tratamientos para garantizar las características optimas tanto químicas, físicas y biológicas para el consumo humano.

Previamente se mencionó la importancia del proceso de purificación del agua y de cómo este es necesario para evitar el contagio de enfermedades que el agua puede transportar. Dice Romero⁸ que el agua debe purificarse para este siempre libre de todo organismo patógeno, es decir, que sea biológicamente segura.

En el momento de hacer la captación del agua debe identificarse la calidad de esta, sus características organolépticas, físico-químicas y microbiológicas, con el fin de seleccionar los procesos de potabilización más adecuados para cada tipo de agua cruda.

El RAS 2000 nos ofrece una tabla que contiene los parámetros físico-químicos y microbiológicos, donde clasifica la calidad del agua cruda y dicta los tipos de tratamiento a los cuales debe ser sometida esta.

⁸ Romero Rojas, Jairo Alberto. Purificación del Agua. Bogotá. 2000. p. 19.

Tabla 2 Calidad de la fuente

Parámetros	Análisis según		Nivel de calidad de acuerdo al grado de polución			
	Norma técnica NTC	Standard Método ASTM	1. Fuente aceptable	2. Fuente regular	3. Fuente deficiente	4. Fuente muy deficiente
DBO 5 días	3630					
Promedio mensual mg/L			≤ 1,5	1,5 - 2,5	2,5 - 4	> 4
Máximo diario mg/L			1 – 3	3 - 4	4 - 6	> 6
Coliformes totales (NMP/100 mL)						
Promedio Mensual		D-3870	0 – 50	50 - 500	500 - 5000	> 5000
Oxígeno disuelto mg/L	4705	D-888	≥ 4	≥ 4	≥ 4	< 4
PH promedio	3651	D 1293	6,0 - 8,5	5,0 - 9,0	3,8 - 10,5	
Turbiedad (UNT)	4707	D 1889	< 2	2 - 40	40 - 150	≥ 150
Color verdadero (UPC)			< 10	10 - 20	20 - 40	≥ 40
Gusto y olor		D1292	Inofensivo	Inofensivo	Inofensivo	Inaceptable
Cloruros (mg/L - Cl)		D 512	< 50	50 - 150	150 - 200	300
Fluoruros (mg/L - F)		D 1179	< 1,2	< 1,2	< 1,2	> 1,7
GRADO DE TRATAMIENTO						
Necesita un tratamiento convencional			No	No	Sí, hay veces (Ver requisitos para uso FLDE literal C.7.4.3.3)	Si
Necesita unos tratamientos específicos			No	No	No	Si
Procesos de tratamiento utilizados			Desinfección + Estabilización	Filtración lenta o filtración directa	Pretratamiento + coagulación + sedimentación + filtración rápida o filtración lenta	Tratamientos Específicos
Fuente RAS – 2000. Título B - Sistemas de Acueductos						

Es necesario de antemano conocer: El tipo de fuente, la calidad del agua de la misma, las características organolépticas, físico-químicas y microbiológicas esenciales, los estudios de tratabilidad para seleccionar los procesos de potabilización, el procedimiento de muestreo para el control de calidad, las características de producción que debe cumplir la fuente para

el abastecimiento que se requiere, la protección que debe suministrarse a este recurso y otros aspectos adicionales

1.4. Características del agua potable

1.4.1 Físicas

Las características físicas del agua son aquellas perceptibles a los sentidos (gusto, visión, olfato, etc.); están ligadas directamente sobre las condiciones estéticas y de aceptabilidad del agua⁹. El color, sabor y aroma del agua, pueden no ser perjudiciales para la salud humana, sin embargo, son características que impiden al ser humano consumirla por cuestiones netamente llamativas.

1.4.1.1 Turbidez

La turbidez ocurre cuando el agua pierde su transparencia. Ésta pérdida se debe a la presencia de sólidos en suspensión, es decir que la cantidad de sólidos será directamente proporcional a la turbidez en el agua.

Causas

Los sólidos en suspensión pueden provenir de diversos orígenes, como por ejemplo, restos vegetales (hojas caídas, algas, fitoplancton, etc.) y sedimentos (rocas o suelo erosionado, elementos ya depositados en el fondo pero que son resuspendidos por movimientos en éste a causa de peces o humana).

Consecuencias

La turbidez le da coloración oscura al agua, esto implica la absorción de calor a partir de la luz solar, el calor aumentará la temperatura del líquido lo que involucra la reducción de la concentración de oxígeno en el agua (a menor temperatura mejor disolución de oxígeno), adicionalmente, al ser más oscura, los rayos solares se dispersarán dificultando la fotosíntesis de plantas marinas, disminuyendo aún más la presencia de oxígeno disuelto.

Impacto

Uno de los impactos del agua turbia es netamente estético, ya que a nadie le agrada consumir agua sucia o de color oscuro, sin importar que no sea perjudicial para la salud.

Es necesario eliminar los sólidos en suspensión para la desinfección completa del agua, dado que éstos pueden adsorber metales pesados entre otros elementos tóxicos.

⁹ Barrenechea Martel Ada. Aspectos Físicoquímicos de la Calidad del Agua, Tomo I Capítulo I, p 4-

Medida

La unidad nefelométrica de turbidez o NTU por su sigla en inglés es la unidad de medida de turbidez para el agua y demás líquidos.

Para determinar los NTU del agua se usa el turbidímetro o nefelómetro, el cuál mide la intensidad de la luz dispersada sobre una muestra de líquido y la compara con una muestra patrón conocida como Formacina.

Valor Máximo de la Turbidez

De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS) la turbidez máxima del agua apta para el consumo humano debe ser de 5 NTU siendo el ideal igual o menor a 1 NTU.

Ensayo de Jarras o Test de Jarras

El ensayo de jarras es una prueba de laboratorio en la que se mide la turbidez inicial de una muestra de agua, posteriormente se aplica el coagulante y se procede a hacer la simulación de los procesos de mezcla rápida, floculación y sedimentación. Posteriormente se vuelve a medir la turbidez de la muestra, comparando así el resultado del ensayo con los valores exigidos por las entidades competentes como la OMS o el Ministerio de Salud.

1.4.1.2 Temperatura

La temperatura es uno de los aspectos más importantes ya que de esta dependerá la absorción de oxígeno, los tiempos de retención en los procesos de mezcla rápida, floculación, sedimentación y filtración. La temperatura dependerá de factores medioambientales y de turbidez, así como se mencionó anteriormente.

De la temperatura depende la velocidad de las reacciones, los tipos de organismos existentes, los gases disueltos y la facilidad de desinfección.

1.4.1.3 Color

El color del agua puede presentarse junto a la turbiedad o independiente de esta. Esta característica se produce por la presencia de materia orgánica, metales como el hierro o el manganeso, descomposición de materia entre otras.

Existen factores como el pH y la temperatura del agua que pueden influir en la formación del color.

Color Aparente: Se le denomina así al color presente en el agua cruda o al color que tiene el agua en la fuente, (componentes en suspensión).

Color Verdadero: Es el color que toma el agua luego del proceso de tratamiento, después de que el agua es filtrada, (componentes disueltos).

1.4.1.4 Olor y Sabor

El olor y el sabor del agua son dos de los factores de mayor rechazo por parte del consumidor, existen diversos orígenes para los diferentes olores y sabores que toma el agua. El agua cruda tiene olor y sabor más intenso cuando hay mayor presencia de compuestos orgánicos producto de microorganismos y algas; así mismo cuando las descargas industriales son mayores.

Olor: Este se puede contrarrestar aumentando el tiempo de aireación del agua o con la adición de carbón activado.

El olor del agua se puede deber a la presencia de arcillas, de peces, de aguas de alcantarilla, de hojas en descomposición, entre otras; y cada origen le da un olor diferente.

Sabor: El agua puede presentar cuatro tipos de sabores, ácido, salado, dulce y amargo. Sales como el cloruro de calcio, cloruro de magnesio, sulfato de hierro, ácido sulfúrico entre otros, son los responsables del sabor del agua.

Aunque la OMS no especifica valores admisibles en cuanto a olor y sabor para una fuente de abastecimiento si recomienda que esta esté libre de estas características.

1.4.2 Químicas

1.4.2.1 Potencial de Hidrógeno pH

Medir el pH de una muestra de agua o cualquier otro líquido, permite determinar la acidez o alcalinidad de la misma. El pH mide la concentración de iones de hidrógeno.

Causas

El pH en fuentes de agua se encuentra por lo general en el rango de 5 a 9. Estas condiciones pueden cambiar a causa de los gases de efecto invernadero, los cuales están presentes en la atmósfera, y que al disolverse en agua lluvia se convierten en ácidos, modificando así el pH de cuerpos de agua.

Consecuencias

Tratar agua ácida hace más difícil los procesos de coagulación y desinfección dadas las reacciones químicas generadas con el sulfato de alúmina o el cloro. Es necesario neutralizar el pH para hacer más fácil y económico el tratamiento de agua; para tal fin se pueden aplicar sustancias como la cal u otras bases químicas.

Impacto

Consumir agua ácida no trae efectos directos para la salud, sin embargo, el agua ácida puede corroer las tuberías de distribución así como generar obstrucciones dentro de las mismas.

Medida

El pH se mide en valores de 1 a 14; el valor neutro es el 7. Una muestra es ácida si su pH está por debajo del valor neutro y a medida que se aleja de este su intensidad de acidez aumentará. Los valores superiores a 7 son considerados como básicos (alcalinos) siendo 14 el de mayor intensidad.

Valores Admisibles

De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud el valor óptimo del pH del agua debe estar entre 6,5 y 9,5. Valores por fuera de este rango pueden no tener consecuencias negativas para los consumidores pero si debe ser tomada en cuenta dentro de los parámetros de calidad de agua y operativos.

La acidez y la alcalinidad se pueden expresar en miligramos de Carbonato de Calcio. De acuerdo al Decreto 1575 de 2007 los valores admisibles de sustancias químicas en el agua son:

Acidez: 60 mg/L CaCO_3

Alcalinidad total: 120 mg/L CaCO_3

Determinación de la Acidez y la Alcalinidad de las muestras

Por medio de este laboratorio se puede determinar la calidad del agua y determinar si es necesario agregar elementos como cal, para neutralizar el pH. En ese ensayo, se mide el pH y se procede a indicar y titular la muestra con diferentes soluciones. Finalmente por medio de ecuaciones se puede obtener la calidad del agua en mg/L de carbonato de calcio y compararlos con los valores estipulados por las entidades como el ministerio de protección social o la OMS.

1.4.2.2 Dureza

Esta característica se presenta cuando hay presencia de alcalinotérreos en el agua. Depende del pH y la alcalinidad.

Causas

En aguas continentales la disolución y lavado de minerales componentes de rocas como calcio y magnesio producen dureza en el agua.

Consecuencias

La presencia de los alcalinotérreos en el agua produce problemas de incrustaciones en tuberías. Para ablandarla se puede realizar una precipitación de cal o el proceso cal-soda, combinación de cal y soda.

Impacto

Consumir Agua dura no ha demostrado traer efectos negativos para la salud, investigaciones de la OMS han concluido que consumir agua dura podría reducir el riesgo cardiovascular a largo plazo. Autores como Sengupta¹⁰ creen que el agua dura en pacientes con cálculos renales puede empeorar su condición, sin embargo no se

¹⁰ Sengupta Pallav. Potential Health Impacts of Hard Water, 2013 August; 4(8): 866-875

considera una causa originaria. Así mismo la OMS recomienda un mínimo de dureza de 25-50 mg/L de magnesio, como prevención de la arterioesclerosis.

Medida

La dureza cálcica y de magnesio se expresa en miligramos equivalentes de Carbonato de calcio por litro.

Valores admisibles

En agua cruda, la dureza puede estar entre 100 y 500 mg/L de equivalentes de carbonato de calcio de litro.

La OMS recomienda valores admisibles entre 100 y 300 mg/L.

En Colombia, de acuerdo a la tabla de Calidad Química del Agua el valor máximo de Dureza Total debe ser de 180 mg/L de CaCO_3 .

1.4.2.3 Oxígeno Disuelto

Es una de las características esenciales, los niveles bajos de oxígeno pueden ser sinónimo de contaminación, de presencia de bacterias y materia orgánica. Las altas concentraciones de oxígeno dependen de la temperatura y la presión. En periodos de verano, los niveles de oxígeno descienden ya que el caudal se reduce y la demanda de oxígeno aumenta dada la presencia de plantas. El oxígeno disuelto en el buen sabor del agua.

1.4.2.4 Bacteriológicas o Microbiológicas

Existen diversos organismos presentes en el agua, sin embargo por la actividad humana, se depositan virus y bacterias perjudiciales, estas bacterias son los coliformes, para los cuales se hacen análisis de riesgo, estos coliformes están presentes en la materia fecal.

La calidad bacteriológica se puede expresar en UFC por su sigla, Unidades Formadoras de Colonias.

1.5. PROCESOS UNITARIOS Y OPERACIONES UNITARIAS

El agua en el momento en que se capta de las fuentes superficiales o subterráneas, presentan unas características físicas, químicas y microbiológicas, que afectan el bienestar y la salud humana, por tanto se hace necesario someter al agua a una serie de operaciones o procesos unitarios, con el fin de purificarla o potabilizarla para hacerla más segura para el consumo de los seres humanos.

1.5.1. Operaciones Unitarias

Las operaciones unitarias se conocen a los procesos químicos, físicos o biológicos mediante el cual las sustancias objetables que contiene el agua son removidas y transformadas en sustancias inocuas¹¹.

1.5.1.1. Floculación

Cuando se habla del término floculación se refiere a la aglomeración de partículas coaguladas, que forman una partícula de mayor tamaño llamada floc. Dice el ingeniero Jairo Romero¹² que es el proceso por el cual, una vez desestabilizados los coloides, se provee una mezcla suave de partículas para incrementar la tasa de encuentros o colisiones entre ellas sin romper o disturbar los agregados preformados.

La floculación esta influenciada por fuerzas químicas y físicas como la carga eléctrica de las partículas, la capacidad de intercambio, el tamaño y la concentración del floculo, el pH, la temperatura del agua y la concentración de electrolitos. Al tener en cuenta cada uno de los factores que intervienen en la floculación, no están definidas exactamente las formas como se comportara el agua en este proceso, por tanto se apela a experiencias previas en otras plantas.

El floculador sencillamente es un tanque con algún medio, ya sea hidráulico o mecánico, que efectúe una mezcla suave y lenta, en un tiempo de retención prolongado.

Los floculadores se clasifican en dos tipos mecánicos e hidráulicos, los mecánicos realizan la mezcla utilizando rotores de paletas tanto horizontales como verticales y los hidráulicos usan el flujo libre del agua, que produce una ligera turbulencia que genera la mezcla.

a. Floculadores mecánicos:

En los Floculadores mecánicos se introduce potencia al agua garantizando una mezcla lenta mediante agitadores mecánicos. El tipo de agitador más utilizado es el de paletas de eje horizontal como de eje vertical, estos imparten un movimiento rotatorio al agua generando una turbulencia interna.

¹¹ Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Diseño de plantas potabilizadoras. Bogotá. 2013. p. 50.

¹² Romero Rojas, Jairo Alberto. Purificación del Agua. Bogotá. 2000. p. 79.

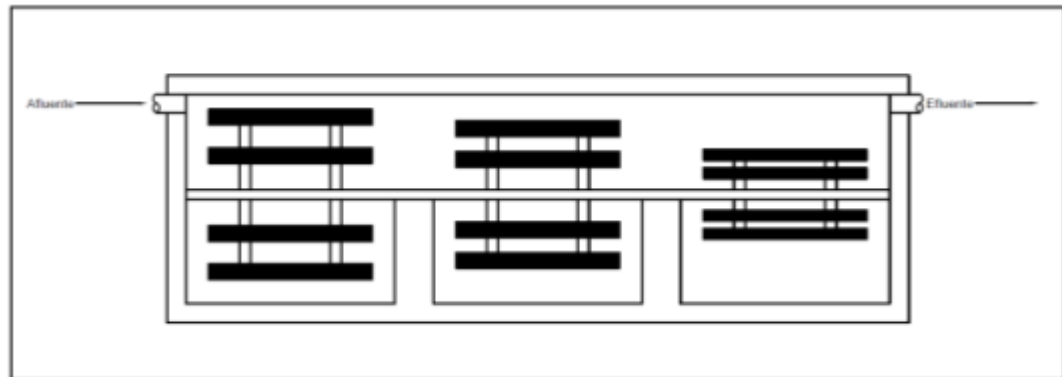


Ilustración 1 Floculador mecánico con paletas de eje horizontal (Romero, 2000).

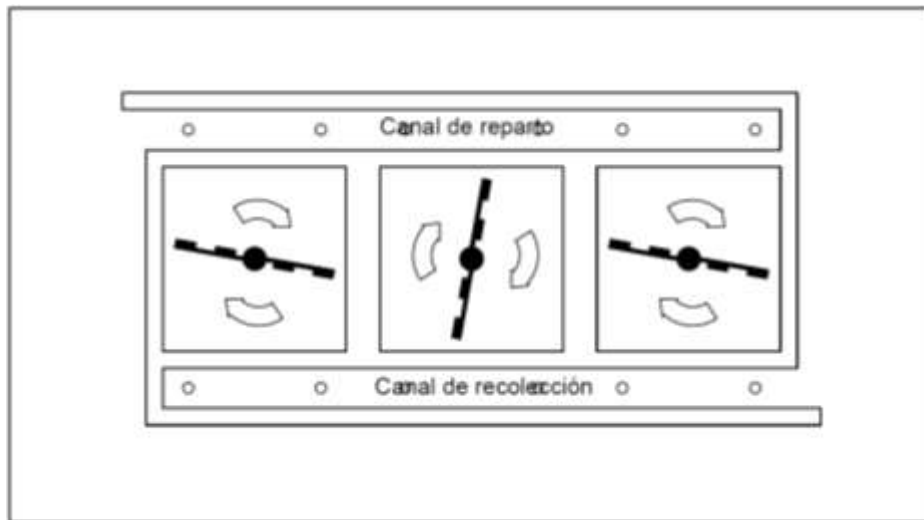


Ilustración 2 Floculador mecánico con paletas de eje vertical (Romero, 2000).

b. Floculadores hidráulicos:

Los floculadores hidráulicos como se menciona anteriormente, trabajan con el flujo libre de agua, por esto los clasificamos en dos grupos, de flujo vertical y de flujo horizontal. En los de flujo vertical es común encontrar tanques con pantallas en las que el flujo cambia de sentido y en este momento es donde se produce la mezcla. En los floculadores de flujo vertical el agua se mueve de arriba hacia abajo dentro de las mismas pantallas.

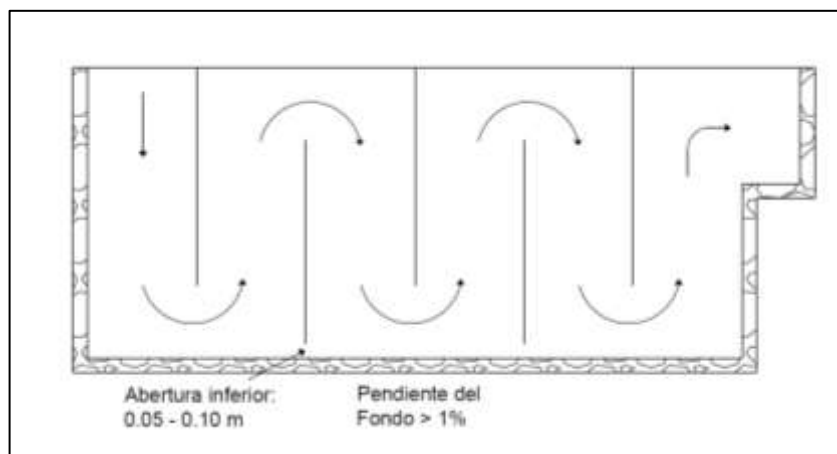


Ilustración 3 Floculador hidráulico de flujo vertical (Romero, 2000).

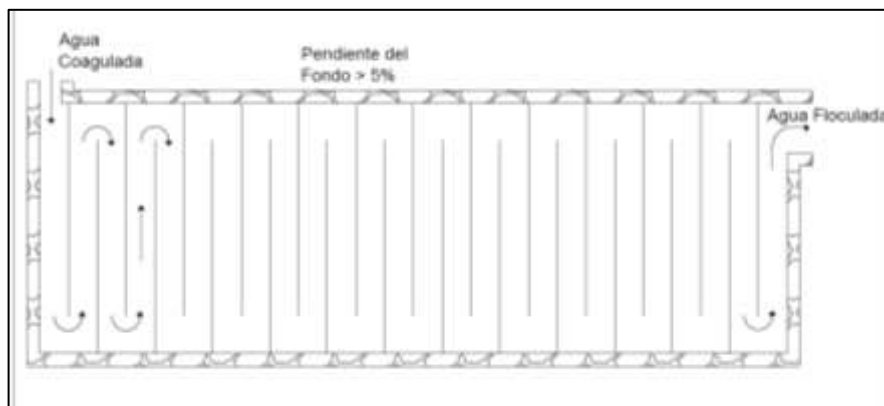


Ilustración 4 Floculador hidráulico de flujo horizontal (Romero, 2000).

1.5.1.2. Sedimentación

La sedimentación es la operación en la que se remueven las partículas, previamente coaguladas y floculadas, el objetivo del sedimentador es separar las partículas del agua por medio de la fuerza de gravedad. La sedimentación se puede usar de dos formas, una simple, que es en la cual no necesita un proceso químico-físico antes, o después de la coagulación y floculación.

La sedimentación se puede dar de distintas formas, según la naturaleza de los sólidos. En los tipos de sólidos se encuentran las partículas discretas, estas no cambian su tamaño, forma o peso cuando se están sedimentando; las partículas floculentas y precipitantes en las cuales la densidad y el volumen cambia cuando se produce el choque entre estas a medida que se están sedimentando.

Existen distintos tipos de sedimentación.

La sedimentación tipo 1, se refiere a la remoción de partículas discretas no floculentas en una suspensión diluida. En estas condiciones se dice que la sedimentación es no interferida

y es función solamente de las propiedades del fluido y de las características de la partícula. Es el tipo de sedimentación que ocurre con partículas de características floculentas mínimas en suspensión diluida, como sería el caso de sedimentación de materiales pesados inertes.

La sedimentación tipo 2, se refiere a la sedimentación de suspensiones diluidas de partículas floculentas, en las cuales es necesario considerar las propiedades floculentas de la suspensión junto con las características de asentamiento de las partículas. Ocurre generalmente en el tratamiento de aguas residuales, dada la naturaleza de los sólidos en ellas presentes, y en la purificación de aguas potables cuando los sedimentadores están precedidos de floculadores y coagulación.

La sedimentación zonal, se refiere al momento de sedimentación de suspensiones de concentración intermedia de material floculento, en las cuales se presenta un asentamiento interferido debido a la cercanía de partículas. Esta cercanía permite que las partículas, gracias a las fuerzas entre ellas, tienen una posición relativa fija de unas con otras; se forma una matriz porosa soportada por el fluido que desplazan, y la masa de partículas se desplaza hacia el fondo como un solo bloque.

Compresión, esta ocurre cuando la concentración aumenta a un valor en que las partículas están en contacto físico unas con otras y el peso de ellas es sostenido parcialmente por la masa compactada. Se presenta en operaciones de espesamiento de lodos cuando cuando las partículas se acomodan en el fondo del tanque de sedimentación; su peso es soportado por la estructura de la masa en compactación y el asentamiento es función de la deformación de las partículas o floculos.

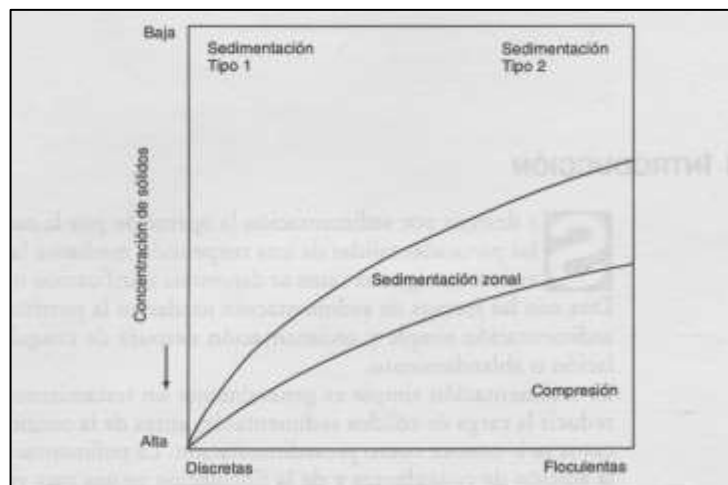


Ilustración 5 Diagrama paragenético (Romero, 2000).

Los sedimentadores de alta tasa se caracterizan por ser de poca profundidad, se entiende sedimentación en elementos poco profundos, en módulos de tubos circulares, cuadrados, hexagonales, octogonales, de placas planas paralelas, de placas pnduladas o de otras formas, en tanques poco profundos, con tiempos de retención menores de 15 minutos. La característica principal de un sedimentados de alta tasa es su poca profundidad,

usualmente del orden de centímetros. En los pequeños conductos usados se puede desarrollar flujo laminar.

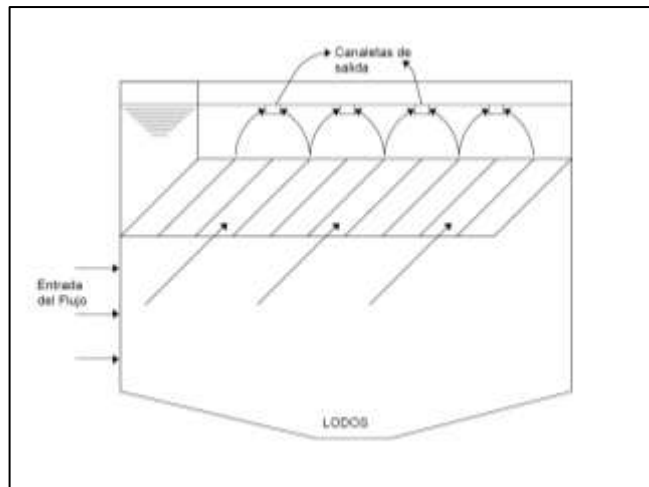


Ilustración 6 Sedimentador de tasa alta (Romero, 2000).

1.5.1.3. Filtración

En la purificación del agua es prerequisite para el suministro de agua es requisito someterla a la filtración. Aunque el 90% de la turbiedad y el color son removidos en la coagulación y la sedimentación, una cierta cantidad de floc pasa del tanque de sedimentación y estas partículas deben ser removidas, de allí la importancia de la filtración.

La filtración es una operación por la cual se pasa el agua a través de medios porosos; generalmente estos medios son arena o la combinación de arena y antracita.

En la filtración se remueve el material suspendido, compuesto de floculo, suelo, metales oxidados y microorganismos. La remoción de microorganismos es de gran importancia puesto que muchos de ellos son extremadamente resistentes a la desinfección y, sin embargo son removibles mediante filtración. Se tiene registro de que en Inglaterra en el año 1829 se realizó la construcción de filtros lentos de arena, lo cual ayudo a controlar la epidemia de cólera que se presentó en Hamburgo.

Se piensa que la filtración es como pasar el agua por un tamiz donde el medio filtrante atrapa el material suspendido. Lo cierto es que la filtración es una operación más compleja ya, ya que combina diferentes acciones físicas, químicas y biológicas que ocurren en el filtro.

El papel más importante en la filtración es el de la adsorción, distinta de absorción, la adsorción es la capacidad de un material de adherir partículas en sus diferentes caras, el medio filtrante y las partículas presentan fuerzas de atracción, de esta forma se retiene el floculo que se desea remover del agua.

Tabla 3 Mecanismos de remoción de un filtro

Mecanismo		Descripción
1.	Cribado	
a.	Mecánico	Partículas más grandes que los poros del medio son retenidas mecánicamente
b.	Oportunidad de contacto	Partículas más pequeñas que los poros del medio son retenidas por oportunidad de contacto
2.	Sedimentación	Las partículas se sedimentan sobre el medio filtrante, dentro del filtro.
3.	Impacto inercial	Las partículas pesadas no siguen las líneas de corriente.
4.	Intercepción	Muchas partículas que se mueven a lo largo de una línea de corriente son removidas cuando entran en contacto con la superficie del medio filtrante.
5.	Adhesión	Las partículas floculentas se adhieren a la superficie del medio filtrante. Debido a la fuerza de arrastre del agua, algunas son arrastradas antes de adherirse fuertemente y empujadas más profundamente dentro del filtro. A medida que el lecho se taponas, la fuerza cortante superficie aumenta hasta un límite para el cual no hay remoción adicional. Algún material se fugara a través del fondo del filtro haciendo aparecer turbiedad en el efluente.
6.	Adsorción química	
a.	Enlace	Una vez que una partícula ha entrado en contacto con la superficie del medio filtrante o con otras partículas, la adsorción, física y, o química, permite su retención sobre dichas superficies
b.	Interacción química	
7.	Adsorción física	
a.	Fuerzas electrostáticas	
b.	Fuerzas electrocinéticas	
c.	Fuerzas de Vander Waals	
8.	Floculación	Partículas más grandes capturan partículas más pequeñas y forman partículas aún más grandes.
9.	Crecimiento biológico	Reducen el volumen del poro y puede promover la remoción de partículas.
Fuente Romero Rojas, J. A., Purificación del agua		

Existen distintos sistemas de filtración propuestos y construidos; se pueden clasificar de acuerdo a la dirección de flujo, el tipo de lecho filtrante, la fuerza impulsora, la tasa de filtración y el método de control de la tasa de filtración.

Según la dirección de flujo, los filtros pueden ser de flujo hacia abajo, hacia arriba o de flujo dual.

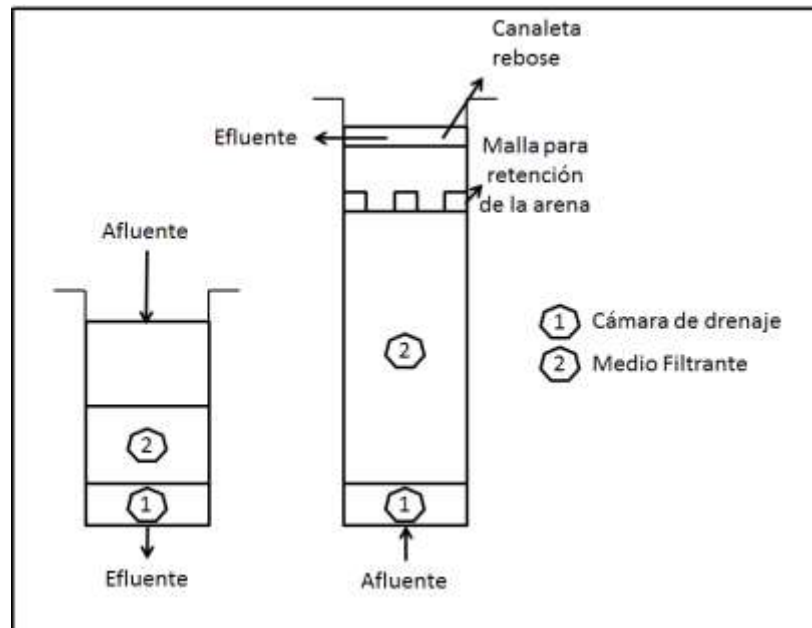


Ilustración 7 Tipos de filtro, según dirección de flujo (Romero, 2000).

Según tipo de lecho filtrante, generalmente se utiliza un solo medio, arena o antracita, pero también existen medios duales que combinan arena y antracita.

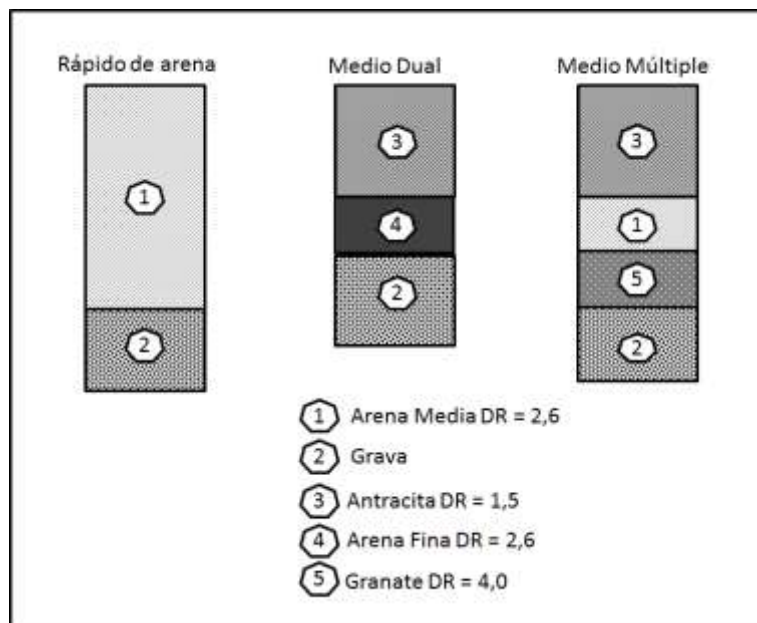


Ilustración 8 Tipos de filtro, según lecho filtrante (Romero, 2000).

Los primeros filtros usados para el tratamiento de agua fueron los filtros lentos, los cuales utilizan una capa de arena fina de 1 m soportada sobre un lecho de grava. Estos filtros fueron remplazados posteriormente por los filtros rápidos, filtros de arena, generalmente con lavado ascensional, con tasas de filtración mucho mayores. Luego, con el uso de medios filtrantes duales se lograron diseños mucho más económicos en área, al usar tasas de filtración aún más altas.

1.5.2. Procesos Unitarios

La Universidad Nacional Abierta y a Distancia¹³, presenta en su curso de diseño de plantas potabilizadoras la definición de un proceso unitario, como aquellas transformaciones en las que existe la presencia de una reacción química de por medio y que involucran una o varias operaciones unitarias.

1.5.2.1. Aireación

La aireación es el proceso por el cual se pone en contacto el agua con el aire, con el fin de modificar las concentraciones de sustancias volátiles contenidas en el agua cruda.

¹³ Universidad Abierta y a Distancia, Diseño de plantas potabilizadoras, Procesos Unitarios para potabilización del agua [en línea]
http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358040/Contenido_en_linea_Diseño_de_Plantas_Potabilizadoras/leccin_11_procesos_unitarios_para_potabilizacin_de_agua.html [citado en 6 de abril de 2016]

Las funciones más importantes de la aireación son:

- Transferir oxígeno al agua para aumentar el OD
- Disminuir la concentración de CO_2
- Disminuir la concentración de H_2S
- 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 representa una de las operaciones de uso más intensivo de energía en los sistemas de tratamiento, mediante equipos de aireación difusa, equipos de turbina y aireadores mecánicos.

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

El proceso de aireación se hace en diferentes formas, pero en esencia se busca que tenga contacto directo con el ambiente, interactuando con acción de la fuerza de gravedad a este tipo de aireadores se le conoce como aireadores de caída de agua como los son los aireadores de fuente o surtidores, aireadores de bandejas múltiples, aireadores en cascada y vertederos.

Los aireadores de fuente o surtidores consisten en una serie de toberas fijas, sobre una malla de tuberías, las cuales dirigen el agua hacia arriba, verticalmente o en ángulo inclinado, de tal manera que el agua se rompe en gotas pequeñas. Tienen gran valor estético, pero requieren un área grande.

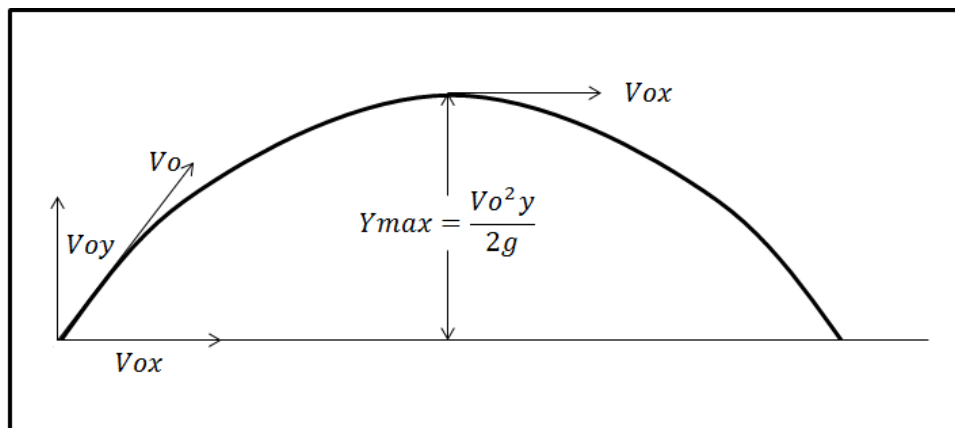


Ilustración 9 Aireador de fuente o surtidores (Romero, 2000).

Un aireador de bandejas múltiples consiste 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 algunos aireadores de bandeja se coloca medio grueso de coque, piedra, ladrillo triturado o cerámica.

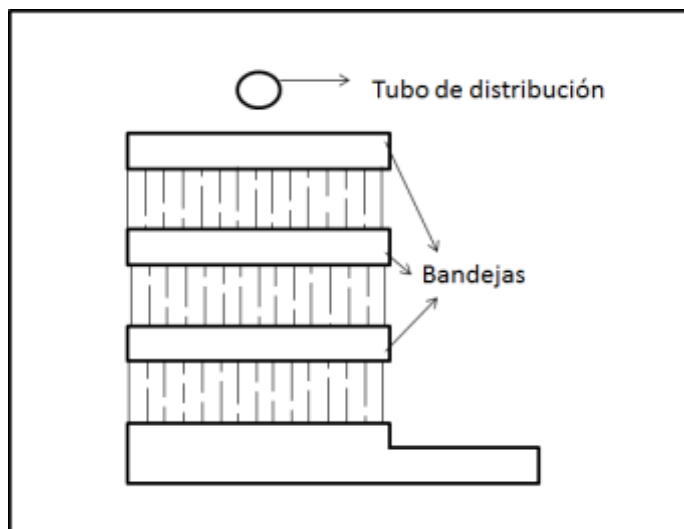


Ilustración 10 Aireador de bandejas múltiple (Romero, 2000).

Los aireadores en cascada y vertederos dejan caer el agua, en láminas o capas delgadas, sobre uno o más escalones de concreto. Este aireador produce una pérdida de energía. Se diseña como una escalera, entre más grande sea el área horizontal más completa es la aireación, pues esta se produce en las áreas de salpicamiento en forma similar a la que ocurre en un río turbulento.

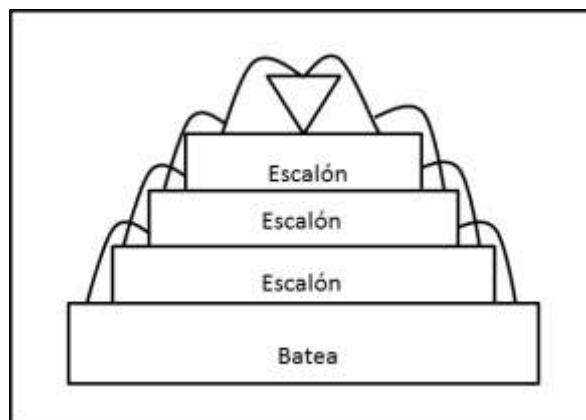


Ilustración 11 Aireador de cascada y vertedero (Romero, 2000).

1.5.2.2. Coagulación

También conocido como como mezcla rápida es un proceso empleado en el tratamiento del agua con el fin de dispersar diferentes sustancias químicas y gases. En plantas de purificación de agua el mezclador rápido tiene generalmente el propósito de dispersar rápida y uniformemente el coagulante a través de toda la masa o flujo de agua.

La mezcla rápida puede efectuarse mediante turbulencia, provocada por medios hidráulicos en canales, canaletas Parshall, vertederos rectangulares, tuberías de succión de bombas,

mezcladores mecánicos en línea, rejillas difusoras, chorros químicos y tanques con equipo de mezcla rápida.

En los mezcladores hidráulicos la mezcla es ejecutada como resultado de la turbulencia que existe en el régimen de flujo; en los mecánicos la mezcla es inducida a través de impulsores rotatorios del tipo de hélice o turbina.

Para los mezcladores rápidos mecánicos se utilizan tanques generalmente de sección circular o cuadrada, estos consisten en hélices, paletas, turbinas u otros elementos similares acoplados a un eje de rotación impulsado por una fuerza motriz cualquiera.

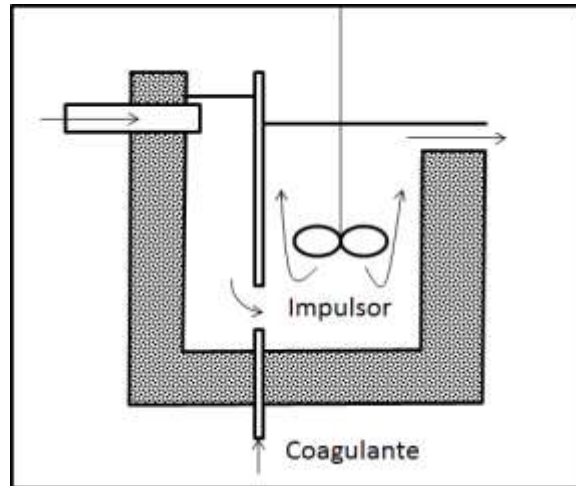


Ilustración 12 Mezclador rápido mecánico (Romero, 2000).

Los mezcladores rápidos hidráulicos se utilizan cuando se dispone de suficiente cabeza o energía en el flujo de entrada. El mezclador hidráulico tiene la ventaja de no requerir equipo mecánico, situación favorable para lugares donde no se cuenta con el personal capacitado para operar los equipos, ni para realizar el mantenimiento de estos.

Los mezcladores hidráulicos más implementados son los vertederos rectangulares, las canaletas Parshall, Tubos Venturi, dispersores de tubos perforados y tanques con baffles.

1.5.2.3. Desinfección

El proceso de desinfección también se conoce como cloración, consiste en la extracción, desactivación o eliminación de los microorganismos patógenos que existen en el agua. La destrucción y/o desactivación de los microorganismos supone el final de la reproducción y crecimiento de estos microorganismos. Si estos microorganismos no son eliminados el agua no es potable y es susceptible de causar enfermedades.¹⁴

¹⁴Lenntech, ¿Qué es la desinfección del agua? [en línea] <<http://www.lenntech.es/procesos/desinfeccion/que-es-desinfeccion.htm#ixzz45odnPjN8>> [citado en 14 de abril de 2016]

La desinfección del agua se logra utilizando desinfectantes químicos y/o físicos. En la desinfección no solo se mata al microorganismo sino además se debe tener en cuenta un efecto residual, como medida preventiva para que los microorganismos no reaparezcan y contaminen de nuevo el agua potable.

La desinfección provoca la corrosión de la pared celular de los microorganismos, o cambios en la permeabilidad de la célula, cambios en la actividad de protoplasma celular o actividad enzimática. Estos problemas en la célula evitan la multiplicación de los microorganismos.

Los desinfectantes también provocan la oxidación y destrucción de la materia orgánica que son generalmente nutrientes y fuente de alimentación de los microorganismos.

Los compuestos químicos utilizados en la desinfección son:

- Cloro Cl_2
- Dióxido de Cloro ClO_2
- Hipoclorito OCl^-
- Ozono O_3
- Halógenos: Bromo Br_2 Yodo I
- Cloruro de Bromo BrCl
- Metales: Cobre Cu^{2+} , Plata Ag^+
- Permanganato potásico KMnO_4
- Fenoles
- Alcoholes
- Jabones y detergentes
- Sales de amonio
- Peróxido de hidrogeno
- Distintos ácidos y bases

1.6. TIPOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE

Previamente se identificó que cada fuente de agua, contiene unas características físicas, químicas y biológicas diferentes. Por tanto deben determinarse las características del agua, con el fin de determinar qué tipo de planta es la más conveniente para realizar la purificación.

1.6.1. Planta Convencional

Esta planta cuenta las siguientes operaciones y procesos unitarios:

- Coagulación
- Floculación
- Sedimentación
- Filtración

Este tipo de plantas son utilizadas cuando el agua presenta un porcentaje alto de turbiedad, que se puede apreciar en su coloración¹⁵.

Se somete a la coagulación, floculación y sedimentación para la remoción de la turbiedad, y la filtración para remover las partículas que alcancen a pasar del sedimentador además de contener microorganismos patógenos, que afecten la salud humana.

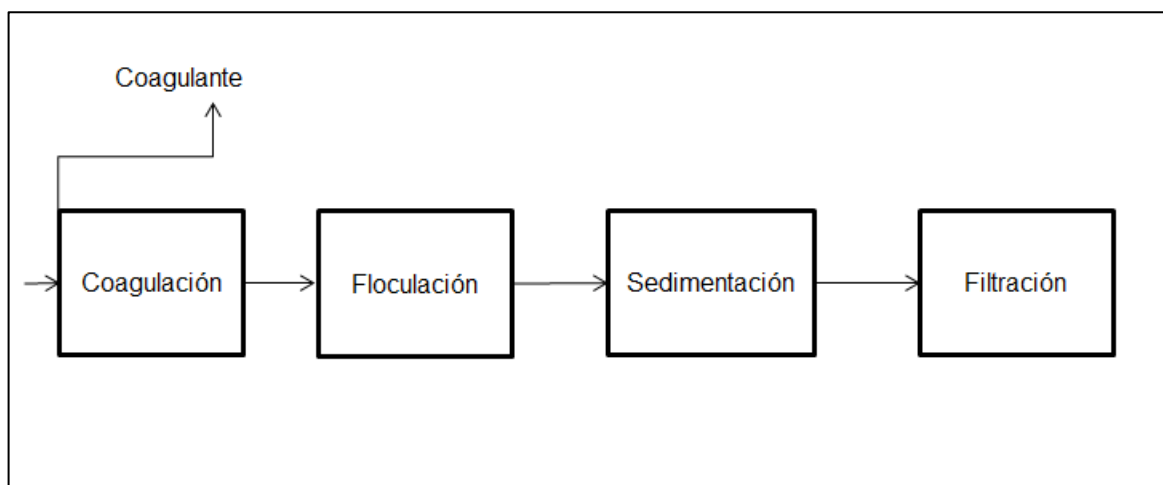


Ilustración 13 Planta convencional (Romero, 2000).

1.6.2. Planta de filtración rápida

Esta planta cuenta las siguientes operaciones y procesos unitarios:

- Coagulación
- Floculación
- Filtración

Este tipo de plantas son utilizadas cuando el agua presenta un porcentaje moderado de turbiedad, que se puede apreciar en su coloración¹⁶.

Normalmente cuando la fuente de agua es una presa o embalse se le realiza la filtración directa, ya que la turbiedad que presenta es moderada, pues se considera que un cuerpo de agua tan extenso sedimenta gran cantidad de partículas antes de someterla al tratamiento.

¹⁵ Montgomery, J.. Water treatment principles and design. New York. 1985. p. 448.

¹⁶ Montgomery, J.. Water treatment principles and design. New York. 1985. p. 448.

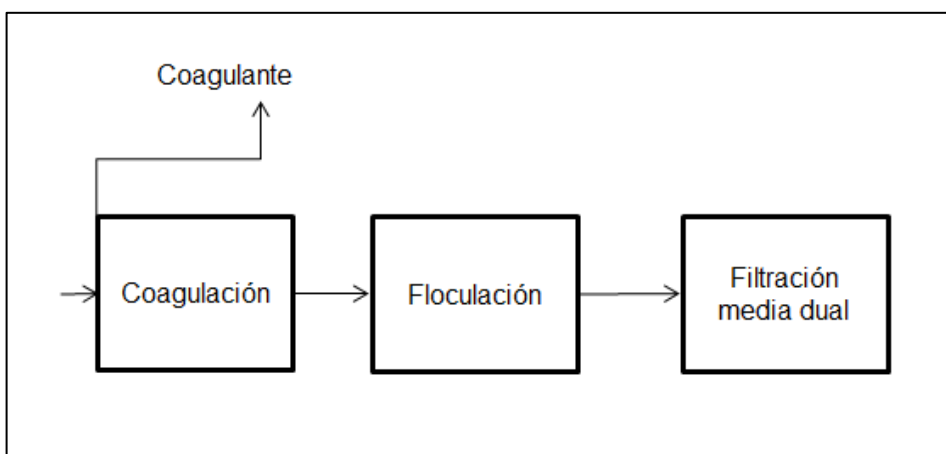


Ilustración 14 Planta de filtración directa (Romero, 2000).

1.6.3. Planta de filtración en línea

Esta planta cuenta las siguientes operaciones y procesos unitarios:

- Coagulación
- Filtración

Este tipo de plantas son utilizadas cuando el agua presenta un porcentaje bajo de turbiedad, y su coloración se acerca a cristalina¹⁷.

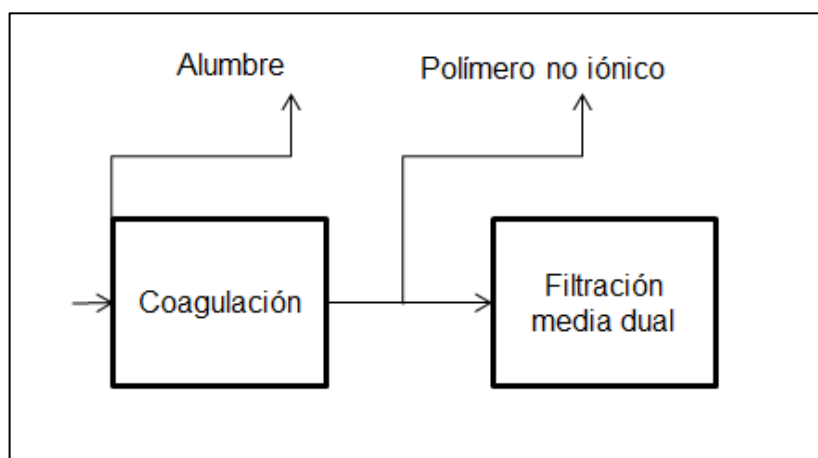


Ilustración 15 Planta de filtración en línea (Romero, 2000).

¹⁷ Montgomery, J.. Water treatment principles and design. New York. 1985. p. 448.

1.7. Plantas Piloto

Primero que todo se debe entender a que hace referencia el término planta piloto.

La Universidad de Alicante¹⁸ en España, define una planta piloto como una instalación donde se pueden realizar las últimas etapas en la optimización de un proceso de investigación. De esta forma se puede establecer la viabilidad de un proyecto o producto desarrollado con el objetivo de poder transferirlo al sector productivo.

Es importante para determinar el tamaño de una planta piloto, es fijar el límite inferior de la cantidad de producto necesario que permita determinar el efecto de las impurezas sobre la reacción, la eficiencia de la separación y la calidad del producto.

La escala apropiada del equipo de prueba debe ser determinada. Los tamaños de equipos disponibles para llevar a cabo las pruebas de prototipo. Investigaciones prototipo a escala real pueden estar en las plantas existentes y son por lo general mayores a 3,8 ML/s. En el extremo opuesto de la gama de tamaños son instalaciones de pequeña escala, que son típicamente en el rango de 0,06 a 0,63 L/s.

1.7.1. Consideraciones generales

- 1.7.1.1.** El diseño de los equipos para una planta piloto están dictados por la normatividad existente o los modelos de plantas a escala real. Pero estos a veces resultan voluminosos e inflexibles. Por tanto se debe diseñar equipos que sean reutilizables, flexibles y con facilidad de transportarse.
- 1.7.1.2.** Es necesario realizar derivaciones y enlaces adecuados entre las operaciones y procesos unitarios.
- 1.7.1.3.** El efecto de escala reducida de las instalaciones en el rendimiento del proceso del sistema debe ser considerado, especialmente los efectos en el sistema de filtración.
- 1.7.1.4.** La flexibilidad en la operación debe ser maximizada, en especial los puntos de aplicación de químicos.
- 1.7.1.5.** Las bombas y motores deberían ser capaces de variar su potencia y velocidad, por ejemplo, en el floculador debería ser ajustable para determinar la energía que se debe usar para optimizar el tratamiento.
- 1.7.1.6.** La división del flujo se logra mejor mediante el uso de vertederos.

¹⁸Universidad de Alicante, Servicios técnicos de Investigación, Plantas Piloto [en línea] <<http://sstti.ua.es/es/experimentacion-industrial/plantas-piloto.html>> [citado en 30 de Abril de 2016]

- 1.7.1.7. Uso de medidores precisos de agua.
- 1.7.1.8. A diferencia de las instalaciones a gran escala, la hidráulica de plantas piloto deben estar diseñados para dar cabida a una amplia gama de condiciones de flujo.

2. LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Se realizó una visita al laboratorio de hidráulica Ángel Calatayud de la Universidad Santo Tomás, donde se realizó una toma de medidas para elaborar el plano de planta de este, además se hizo un registro fotográfico donde se evidencia que tan abarrotado se encuentra e identificar más fácilmente la distribución de espacios, por tanto que disponibilidad hay para alojar la planta allí.

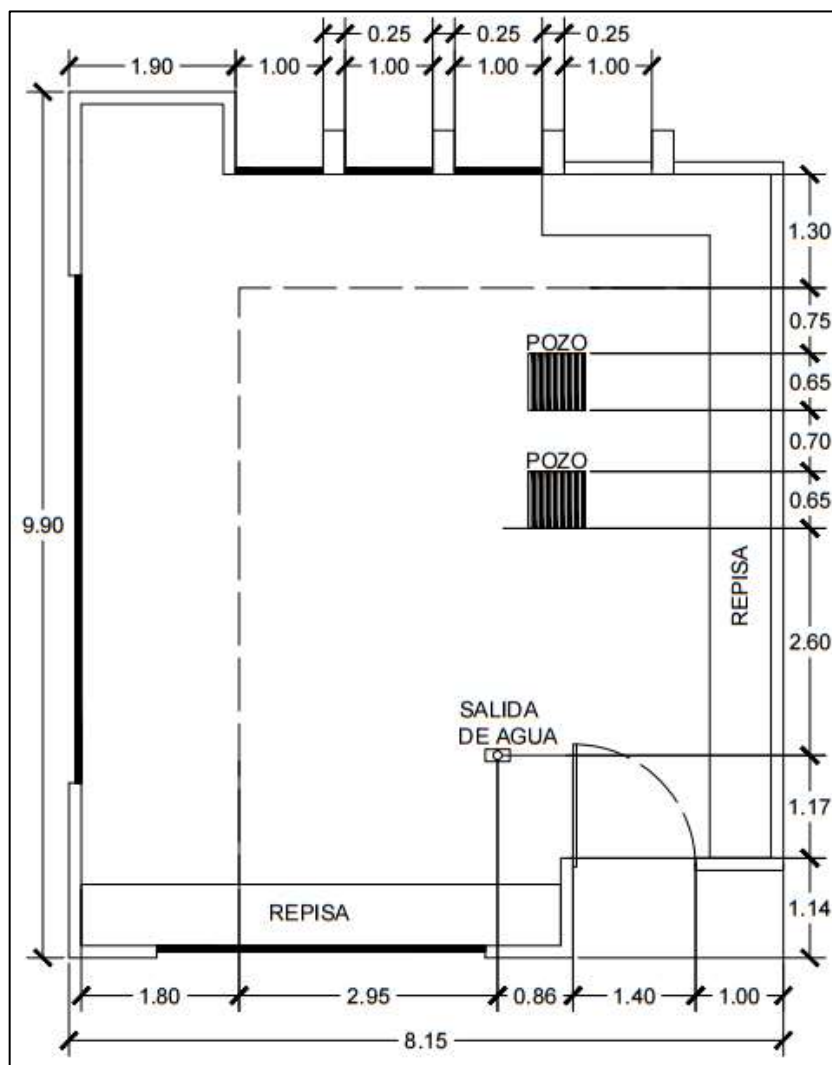


Ilustración 16 Plano laboratorio de hidráulica.

La vista en planta del laboratorio, muestra las dimensiones del mismo, además la los detalles más relevantes para el proyecto.



Ilustración 17 Fotografía Laboratorio Hidráulica.

3. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL

Para la determinación del caudal con el cual trabajara la planta de tratamiento, se fijó tomando como referente el libro Water Treatment Principles and Design de James M. Montgomery, donde se encuentra los rangos para determinar los caudales de plantas piloto.

Tabla 4 Directrices de escala para plantas piloto

Tamaño	Flujo aproximado	Ejemplos de pruebas piloto
Escala completa	> 3,8 ML/d (> 1 mgd)	Efecto de los módulos de contracorriente en el rendimiento de la cuenca, efecto de canaletas de aguas residuales en el rendimiento de lavado a contracorriente
Escala grande	0,38 - 3,8 ML/d (0,1 - 1 mgd)	Prueba de la seguridad del proceso, la configuración de contacto de ozono, el régimen de lavado a contracorriente.
Escala media	0,63 - 3,15 L/s (10 - 50 gpm)	La extracción con aire, el régimen de lavado a contracorriente.
Escala pequeña	0,063 - 0,63 L/s (1 - 10 gpm)	Tasa de filtración, tiempo de contacto.
Banco de pruebas	Banco	Selección del coagulante mediante el ensayo de jarras, la dosis de ozono en comparación con el color, la determinación de la demanda de desinfectante.
Fuente Montgomery J., Water treatment principles and design.		

Se determinó que la planta tendrá una escala laboratorio y su tamaño se encuentra entre los rangos de Escala pequeña con rangos de caudal entre 0,063 y 0,63 L/s. Ya que un valor de caudal mayor a este, podría generar una planta de gran tamaño que no tendría espacio dentro del laboratorio de hidráulica.

Se ha estimado tratar el agua de uno de los tanques existentes en el laboratorio, por tanto se hace necesario la operación de una bomba que lleve el agua, al inicio del proceso de tratamiento del agua, el cual es la torre de aireación. Para esto se prevé adquirir una electrobomba de un caudal máximo de 29 litros por minuto, el cual se encuentra en el rango de plantas pequeñas y alcanza una altura máxima de 13 metros, suficiente para llevar el agua a la primera bandeja de aireación.

Por tanto el caudal de diseño que se ha determinado para la planta es de 0,1 L/s, el cual se encuentra en el rango y se espera que con este, los tamaños de los equipos sean factibles de construir en el laboratorio.

4. DISEÑOS

4.1. Aireación

Se determinó que la operación de aireación se realizaría por medio de un aireador de bandeja múltiple.

4.1.1. Aireador de bandeja múltiple

Tabla 5. Parámetros de Diseño: Aireador de Bandejas

AIREADOR DE BANDEJAS					
Autores, Entidades:	Carga Superficial	Área de Bandejas	Número de Bandejas	Espaceamiento entre Bandejas	Referencia
	[m ³ /[m ² .dia]]	[m ²]	Un	[m]	
RAS 2000	<100	0,5 a 2 por cada 1000m ³ de capacidad	3 a 5	0,3 a 075	Ministerio de desarrollo económico. Reglamento Técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000. Bogotá. 2000. p. C.32
Jairo Romero	<100	0,05 a 0,15 por L/s de agua tratada	3 a 9	0,3 a 075	Romero Rojas, Jairo Alberto. Purificación del Agua. Bogotá. 2000. p. 35.

El aireador de bandeja múltiple consiste en una serie de bandejas que cuentan con ranuras en el fondo que permiten el paso del agua, por medio de caída libre y se produce un tiempo de exposición del agua para que entre en contacto con el aire, esto permite modificar la concentración de sustancias volátiles contenidas en el agua cruda.

Como punto de partida para el diseño de las bandejas de aireación se tomó el caudal de diseño. Así mismo se establece la separación entre Bandejas como 0,3 m cumpliendo con

los parámetros de Diseño. El agua a tratar se encuentra almacenada en un tanque subterráneo, por tanto no está expuesta a gases que puedan contaminarla de manera significativa, esto se pudo constatar por medio de la Sonda Multiparámetro, la cual midió que el Oxígeno Disuelto en el agua es de 4,7 mg/L. De acuerdo el RAS 2000 en el título A¹⁹, para una fuente deficiente si el Nivel de Oxígeno Disuelto en el agua de Mayor a 4 mg/L, no será necesario el proceso de aireación, de sin embargo, se va a diseñar y a construir de manera ilustrativa (aclarando que es útil en fuentes que requieran aireación).

$$Qd = 0,1 \text{ L/s}$$

$$Qd = 0,0001 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Qd = 8,64 \text{ m}^3/\text{día}$$

La carga superficial según lo estipulado en el RAS 2000, debe ser menor a 100²⁰.

$$CH < 100 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ día}$$

De esta forma se determinó el Área total de bandejas.

$$At = \frac{Qd}{CH}$$

$$At = 0,086 \text{ m}^2$$

Con el dato del área de bandejas total, se determina el número que se va utilizar. En el RAS 2000, se establece que este número debe estar entre 3 y 5²¹, cumpliendo así con los parámetros del RAS y facilitando la construcción. Por tanto se decide que el modelo tendrá un total de tres (3) bandejas y el canal de fondo de recolección, el cual conducirá en agua a la mezcla rápida.

De acuerdo a esta información se obtiene el área de cada bandeja.

$$Ab = \frac{At}{n}$$

$$Ab = 0,029 \text{ m}^2$$

Donde,

$$n = \text{Numero de bandejas} = 3$$

Cada bandeja será cuadrada por tanto se determina la longitud de cada lado, con la raíz cuadrada del área.

¹⁹ Ministerio de desarrollo económico. Reglamento Técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000. Bogotá. 2000. p. A.55-A.57.

²⁰ Ministerio de desarrollo económico. Reglamento Técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000. Bogotá. 2000. p. C.32.

²¹ Ministerio de desarrollo económico. Reglamento Técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000. Bogotá. 2000. p. C.32.

$$Lb = \sqrt{Ab}$$

$$Lb = 0,17 \text{ m} \approx 0,2 \text{ m}$$

Se verifica que con una longitud de 0,2 m por cada lado cumpla con la carga hidráulica.

$$Ab = 0,04 \text{ m}^2$$

$$At = 0,12 \text{ m}^2$$

$$CH = 72 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{ día}$$

La carga hidráulica es menor a 100, por tanto se cumple la condición de carga hidráulica.

El Tiempo de exposición se calcula por medio de la ecuación de Caída Libre, teniendo en cuenta que la velocidad inicial o a la salida de cada bandeja es 0:

$$y = \frac{gt^2}{2}$$

$$t = \sqrt{\frac{2y}{g}}$$

$$t = \sqrt{\frac{2y}{g}}$$

$$t = \sqrt{\frac{2 * (0,3\text{m})}{9,8 \text{ m/s}^2}}$$

$$t = 0,25 * 3$$

$$t = 0,75 \text{ seg}$$

Se procede a diseñar los orificios por donde pasara el agua:

Para establecer la cantidad de orificios por bandeja, se debe tener en cuenta que el diámetro de orificios está entre 5 – 12 mm y la separación entre orificios debe ser de 2,5 cm²².

Conociendo estos datos se escogió que el diámetro de los orificios sea de 5 mm, de esta forma la cantidad de orificios por fila serán 6, para un total de 36 orificios por bandeja, con un borde libre de 2,25 cm por cada lado.

Se determinó la velocidad de desalojo del agua por los orificios de las bandejas de la siguiente forma.

$$Ao = n \pi \frac{d^2}{4}$$

$$Ao = 0,0007 \text{ m}^2$$

²² Romero Rojas, Jairo Alberto. Purificación del Agua. Bogotá. 2000. p. 37.

$$V_o = \frac{Qd}{A_o}$$

$$V_o = 0,14 \text{ m/s}$$

A continuación se presenta el esquema del diseño del aireador de bandejas.

Se utilizara en cada bandeja un lecho de coque de espesor de 5 cm, con diámetro de 4 cm con el fin de mejorar la eficiencia en el intercambio de gases y la distribución del agua.

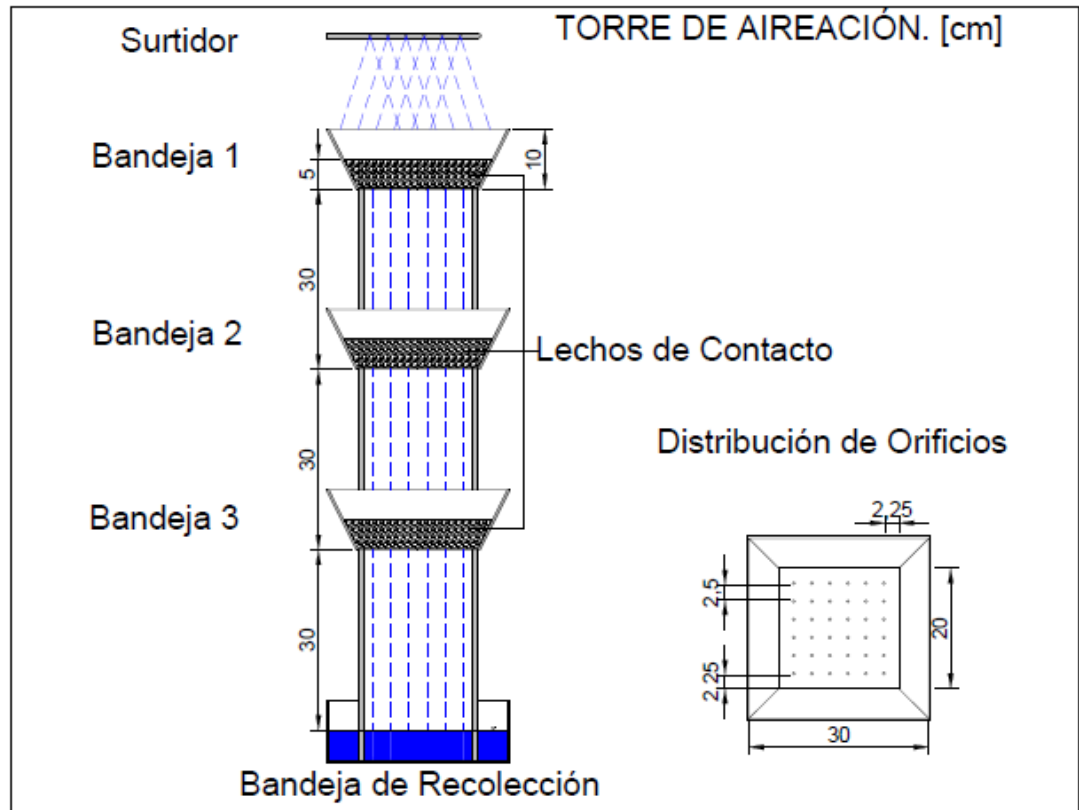


Ilustración 18 Esquema de torre de aireación.

4.2. Mezcla rápida

Para la mezcla rápida en un principio se planteó hacerla por medio de una canaleta Parshall, pero se abandonó esta posibilidad ya que el caudal de la planta se encuentra por debajo de los parámetros mínimos de diseños de Canaleta Parshal como mezcladores rápidos. De este modo se decidió diseñar un vertedero rectangular.

Tabla 6 Determinación del ancho W de la Parshall en función del caudal

Ancho W	Límites de caudal (l/s)	
	Q Mínimo	Q Máximo
1"	0.28	5.67
2"	0.57	14.15
3"	0.85	28.31
6"	1.42	110.44
Fuente: Romero Rojas, 2008		

4.2.1. Vertedero rectangular

El vertedero rectangular usado como aforador y mezclador rápido, busca la dispersión homogénea del coagulante en toda la masa del agua cruda, para alcanzar este objetivo se desea que el resalto hidráulico que se produce a continuación de la caída libre del agua, cumpla con las condiciones de turbulencia que le permita al coagulante mezclarse con el agua a tratar.

Después de pasar la torre de aireación, un canal conduce el agua a tratar hacia el vertedero rectangular donde se producirá el proceso de coagulación.

El canal de conducción tendrá una sección dada a continuación.

$$Qd = 0,1 \text{ L/s}$$

$$Qd = 0,0001 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = \frac{A}{n} * R^{2/3} * s^{1/2}$$

Donde,

$Q = \text{Caudal en } \text{m}^3/\text{s}$

$n = \text{Coeficiente de manning [0,010 para vidrio o plastico]}$

$A = \text{Area de la seccion rectangular}$

$R = \text{Radio hidraulico}$

$s = \text{Pendiente del canal}$

El canal que conducirá el agua hacia el vertedero será de sección rectangular, con altura (Y) y base (B).

Por tanto la ecuación de manning en términos de B y Y será,

$$Q = \frac{B * Y}{n} * \left(\frac{B * Y}{B + 2 * Y} \right)^{2/3} * s^{1/2}$$

Se ha determinado un ancho de canal de 8 cm, por tanto se despeja el valor de Y.

$$Y = 0,02 \text{ m}$$

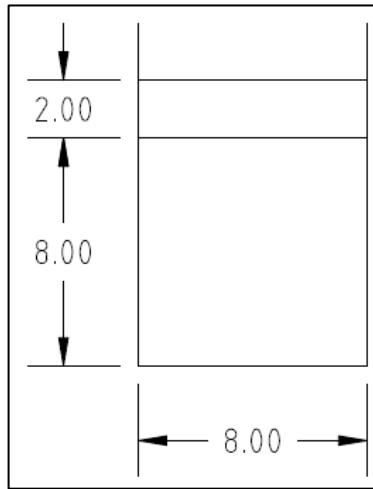


Ilustración 19 Sección del canal hacia el vertedero [cm].

Para el diseño del vertedero como mezclador rápido se realizó el siguiente proceso, partiendo del caudal que se ha determinado.

$$Qd = 0,1 \text{ L/s}$$

$$Qd = 0,0001 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$q = \frac{Q}{B}$$

Previamente se determinó la sección del canal donde se tomó una base B de 8 cm.

$$q = 0,0013 \text{ m}^2/\text{s}$$

Donde q es el caudal por unidad de ancho del vertedero.

A continuación se determina la profundidad crítica de flujo (h_c).

$$h_c = \left(\frac{q^2}{g} \right)^{1/3}$$

$$h_c = 0,0054 \text{ m}$$

Cuando hay resalto la profundidad del agua en la sección 1 debe estar relacionada con la profundidad crítica.

$$\frac{h_1}{h_c} = \frac{\sqrt{2}}{1,06 + \sqrt{\frac{P}{h_c}} + 1,5}$$

$$h_1 = 0,0015 \text{ m}$$

Para determinar el número de Froude, es necesario conocer las velocidades en la sección

El número de Froude debe estar entre 4,5 y 9,0, para que haya resalto estable y mezcla eficiente, dice Romero²³.

$$V1 = \frac{q}{h1}$$

$$V1 = 0,83 \text{ m/s}$$

$$F1 = \frac{V1}{\sqrt{gh1}}$$

$$F1 = 6,87$$

El número de Froude se encuentra entre el intervalo de diseño establecido por tanto se tendrá resalto estable.

La profundidad después del resalto se encuentra relacionada con h1, de esta forma determinamos h2, la cual será la profundidad después del resalto.

$$\frac{h2}{h1} = \frac{\sqrt{1 + 8F1^2} - 1}{2}$$

$$h2 = 0,014 \text{ m}$$

Se calcula la pérdida de energía h.

$$h = \frac{(h2 - h1)^3}{4 h1 h2}$$

$$h = 0,023 \text{ m}$$

El siguiente paso es determinar la longitud del resalto Lj y la distancia Lm.

$$Lj = 6(h2 - h1)$$

$$Lj = 0,075 \text{ m}$$

$$Lm = 1,45 P^{0,54} H^{0,46}$$

$$Lm = 0,061 \text{ m}$$

La Velocidad de la mezcla será la velocidad media entre la sección 1 y 2, por tanto es necesario calcular la velocidad en h2.

$$V2 = \frac{q}{h2}$$

$$V2 = 0,089 \text{ m/s}$$

$$Vm = \frac{V1 + V2}{2}$$

$$Vm = 0,46 \text{ m/s}$$

Conociendo la velocidad de mezcla y la longitud del resalto, se puede hallar el tiempo de mezcla T.

²³ Romero Rojas, Jairo Alberto. Purificación del Agua. Bogotá. 2000. p. 71.

$$T = \frac{L_j}{V_m}$$

$$T = 0,16 \text{ s}$$

Y finalmente determinamos el gradiente de Velocidad, el cual debe ser mayor a 1000 s^{-1} , como dicta el RAS 2000²⁴, para que se produzca el gradiente medio óptimo.

$$G = \sqrt{\frac{\gamma h}{\mu T}}$$

$$G = 1036 \text{ s}^{-1}$$

El gradiente de velocidad es mayor a 1000 s^{-1} , por tanto cumple las especificaciones del RAS 2000 para realizar la mezcla rápida.

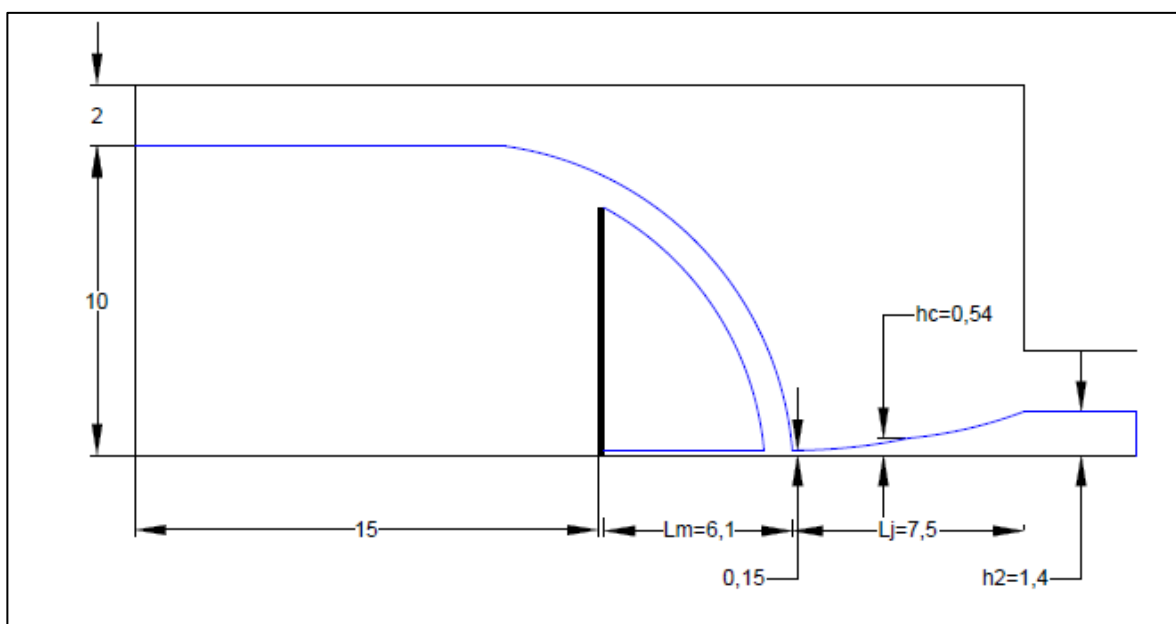


Ilustración 20 Resalto hidráulico [cm].

4.2.2. Determinación de la dosificación de coagulante óptimo.

Se realizó el ensayo de jarras o Jar Test para lo cual se tomó una muestra de agua del tanque del laboratorio que fue utilizado como fuente, posteriormente se realizó el siguiente procedimiento con sus respectivos resultados:

1. Tomar 1 L de muestra de agua en vasos de precipitado.
2. Dosificar el coagulante Sulfato de Aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ con concentración del 1% en los vasos de precipitado con dosis de 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12 ml.

²⁴ Ministerio de desarrollo económico. Reglamento Técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000. Bogotá. 2000. p. C.43.

3. Realizar mezcla a 100 RPM durante 2 minutos.
4. Realizar mezcla a 35 RPM durante 15 minutos.
5. Dejar sedimentar partículas por 90 minutos.

Resultados obtenidos después del ensayo:

Tabla 7 Resultados de ensayo de Jarras

Al ₂ (SO ₄) ₃ [ml]	Turbidez [NTU]
0	40
2	36
4	31
6	27
8	22
10	10
12	10

Si bien el RAS recomienda que el agua apta para el consumo humano debe poseer como máximo una turbidez de 5 NTU, por la calidad del agua de esta fuente (turbidez inicial de 65 NTU), en la cual la presencia de sólidos en suspensión es casi nula si se compara con fuentes que normalmente poseen turbidez de más de 1000 NTU, se hace difícil reducir más el nivel de turbidez final debido a la falta de partículas que choquen, aumenten su tamaño y peso y posteriormente se sedimenten.

Se decide optar por una dosificación de coagulante de 10 ml de Al₂(SO₄)₃ por cada Litro de agua tratado.

Como el Caudal a tratar en la planta es de 0,1 L/s el coagulante se debe dosificar como 1 ml/s.

4.3. Mezcla lenta

Se determinó que la mezcla lenta se realizaría mediante un Floculador hidráulico, por factibilidad económica y operacional, ya que no requeriría ningún impulso distinto al flujo libre del agua.

Tras los resultados obtenidos de este diseño se plantea la posibilidad de cambiar la idea original de un floculador hidráulico a uno mecánico, ya que en el laboratorio no existe la disponibilidad de espacio, para albergar una planta de tal tamaño.

4.3.1. Prediseño Floculador hidráulico de flujo horizontal

Parámetros de Diseño

En la siguiente tabla se resumen los parámetros de Diseño de diversos Autores y Entidades, de acuerdo a la conveniencia de espacio, se definirán los parámetros como tiempo de retención, velocidad de flujo, etc.

Tabla 8 Parámetros de Diseño Para el Diseño de Floculadores Hidráulicos de Flujo Horizontal

PARÁMETROS DE DISEÑO FLOCULADOR HIDRÁULICO DE FLUJO HORIZONTAL					
Autores y Entidades	G Gradiente [s ⁻¹]	Gt Número de Camp	t Tiempo Retención [min]	v Velocidad Flujo [m/s]	h Pérdida de Energía [m]
Smethurst	20-100	20000-150000	10-60	0,15-0,5	0,15-0,6
Arboleda	10-100	-	15-20	0,10-0,60	-
Insfopal	-	-	15-60	0,15-0,45	-
Hardenbergh y Rodie	-	-	20-50	0,15-0,45	-
Fair y Geyer	-	-	10-90	0,1-0,9	0,3-0,9
AWWA	5-100	30000-150000	10-60	0,09-0,30	-
RAS 2000	20-70	-	20-30	0,2-0,6	-
<i>Fuente. Romero Rojas, Jairo Alberto. Purificación del Agua. Bogotá 2000. P.91-94.</i>					
<i>Fuente. Ministerio de desarrollo Económico. Reglamento Técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000. Bogotá. 2000. P. C.46-47</i>					

Se establecen los siguientes parámetros para el diseño del Floculador. Inicialmente se tuvieron en cuenta los mínimos exigidos por el RAS 2000 $t_d = 20 \text{ minutos}$, $v_{tanque} = 0,2 \frac{m}{s}$, sin embargo la velocidad de flujo y el tiempo de retención convertían el Floculador en una estructura muy grande y alejada del tamaño disponible en el laboratorio.

La velocidad de flujo está directamente relacionada con la sección transversal de los canales y la longitud que debe recorrer el agua en la cámara de floculación. A mayor velocidad de flujo, menor sección transversal y mayor longitud de recorrido; lo que se traduce en mayor pérdida por fricción y pérdida adicional. Realizar los cálculos con los parámetros del RAS 2000 generaba pérdidas muy elevadas lo que hizo dudar del buen funcionamiento del sistema.

De acuerdo a lo anterior, se establecieron nuevos parámetros que son respaldados por autores como Fair y Geyer (ver Tabla 6.), así mismo por entidades como la AWWA (American Water Works Association).

$$Q_d = 0,1 \frac{l}{s} \quad v_{tanque} = 0,1 \frac{m}{s} \quad t_d = 15 \text{ minutos}$$

A partir del tiempo de detención y la velocidad en el tanque se determinará la distancia que recorrerá el agua en el floculador, así:

$$L = 0,10 \frac{m}{s} * 15 \text{ minutos} * \frac{60 \text{ segundos}}{1 \text{ minuto}}$$

$$L = 90 \text{ metros}$$

El volumen de agua a mezclar, de acuerdo al tiempo de detención:

$$V = Qt_d = 0,0001 \frac{m^3}{s} * 15 \text{ minutos} * \frac{60 \text{ segundos}}{1 \text{ minuto}}$$

$$V = 0,09 \text{ m}^3$$

Área transversal de los canales:

A partir del Volumen del tanque y la longitud:

$$a = \frac{V}{L} = \frac{0,09 \text{ m}^3}{90 \text{ m}} * \frac{(100 \text{ cm})^2}{1 \text{ m}^2}$$

$$a = 10 \text{ cm}^2$$

A partir del Caudal y la velocidad en el tanque:

$$a = \frac{Q}{v} = \frac{100 \text{ cm}^3}{10 \frac{\text{cm}}{\text{s}}}$$

$$a = 10 \text{ cm}^2$$

Desde el área transversal de los canales se supone el ancho entre baffles de $b = 2 \text{ cm}$ por tanto la profundidad de la lámina de agua, d será:

$$d = \frac{a}{b} = \frac{10 \text{ cm}^2}{2 \text{ cm}}$$

$$d = 5 \text{ cm}$$

Adoptando un borde libre de $2,5 \text{ cm}$:

$$H = d + bl = 5 \text{ cm} + 2,5 \text{ cm}$$

$$H = 7,5 \text{ cm}$$

El espaciamiento entre los tabiques y la pared del tanque de floculación será $1,5$ la separación entre baffles, como lo recomiendan autores como Arboleda, Jairo Romero.²⁵

$$1,5 * b = 1,5 * 2 \text{ cm} = 3 \text{ cm}$$

Si el tanque de floculación tiene ancho de $1,5$ entonces la Longitud efectiva o ancho útil, L_E de cada canal será:

$$L_E = B - 0,03 \text{ m} = 1,5 \text{ m} - 0,03 \text{ m} \qquad L_E = 1,47 \text{ m}$$

²⁵ Romero Rojas, Jairo Alberto. Purificación del Agua. Bogotá. 2000. p. 93.

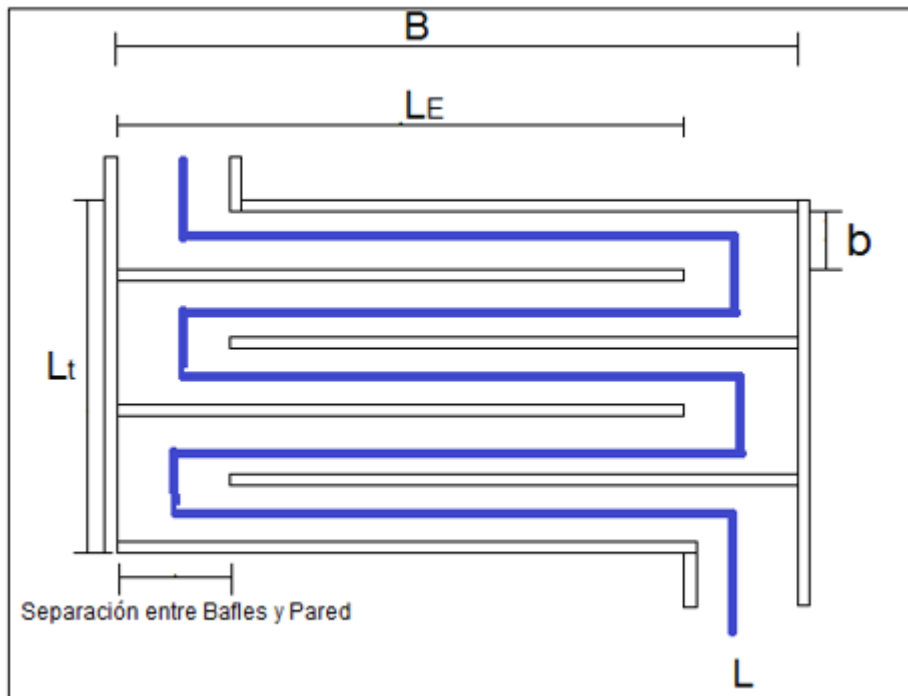


Ilustración 21. Nomenclatura del Floculador Hidráulico.

El número de canales necesarios dependerá de la Longitud que debe recorrer el agua y la longitud efectiva de cada canal:

$$N = \frac{L}{L_E} = \frac{90m}{1,47m}$$

$$N = 61,24 \text{ Canales}$$

Constructivamente es necesario ajustar el número de canales, adoptando $N = 61 \text{ canales}$

El espesor de las láminas de Acrílico en la que se construirá el tanque y sus tabiques será de $2mm$ por tanto la Longitud Total Interior de la cámara de floculación es:

$$L_t = (N * b) + ((N + 1) * \text{EspesorAcrílico})$$

$$L = (61 * 2cm) + ((61 + 1) * 0,2cm)$$

$$L = 1,349 \text{ m}$$

Pérdidas en el floculador

Pérdida Por Fricción.

La pérdida a causa del contacto del agua con las paredes de la cámara de floculación, se determina por medio de la ecuación de Manning:

$$n = 0,010$$

$$hf = \frac{(n * v)^2 * L}{R^{\frac{4}{3}}} = \frac{\left(0,010 * 0,1 \frac{m}{s}\right)^2 * 61 * 1,47m}{\left(\frac{0,0001m^2}{0,05m + 0,02m + 0,05m}\right)}$$

$$hf = 0,053 m$$

Pérdida Adicional

Para determinarla, se tendrá en cuenta la ecuación propuesta por Arboleda²⁶.

$$h = \frac{3(N - 1)v^2}{2g} = \frac{3(61 - 1)(0,1 \frac{m}{s})^2}{2 * 9,8 \frac{m}{s^2}}$$

$$h = 0,09 m$$

La pérdida total será:

$$H = hf + h = 0,053m + 0,09m$$

$$H = 0,145m$$

Para determinar el gradiente de velocidad se establece la temperatura del agua de 15°C, por tanto la viscosidad cinemática:

$$v = 1,139 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

$$G = \sqrt{\frac{g * H}{v * t_d}} = \sqrt{\frac{9,8 * 0,145}{1,139 * 10^{-6} * 15 * 60}}$$

$$G = 37,27 s^{-1}$$

El Número Adimensional de Camp es:

$$G_t = G * t_d = 37,27 * 15min * 60seg/1min$$

$$G_t = 33545,9$$

A continuación se presenta el esquema del floculador hidráulico diseñado.

²⁶ Romero Rojas, Jairo Alberto. Purificación del Agua. Bogotá. 2000. p. 92.

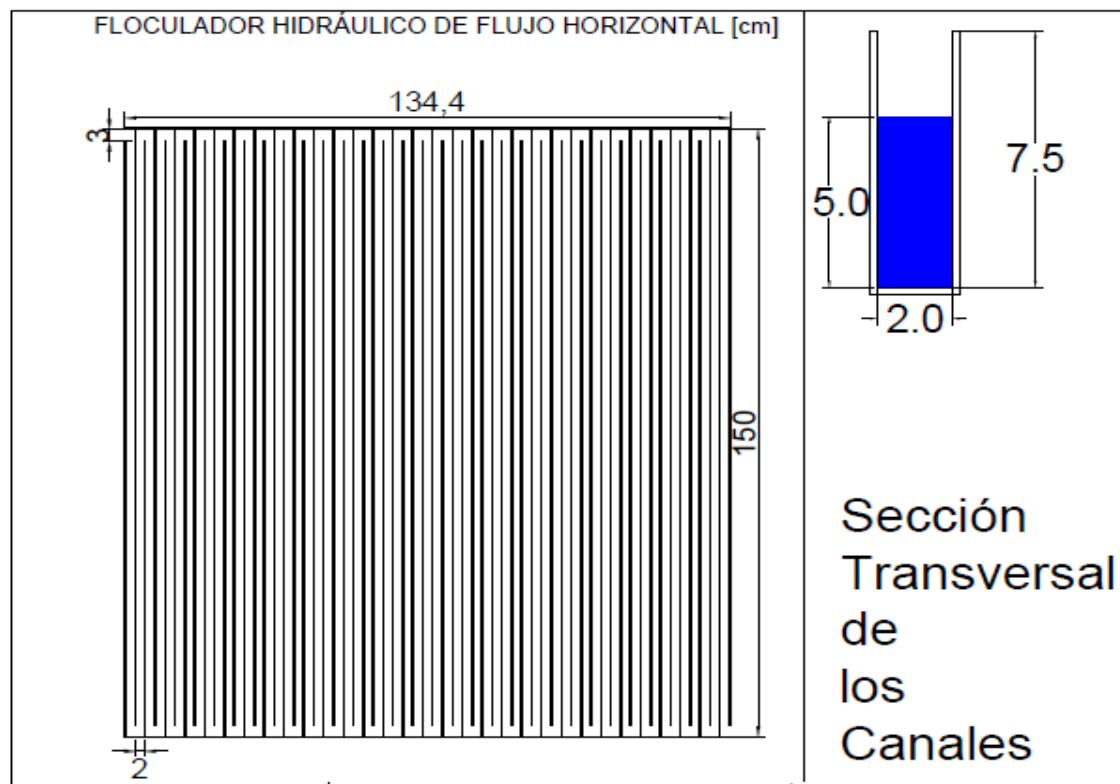


Ilustración 22 Esquema Floculador Hidráulico.

4.3.2 Diseño Floculador Mecánico de Eje Horizontal

Tabla 9 Parámetros de Diseño Floculador Mecánico de eje horizontal.

	G s^{-1}	Gt	t min	Vel. Paletas cm/s	Vel. Agua	Área de las Paletas % área sec. transversal	C_d
AWWA	5-100	30.000-150.000	20-60	3-90	-	10-25	-
Fair y Geyer	10-75	10.000-100.000	>10	9-90	$1/4 V_p$	-	1,8
Insfopal	15-60	-	15-60	15-60	0,15-0,30 m/s	10-25	-
Montgomery	30-80	-	-	25-75	-	<25	-
Metcalf y Eddy	20-75	10.000-100.000	15-30	60-90	-	-	-
Steel	10-75	23.000-110.000	30-60	18-76	$1/4 V_p$	<20	1,16-1,9

Procedimiento de Diseño

Para determinar el ancho y profundidad de la cámara de floculación se realizaron cálculos repetitivos entre el diseño del tanque de floculación y sedimentación, de esta manera se pretendía que ambos tuvieran el mismo ancho y profundidad para así facilitar el proceso constructivo. Para determinar el largo del tanque de floculación se debió iterar el cálculo de

modo que cumpliera con todos los parámetros, Gradiente de velocidad, tiempo de retención, etc. De lo descrito anteriormente se obtuvo:

$$Q = 0,1 \frac{L}{s}$$

$$t_r = 15min$$

Del Caudal de Diseño y el tiempo de retención se obtiene el volumen así:

$$V = 0,1 \frac{L}{s} * \frac{1000cm^3}{1L} * \frac{60s}{1min} * 15min$$

$$V = 90.000 cm^3$$

$$V = 0,09 m^3$$

Usando la altura h= 50cm Igual a la altura del sedimentador:

$$A = \frac{V}{h} = \frac{90000cm^3}{50cm}$$

$$A = 1800cm^2$$

Si el ancho B de la cámara de floculación es de 30 cm, entonces L será:

$$L = \frac{A}{B} = \frac{1800cm^2}{30cm}$$

$$L = 60cm$$

Para determinar el Número de Marcos que tendrá el Floculador: n:

$$h_n = \text{Altura del marco}$$

Se dejará una separación entre el Marco y la altura de la lámina así como del Fondo de 3 cm por tanto la altura del marco será:

$$h_n = 50 cm - (2 * 3cm)$$

$$h_n = 44 cm$$

$$s_n = \text{Separación entre marcos}$$

El espacio entre Marcos tendrá el mismo valor que la separación entre Marco y Fondo de la cámara, es decir $s_n = 3cm$

$$(n * h_n) + ((n + 1) * s_n) = L$$

$$(n * 44) + (n + 1) * 3 = 60$$

$$44n + 3n + 3 = 60$$

$$47n = 60 - 3$$

$$n = 1,22 \text{ marcos}$$

Se decide utilizar un solo marco ubicado en centro de la longitud de la cámara de floculación, es decir a 30 cm.

Para determinar el Área de las paletas se supondrá que este valor será el 20% de la sección transversal de la cámara de floculación: w

$$\begin{aligned}
 w &= b * h \\
 w &= 30 * 50 \\
 w &= 1500cm^2 \\
 Ap &= 20\%w \\
 Ap &= 0,2 * 1500cm^2 \\
 Ap &= 300cm^2
 \end{aligned}$$

La mitad del Área de las Paletas estará ubicada por debajo del eje de rotación, la otra mitad por encima por tanto:

$$\begin{aligned}
 Ap_i &= \frac{300cm^2}{2} \\
 Ap_i &= 150cm^2
 \end{aligned}$$

Aunque El RAS 2000 y el Insfopal recomiendan que el espacio entre las paletas y las paredes del Floculador estén entre 0,15 y 0,30m dadas las dimensiones y el caudal a tratar se decide que la separación entre las paletas y las paredes del floculador sea de 2,5 cm por tanto el largo de la paleta será:

$$\begin{aligned}
 l &= 30cm - (2,5 * 2) \\
 l &= 25cm
 \end{aligned}$$

De acuerdo a esto el ancho de la paleta está dado por:

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{Ap_i}{l} = \frac{150cm^2}{25cm} \\
 a &= 6cm
 \end{aligned}$$

El coeficiente de arrastre de las paletas se determina a partir de la relación que existe entre Longitud Paleta / Ancho Paleta $\left(\frac{L_p}{B_p}\right)$.

$$\left(\frac{L_p}{B_p}\right) = \frac{25cm}{6cm} = 4,16$$

Con este valor obtenido se procede a verificar el coeficiente de arrastre con base en la tabla establecida por Rouse²⁷, Obteniendo:

²⁷ Romero Rojas, Jairo Alberto. Purificación del Agua. Bogotá 2000, P.96

Tabla 10 Coeficientes de arrastre en floculadores mecánicos

C_D	Longitud de la Paleta/Ancho de la Paleta
1,16	1
1,20	5
1,50	20
1,90	∞

Para determinar el Coeficiente de arrastre se aplica la ecuación de interpolación lineal:

$$C_{D_{4,16}} = 1,16 + \frac{4,16 - 1}{5 - 1} * (1,20 - 1,16)$$

$$C_{D_{4,16}} = 1,19$$

Determinación de la Potencia disipada a partir de la ecuación establecida para Floculadores mecánicos:

$$P = \frac{C_D \gamma A v^3}{2}$$

Como se puede observar, la potencia está directamente relacionada con el Área de las paletas, su velocidad, su coeficiente de arrastre y el peso específico del agua, que para la temperatura 15°C corresponde a $\gamma = 1 \frac{g}{cm^3}$

La velocidad de las paletas se establece a partir de los parámetros de diseño:

$$v = \left(35 \frac{cm}{s} \right)$$

La velocidad expresada en Revoluciones por minuto:

$$\omega = \frac{v}{r} * \frac{60s}{1min} * \frac{1rev}{2\pi}$$

$$\omega = \frac{\frac{35cm}{s}}{22cm} * \frac{60s}{1min} * \frac{1rev}{2\pi}$$

$$\omega = 15,19 \text{ rpm}$$

Reemplazando los valores en la ecuación de Potencia

$$P = \frac{1,19 * 1 * 300cm^2 * \left(\frac{35cm}{s} \right)^3}{2}$$

$$P = 7.653.188 \frac{gcm^2}{s^3} * \frac{1Kg}{1000g} * \frac{1m^2}{10000cm^2}$$

$$P = 0,76 \frac{Kgm^2}{s^3} = 0,76 Watt$$

Para determinar el Gradiente:

La viscosidad dinámica del agua para la Temperatura de 15°C es de $\mu = 0,001139 \frac{Kg}{m.s}$

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$$

$$G = \sqrt{\frac{0,76}{0,001139 * 0,09}}$$

$$G = 86,4 s^{-1}$$

$$G_t = G * t = 86,4 s^{-1} * 15 min * 60 seg$$

$$G_t = 77764,35$$

Finalmente el Tanque de Floculación será construido así: UNIDADES EN CENTÍMETROS

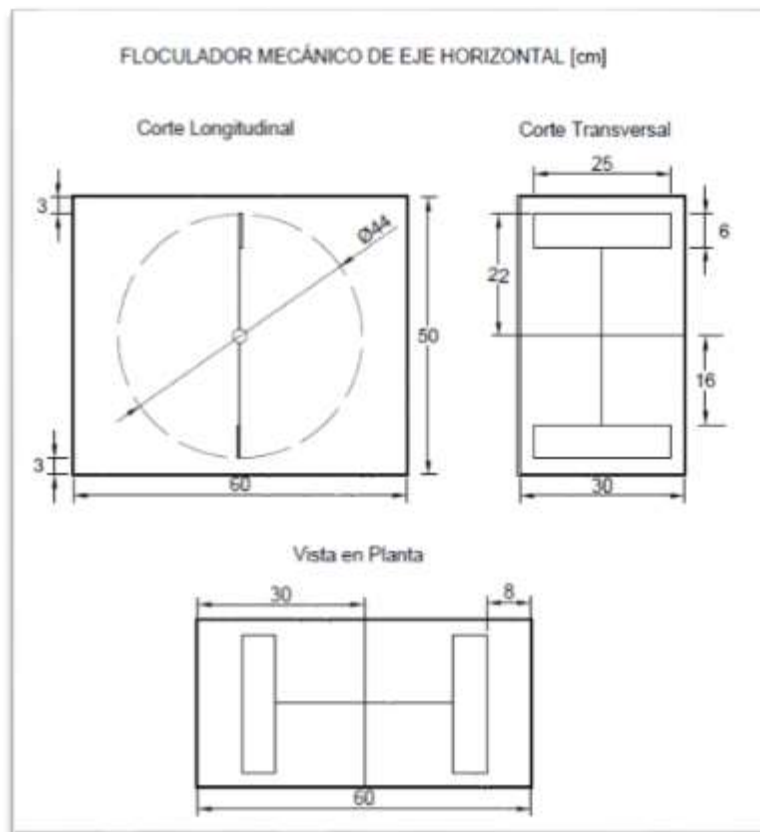


Ilustración 23 Floculador Mecánico de Eje Horizontal.

4.4. Sedimentador

Se determinó que el tipo de sedimentador que se utilizara para la planta, es un sedimentador de tasa alta de placas paralelas inclinadas.

Se determinó un sedimentador de tasa alta ya que la disponibilidad de espacio en el laboratorio de hidráulica es escaso, y el proceso de sedimentación requiere un tiempo de retención alto, que permita que las partículas se asientan.

4.4.1. Sedimentador de placas paralelas

En los sedimentadores de placas inclinadas se utilizan tiempos de retención entre 15 y 25 minutos como lo indica Romero²⁸.

Por tanto se determinó que el tiempo de retención será de 15 minutos.

$$Tr = 15 \text{ min} = 900 \text{ s}$$

De esta manera se determina el volumen necesario del tanque de sedimentación.

$$Vt = Q * Tr$$

Vt = Volumen del tanque

Q = Caudal en L/s

Tr = Tiempo de retencion en segundos

$$Vt = 90 \text{ Litros}$$

$$Vt = 0,09 \text{ m}^3$$

La velocidad critica de asentamiento (V_{sc}) debe encontrarse entre $20 \text{ y } 60 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{ d}$, según Perez²⁹.

Por tanto,

$$V_{sc} = 20 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{ d}$$

$$V_{sc} = 0,023 \text{ cm/s}$$

La inclinación de las placas se debe encontrar en un rango de 40° a 60° , para que haya una remoción eficiente de las partículas sedimentadas.

Por tanto,

$$\theta = 60^\circ$$

También se determinó que el espaciamiento entre placas será de 3 cm.

²⁸ Romero Rojas, Jairo Alberto. Purificación del Agua. Bogotá. 2000. p. 92.

²⁹ Pérez P., Jorge A., Tratamiento de agua, Universidad Nacional, Facultad de minas. Bogotá 1981. p. 133.

El ancho del sedimentador será de 30 cm. Igual que el ancho del floculador.

Además determinamos unas placas de un largo de 23 cm.

Y se comprueba si la longitud efectiva de este cumple con el número de Reynolds, el cual debe ser menor a 250, para que el flujo sea laminar y permita la sedimentación de las partículas.

$$L = \frac{l}{e}$$

$$Vo' = Vsc (\sin \theta + L \cos \theta)$$

L = Longitud relativa del sedimentador

l = longitud de placa

e = Espacio entre placas

Vo' = Velocidad promedio del fluido de sedimentación de tasa alta

Vsc = Velocidad crítica de asentamiento

$$Vo' = 0,109 \text{ cm/s}$$

Con este Vo supuesto, encontramos el número de Reynolds, para verificar que cumpla.

$$N_{RE} = \frac{Vo d}{\nu}$$

$$N_{RE} = 29$$

La longitud corregida de sedimentación, se determina de con la siguiente formula.

$$Lc = L - L'$$

Para hallar L' , se utiliza el número de Reynolds.

$$L' = 0,058 N_{RE}$$

De esta manera se reemplaza la longitud corregida de sedimentación, en la fórmula de Vo ,

$$Vo' = Vsc (\sin \theta + Lc \cos \theta)$$

Tabla 11 Comparación de la velocidad promedio del fluido

Vo'	R	Vo
0,10	27	0,09
0,090	24	0,093
0,092	25	0,092

Cuando Vo' y Vo son iguales, se ha encontrado el número de Reynolds definitivo, el cual indica que cumple.

La velocidad promedio del fluido de sedimentación será de 0,092 cm/s.

La longitud relativa donde no hay sedimentación es de 1,43 cm.

Para determinar el número de canales se utiliza la siguiente formula.

$$N = \frac{Q}{a V_o e}$$

N = Numero de canales

a = Ancho de placas

V_o = Velocidad Promedio del fluido

e = Espacio entre placas

$$N = 12$$

Y el número de placas seria,

$$N_p = N + 1$$

$$N_p = 13$$

La longitud del tanque de sedimentación estará determinada por,

$$L_{canal} = l \cos \theta \left(\frac{N e + (N + 1) \text{EspesorPlaca}}{\text{sen } \theta} \right)$$

$$L_{canal} = 0,6 \text{ m}$$

Por tanto para determinar la altura del tanque se utiliza la fórmula de volumen.

$$V_t = L_{canal} * a * h$$

De allí se despeja h , y se determina que la altura es de,

$$h = 0,5 \text{ m}$$

Canales de salida

Para la salida del agua del sedimentador, se utilizaran dos canales rectangulares a los cuales se les determino su sección con la ecuación de Manning.

$$Q = \frac{A}{n} * R^{2/3} * s^{1/2}$$

Donde,

El radio hidráulico se determina con la siguiente ecuación.

$$R = \frac{A}{P}$$

Como la sección será rectangular se simplifica la ecuación, y se expresa en términos de Y (altura de la lámina de agua), la cual se presenta de la siguiente forma.

$$b = 2 * y$$

$$R = \frac{y}{2}$$

El canal será en acrílico por lo cual el coeficiente de Manning n será de 0.010 y una pendiente s de 1%.

La ecuación de caudal quedara expresada de la siguiente forma.

$$Q = \frac{2 * y^2}{n} * \left(\frac{y}{2}\right)^{2/3} * s^{1/2}$$

Despejando en la ecuación se determina que el valor de “y” será de 2.5 cm por tanto b será de 5 cm.

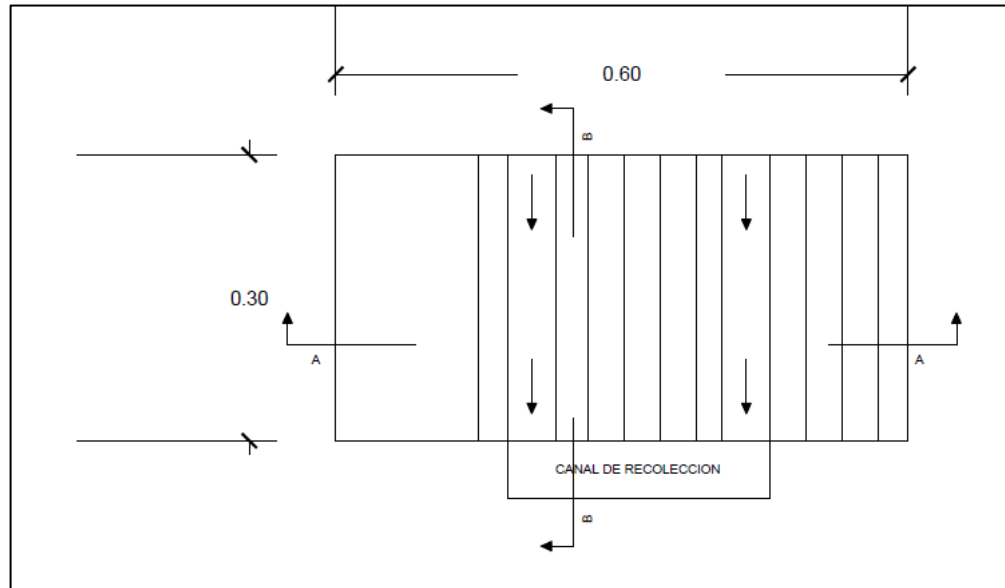


Ilustración 24 Vista en planta del sedimentador.

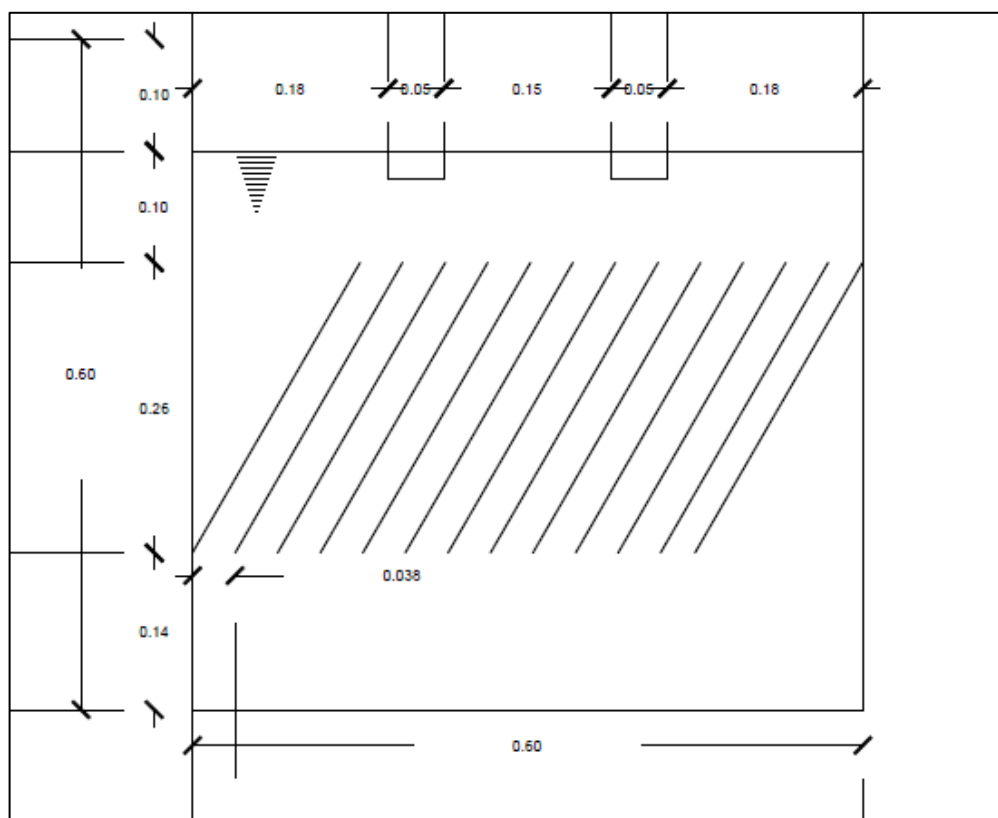


Ilustración 25 Perfil longitudinal del sedimentador.

4.5. Filtración

Para la filtración se ha decidido realizar los filtros en antracita, ya que es uno de los métodos más utilizados en los filtros de uso doméstico, y se determinó que para el tamaño de la planta este tipo de filtros son de mayor practicidad.

Al utilizar la fórmula que indica el número de filtros a utilizar, el resultado es de 0,13. Por tanto se ha descartado esta fórmula para determinar la cantidad de filtros a utilizar.

$$N = 0,044 \sqrt{Q}$$

$$N = 0,13$$

A continuación se precede a identificar el área de los filtros, para los cuales es necesario identificar la carga hidráulica CS,

Tabla 12 Características de filtros de alta tasa

Características	Filtros de alta tasa
Tasa de filtración	180 - 480 m/d
Medio	Arena y antracita
Fuente	Romero Rojas, J. A., Purificación del agua

Se eligió una tasa de filtración de 200 m/día, de esta manera se determinó el área de los filtros y la manera más ágil de distribuir esta área en el número de filtros.

El número de filtros el cual se acomoda más al caudal de diseño, sin sobredimensionar los filtros es 3.

$$Q = 8,64 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$Qf = \frac{8,64}{3}$$

$$Qf = 2,88 \text{ m}^3/\text{día}$$

Se determina que es caudal para cada filtro será de 2,88 m³/día.

Y para encontrar el área de la sección de cada filtro, se divide el caudal entre la carga hidráulica.

$$Af = \frac{2,88}{200}$$

$$Af = 0,0144 \text{ m}^2 \approx 0,0150 \text{ m}^2$$

Cada filtro tendrá sección rectangular, se construirán en vidrio, por tanto, se supone un ancho b de 10 cm:

$$Af = a * b$$

$$150 \text{ cm}^2 = a * 10 \text{ cm}$$

Despejando a,

$$a = 15 \text{ cm}$$

Entonces se fijó que los filtros tendrán sección de 10 cm * 15 cm.

Se tuvo como referencia un filtro de uso doméstico para el diseño. Este filtro se compone de dos tipos de material, antracita y arena sílice.



Ilustración 26 Filtro de uso domestico.

Se determinó el tamaño de las partículas de los lechos, mediante un ensayo granulométrico realizado en el laboratorio de suelos de la universidad.

Tabla 13 Granulometría de Antracita

Tamiz	Peso retenido [g]	W pasa	% Pasa	% Retenido
4	0,00	250,36	100,00	0,00
8	0,00	250,36	100,00	0,00
16	122,63	127,73	51,02	48,98
30	122,22	5,51	2,20	97,80
50	5,51	0,00	0,00	100,00
100	0,00	0,00	0,00	100,00
200	0,00	0,00	0,00	100,00
Fondo	0,00	0,00	0,00	100,00

La primera capa de material es de antracita, y allí se observa que la mayor parte del material queda retenida en los tamices 16 y 30. Por lo que el tamaño de las partículas de esta capa se encuentran entre 0.16 y 0.08 cm.



Ilustración 27 Muestra de antracita.

Además, se calculó la densidad del material dentro del filtro.

Se midió el diámetro del filtro con un pie de rey, el cual fue de 7.4 cm y el espesor del lecho que fue de 11 cm. Con estos datos se obtiene el volumen y con el peso de la muestra de antracita (tomado en el laboratorio) se determina la densidad del material en el filtro.

$$V = \frac{\pi * d^2}{4} * e$$

Donde,

V = Volumen donde se aloja el lecho filtrante

d = Diametro del filtro

e = espesor del lecho

$$V = \frac{\pi * 0.074^2}{4} * 0.11$$

$$V = 0.00047 \text{ m}^3$$

En el laboratorio se determinó que el peso del lecho de antracita fue de 250,36 g.

Por tanto se calcula la densidad del material dentro del filtro.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$\rho = \frac{250,36 \text{ g}}{0,00047 \text{ m}^3}$$

$$\rho = 529,2 \text{ Kg/m}^3$$

Se observó que el filtro tenía dos lechos de antracita, pero al determinar las características granulométricas no se encontró, diferencia alguna entre estas dos, por tanto para los filtros que se construirán en la planta se realizara un solo lecho de antracita de 12 cm y un lecho de arena sílice de 2 cm.

Con la misma fórmula de densidad y calculando el volumen para un filtro de 10 cm* 15 cm, se encuentra el peso en gramos de antracita, que se utilizará para cada filtro.

$$V = 0,015 \, m^2 * 0,15 \, m$$

$$V = 0,00225 \, m^3$$

$$m = V * \rho$$

$$m = 0,00225 \, m^3 * 529,2 \, kg/m^3$$

$$m = 1,191 \, Kg$$

Cada filtro tendrá 1,191 kg de antracita distribuida en un espesor de 15 cm.

Para la arena sílice se realizó el mismo procedimiento que con la antracita, se determinó el tamaño de sus partículas y su densidad para poder reflejarlo en el filtro de la planta.



Ilustración 28 Muestra de arena sílice.

Tabla 14 Granulometría Arena Sílice

Tamiz	Peso retenido [g]	W pasa	% Pasa	% Retenido
4	0,00	95,15	100	0
8	0,00	95,15	100	0
16	0,00	95,15	100	0
30	83,22	11,93	12,5380977	87,4619023
50	6,95	4,98	5,2338413	94,7661587
100	2,00	2,98	3,131897	96,868103
200	2,00	0,98	1,02995271	98,9700473
Fondo	0,98	0,00	7,0009E-15	100

Se determina el volumen para un espesor de 2cm.

$$V = \frac{\pi * 0,074^2}{4} * 0,02$$

$$V = 0,00009 \, m^3$$

En el laboratorio se determinó que el peso del lecho de antracita fue de 95,15 g.

Por tanto se calcula la densidad del material dentro del filtro.

$$\rho = \frac{95,15 \text{ g}}{0,00009 \text{ m}^3}$$

$$\rho = 1106,2 \text{ Kg/m}^3$$

Se calcula el peso en gramos de arena sílice, que se utilizara para cada filtro.

$$V = 0,0150 \text{ m}^2 * 0,04 \text{ m}$$

$$V = 0,0006 \text{ m}^3$$

$$m = V * \rho$$

$$m = 0,0006 \text{ m}^3 * 1106,2 \text{ kg/m}^3$$

$$m = 0,664 \text{ Kg}$$

Cada filtro tendrá 0,664 Kg de arena sílice distribuida en un espesor de 4 cm.

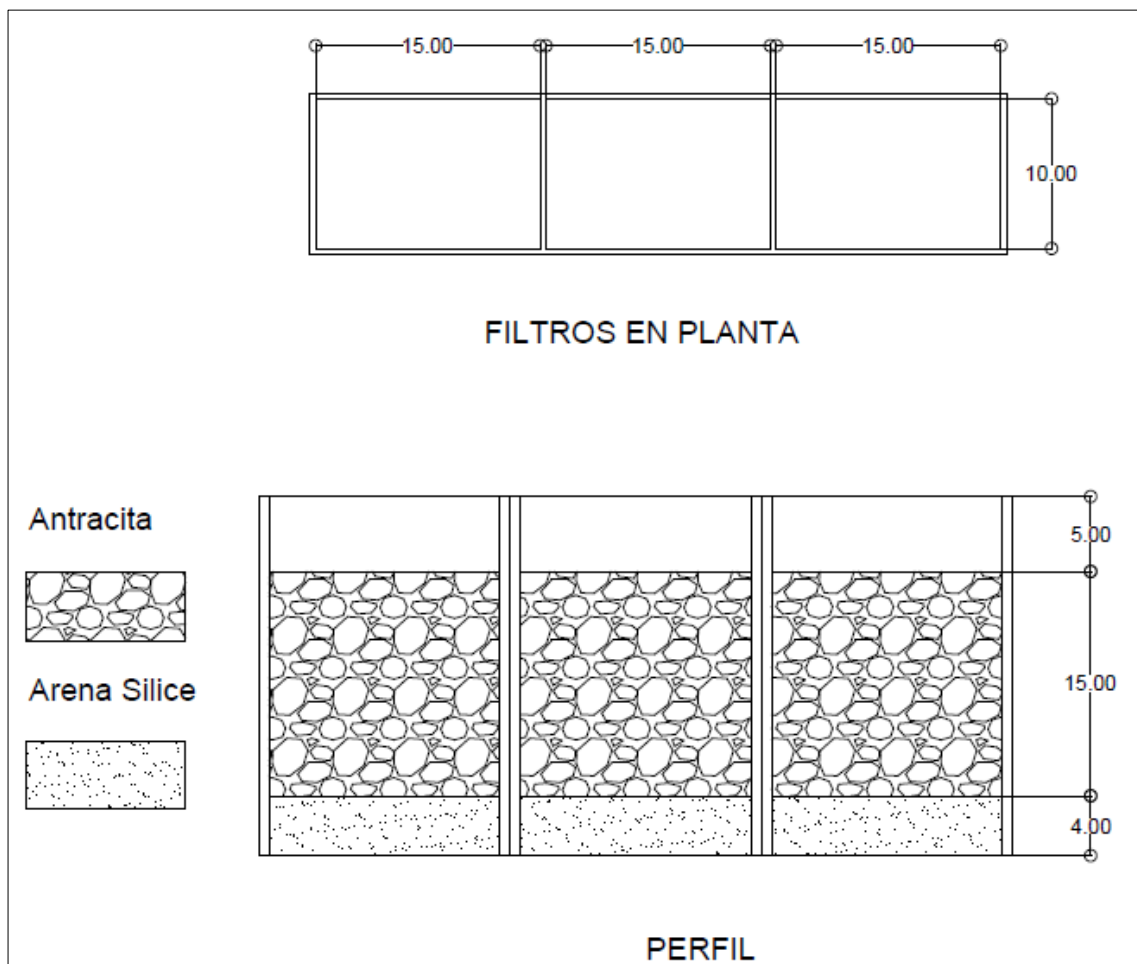


Ilustración 29 Esquema Filtros.

5. CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO.

Para la construcción de la planta fue necesario optimizar el espacio y facilitar el desplazamiento de esta dentro del laboratorio. De acuerdo a esto se decidió construir una base metálica, la cual soporta cada uno de los componentes de la planta de tratamiento; así mismo con ruedas que facilitan la ubicación dentro del laboratorio. Realizado el diseño se le suministraron las medidas a un ornamentador para su construcción.

5.1. Aireación

Para la elaboración de las bandejas de la torre de aireación se optó por la utilización de acero galvanizado el cual es más resistente a los efectos corrosivos por acción del agua frente al acero común, esto debido a que cuenta con un recubrimiento realizado en zinc.

Para realizar las perforaciones de los orificios de cada bandeja se optó por el corte mecánico por medio de un taladro con broca de 5 mm de diámetro de acuerdo al diseño.

Se definió que el lecho de contacto sería coque, con un espesor sobre las bandejas de 5 cm con partículas de máximo 0.05 m.



Ilustración 30 Bandeja de aireación.

5.2. Mezcla Rápida

Para la construcción de este canal y vertedero se optó por la utilización de vidrio con espesor de 5 mm debido a que la altura máxima del agua en esta etapa sería de 10 cm aproximadamente, por otra parte, siguiendo lo establecido en el diseño, se decide realizar en vidrio debido a su alta lucidez.

Para la aplicación del coagulante se utiliza un equipo de macro goteo, el cual permite dosificar el caudal del necesario para llevar a cabo el tratamiento del agua.



Ilustración 31 Canal de mezcla rápida.

5.3. Mezcla Lenta o Floculador y Sedimentador de Alta Tasa

Dado que en el diseño se decidió calcular el Floculador y el sedimentador con la misma altura y ancho de modo que se optimizara el espacio en el laboratorio estos dos tanques se realizaron en conjunto, separados por una sección de vidrio.

Para su construcción se contó con la asesoría de un constructor de acuarios, quien recomendó la utilización de vidrio crudo de 10 mm de espesor, el cual ya había utilizado en la elaboración de acuarios con dimensiones muy aproximadas.

Los canales de salida del sedimentador se diseñaron con sección cuadrada, pero por recomendación del fabricante del tanque en vidrio, se decide cambiar dichos canales a sección circular debido a que la perforación en el vidrio de forma circular disminuye la posibilidad de rotura, por la resistencia del vidrio.

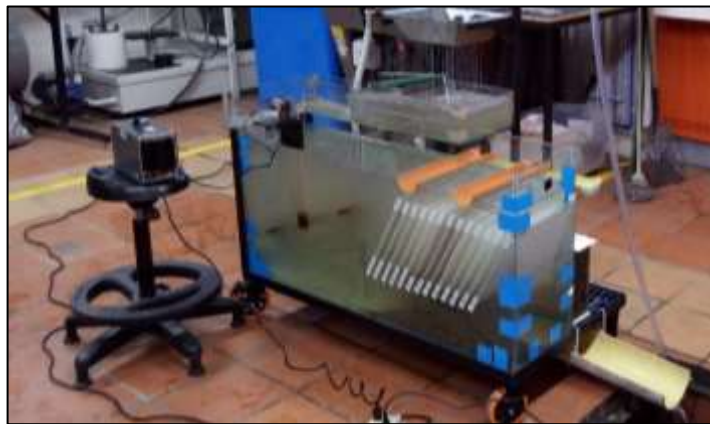


Ilustración 32 Floculador y sedimentador.

Para el motor del floculador, se utilizó un motor de tipo DC o corriente directa dada su facilidad de utilización; este tipo de motores tienen la ventaja de controlar su velocidad desde el cambio de tensión, es decir que si tenemos una fuente de alimentación que pueda variar su voltaje, para distintos valores el motor generará una velocidad diferente, de esta forma y por medio de un tacómetro se podrá determinar las revoluciones por minuto RPM a las que gira el motor.



Ilustración 33 Paletas del floculador.

Para la paleta del floculador se utilizó madera, que es el material más común utilizado en este proceso. Se realizaron los cortes de acuerdo al plano, se unieron con pegante para madera tipo industrial. En los extremos del eje de la paleta se instalaron rodamientos de tipo balinera, los cuales permitieron el giro del eje con la menor pérdida de energía posible. Para la transmisión de la potencia desde el motor hasta la paleta se utilizaron poleas, conectadas por medio de una banda de caucho.

Las placas inclinadas del sedimentador se realizan en fibra de vidrio, pues este material nos cumple con el espesor de la placa sin perder su forma por deformación y no se corroe o pierde resistencia al contacto permanente con el agua.

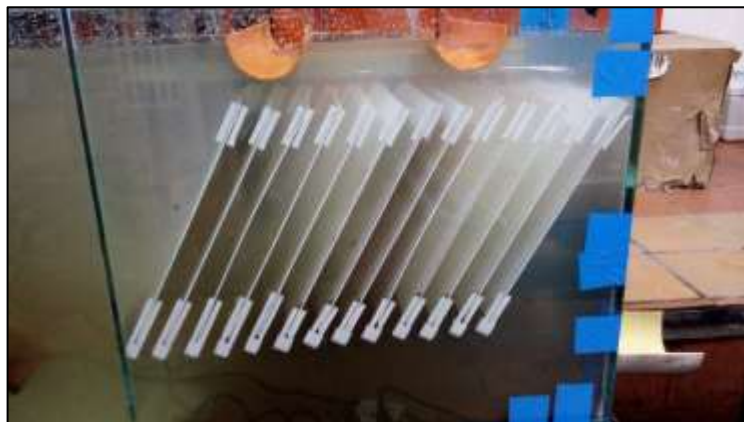


Ilustración 34 Sedimentado de placas inclinadas.

5.4. Filtros

Para la fabricación de estos se decidió utilizar vidrio crudo de 4 mm debido a su alta lucidez y resistencia, se realizaron los respectivos cortes de acuerdo a las secciones diseñadas, para la entrada y salida de agua de los filtros se utilizaron rejillas de plástico; así mismo se utilizó geotextil no tejido (PAVCO NT 1600AR) de modo que impida la pérdida del material filtrante y separe la antracita y la arena sílice. De acuerdo a la ficha técnica del geotextil su tasa de flujo es tal (8109 L/min/m^2), que no afectará el paso de caudal.

Para determinar el peso de material que utilizaría cada filtro se tuvieron en cuenta los porcentajes retenidos en el ensayo de granulometría:

Antracita:

Tabla 15 Peso de Antracita para filtros con base en el ensayo de granulometría

Tamiz	W filtro	% Retenido	W
[#]	[g]	en el Tamiz	[g]
16	1191	48,98	583,3518
30	1191	48,82	581,4462
50	1191	2,2	26,202
Σ			1191

Arena Sílice:

Tabla 16 Peso de Arena para filtros con base en el ensayo de granulometría

Tamiz	W filtro	% Retenido	W
#	[g]	en el Tamiz	[g]
30	664	87,4619023	580,747031
50	664	7,3042564	48,5002625
100	664	2,1019443	13,9569102
200	664	3,131897	20,7957961
Σ			664

Con base en los datos de las tablas anteriores, se procedió a tamizar y pesar las cantidades de cada granulometría. Posteriormente se ensamblaron los filtros obteniendo con los pesos los espesores de lechos propuestos en el diseño.



Ilustración 35 Filtro de antracita y arena sílice.

6. RESULTADOS

Tras la elaboración de los diseños de la planta de tratamiento y la construcción de esta, se evaluó el desempeño y eficiencia del tratamiento al cual se somete el agua, se utiliza la fórmula de eficiencia de remoción para el tratamiento de aguas residuales³⁰.

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

E = Eficiencia de remocion [%].

S₀ = Carga contaminante de entrada.

S = Carga contaminante de salida.

Se toman muestras de agua a la entrada de la planta y a la salida de esta.

³⁰ Parra Rodriguez, Lina Marcela, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, Operación de un filtro anaeróbico ascendente (FAFA) hasta alcanzar el estado estable. [en línea]. < <http://www.bdigital.unal.edu.co/1178/1/linamarcelaparrarodriguez.2006.pdf> >



Ilustración 36 Muestra de agua a la salida y entrada de la planta.

La primera conclusión es que la planta está cumpliendo su objetivo de remoción de turbidez en el agua, mediante la inspección visual se logra apreciar la diferencia de una muestra traslúcida de agua.

Una vez se obtienen las muestras de agua se miden los parámetros a utilizar para determinar su eficiencia con el multiparámetro de la universidad.



Ilustración 37 Datos de la muestra de entrada.



Ilustración 38 Datos de la muestra de salida.

Parámetro	Unidades	Carga contaminante de entrada	Carga contaminante de salida	Porcentaje de eficiencia [%]
Calidad fisicoquímica del afluente	FNU	91,3	5,5	93,98
Oxígeno disuelto	DO	12,6	16,3	29,37
Concentración de partículas	FNU	91,3	5,5	93,98

La planta presenta unos resultados de remoción de partículas suspendidas en el agua de 93,9 %, resultado satisfactorio debido a que el RAS 2000 recomienda como rango admisible de turbiedad de 5 UNT, Además el porcentaje removido es dependiente de las características de la muestra de agua de entrada. Donde se encuentra que entre más alto sea el nivel de turbiedad, más alto será el porcentaje de remoción.

Se tomó una muestra de agua del grifo de la llave del laboratorio de hidráulica, se midió y se comparó la turbiedad con la muestra de agua procedente de la planta de tratamiento y se pudo evidenciar que el agua del acueducto tenía una turbiedad de 7.5 UNT mientras que la muestra tratada por la planta a escala tubo un valor de 5.5 UNT.

Al medir de la turbiedad del agua a la salida del sedimentador se pudo determinar un valor de 9 NTU por lo cual, son las etapas de Floculación y Sedimentación las encargadas de remover la mayor cantidad de partículas, reduciendo en 81.3 NTU la turbidez del agua. Cabe mencionar que el RAS 2000 recomienda que sean 2 NTU los removidos por los filtros, sin embargo, los filtros de la planta removieron 3,5 NTU.

El agua al principio y al final del tratamiento se mantiene en el rango de ph aceptable por el RAS 2000, el cual se encuentra entre 6,5 y 9 con un valor a la entrada de 7,65 y a la salida de 6,38, manteniendo el agua neutra y evitando los posibles efectos del agua alcalina o ácida.

En cuanto a oxígeno disuelto, antes de la entrada al aireador el agua cumplía con los parámetros, el cual debe encontrarse por encima de 4 %, pero se puede apreciar que el aireador está cumpliendo con su función pues el porcentaje de oxígeno disuelto incremento un 29,37 %.

Al realizar el diseño de la mezcla rápida con vertedero rectangular se tuvieron en cuenta los parámetros y criterios recomendados por las entidades y autores más relevantes en el tratamiento de aguas, sin embargo, en el diseño de este tipo de estructuras los autores no tienen en cuenta los efectos de la carga superficial del agua, un fenómeno que se presenta cuando el caudal unitario o caudal por metro lineal del vertedero tiene un valor muy pequeño. Se pudo constatar este efecto cuando se realizaron los ensayos, donde se pudo evidenciar que el agua no rebosó el vertedero sobre toda su longitud sino que se vertió por el centro del mismo.

7. CONCLUSIONES

- Se identificaron todos los procesos y operaciones unitarias requeridos para remover sustancias físicas y químicas en el tratamiento de agua potable, como los son aireación, coagulación, floculación, sedimentación y filtración, así mismo los parámetros de diseño establecidos por muchos autores y entidades que por medio de rigurosos estudios los han definido, entre los que se incluyen los tiempos de retención, los gradientes, velocidades para cada proceso, relaciones de áreas, entre otras.
- Se determinaron los distintos tipos de plantas de tratamiento de agua potable y se definió como el más conveniente, la planta de tipo convencional, la cual es la que involucra el mayor número de procesos y operaciones, de esta forma se elaboró un modelo didáctico muy completo para el aprendizaje del tratamiento de agua potable.
- Se realizó el prediseño de la aireación, coagulación, floculación, sedimentación y filtración, teniendo en cuenta los conceptos teóricos aprendidos a lo largo de la vida universitaria en relación a la potabilización de agua, donde se analizó el tipo de mecanismo a utilizar más conveniente, según eficacia y espacio disponible en el laboratorio de hidráulica de la universidad.
- Se determinaron los diseños finales de la planta de tratamiento y su dimensionamiento, asimismo las estructuras que sirvieron de acople entre las partes contempladas en el diseño de manera que se redujera al máximo el espacio utilizado por la planta en el laboratorio.
- Se establecieron los materiales más convenientes para la construcción de la planta, teniendo en cuenta economía, resistencia, duración, recomendaciones del RAS 2000 e interactividad de los materiales para la construcción de las estructuras de la planta, de esta forma se establecieron el vidrio, el acero inoxidable y la madera como los más convenientes.
- Se pudo determinar la eficiencia del aireador de bandejas, el cual posee la ventaja de no necesitar energía mecánica y de aumentar el oxígeno disuelto en el agua por medio de la separación entre bandejas y el diámetro de los orificios. Cabe mencionar que en el diseño de las bandejas fue de 20*20 cm en la base de la bandeja, y en la parte alta de 30*30 cm, sin embargo, no existe una recomendación para esta última medida, lo que conllevó a que, por la aspersión de las gotas de agua, algunas no logran caer en la bandeja inferior, lo cual generó pérdidas de caudal mínimas en el sistema.

- Se pudo determinar que el uso de canaletas Parshall para la mezcla rápida está limitado por el caudal de diseño debido a que estos elementos trabajan con caudales más altos que el propuesto para esta planta.
- Con base en los inesperados efectos de la carga superficial del agua durante la mezcla rápida se considera que para caudales pequeños, lo mejor es la utilización de mezcladores de tipo mecánico, los cuales no presentan limitantes por el flujo de caudal debido a que es una paleta la encargada de realizar la mezcla.
- Se comprobaron las ventajas de los floculadores mecánicos frente a los de tipo hidráulico conservando el mismo tiempo de retención en los dos diseños. La principal ventaja consiste en que los floculadores mecánicos son elementos con dimensiones que se pueden modificar a conveniencia del proyecto, mientras que en los floculadores hidráulicos existen limitantes que impiden la misma versatilidad. En el floculador mecánico se podían manipular las tres dimensiones del tanque para un mismo volumen, mientras que en el floculador hidráulico se podían modificar dos dimensiones manteniendo el mismo valor del área con una única altura de 5 cm, manteniendo la longitud que debe recorrer el agua, el caudal y la velocidad en el tanque. Lo anterior implica que el floculador hidráulico necesariamente tendrán un área de vista en planta mucho mayor que el área del floculador hidráulico, esto se puede comprobar con los diseños definitivos de la planta, donde para el floculador hidráulico se obtuvo un área de sección de 1,5m*1,4m y para el mecánico de 0,3m*0,6m. Cabe recordar que una de las limitantes del proyecto era el espacio disponible en el laboratorio.
- Se pudieron evidenciar las ventajas de los sedimentadores de alta tasa, los cuales trabajan de manera inversa a los convencionales, mientras que en el convencional el agua desciende de manera parabólica, en el de alta tasa de bandejas inclinadas, el agua ingresa por el fondo y va ascendiendo, este movimiento de por sí ya decanta los flocs más grandes. Por otra parte, el agua al entrar en contacto con las bandejas, cuenta con una superficie para que decante las partículas, mientras que en el convencional no se cuenta con ningún otro elemento que facilite la sedimentación.
- Se realizaron pruebas de la planta de tratamiento, donde se tomaron muestras de agua a la entrada y salida, se tomaron diferentes medidas con el multiparámetro, como lo fueron PH, % oxígeno disuelto y turbiedad con el fin de determinar la eficiencia de la planta.
- Se determinó que la planta cumple con un nivel de desempeño que cumple las exigencias del RAS 2000, según lo esperado, pues este arroja resultados de remoción de turbiedad altos y aumento de la concentración de oxígeno disuelto del agua.

- Con base en cotizaciones y opinión de expertos se pudo determinar que para la construcción de una planta de tratamiento con características similares a la elaborada durante el proyecto lo más conveniente es la utilización de vidrio frente a policarbonatos y acrílicos, esto teniendo en cuenta costo y resistencia.

8. RECOMENDACIONES

Después de la experiencia del diseño y construcción de la planta de tratamiento de agua potable, surgen varios aspectos por incluir para un mejor aprovechamiento del proyecto realizado.

Primero que todo se recomienda realizar la adecuación de un sistema de captación de agua de fuentes naturales, con el fin de determinar el comportamiento de la planta frente a condiciones reales de operación a las cuales se enfrentan las plantas de tratamiento convencional. Se sugiere la utilización del agua recogida por las cubiertas procedente de la lluvia, captarla y tratarla con la planta de tratamiento para su posterior distribución.

Es necesario incluir el proceso de desinfección el cual involucra la remoción de contaminantes microbiológicos para que el agua que trata la planta sea 100 % potable.

Se podrían realizar estudios sobre los efectos de la viscosidad cinemática y dinámica en el agua, debido a que la temperatura juega un papel importante en el tratamiento del agua, a mayor temperatura, mayor viscosidad y por tanto mayor dificultad para mezclar el coagulante, flocular y sedimentar el agua en proceso de potabilización.

Se recomienda la instalación de un mezclador mecánico, si bien con el mezclador tipo vertedero (energía hidráulica) se obtuvieron buenos resultados al final del tratamiento, es posible que con este nuevo tipo de mezclador se consigan mejores resultados debido a la mejor agitación y por tanto mejor mezcla del coagulante con el agua.

Con base en los resultados obtenidos durante la mezcla rápida se podrían realizar estudios donde se obtengan resultados similares tanto en el diseño como en la puesta en marcha para un flujo mezclado por medio de vertedero rectangular, definiendo así, un caudal mínimo que garantice la turbulencia y dimensiones necesarias durante la mezcla rápida. Algo similar a lo ya establecido para la mezcla por medio de canaleta Parshall.

9. REFERENCIAS

- OKI, Taikan; KANAE, Shinjiro. Global hydrological cycles and world water resources. *science*, 2006, vol. 313, no 5790, p. 1068-1072.
- IGLESIAS ROSADO, C., et al. Importancia del agua en la hidratación de la población española: documento FESNAD 2010. *Nutrición Hospitalaria*, 2011, vol. 26, no 1, p. 27-36.
- ARROJO, Pedro. Los retos éticos de la nueva cultura del agua. *Polis. Revista Latinoamericana*, 2006, no 14.
- Country Meters, Población mundial [en línea]. < <http://countrymeters.info/es/World> > [citado en 14 de marzo de 2016]
- Lenntech, ¿Qué es ósmosis inversa? [en línea] <<http://www.lenntech.es/biblioteca/osmosis-inversa/que-es-osmosis-inversa.htm>> [citado en 14 de marzo de 2016]
- Ministerio de desarrollo económico. Reglamento Técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000. Bogotá: MinDesarrollo, 2000.
- Montgomery, J.. Water treatment principles and design. 1985, A. Wiley – Interscience publication.
- Parra Rodriguez, Lina Marcela, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, Operación de un filtro anaeróbico ascendente (FAFA) hasta alcanzar el estado estable. [en línea]. < <http://www.bdigital.unal.edu.co/1178/1/linamarcelaparrarodriguez.2006.pdf> >
- Pérez Parra, Jorge Arturo. Manual e tratamiento de agua. Documento de trabajo. Universidad Nacional. Bogotá 1981.
- Romero Rojas, Jairo Alberto. Purificación del Agua. 3 ed. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2000.
- Pimienta R., Neissa V.. Flujo unidimensional, bidimensional y tridimensional [en línea]. <<http://mecanicadefluidosuniquajira2014.blogspot.com.co/2014/10/flujos-unidimensionales-bidimensional.html>> [citado en 14 de marzo de 2016]
- Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Diseño de plantas potabilizadoras. Bogotá. 2013. [en línea] < http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358040/MODULO_CURSO_DISENO_DE_PLANTAS_POTABILIZADORAS_II-2013.pdf >

10. ANEXOS

- 10.1 Plano de bandejas de aireación.
- 10.2 Plano de mezcla rápida.
- 10.3 Plano de floculador mecánico.
- 10.4 Plano de sedimentador de alta tasa.
- 10.5 Plano de filtros.
- 10.6 Plano de diseño de planta.
- 10.7 Plano de diseño de perfil.
- 10.8 Plano de armadura de la planta.
- 10.9 Plano constructivo de la planta.
- 10.10 Manual de operación de la planta.